

MODELAGEM DO LINEAMENTO COLATINA UTILIZANDO MÉTODOS
GEOFÍSICOS NA REGIÃO ONSHORE ADJACENTE À BACIA DO ESPÍRITO
SANTO

Christofher do Vale Pena

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Observatório Nacional, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Orientador(a): Dr. Andrés Reinaldo
Rodriguez Papa –
DPPG/ON/ MCTIC

Co-orientador(a): Dr. Juarez Lourenço –
ON/MCTIC

Rio de Janeiro
Maio de 2022

MODELAGEM DO LINEAMENTO COLATINA UTILIZANDO MÉTODOS
GEOFÍSICOS NA REGIÃO ONSHORE ADJACENTE À BACIA DO ESPÍRITO
SANTO

Christoffer do Vale Pena

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOFÍSICA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM GEOFÍSICA.

Examinada por:

Dr. Andrés Reinaldo Rodriguez Papa - ON

Dr. Juarez Lourenço - ON

Dra. Suze Nei Pereira Guimarães - ON

Dr. Luiz Gabriel Souza de Oliveira - UFES

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MAIO DE 2022

do Vale Pena, Christofher

Modelagem do lineamento Colatina utilizando Métodos Geofísicos na região onshore adjacente à Bacia do Espírito Santo/Christofher do Vale Pena. – Rio de Janeiro: ON, 2022.

153 pp. 29, 7cm.

Orientador(a): Andrés Reinaldo Rodriguez Papa –
DPPG/ON/ MCTIC

Co-orientador(a): Juarez Lourenço – ON/MCTIC

Dissertação (mestrado) – ON/Programa de Pós-graduação em Geofísica, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 112 – 124.

1. Magnetometria. 2. Gravimetria. 3. Radiometria. I. Lourenço – ON/MCTIC, Juarez. II. Observatório Nacional, Programa de Pós-graduação em Geofísica. III. Título.

Agradecimentos

O desenvolvimento desse trabalho contou com a contribuição de algumas pessoas, pessoas essas as quais eu devo agradecer.

Agradeço primeiramente aos familiares que sempre me apoiaram e deram todo suporte, aos meus orientadores Andrés Reinaldo Rodriguez Papa e Juarez Lourenço por toda a ajuda e paciência, aos amigos antigos que sempre me incentivaram, aos amigos que o Observatório Nacional propiciou (Sejam Doce) e todos aqueles que indiretamente e diretamente ajudaram nesse projeto.

Além de agradecer também a CNPq e FAPERJ por disponibilizarem apoio financeiro para o desenvolvimento desse trabalho.

*Dedico esse trabalho a ciência que
têm sido alvo de incansáveis
ataques de inúmeros néscios*

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Observatório Nacional como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Geofísica.

MODELAGEM DO LINEAMENTO COLATINA UTILIZANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS NA REGIÃO ONSHORE ADJACENTE À BACIA DO ESPÍRITO SANTO

Christofher do Vale Pena

Maio/2022

Esta pesquisa teve como objetivo realizar um estudo interpretativo magnetométrico, gravimétrico e radiométrico do feixe de diques, localizados no estado do Espírito Santo, estrutura que recebeu diferentes nomenclaturas ao longo dos anos como Faixa Colatina, Feixe Colatina ou Lineamento Colatina. O conjunto atravessa boa parte do estado, estando localizado entre as cidades de Ecoporanga e Vitória com área aproximada de 7500 km^2 , com 30 km de largura e 250 km de comprimento. A Faixa Colatina têm direção preferencial N10-15W e desenvolveu-se sobre o núcleo do Orógeno Neoproterozóico Araçuaí, o qual é caracterizado pela ocorrência de rochas da Orogenia Brasileira. Os dados dos métodos geofísicos (magnético e radiométrico) correspondem ao Projeto Aerogeofísico do Espírito Santo - 1093 (2010), que foi adquirido através do repositório digital da CPRM, enquanto os dados gravimétricos foram adquiridos através da ANP, como resultado da campanha da junção de levantamentos executados por diferentes instituições (ON, USP, Petrobras e CPRM). Utilizando técnicas existentes na literatura geraram-se mapas temáticos associados a cada grandeza física, adquiridas através de métodos diferentes, para identificar e caracterizar as feições estruturais nesta região, associando-os assim à geologia regional, visando investigar seu comportamento em subsuperfície. Na realização deste estudo foram utilizadas rotinas computacionais de filtragem, de modelagem 2D e 3D, com o objetivo de determinar os valores anômalos em cada grandeza, identificando assim valores de susceptibilidade magnética, densidade e sinal radioativo, associados a Faixa Colatina. Os produtos gerados foram correlacionados com dados geológicos existentes possibilitando o entendimento no âmbito estrutural e tectônico da região. Determinando contatos, profundidade das fontes e das estruturas em subsuperfície, associados ao Lineamento Colatina, propiciando assim um melhor entendimento das variações do relevo atual.

Abstract of the Dissertation presented to the National Observatory's Graduate Program in Geophysics as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Geophysics.

MODELING THE COLATINA LINEAMENT USING GEOPHYSICAL METHODS
IN THE ONSHORE REGION ADJACENT TO THE ESPIRITO SANTO BASIN

Christofher do Vale Pena

May/2022

This research had as objective to carry through an interpretative magnetometric, gravimetric and gamma radiometric study of the dykes bundle, located in the state of Espirito Santo, a structure that has received different nomenclatures along the years as Colatina Belt, Colatina Beam or Colatina Lineament. It crosses most of the state, being located between the cities of Ecoporanga and Vitória, with an area of approximately 7500 km², with 30 km width and 250 km length. The Colatina Belt is formed by several lineaments, which have preferential directions of N10-15W and developed over the core of the Neoproterozoic Araçuaí Orogen, which is characterized by the occurrence of rocks of the Brasiliano Orogeny. The data of the geophysical methods (magnetic and gamma radiometric) correspond to the Aerogeophysical Project of Espirito Santo - 1093 (2010), which was acquired through the digital repository of CPRM. The gravimetric data were acquired through ANP, as a result of the joining campaign of surveys executed by different institutions (ON, USP, Petrobras and CPRM). Using existing techniques in the literature, generated thematic maps associated with each physical quantity acquired through different methods, to identify and characterize the structural features in this region, associating them with the regional geology, aiming to investigate their behavior in the subsurface. In this study, was used computational routines for filtering, 2D modeling and 3D modeling, in order to determine the anomalous values in each physical quantity, to identify magnetic susceptibility, density, and radioactive signal, associated with the Colatina Belt. The products generated were correlated with existing geological data enabling the understanding in the structural and tectonic of the region. Determining contacts, depth of sources and subsurface structures associated with the Colatina Lineament, thus providing a better understanding of the variations of the current relief.

Lista de Figuras

1.1	Figura representativa da topografia do estado do Espírito Santo em relação ao Brasil, enfatizando a Área de Estudo.	3
2.1	Morfoestruturas do estado do Espírito Santo.	6
2.2	Principais Orógenos brasileiros inseridos na Província Mantiqueira.	8
2.3	Principais estruturas e Orógenos no território nacional.	9
2.4	Cráton São Francisco-Congo	11
2.5	Feixe de Lineamentos e Cráton de São Francisco	12
2.6	Direção Preferencial do feixe de Lineamentos	13
2.7	Mapa geológico e principais lineamentos do estado	14
2.8	Feixe de Lineamentos Colatina se apresenta paralelo com feixe de Lineamentos Transminas	15
2.9	Seção Geológica que atravessa o Lineamento Colatina	16
2.10	Afloramento do Lineamento Colatina	16
3.1	Linhas de Força entre Imãs. a: Linhas de Campo em um imã, b: Atração entre dois polos distintos, c: Repulsão entre dois polos	19
3.2	Exemplo de como se comportam materias, Paramagéticos, Diamagnéticos e Ferromagnéticos perante um campo magnético externo	22
3.3	Diagrama da Balança de Torção Utilizado por Henry Cavendish, onde mostra-se a vista frontal e superior da balança.	26
3.4	Modelo simplificado do processo de emissão de radiação	32
3.5	Esquemático com a representação dos nuclídeos relacionados pelos seus nêutrons e prótons	33
3.6	Representação do decaimento exponencial dos núcleos radioativos	35
4.1	Representação das componentes do Campo Geomagnético	39
4.2	Exemplo de como as anomalias magnéticas devem ser apresentadas após a retirada do IGRF	41
4.3	Exemplo dos tipos de sensores: A é conhecido como Stinger, o B como Bird e C como Fish	42
4.4	Manobras Roll, Pitch e Yaw.	43

4.5	Exemplo de um erro de Paralaxe	43
4.6	Exemplo de linhas de voo.	44
4.7	Exemplo de uma anomalia magnética sintética gerada por dois cubos	45
4.8	Exemplo de uma anomalia magnética Reduzido ao Polo	46
4.9	Aplicação da Derivada em Z	47
4.10	Amplitude de Sinal Analítico aplicado aos dados sintéticos	48
4.11	TDR aplicado aos dados sintéticos	49
4.12	A Força Gravitacional na superfície da Terra é influenciada por inúmeros fatores	52
4.13	Exemplo de como rochas com diferentes densidades podem gerar anomalias positivas/negativas nos dados	53
4.14	Deriva Instrumental: Curva construída com valores de leituras repetidas em um ponto	54
4.15	Efeitos das Marés	55
4.16	Exemplo de correção de Bouguer, mostrando como as diferenças de topografia devem ser levadas em consideração.	57
4.17	Divisão de setores em forma de discos concêntricos em relação à região de medição.	58
4.18	Quantidade Relativa dos elementos radioativos das rochas.	60
4.19	Gráfico do espectro de emissão de raios gama indicando a faixa de energia e seus radionuclídeos	60
4.20	Esquema das variações de altura nominal e da altura real do voo	62
5.1	Mapa Magnético Total Nivelado e Micronivelado	67
5.2	Mapa Magnético Anômalo: retirada a contribuição do IGRF	68
5.3	Mapa Gravimétrico Anômalo: Bouguer Completo	69
5.4	Modelo de uma modelagem feita através do GM-SYS Profile/Oasis Montaj	71
6.1	Mapa Magnético Anômalo: Continuação para cima a 1000 m	75
6.2	Mapa Magnético Anômalo: Reduzido ao Polo	77
6.3	Mapa Magnético Anômalo: Primeira Derivada Vertical	79
6.4	Mapa Magnético Anômalo: Amplitude de Sinal Analítico (ASA)	80
6.5	Mapa Gravimétrico Anômalo: Bouguer Completa Aplicada Correção Polinomial de Grau 9	82
6.6	Mapa Gravimétrico Anômalo: Derivada Tilt	84
6.7	Mapa Radiométrico: Fator F	86
6.8	Mapa Radiométrico: Ternário com padrão RGB	87
6.9	Mapa Magnético Reduzido ao Polo com os perfis de trabalho.	89
6.10	Modelagem 2D Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 1	91

6.11	Seção 1 retirada da modelagem 3D Magnetométrica	92
6.12	Modelagem 2D Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 2	93
6.13	Seção 2 retirada da modelagem 3D Magnetométrica	94
6.14	Modelagem 2D Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 3	95
6.15	Seção 3 retirada da modelagem 3D Magnetométrica	96
6.16	Modelagem 2D Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 4	97
6.17	Seção 4 retirada da modelagem 3D Magnetométrica	98
6.18	Modelagem 2D Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 5	99
6.19	Seção 5 retirada da modelagem 3D Magnetométrica	100
6.20	Modelagem 2D Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 6	101
6.21	Seção 6 retirada da modelagem 3D Magnetométrica	102
6.22	Vista Lateral 1 do Lineamento Colatina	104
6.23	Vista Superior do Lineamento Colatina	105
6.24	Vista Lateral 2 do Lineamento Colatina	106
6.25	Vista lateral 1 do Lineamento atravessando os seções dos mapas das anomalias magnéticas	107
6.26	Vista lateral 2 do Lineamento atravessando os seções dos mapas das anomalias magnéticas	108
A.1	Mapa Magnético Anômalo: Reduzido ao Polo	125
B.1	Interface do Geosoft mostrando os Menus Utilizados	127
C.1	Mapa Gravimétrico Anômalo: Bouguer Completa Aplicada Correção Polinomial de Grau 9	128
D.1	Mapa Radiométrico: Contagem de Potássio em %	129
D.2	Mapa Radiométrico: Contagem de Tório em ppm	130
D.3	Mapa Mapa Radiométrico: Contagem de Urânio em ppm	131
E.1	Perfil 1, mostrando perfis magnéticos e gravimétricos além de mostrar as soluções obtidas pelo sinal analítico	132
E.2	Perfil 2, mostrando perfis magnéticos, gravimétricos e soluções obtidas pelo sinal analítico	133
E.3	Perfil 3, mostrando perfis magnéticos, gravimétricos e soluções obtidas pelo sinal analítico	134
E.4	Perfil 4, mostrando perfis magnéticos, gravimétricos e soluções obtidas pelo sinal analítico	135
E.5	Perfil 5, mostrando perfis magnéticos, gravimétricos e soluções obtidas pelo sinal analítico	136
E.6	Perfil 6, mostrando perfis magnéticos, gravimétricos e soluções obtidas pelo sinal analítico	137

Lista de Tabelas

3.1	Tabela de susceptibilidade de Rochas Comuns	23
3.2	Tabela da Densidade de Rochas Comuns e Alguns tipos de Minérios .	30
3.3	Tabela de Concentração de Potássio, Tório e Urânio nas Rochas . . .	36
4.1	Métodos Físicos e Propriedade Medidas	38
4.2	Valores do índice estrutural e as respectivas formas dos corpos.	51

Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASA	Amplitude de Sinal Analítico
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
cpm	Contagem por minuto
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
cps	Contagem por segundo
CT	Contagem Total
DGC	Diretoria de Geociências
E	Leste
FAPERJ	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro
IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IBGE	O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGRF	Campo Geomagnético de Referência Internacional
IJSN	Instituto Jones dos Santos Neves
K	Potássio
MT	Magnetotelúrico
N	Norte
NE	Nordeste
NNE	Nor-Nordeste
NNW	Nor-Noroeste
NW	Noroeste
ON	Observatório Nacional
ppm	Parte por milhão
RGB	Sistema de cores em que o Vermelho, o Verde e o Azul, são combinadas
RTP	Redução ao Polo
S	Sul
SSW	Sul-Sudoeste
SW	Sudoeste
TDR	Derivada Tilt

Th
U
USP
UTM
WGS 84

Tório
Urânio
Universidade de São Paulo
Projeção Universal Transversal de Mercator
Última Revisão do Sistema Geodésico Mundial

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Área de Estudo	2
1.2	Objetivos	4
1.3	Justificativa	4
2	Geologia Geral	5
2.1	Contextos Geológicos Regionais	5
2.2	Principais Morfoestruturas do Estado do Espírito Santo	7
2.2.1	Depósitos Sedimentares	7
2.2.2	Maciços Plutônicos	7
2.2.3	Faixa de Dobramentos Remobilizados	8
2.3	Província Mantiqueira	8
2.4	Cráton de São Francisco e Orógeno Araçuáí	10
2.5	Feixe de Lineamentos e Lineamento Colatina	12
3	Fundamentos Históricos e Teóricos	18
3.1	Breve Histórico Sobre o Magnetismo	18
3.2	Fundamentos Teóricos do Magnetismo	19
3.3	Breve Histórico Sobre a Gravidade	24
3.4	Fundamentos Teóricos da Gravitação	25
3.5	Breve Histórico Sobre a Radiação	30
3.6	Fundamentos Teóricos da Radiação	32
4	Métodos	37
4.1	Métodos Magnetométricos	38
4.1.1	Correções e Compensações dos dados Magnéticos	41
4.1.2	Filtragem dos Dados magnéticos	45
4.2	Métodos Gravimétricos	51
4.2.1	Reduções Gravimétricas	53
4.3	Métodos Radiométricos	59
4.3.1	Correções Radiométricas	61

5	Metodologia	65
5.1	Dados Magnetométricos	66
5.2	Dados Gravimétricos	69
5.3	Dados Radiométricos	70
5.4	Menus e Rotinas Utilizados	70
6	Resultados e Discursões	73
6.1	Mapas Magnéticos	73
6.1.1	Mapa da Continuação para cima - 1000 m	74
6.1.2	Mapa Magnético Reduzido ao Polo	75
6.1.3	Mapa Magnético da Primeira Derivada Vertical	78
6.1.4	Mapa do Sinal Analítico	79
6.2	Mapas Gravimétricos	81
6.2.1	Mapa Gravimétrico Residual	81
6.2.2	Mapa Gravimétrico Residual com filtro da Derivada Tilt	83
6.3	Mapas Radiométricos	85
6.3.1	Mapa Radiométrico do Fator F	85
6.3.2	Mapa Radiométrico: Ternário com Padrão RGB	86
6.4	Gm-SYS Profile e Seções	88
6.4.1	Modelagem do Perfil 01	91
6.4.2	Modelagem do Perfil 02	93
6.4.3	Modelagem do Perfil 03	95
6.4.4	Modelagem do Perfil 04	97
6.4.5	Modelagem do Perfil 05	99
6.4.6	Modelagem do Perfil 06	101
6.4.7	Comparativo entre diferentes modelagens: GM-sys Profile e Seções (Slices) do Voxi Voxel	102
6.5	Voxi e Voxel	103
7	Conclusão	109
8	Pespectivas Futuras	111
	Referências Bibliográficas	112
	A: Mapa das Pedreiras	125
	B: Menus	126
	C: Mapas Gravimétricos	128
	D: Mapas Radiométricos	129

Capítulo 1

Introdução

A região offshore do sudeste do Brasil tem sido privilegiada com grande investimento de recursos financeiros desde a década de 50, em pesquisas nas áreas da Geologia e Geofísica. Pois, nessa região se encontram inseridas as três principais bacias sedimentares, com as maiores produções de petróleo e gás do país (Santos, Campos e Espírito Santo).

Na região onshore próxima a essas três bacias existem várias feições estruturais que tem sido estudadas, devido interesse econômico e científico. Podemos citar o lineamento Além-Paraíba, (ALMEIDA *et al.* (1975)), o lineamento Colatina (IBGE/DGC (1987)), os conjuntos de rochas intrusivas do complexo Aimorés e do complexo Espírito Santo, (PEDROSA-SOARES *et al.* (2007)), o cavalgamento do Complexo Região dos Lagos sobre o São Fidelis (TAVARES (2011)), alinhamento magmático de Cabo Frio (OLIVEIRA (2016)), o Pico da Bandeira (OLIVEIRA (2014b)), dentre outras.

Dentre essas estruturas citadas há duas feições lineares que se destacam. Uma delas com direção NE-SW, e conhecida como lineamento Paraíba do Sul (ALMEIDA *et al.* (1975)), situada na fronteira das bacias Campos e Santos e a outra é a Faixa Colatina (NOVAIS *et al.* (2004)). Esta última estrutura está situada próxima à bacia do Espírito Santo, com direção preferencial N10-15W, apresentando idade pré-cambriana e reativação no Cretáceo (145 a 65 milhões de anos), durante o evento de formação da margem atlântica brasileira (SCHOBENHAUS *et al.* (1984)).

As regiões onde encontram-se tais estruturas, receberam ao longo dos anos diversos estudos com o propósito de caracterizar melhor. A área onde se encontram o lineamento Além-Paraíba e as bacias Campos e Santos, tiveram uma quantidade maior desses estudos, se comparado com a região do lineamento Colatina, e da bacia do Espírito Santo. Vale ressaltar o trabalho de ALMEIDA (1976), sobre o rift continental. CAMPANHA (1981), continuou os estudos realizados por ALMEIDA *et al.* (1975), sobre o lineamento Além-Paraíba, na região de Três Rios, enquanto que, MACEDO (1989) estudou o tectonismo e a evolução da margem oceânica, dentre

outros.

Na área onde está inserido o lineamento Colatina, não foi diferente, pois diferentes estudos foram realizados. Vale citar o trabalho de IBGE/DGC (1987), publicando as conclusões associados ao projeto RadamBrasil, RODRIGUES (2005) realizou um estudo geomorfológico da região. O método magnetotelúrico foi utilizado por COSTA (2005) ao longo do rio Doce, para estudar a porção continental da bacia e JUNIOR (2007) elaborou um estudo de quantificação dos lineamentos da região, mas nenhuma dessas pesquisas realizou um trabalho de imageamento mais aprofundado e extenso sobre o Lineamento Colatina.

Essa região onde encontra-se o feixe de lineamentos Colatina, recebeu algumas nomenclaturas diferentes aos longos dos anos, no relatório técnico realizado pelo IBGE/DGC (1987), denominou a região como Alinhamento Vitória-Colatina, já CHANG *et al.* (1992) denominou como: Zona de Cisalhamento Colatina. Outra nomenclatura dada por NOVAIS *et al.* (2004) foi a de Faixa Colatina.

Essa estrutura atravessa a porção oeste da bacia Espírito Santo, e parece relacionar-se com a influência dos mecanismos neotectônicos na área. Devem-se destacar também neste caso, os trabalhos de GALLARDO *et al.* (1987), em estudo sobre a atividade tectônica atual na região de Nova Venécia (ES) e NOVAIS *et al.* (2004), relatando novas ocorrências de diques ao longo da faixa Colatina.

O estado do Espírito Santo só tinha uma projeção de destaque a nível nacional pela descoberta de petróleo no campo de São Mateus, mas após alguns anos se tornou grande produtor e exportador de rochas ornamentais, e essa atividade extrativista tem sido de grande importância para os estudos geológicos e geofísicos. Os locais de extração propiciaram novos pontos de coleta de amostras, além dos afloramentos já existentes, para geoquímica, e se tornaram novos pontos de observações para o mapeamento estrutural, etc.

A proposta de nosso trabalho é utilizar as informações associadas aos dados existentes das grandezas físicas (magnetométrica, gravimétrica e radiométrica), associando as informações geológicas dos pontos de afloramentos conhecidos do Feixe Colatina e compará-los com outros locais desprovidos de afloramentos ou pedreiras¹, e assim, poder mapear e conhecer melhor a geologia da região do Lineamento Colatina, estimando a distribuição e profundidade dessa estrutura.

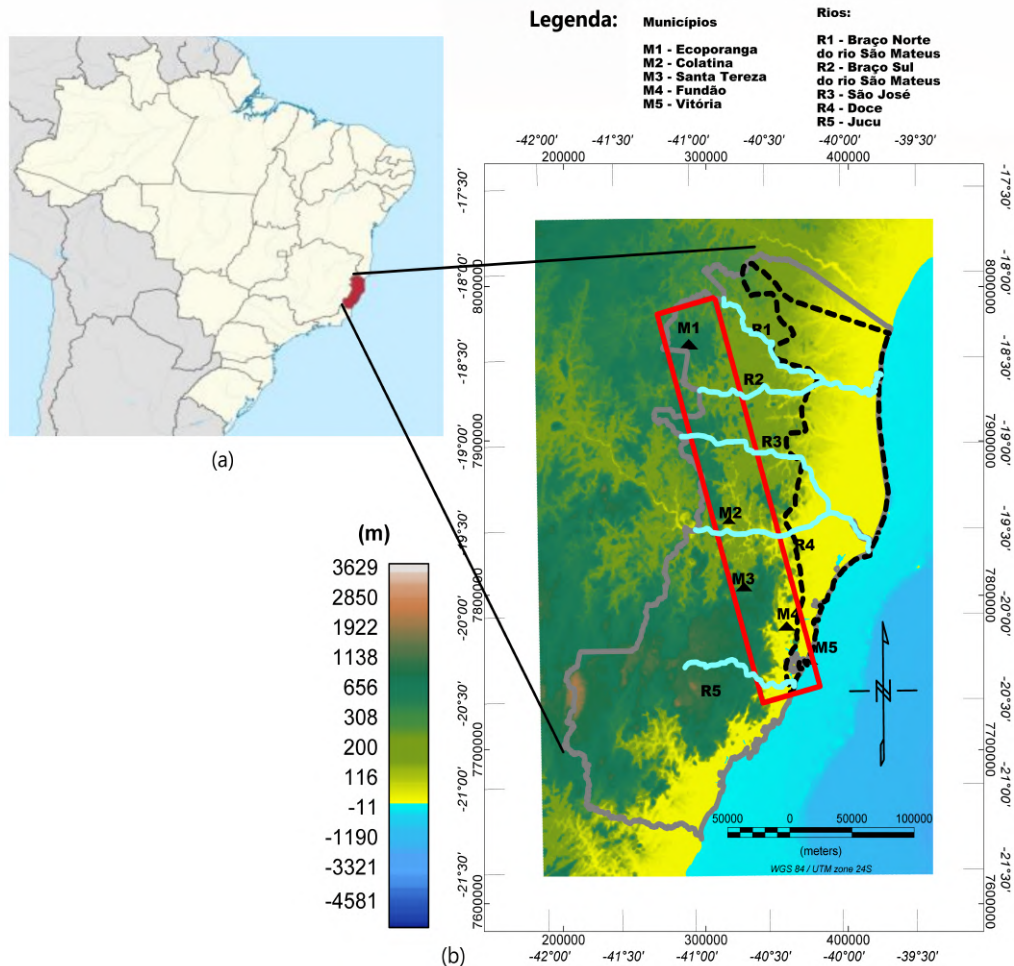
1.1 Área de Estudo

O objeto de estudo está compreendido no âmbito do Orógeno Araçuaí, uma região que se estende do Cráton São Francisco até ao litoral Atlântico. Tendo seus limites

¹Um mapa de algumas pedreiras do estado é apresentado na Figura A.1 no apêndice A

aproximados entre os paralelos 18° e 21° Sul e meridianos 40° e 42° Oeste, este polígono recobre a região de estudo.

Figura 1.1: Figura representativa da topografia do estado do Espírito Santo em relação ao Brasil, enfatizando a Área de Estudo.



Legenda: Contornos dos estados são representados por linha cinza, os principais rios por linhas azuis, o limite das bacias por linhas pretas tracejadas e a área de estudo por um retângulo vermelho.

Fonte: Produzido Pelo Autor

Na Figura 1.1 está representando o Brasil (a), junto com o mapa topográfico (gerado utilizando dados SRTM30.) do estado do Espírito Santo (b) com algumas informações adicionais, mostrando o limite da bacia sedimentar, os principais rios, junto com os limites estaduais e dando realce na área de estudo (retângulo vermelho), informações essas utilizadas como referência no processo de interpretação dos mapas gerados.

O nosso objeto de estudo atravessa boa parte do estado do Espírito Santo na região sudeste do Brasil. O estado ocupa uma área de 46.098,571 km², dividido em 78 municípios, tendo como capital a cidade de Vitória.

A principal via de acesso é a BR-101, que atravessa o estado na sua totalidade de Norte a Sul, e o liga aos estados subjacentes da Bahia e Rio de Janeiro. Na direção oeste para leste temos as BR-259 e BR-262 que cortam o estado, desde o litoral do Espírito Santo adentrando pelo estado de Minas Gerais.

1.2 Objetivos

Os principais objetivos do projeto de pesquisa desta dissertação de mestrado com o emprego de métodos geofísicos quantitativos e qualitativos são:

I Gerar mapas magnetométricos, gravimétricos e radiométricos em escala de detalhe para definir melhor a continuidade longitudinal do Lineamento Colatina.

II Elaborar mapas temáticos interpretativos desses três métodos geofísicos e identificar outras estruturas associadas ao Lineamento Colatina.

III Identificar nos mapas magnetométricos temáticos o feixe de diques e falhamentos que compõem o Lineamento Colatina.

IV Estimar a distribuição espacial e profundidade dos feixes de diques.

V Fazer modelagens 2D integradas dos dados magnetométricos e gravimétricos, associados à geologia.

VI Imageamento 3D do enxame de diques, característico do Feixe de Lineamentos Colatina.

1.3 Justificativa

O estudo visa à identificação e caracterização dos diques que compõem o extenso Lineamento Colatina, com o objetivo de se obter mais conhecimento das estruturas geológicas da região. Os estudos realizados na área até hoje, foram de cunho superficial. Desta forma, este trabalho servirá para aprofundar o conhecimento em subsuperfície da faixa Colatina, através da geração de mapas temáticos magnetométricos, gravimétricos e radiométricos. Servirá também para caracterizar as estruturas geológicas, de modo qualitativo e quantitativo, com a criação de modelagens 2D e 3D, e assim, entender melhor a distribuição espacial das estruturas presentes na região.

Capítulo 2

Geologia Geral

2.1 Contextos Geológicos Regionais

Os estudos de Geociências na região do Espírito Santo são bem recentes, comparado com a geologia moderna, sendo a geomorfologia a principal ferramenta utilizada nos estudos para conhecimento da superfície. Uma vez que não necessita de muitos procedimentos para ser desenvolvida, se tornando um grande mecanismo para a compreensão inicial de uma determinada região.

O estudo geomorfológico do estado do Espírito Santo teve início no meio da década de 80, através do Projeto RadamBrasil, tendo este sido iniciado na região Amazônica na década de 70. O projeto foi criado em outubro de 1970 e inicialmente tinha como objetivo mapear, os recursos minerais, o solo e a vegetação da floresta Amazônica, e regiões próximas. Os aerolevantamentos na Amazônia começaram a ser realizados em julho de 1971. Por causa do sucesso na obtenção de dados confiáveis o projeto foi então expandindo para todo território nacional. Mas se manteve a nomenclatura inicial de Radar da Amazônia – RADAM.

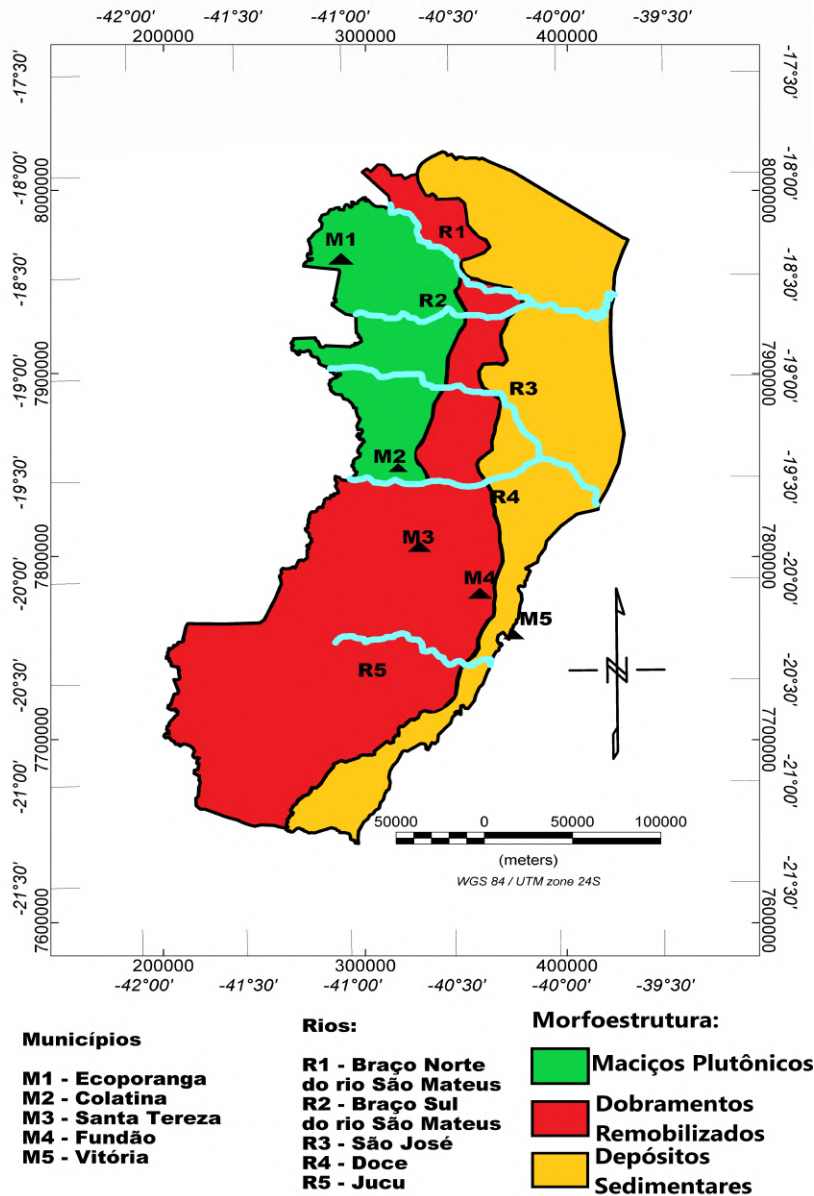
Devido ao grande sucesso na aquisição de dados de qualidade, ocorreu uma inúmera quantidade de publicações, como por exemplo, RADAMBRASIL (1976), RADAMBRASIL (1982), RADAMBRASIL (1983a), RADAMBRASIL (1983b) e IBGE/DGC (1987), entre outros.

Uma das regiões beneficiadas com esse tipo de aerolevantamento entre os anos de 1983 e 1987, foi o estado do Espírito Santo, sendo publicado dois relatórios técnicos, nos anos de 1983 e 1987, nos trabalhos de RADAMBRASIL (1983a) e IBGE/DGC (1987).

Nos anos seguintes, estudos geomorfológicos da região do Espírito Santo continuaram a ser executados. O IJSN realizou o mais recente trabalho na região, que resultou na publicação da nota técnica nomeada de Mapeamento Geomorfológico do Estado do Espírito Santo, publicado em COELHO *et al.* (2012). Este trabalho

está baseado nas seguintes fontes: dados coletados pelo projeto RADAMBRASIL (1983-1987), trabalho de SUGUIO (1998) e informações do IBGE (2009). Esta nota técnica apresenta a conclusão de que o estado é composto basicamente por três tipos de extratos, como está representado na Figura 2.1.

Figura 2.1: Morfoestruturas do estado do Espírito Santo



Fonte: Produzido pelo autor utilizando informações de COELHO *et al.* (2012)

A Figura 2.1 mostra o mapa geomorfológico do estado do Espírito Santo, e sua divisão nos principais terrenos: depósitos sedimentares, maciços plutônicos e faixas de dobramentos remobilizados, que são melhor descritos nas subseções seguintes.

2.2 Principais Morfoestruturas do Estado do Espírito Santo

2.2.1 Depósitos Sedimentares

Extratos que englobam sedimentos arenosos e argilosos, que foram sendo depositados ao longo do Cenozoico (65 a 0 milhões de anos). Esses sedimentos são resultantes da decomposição de rochas preexistentes que sofreram ação do intemperismo (mecânico, químico e/ou biológico).

A estrutura é formada basicamente pela Formação Barreiras no ambiente costeiro. Segundo ROSSETI *et al.* (2012), é datada mais especificamente no período do Mioceno (23 a 5 Ma). Essa formação ocorre ao longo da costa brasileira desde o estado do Amapá até o Rio de Janeiro.

De acordo com CHRISMANN (2014) a formação Barreiras tem maior presença nas regiões norte e nordeste, sendo mais restrita e espaçada na região sudeste. No estado do Espírito Santo, essa formação se estende do norte do estado até próximo do município de Vitória. Já no estado do Rio de Janeiro a formação aflora na parte costeira do Norte Fluminense.

2.2.2 Maciços Plutônicos

São rochas intrusivas provenientes dos acúmulos de grande quantidade de magma que não conseguiu atingir a superfície, e com isso passou por um processo de resfriamento lento onde teve um período maior de cristalização dos minerais, tornando-os visíveis a olho nu. Este processo resultou em classificação e denominações diferentes dependendo da profundidade, TEIXEIRA e FAIRCHILD (2009).

A definição de maciços é utilizada por serem corpos que são delimitados por falhas e/ou fendas. O termo plutônico ¹ foi cunhado por James Hutton, no século XX. Como essas rochas têm a sua formação longe da superfície, a sua visualização hoje em dia, é devida aos processos de erosão e soerguimento, sendo que FILHO *et al.* (2013) destaca a existência de uma grande quantidade dessas rochas no noroeste do Espírito Santo. Além disso, na parte sul do estado, estão presentes suítes intrusivos: Aimorés, Santa Angélica e Espírito Santo, PEDROSA-SOARES *et al.* (2007) e FLECK (2014), com idades entre 520-490 Ma.

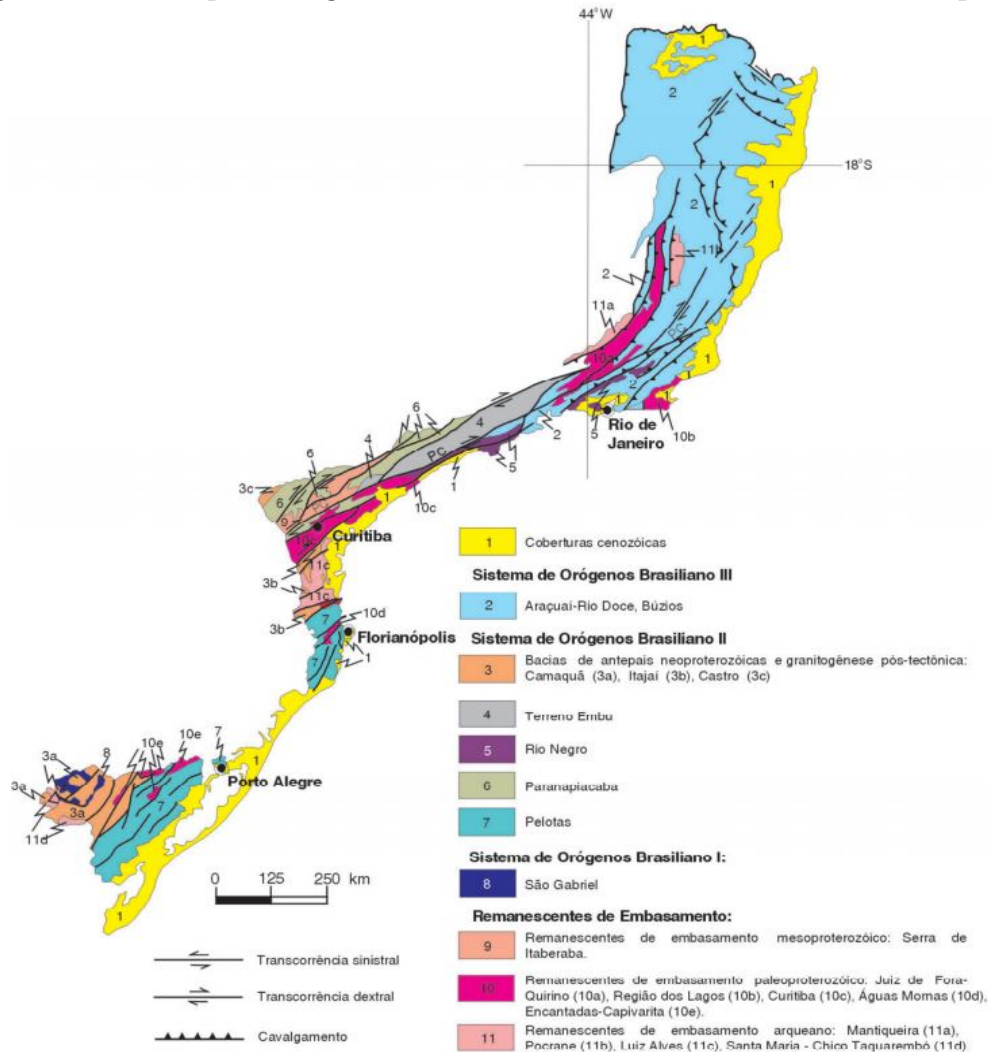
¹Baseada na mitologia romana e está associada ao deus Plutão, que era o deus dos infernos e profundezas.

2.2.3 Faixa de Dobramentos Remobilizados

Para COELHO *et al.* (2012), a região é caracterizada por falhas, dobras e outros elementos que evidenciam os movimentos crustais, propiciando um controle estrutural sobre a morfologia da região. Esta faixa de dobramentos serve como uma estrutura que salienta as diferenças entre as morfoestruturas citadas acima. Segundo IBGE/DGC (1987) a faixa de dobramentos remobilizados pode ser subdividido em: Planalto da Mantiqueira Setentrional, Piemontes Orientais e compartimentos Planálticos do Leste de Minas. O feixe de lineamentos da faixa Colatina, encontra-se imerso dentro da parte Setentrional da Província Mantiqueira.

2.3 Província Mantiqueira

Figura 2.2: Principais Orógenos brasileiros inseridos na Província Mantiqueira.

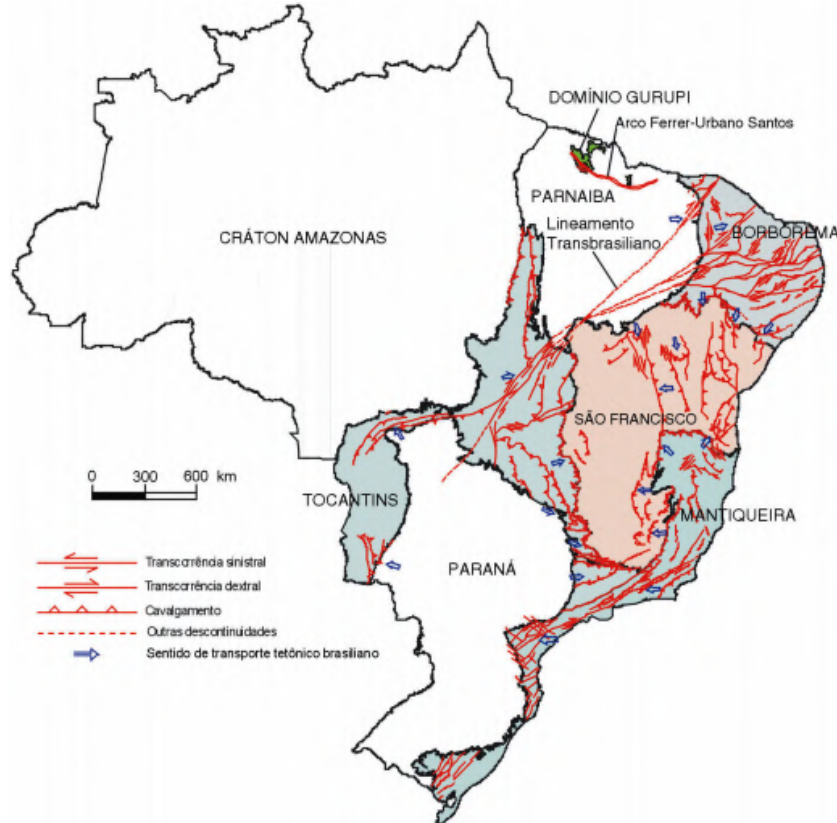


Fonte: Extraído BIZZI *et al.* (2003)

A província Mantiqueira é uma grande província que se estende por boa parte do litoral Sul e Sudeste do Brasil. Como pode ser visto na Figura 2.2, a província tem seu início em Montevideú (Uruguai) adentrando em território nacional no Rio Grande do Sul, estendendo-se até o sul da Bahia. Apresenta extensão de 3.000 km, e área aproximada de 700.000 km², HEILBRON *et al.* (2004), com orientação NNE-SSW.

A província está limitada a noroeste por uma importante estrutura geológica brasileira, o Cráton de São Francisco, como mostrado na Figura 2.3. No início dos anos 90, por causa da pouca quantidade de datações realizadas na região, e pelos modelos tectônicos de evolução serem bem superficiais, era comum a confusão dos limites entre essas formações, ALMEIDA (1977). Um ponto que motivava essa confusão eram os ortognaisses ² localizados no extremo nordeste da província, até então considerados como parte do Cráton de São Francisco, ALKIMIN (2004).

Figura 2.3: Principais estruturas e Orógenos no território nacional.



Fonte: Extraído BIZZI *et al.* (2003)

Motivados por essas interpretações dúbias, foram realizados um refinamento e um aumento da quantidade de datações, sendo estas realizadas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Assim foi possível ordenar os eventos tectônicos da origem dessas formações e delimitar cada uma delas, obtendo uma janela de idade entre 2180 a 2058 milhões de anos para a alguns eventos metamórficos da província, NOCE *et al.*

²Rocha Metamórfica derivada de rochas ígneas

(2007), onde a fixação do Orógeno Araçuaí ao Cráton de São Francisco, ocorreu por volta de 580-570 milhões de anos.

Como se trata de uma formação antiga, desenvolveu-se durante a Orogenia Neoproterozóica Brasileiro-Pan Africana. A província Mantiqueira se tornou uma fonte de estudos para tentar entender o processo de evolução do Neoproterozóico na América do Sul, (ALMEIDA *et al.* (1975), ALMEIDA (1976), ALMEIDA (1977) e ALMEIDA *et al.* (1981)), já que em sua formação existem registros de elementos que pertenceram ao arqueano, ao paleoproterozoico e ao mesoproterozoico. Em sua estrutura estão os principais orógenos brasileiros: o Araçuaí, Ribeira, Brasília Meridional, Dom Feliciano e São Gabriel, HEILBRON *et al.* (2004).

Através dos inúmeros trabalhos realizados por Fernando Flávio Almeida, sendo alguns deles ALMEIDA (1977) e ALMEIDA *et al.* (1981), foram se definindo os principais traços da tectônica da província Mantiqueira, caracterizada como maciços medianos e faixas de dobramentos também denominadas de faixas móveis, HEILBRON *et al.* (2004).

2.4 Cráton de São Francisco e Orógeno Araçuaí

Como a província Mantiqueira é limitada pelo Cráton de São Francisco e tem em sua estrutura o orógeno Araçuaí, vale a pena diferenciar e definir melhor essas duas estruturas. Segundo HEILBRON *et al.* (2017) um orógeno é o produto de interações convergentes entre placas litosféricas, gerando diferentes produtos, como por exemplo, arcos de ilhas ³ e cadeias de montanhas ⁴.

Os orógenos podem ser formados de duas maneiras distintas: via prisma acrescional, onde magma e sedimentos são adicionados nas margens de uma placa, ou via colisão entre placas. Imagina-se então que as regiões onde ocorra o surgimento dessas estruturas sejam regiões tectonicamente ativas diferentes dos Cráton. Os crátons são regiões estáveis com raízes mantélicas antigas, mantendo suas estruturas estáveis por longos períodos de tempo, e assim, apresentando uma alta resistência mecânica, ALKIMIN (2004).

Para se definir uma região como Cráton se devem analisar os orógenos que a circundam para só então definir e delimitar o Cráton, ou seja, as definições de ambas as estruturas são independentes, mas são por vezes analisadas conjuntamente. O Cráton de São Francisco foi datado como do período arqueano, podendo assumir que seu embasamento seja anterior a 1.8 bilhões de anos, ALKIMIN (2004), tendo sobrevivido ao processo de orogênese que ocorreu no Proterozóico, durante o evento Transamazônico, ALMEIDA *et al.* (1981).

³Um exemplo são as ilhas que formam o Japão

⁴Alpes e Himalaia

Como os continentes Africano e Sul-Americano outrora já foram conectados, formando o Gondwana, espera-se que exista uma contraparte do Cráton São Francisco no continente africano. Ao utilizar a reconstrução cartográfica de DE WIT *et al.* (1988) (Figura 2.4), posicionando a linha de costa do Brasil (Margem Leste) e linha de costa do continente Africano (margem oeste), nota-se que o Cráton de São Francisco e o Cráton de Congo vão ao encontro um do outro, dando a entender que ambas formavam uma estrutura mais antiga. Percebe-se esse fato também no orógeno Araçuaí que se encontra alinhado com a faixa Pan-africana Oeste Congolesa.

Essa reconstrução, apresentada na Figura 2.4, foi corroborada por alguns elementos. Por exemplo, com o uso de dados estratigráficos de prospecção que confirmam ambas regiões terem a mesma origem, além de estudos de D'AGRELLA-FILHO *et al.* (1990) utilizando o método paleomagnético como ferramenta, constataram em ambas regiões a existência de paleo polos que praticamente são coincidentes no estágio anterior ao Neoproterozoico.

Figura 2.4: Cráton São Francisco-Congo

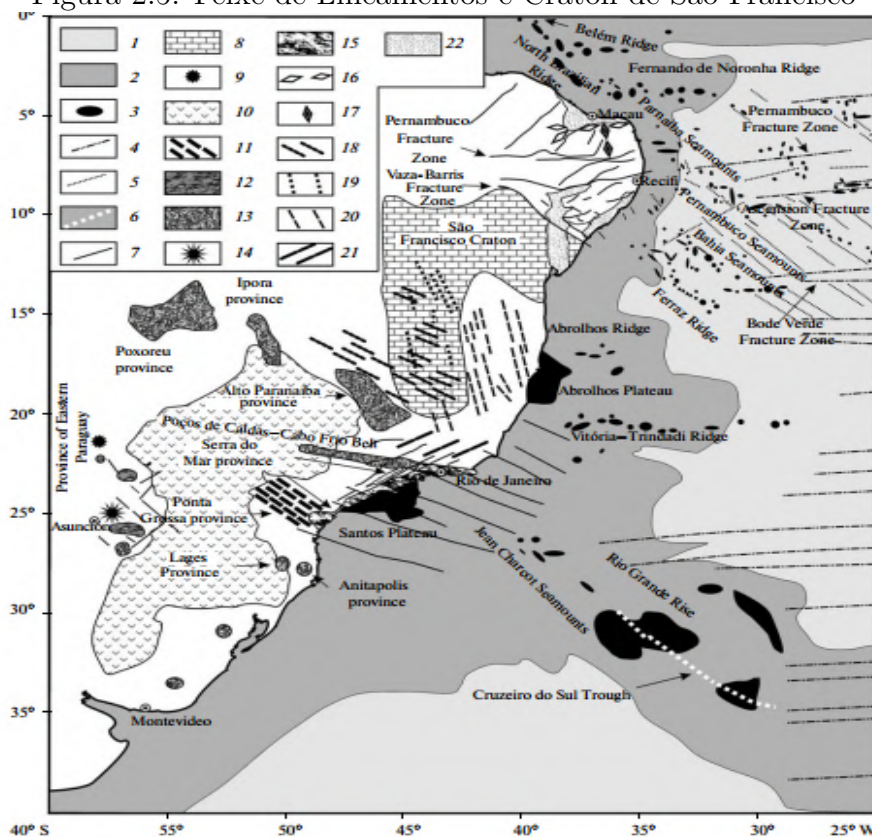


Fonte: Extraído ALKIMIM *et al.* (2012/2013)

A evolução desta estrutura orogênica foi estudada por PORADA (1989), PEDROSA-SOARES *et al.* (1992) e ALKIMIM *et al.* (2007), que realizaram importantes avanços na tentativa de melhor explicar a formação dessa feição. BUENO (2004), em seu trabalho descreve o processo de rifteamento entre os dois continentes em três fases: break-up I, cerca de 132 Ma com ápice de vulcanismo na bacia do Paraná e aquecimento climático, break-up II, ocorrido há cerca de 126 Ma, dando início à produção de crosta oceânica e break-up III, datado de 115 Ma, ocorrendo aqui a separação total dos continentes.

Essas comprovações serviram para deixar clara a relação entre essas estruturas, que não podem ser desassociadas, o Cráton São Francisco-Congo e o Orógeno Araçuaí-Congo, sendo uma relação incomum, pois, diferente de outros orógenos, o Araçuaí-Congo é enclausurado por uma formação cratônica.

Figura 2.5: Feixe de Lineamentos e Cráton de São Francisco



Fonte: Extraído PEYVE (2010)

Na parte brasileira do Orógeno Araçuaí se encontra o alinhamento Vitória-Ecoporanga, formado por uma grande quantidade de feixes, tendo orientação preferencial NNW-SSE. A Figura 2.5 mostra o comportamento do feixe de lineamentos perante o cráton de São Francisco e como dentro do cráton também existem feições com direções coincidentes a do feixe de lineamentos, PEYVE (2010).

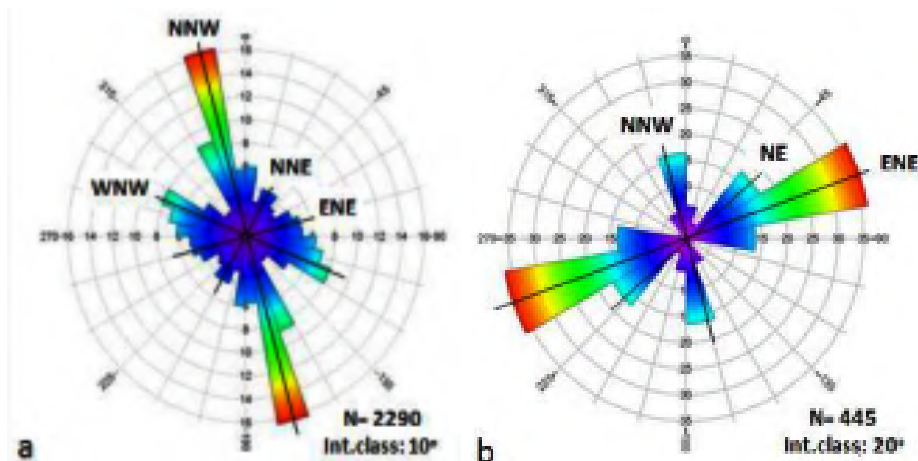
2.5 Feixe de Lineamentos e Lineamento Colatina

A zona onde se encontra o feixe de lineamentos ⁵ do estado, além do próprio lineamento Colatina, é uma estrutura tectônica datada do proterozoico superior, sendo uma zona de cisalhamento transcorrente, VIEIRA e MENEZES (2015). Esta zona influencia diretamente na maior parte da granitogênese do estado, por isso,

⁵Também chamada de Faixa Colatina

é considerada uma das feições mais importantes, e apresenta direção preferencial NNW-NW. Na Figura 2.6, está representado o diagrama de roseta com a direção preferencial dos lineamentos.

Figura 2.6: Direção Preferencial do feixe de Lineamentos

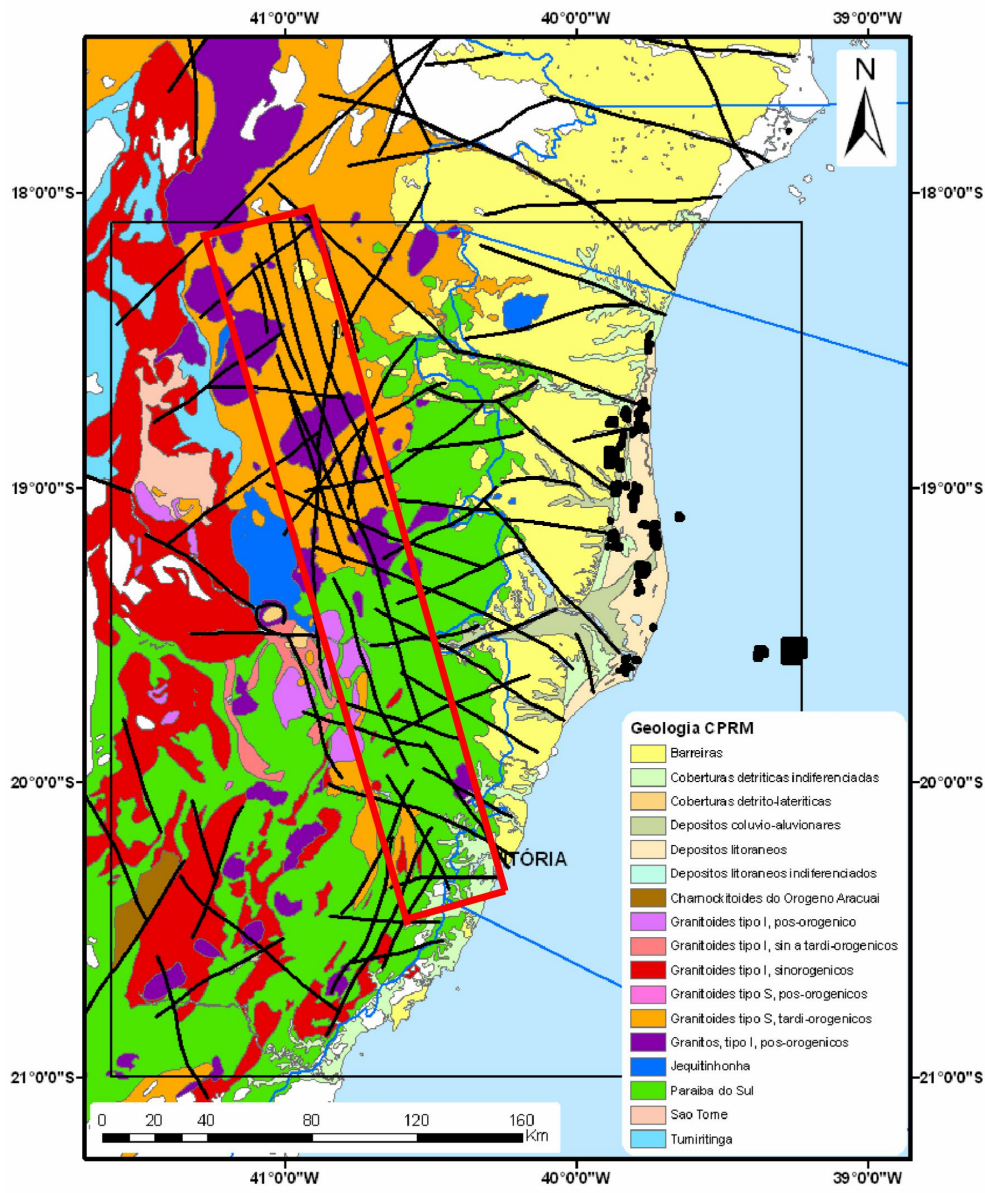


Fonte: Extraído ALKIMIM *et al.* (2012/2013)

A Figura 2.6 além de mostrar a direção preferencial do feixe de diques (a), também mostra a direção das fraturas (b) da região observada, nos municípios de Serra e Vitória. O lineamento Colatina é o mais importante na região, já que se estende por uma distância aproximada de 250 km, atravessando boa parte do estado, indo do Norte, desde a cidade de Ecoporanga até a cidade de Vitoria.

JUNIOR (2007) mostrou em seu trabalho, as direções do lineamento e a extensão do principal lineamento do estado, estando em acordo com a Figura 2.6, onde fez uma estimativa de lineamentos no estado com dimensões maiores que 1 km, chegando ao número de 8890 lineamentos, sendo apresentando na Figura 2.7 uma pequena parcela desses lineamentos, que em seu trabalho foram construídos a partir de imagens de satélite e levantamentos geológicos. Na região central onde se encontra o lineamento principal há cerca de 2940 feições, que podem chegar até cerca de 300 km de dimensões acumuladas.

Figura 2.7: Mapa geológico e principais lineamentos do estado

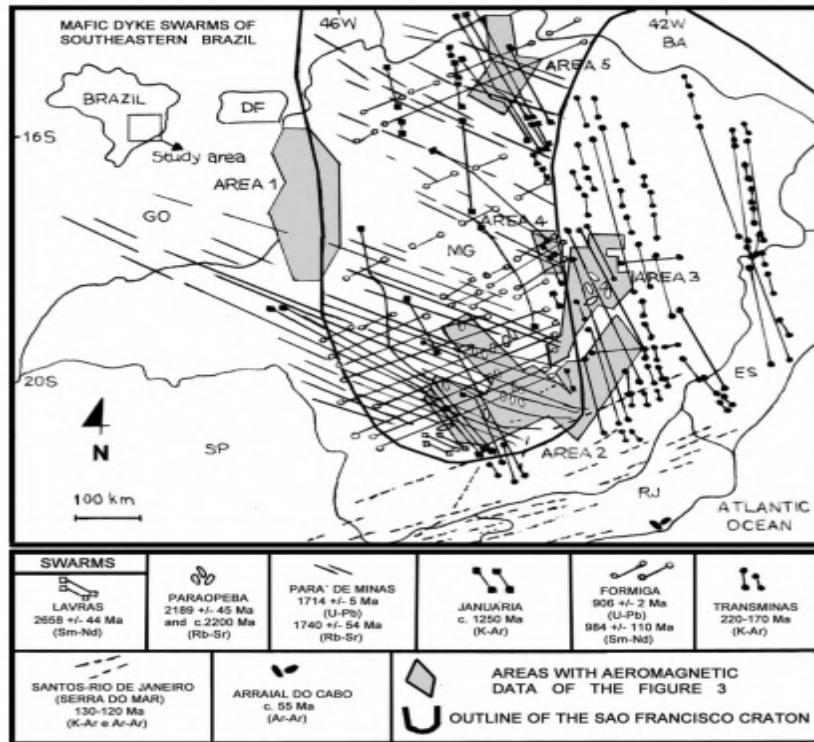


Legenda: Região de estudo delimitada pelo polígono vermelho, Lineamentos (traços pretos) sobrepostos ao mapa geológico da região (BIZZI *et al.* (2003)). Campos de produção (polígonos pretos) e limites das bacias (azul) de acordo com a ANP (2006).

Fonte: Modificado JUNIOR (2007)

Estruturas com direção semelhante a do lineamento Colatina, pode ser notadas na Figura 2.8, localizadas na região nordeste do estado de Minas Gerais. Estes foram nomeados de Transminas, que segundo COELHO (2016), têm idades entre 127 Ma a 130 Ma, idade semelhante à do lineamento Colatina que segundo PESSANO *et al.* (2020) tem idade entre 128 Ma a 136 Ma, além de idades semelhantes essas estruturas, mostradas na Figura 2.8, estão paralelas entre si.

Figura 2.8: Feixe de Lineamentos Colatina se apresenta paralelo com feixe de Lineamentos Transminas

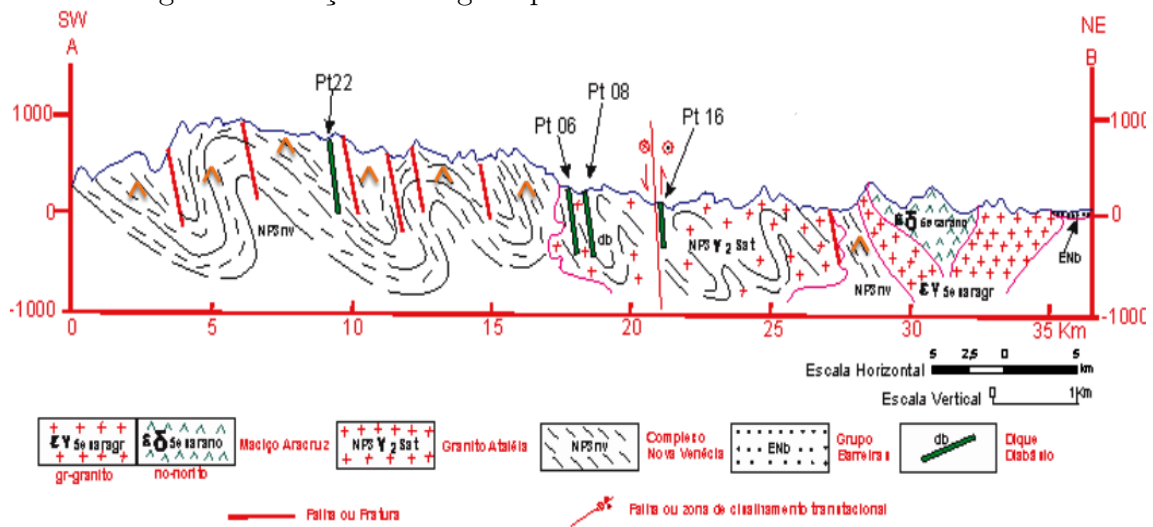


Fonte: Extraído CHAVES e NEVES (2005)

Sendo o lineamento Colatina o principal elemento que controla a tectônica estrutural da Bacia do Espírito Santo (IBGE/DGC (1987) e NOVAIS *et al.* (2004)), seções geológicas com intuito de estudar essa região foram desenvolvidos por VIEIRA e MENEZES (2015), mostrada na Figura 2.9, evidenciando a quantidade de dobramentos e de falhas na região, ou seja, uma região com grande quantidade de cataclase ⁶, IBGE/DGC (1987).

⁶Deformação de uma rocha com fraturamentos e rotações de seus constituintes sem recristalizações minerais significativas.

Figura 2.9: Seção Geológica que atravessa o Lineamento Colatina



Fonte: Extraído VIEIRA e MENEZES (2015)

A Figura 2.9 mostra como parte dos lineamentos encontram-se aflorantes. Segundo VIEIRA e MENEZES (2015) e COELHO (2016), os diques apresentam pontos de afloramento com maior frequência nas cidades de Fundão e Santa Tereza. A Figura 2.10 mostra imagens de exploração de rochas, onde evidenciamos inúmeros diques coincidentes com os lineamentos. Nas imagens podemos observar que são corpos verticais tabulares com espessuras variáveis.

Figura 2.10: Afloramento do Lineamento Colatina



Fonte: Extraído VIEIRA e MENEZES (2015)

Segundo o relatório técnico IBGE/DGC (1987) o feixe de lineamentos na região de Fundão e Santa Tereza é composto por diques básicos, datados do Jurássico, propondo nomear essa região de suíte intrusiva Fundão. FLECK (2014) em seu trabalho, realizou coletas ao longo da faixa Colatina, em regiões onde existiam

pedreiras ou afloramentos dos diques. As amostras apresentadas em seu trabalho, em sua maioria são caracterizadas como basalto (descrito anteriormente por VALENTE *et al.* (2009)), diabásio (descrito anteriormente por SILVA e FERRARI (1976)) e gabro (descrito anteriormente por FONTES *et al.* (1978)), com menor número de amostras associadas a gnaisses e noritos.

De acordo com SGARBI (2007) as rochas, basalto, diabásio, gabro e norito se enquadram na mesma família, grupo de rochas ígneas básicas ⁷, sendo a distinção feita a grosso modo pela profundidade de resfriamento, da seguinte forma: basalto como rocha vulcânica, diabásio como rocha hipoabissal, gabro/norito como rochas plutônicas, acarretando em diferentes granulações. Por outro lado, a rocha caracterizada como paragnaisse, consiste em uma rocha metamórfica, resultante do metamorfismo do granito, ou rochas sedimentares.

Como essas rochas são da mesma família, com composição química semelhante, espera-se que ambas apresentem propriedades físicas similares. Segundo TELFORD *et al.* (1990), ambas as rochas têm densidades médias semelhantes de 2.91 g/cm³, 2.99 g/cm³ e 3.03 g/cm³ para o diabásio, basalto e gabro, respectivamente. O mesmo vale para valores de susceptibilidade com janelas bem mais amplas de valores que se enquadram como essas rochas, podendo variar de autor para autor.

⁷Rochas com teor de sílica entre 45% e 54%, relativamente ricas em elementos pesados como Ferro e Manganês

Capítulo 3

Fundamentos Históricos e Teóricos

3.1 Breve Histórico Sobre o Magnetismo

O magnetismo, como muitas outras áreas da física, teve alguns de seus fundamentos descritos durante a Grécia Antiga (1100 a.C. a 600 d.C.), quando foram descobertos pequenos fragmentos de um mineral que eram capazes de gerar atração e repulsão. Esse mineral posteriormente viria a ser chamado de imã, mas no momento de sua descoberta veio a ser chamado de magneto, PIRES (2008), já que foi descoberto na cidade chamada de Magnésia.

Este estudo permaneceu estagnado durante anos, voltando a ser pauta devido à pesquisa de Pierre Pelerin de Maricourt (1240 - 1286), que em 1269 publicou um trabalho, chamado de maneira simplificada de "**Epístola do Magneto**". O principal experimento nesse trabalho consistia basicamente em colocar agulhas em torno de um imã perfeitamente esférico e perceber que as agulhas circundavam a esfera e tinham um maior acúmulo em dois pontos diametralmente opostos, pontos que foram nomeados de polos, SERWAY e JEWETT JR. (2014b).

Os estudos buscando compreender o campo magnético dos imãs e o do campo terrestre continuaram, e em 1600 Sir William Gilbert (1540 - 1603), repetiu os experimentos realizados por Pierre e estendeu para outros corpos, concluindo que os imãs têm direções preferências nas quais são atraídos, mostrando que o polo magnético era próximo ao eixo de rotação terrestre, HALLIDAY *et al.* (2016b).

Dando continuidade aos estudos, no ano de 1750, John Michell (1724 - 1793), usou a balança de torção, mostrando a existência de forças repulsivas e atrativas entre os polos dos imãs, percebendo outra característica importantíssima do magnetismo: o fato de não ser possível encontrar polos magnéticos isolados, sempre encontrados em pares, PIRES (2008).

Uma revolução veio com a percepção de que existia uma relação entre eletricidade e magnetismo. Alguns cientistas que contribuíram para essas descobertas foram:

Hans Oersted (1777 - 1851), André Ampère (1755 - 1836), James Clerk Maxwell (1831 - 1879) e vários outros, SERWAY e JEWETT JR. (2014b). Esses cientistas chegaram à conclusão de que em certas condições, campos magnéticos geravam campos elétricos. O oposto também se mostrou válido.

O campo magnético só veio a ser usado no ramo na geofísica em 1843, ao utilizar na exploração de minério de ouro, resultando em uma publicação em 1879, onde se explicava o método magnético. Medições do campo magnético até o final da década de 40 (Século XX), consideravam apenas uma componente do campo magnético, usualmente a vertical, além de necessitar que as medidas fossem feitas em terra, TELFORD *et al.* (1990).

Evoluções nos métodos ocorreram durante a segunda guerra mundial, onde aparelhos, conhecidos como fluxgate, foram utilizados para obter a localização de submarinos, tornando assim as medições através de aerolevantamentos possíveis, TELFORD *et al.* (1990). A utilização dessa grandeza para estudos do planeta continuou, enquanto a evolução tecnológica possibilitou acelerar o processo de aquisição e interpretação dela.

3.2 Fundamentos Teóricos do Magnetismo

Como descrito na seção 3.1 os ímãs interagem entre si com forças repulsivas e atrativas, sendo essas interações representadas na Figura 3.1.

Figura 3.1: Linhas de Força entre Ímãs. a: Linhas de Campo em um ímã, b: Atração entre dois polos distintos, c: Repulsão entre dois polos iguais



Fonte: Extraído SERWAY e JEWETT JR. (2014b)

A expressão matemática que explica o fenômeno da Figura 3.1, foi obtida de maneira experimental, tendo a mesma sido descrita se baseando na lei de Coulomb, criando assim a relação que descreve a intensidade da força entre dois polos vista na equação 3.1, KEAREY *et al.* (2009):

$$\vec{F}_M = \frac{\mu_0 m_1 m_2}{4\pi\mu_r r^2} \hat{r} \quad (3.1)$$

A equação 3.1 mostra como a força magnética entre dois polos magnéticos pode ser obtida, onde \vec{F}_M é a força magnética e é medida em Newtons [N]¹. Essa força dependerá, da intensidade dos polos magnéticos de dois ímãs quaisquer, simbolizados por \mathbf{m}_1 e \mathbf{m}_2 , sendo os mesmos definidos como pontos onde as linhas do campo magnético convergem ou divergem, medidos em Ampere vezes metro [Am]. Dependerá também do quadrado da distância, medida em metros [m], SERWAY e JEWETT JR. (2014b).

Os últimos fatores de que a força magnética dependerá, são conhecidos como permeabilidade magnética² e permeabilidade magnética relativa³. A primeira serve para mensurar o campo magnético no interior de um material devido a um campo magnetizante externo, medida em [N/A²]. A segunda depende do meio no qual estão imersos os ímãs, sendo está adimensional, HALLIDAY *et al.* (2016b).

A força magnética entre dois polos se deve ao campo magnético que surge e circunda o ímã, a intensidade do campo magnético dependerá diretamente da intensidade do polo magnético. Sendo assim existe a necessidade de definir o campo magnético \mathbf{B} , HALLIDAY *et al.* (2016b).

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 m_1}{4\pi\mu_r r^2} \hat{r} = \frac{\vec{F}}{m_2} \quad (3.2)$$

Onde o campo magnético \mathbf{B} , da equação 3.2, será medido em Teslas, [T]. Para anomalias magnéticas se utiliza o nanoTesla [nT] pois essas anomalias tem intensidade muito pequena se comparado com a unidade Tesla, SERWAY e JEWETT JR. (2014b).

Todas as análises realizadas nas equações anteriores mostram a força entre polos de ímãs distintos, mas como já descoberto os ímãs naturais têm dois polos e portanto são dipolos, definindo assim o momento magnético \mathbf{M} , que consiste na interação entre dois polos de um ímã, HALLIDAY *et al.* (2016b), como:

$$\vec{M} = ml\hat{r} \quad (3.3)$$

O momentum \mathbf{M} tem como unidade de medida o Ampere vezes metro ao quadrado [Am²], que dependerá da intensidade dos polos magnéticos da amostra e da distância

¹As unidades descritas estão sendo referenciadas ao SI

²Sendo esta definida como permeabilidade magnética do vácuo, que recebe o índice zero

³Recebe o índice r

l entre eles, dada em metros [**m**], SERWAY e JEWETT JR. (2014b).

Toda discursão apresentada até aqui, mostra a interação entre dois polos de imãs distintos ou a interação entre dois polos de um mesmo imã, mas um imã pode interagir com outros minerais que não sejam imãs. Sendo assim necessita-se definir melhor esse tipo de interação. A primeira ocorre quando se insere um material dentro de um campo magnético, ele pode ser magnetizado e obter uma magnetização **M**, além de obter uma magnetização induzida, HALLIDAY *et al.* (2016b).

$$\vec{J}_i = \frac{\vec{M}}{V} \quad (3.4)$$

Sendo **J_i** a magnetização induzida, medida em Ampere por metro [**A/m**], que dependerá do momento dipolar **M** e do volume **V** da amostra, o que acarreta em outro efeito, o material estando sujeito a um campo **B** qualquer, irá sofrer com o surgimento de uma magnetização induzida que acarretará na criação de um campo derivado da magnetização induzida, sendo este definido com a letra **H**, HALLIDAY *et al.* (2016b). Para tentar diminuir as chances de ambiguidade esse campo induzido é conhecido como força de magnetização, podendo então construir-se uma relação entre a magnetização induzida e o campo induzido.

$$\vec{J}_i = \chi \vec{H} \quad (3.5)$$

A dependência da força de magnetização e a magnetização induzida mostrada na equação 3.5, dependerão de um elemento χ , chamado de susceptibilidade magnética do material, que representa a capacidade de um corpo em ser magnetizado. Sendo possível contruir também duas relações entre os campos **B** e **H**, SERWAY e JEWETT JR. (2014b). A primeira ocorre quando o campo se encontra no vácuo:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (3.6)$$

Nesse caso, na equação 3.6, o meio em que está ocorrendo essa interação é o vácuo, ar ou água, onde ambos os campos estarão relacionados através da permeabilidade magnética do vácuo. Mas essa relação é válida pra situações onde o mesmo não se encontra perturbado por um material magnetizado, o que pode ocorrer facilmente quando se insere um material magnético no meio. Dessa maneira irá surgir uma magnetização induzida que irá contribuir na interação entre **B** e **H**, SERWAY e JEWETT JR. (2014b).

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}_i \quad (3.7)$$

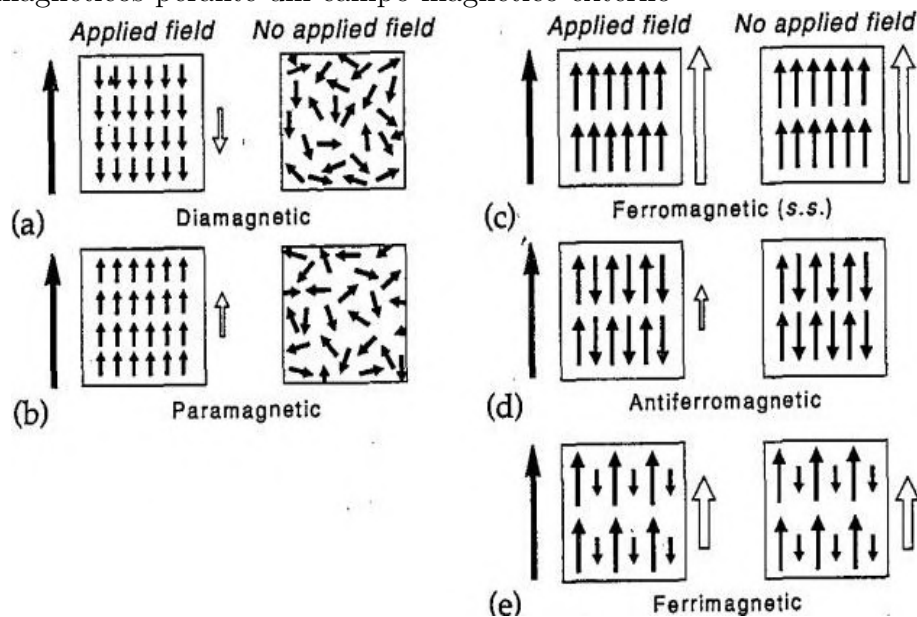
Através das relações 3.5 e 3.7, obtém-se:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} = (1 + \chi) \mu_0 H = \mu_r \mu_0 H \quad (3.8)$$

Toda matéria é magnética em uma escala atômica, já que os movimentos do elétron, seu spin e sua órbita agem como um dipolo magnético. Normalmente esse efeito magnético se anula graças à aleatoriedade do movimento dos elétrons em certo material, mas quando aplicado um campo magnético externo o material se encontra magnetizado. A depender do comportamento desses materiais perante um campo externo eles podem ser divididos em diferentes grupos, GRIFFTHS (2011).

Geralmente podem-se generalizar como **diamagnéticos** os que apresentam valores negativos de susceptibilidade, se opondo ao sentido do campo externo, aqueles que se magnetizam paralelamente a **B**, chamados de **paramagnéticos** e outro grupo que retêm a magnetização após a retirada do campo externo, sendo que a magnetização desses corpos não sendo explicada pelo campo externo e sim pela formação desses materiais que são conhecidos como **ferromagnéticos**. A Figura 3.2 mostra um exemplo do comportamento dessas materias sob ação de um campo externo, GRIFFTHS (2011).

Figura 3.2: Exemplo de como se comportam materias, Paramagnéticos, Diamagnéticos e Ferromagnéticos perante um campo magnético externo



Fonte: Extraído TARLING e HROUDA (1993)

Os materias ferromagnéticos têm essa características pois em sua estrutura quase todos os momentos magnéticos ⁴ estão alinhados dentro desses materiais, esses conjuntos de momentos alinhados são definidos como domínios magnéticos, GRIFFTHS (2011).

⁴Gerados pelo movimentos dos elétrons

A separação entre os domínios é conhecida como parede de Bloch, KEAREY *et al.* (2009), e é onde ocorre a transição de orientação entre domínios. Acima de certa temperatura máxima conhecida como Temperatura de Curie, os materiais começam a perder suas características magnéticas, os domínios se desorganizam, a relação 3.9, descreve a Lei de Curie, que relaciona como a susceptibilidade de um material está sujeita à temperatura, sendo medida em Kelvin [K] e de uma constante C que dependerá do material.

$$\chi = \frac{C}{T} = \frac{J_i}{H} \quad (3.9)$$

O magnetismo nas rochas advém de sua composição mineral, onde a maioria dos materiais formadores apresentam uma baixa susceptibilidade. Aqueles que apresentam características magnéticas têm em sua composição uma grande concentração do mineral magnético conhecido como magnetita (Fe_3O_4), ou sua variante oxidada a maghemita (γFe_2O_3) ou o próprio óxido de ferro (Fe_2O_3), KEAREY *et al.* (2009).

Todas as rochas que apresentam em sua formação certa concentração de magnetita, ou alguma variante que contenha ferro, irão apresentar propriedades magnéticas, embora a intensidade da anomalia gerada dependa diretamente da concentração desses minerais na estrutura da rocha. O campo magnético anômalo da rocha dependerá diretamente do seu valor de susceptibilidade, a tabela 3.1 mostra uma lista de algumas rochas e suas respectivas susceptibilidades, TELFORD *et al.* (1990).

Tabela 3.1: Tabela de susceptibilidade de Rochas Comuns

Rochas Sedimentares	Susceptibilidade
Dolomita	0 - 0.9
Arenito	0 - 20
Xisto	0.01 - 15
Calcário	0 - 3
Rochas Metamórficas	Susceptibilidade
Xisto	0.3 - 3
Gneisse	0.1 - 25
Serpentina	3 - 17
Ardósia	0 - 35
Rochas Ígneas	Susceptibilidade
Granito	0 - 50
Riolito	0.2 - 35
Diabásio	1 - 160
Basalto	0 - 175
Gabbro	1 - 90

Fonte: Adaptado TELFORD *et al.* (1990)

A susceptibilidade magnética no sistema internacional de unidade (SI) é adimen-

sional. Como se percebe na tabela 3.1 os minérios que em sua estrutura tenha átomos de ferro ou magnésio, têm um valor maior de susceptibilidade. Sendo essa uma das grandezas utilizadas para identificar os tipos de rocha na interpretação dos dados magnéticos, TELFORD *et al.* (1990).

3.3 Breve Histórico Sobre a Gravidade

Como dito anteriormente, um dos berços dos estudos das ciências exatas é a Grécia Antiga. Logo era de se esperar que algumas teorias que procurassem explicar a gravitação, fossem oriundas dos gregos. A teoria Aristotélica da Gravitação foi essa tentativa, talvez sendo a mais antiga a tentar explicar a gravidade, realizada por Aristóteles (384 a.C. - 322 a.C.), PIRES (2008).

Essa teoria perdurou por séculos até que a ciência florescesse, com cientistas desenvolvendo estudos sobre os movimentos dos corpos, como Galileu Galilei (1564 - 1642) ao descrever o movimento de corpos sujeitos a ação da gravidade terrestre. Johannes Kepler (1571 - 1630) descreveu leis que regem os movimentos de corpos celestes, mas coube a Isaac Newton (1643 - 1727), anos depois, criar a Lei da Gravitação Universal que foi publicada em 1687, THORTON e MARION (2011). Ela unificou ambas as ideias, afirmando que todos os corpos do Universo estavam sujeitos a uma força atrativa que era proporcional à massa de ambos os corpos, sendo esse princípio a base da mecânica clássica até hoje.

Do surgimento da teoria proposta até começar a ser aplicada no estudo da Terra, passara-se ainda alguns anos. Talvez o primeiro estudo com intuito de melhor entender o comportamento gravitacional no planeta, foi desenvolvido por Pierre Bourguer (1698 - 1758). Ao realizar uma expedição no Equador, coordenada pela Academia de Ciência Francesa entre os anos de 1735 - 1745, estabelecendo a existência de uma relação entre a variação da gravidade, a altitude e a latitude, TELFORD *et al.* (1990), tendo percebido que essa é uma variação muito pequena.

A partir disso começaram a surgir experimentos e equipamentos mais precisos com a finalidade de medir essas pequenas oscilações. Roland Von Eötvös (1848 - 1919), criou uma balança de torção em 1890 (baseada na balança de torção de Coulomb) e realizou a primeira pesquisa gravimétrica entre os anos 1901 e 1903, no gelo do lago Balaton (Hungria), EÖTVÖS (1908). Estudos realizados no ano de 1923 (utilizando submarino), mostraram uma grande variação do campo gravitacional localizada na fossa oceânica de Sunda (Indonésia), MEINESZ (1929).

A utilização de medidas gravimétricas com a finalidade de exploração de riquezas naturais, ocorreu em um campo de óleo em Spindletop (EUA), no final de 1922. Em 1924 foram utilizadas no estudo de domos de sal no condado de Brazoria (EUA), e na descoberta de hidrocarbonetos, BARTON *et al.* (1932).

Nos anos seguintes os avanços continuaram, com LaCoste criando o primeiro aparelho confiável de medição em 1939, derivado dos primeiros sismógrafos verticais LACOSTE JR (1934). Após isso, os aparelhos de medição começaram a ser adaptados para que fossem utilizados em poços (LAFEHR (1983)), em navios e até aviões, LACOSTE (1967). Sendo talvez o maior avanço sua utilização através de satélites em 1983, KAHN (1983). Nos dias atuais, com a evolução de computadores, o poder de processamento e interpretação de dados gravimétricos só aumentou, tornando assim a gravidade uma grandeza fácil de ser obtida e trabalhada, e de suma importância no entendimento do planeta Terra.

3.4 Fundamentos Teóricos da Gravitação

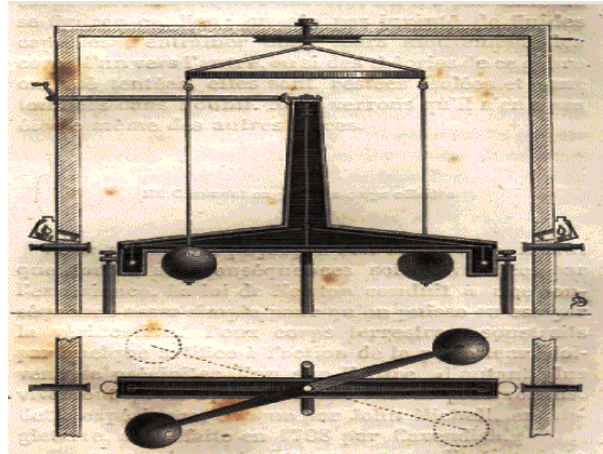
Para a gravitação, mesmo que existissem tentativas de explicar e interpretar seus conceitos há mais de 2000 anos, o formalismo matemático só aconteceu muito mais tarde. Para ser mais exato em 1687, com Isaac Newton e sua Teoria da Gravitação Universal, que pode ser expressa como visto na equação 3.10, SERWAY e JEWETT JR. (2014a):

$$\vec{F}_G = -G \frac{Mm}{r^2} \hat{r} \quad (3.10)$$

Onde a \mathbf{F}_G é a força entre os corpos dada em Newton [N], \mathbf{M} e \mathbf{m} as massas dos corpos, ambas medidas em quilograma [kg] e \mathbf{r} a distância entre elas, expressas em metro [m]. Uma consideração, utilizada quando possível, para facilitar é que a distância entre os corpos seja muito maior que as dimensões dos corpos, por se tratar de um força de caráter atrativo, o termo negativo surge na relação 3.10, SERWAY e JEWETT JR. (2014a).

Sendo \mathbf{G} a Constante Gravitacional, com valor de $6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kgs}^2$, essa constante foi determinada por Henry Cavendish (1731 - 1798), em 1798, SERWAY e JEWETT JR. (2014a), utilizando um experimento conhecido como balança de torção, obtiveram o valor de \mathbf{G} , como pode ser visto na Figura 3.3.

Figura 3.3: Diagrama da Balança de Torção Utilizado por Henry Cavendish, onde mostra-se a vista frontal e superior da balança.



Fonte: Extraído <https://historiadafisicauc.blogspot.com/2011/06/experiencia-de-cavendish_15.html>

Acesso Março de 2021

Como descrito anteriormente, a relação mostrada na equação 3.10, é aplicável em situações onde as dimensões dos corpos não intervêm, mas em situações reais, as dimensões muitas vezes importam, ou seja, devemos considerar uma situação com distribuição de matéria contínua, onde para realizar a soma de todas as contribuições do corpo, utilizasse então uma integração em relação ao volume do corpo, THORTON e MARION (2011), chegando à descrição a seguir:

$$\vec{F}_G = -Gm \int_V \frac{\rho(\vec{r}') \hat{r}}{r^2} dv' \quad (3.11)$$

A equação 3.11, mostra que como se trata de um corpo com distribuição de matéria contínua, trabalharemos com a densidade, $\rho(\vec{r}')$, dada em quilograma por metro cúbico, $[\text{kg}/\text{m}^3]$ e um elemento de volume $d\mathbf{v}'$, dado em metro cúbico $[\text{m}^3]$, evidenciando que só nos preocupamos com as dimensões do corpo \mathbf{M} , já que consideram-se essas dimensões muito maiores que o corpo \mathbf{m} , SERWAY e JEWETT JR. (2014a)

Caso tivéssemos uma Terra, homogênea de massa \mathbf{M} , esférica de raio \mathbf{R} e estática, o que foi descrito equação 3.10, seria suficiente para calcular a força que a Terra exerceria em qualquer corpo sobre sua superfície. Podemos simplificar a expressão na equação 3.11 substituindo os termos, \mathbf{G} , \mathbf{M} e \mathbf{R} por apenas um termo, já que todos os três são constantes. Adotamos o termo \mathbf{g} , que será chamado de campo gravitacional sendo definido como a força exercida sobre uma massa \mathbf{m} , imersa no campo gerado por \mathbf{M} , SERWAY e JEWETT JR. (2014a).

$$\vec{g} = -\frac{GM_T}{r_T^2} \hat{r} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (3.12)$$

O campo gravitacional também pode ser referido como aceleração da gravidade, caso estejamos querendo obter o campo gravitacional em um determinado ponto, ambas medida em $[\mathbf{m}/\mathbf{s}^2]$. Caso as considerações feitas de Terra homogêna, fossem verdadeiras, o valor de \mathbf{g} seria constante em qualquer ponto da superfície terrestre. Como a Terra apresenta variações no seu raio, apresenta movimento rotacional, além de uma distribuição de massa não uniforme em seu volume, o valor de \mathbf{g} oscilará ao longo na superfície, HALLIDAY *et al.* (2016a), logo a equação 3.12 pode ser melhor apresentada na relação 3.13.

$$\vec{g} = -G \int_V \frac{\rho(\vec{r}') \hat{r}}{r^2} dv' \quad (3.13)$$

Pode ser cansativo e áspera a resolução da equação 3.11, pois \mathbf{g} é uma grandeza vetorial, isso implica possuir magnitude, direção e sentido, por isso é interessante a definição de alguma grandeza que possa ser mais simples a sua resolução, definindo assim o potencial gravitacional, THORTON e MARION (2011), ϕ , sendo medido em $[\mathbf{m}^2/\mathbf{s}^2]$:

$$\phi = -G \frac{M}{r} \quad (3.14)$$

Ou, para uma distribuição contínua de massa.

$$\phi = -G \int_V \frac{\rho(\vec{r}')}{r} dv' \quad (3.15)$$

Sendo o potencial gravitacional, uma grandeza escalar, o que torna a resolução mais simples. Sua definição, equações 3.14 e 3.15, pode ser feita, devido ao fato do vetor aceleração da gravidade ser um vetor irrotacional ⁵, THORTON e MARION (2011), podendo assim relacionar o potencial gravitacional e a aceleração da gravidade através da seguinte relação.

$$g \equiv -\nabla\phi \quad (3.16)$$

Mesmo que essa definição, 3.16, venha para facilitar a resolução dos problemas, o significado físico de ϕ não está bem definido, para isso se deve tomar em considerar a função trabalho, medida em Joules [\mathbf{J}], HALLIDAY *et al.* (2016a). Por definição trabalho é:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{r} \quad (3.17)$$

Usando as relações 3.12 e 3.17, iremos obter:

⁵ $\nabla \times \vec{g} = 0$, ou seja, é um campo vetorial conservativo

$$dW = -m\vec{g} \cdot d\vec{r} \quad (3.18)$$

Sobre a relação 3.18, considerando então trabalho por unidade de massa

$$\frac{dW}{m} = -\vec{g} \cdot d\vec{r} \quad (3.19)$$

Utilizando a relação 3.16 e 3.19, obtêm-se:

$$\frac{dW}{m} = \nabla\phi \cdot d\vec{r} = d\phi \quad (3.20)$$

Descobrimos assim na equação 3.20 que o significado do potencial gravitacional é o trabalho realizado sobre unidade de massa que se encontra imersa dentro de um campo gravitacional, LOWRIE (2007). É muito comum associar a grandeza trabalho com a energia, pois trabalho é a transferência de energia, podemos então reescrever a equação 3.20 utilizando a energia potencial gravitacional:

$$dU_G = md\phi \quad (3.21)$$

Pode-se relacionar a energia potencial gravitacional com a força gravitacional, obtendo:

$$\vec{F}_G = -\nabla U_G \quad (3.22)$$

Percebe-se então, que tanto o potencial gravitacional quanto a energia potencial gravitacional tendem a crescer quando o trabalho é feito sobre o corpo de estudo, THORTON e MARION (2011).

Por vezes é muito comum na física a comparação entre duas áreas distintas com o propósito de verificar a possível relação e/ou utilizar ferramentas de uma área em outra. Aqui surge essa possibilidade na utilização de conceitos bem estabelecidos na eletrodinâmica, mais especificamente das equações de Maxwell, adotando os conceitos da lei de Gauss⁶. Assim se tem como objetivo obter o fluxo de potencial gravitacional através dessa superfície, SERWAY e JEWETT JR. (2014b).

Aplicando então a lei de Gauss para a gravitação, temos:

$$\phi = \int_S \vec{n} \cdot \vec{g} dA \quad (3.23)$$

Tomaremos certas facilidades para simplificar nossas interpretações, a primeira é como trataremos a aceleração da gravidade que aponta radialmente para dentro do corpo. Assim o produto escalar da equação 3.23, resultará em:

⁶Formulada por Carl Friedrich Gauss (1777 - 1855) em 1835

$$\phi = - \int_S g dA \quad (3.24)$$

O próximo ponto de análise será o de utilizar a relação 3.12, para um corpo qualquer \mathbf{m} , temos que, $\vec{\mathbf{g}} = \mathbf{G}\mathbf{m}/r^2$, substituindo então na equação 3.24, temos:

$$\phi = - \int_S \frac{Gm}{r^2} dA \quad (3.25)$$

A seguinte simplificação será definir uma área conhecida \mathbf{S} . Nesse caso tomaremos uma esfera, como sabemos que a área da esfera é $4\pi r^2$, ao substituir esse termo na equação 3.25 e resolvendo a integral iremos obter:

$$\phi = -4\pi Gm \quad (3.26)$$

Utilizando o resultado obtido nas equação 3.23 e 3.26 iremos obter então que:

$$\phi = \int_S \vec{\mathbf{n}} \cdot \vec{\mathbf{g}} dA = -4\pi Gm \quad (3.27)$$

A relação 3.27 é utilizada para situações onde o corpo \mathbf{m} tem uma dimensão bem definida e conhecida, mas caso seja um corpo com distribuição de massa em um certo volume desconhecido, devemos adaptar a relação, obtendo:

$$\int_S \vec{\mathbf{n}} \cdot \vec{\mathbf{g}} dA = -4\pi G \int_V \rho dv \quad (3.28)$$

Na equação 3.28 temos de um lado da relação uma integral relacionada a volume e outra relacionada a área, com isso pode-se utilizar o teorema da divergência de Gauss, GRIFFITHS (2011), obtendo então:

$$\int_V \nabla \cdot \vec{\mathbf{g}} dv = -4\pi G \int_V \rho dv \quad (3.29)$$

Como se trata de uma área e volume arbitrários obtemos então:

$$\nabla \cdot \vec{\mathbf{g}} = -4\pi G\rho \quad (3.30)$$

Com isso teremos a lei de Gauss aplicada à gravitação, vista na relação 3.30. Caso seja do interesse é muito comum não utilizar o campo potencial gravitacional \mathbf{g} e sim potencial gravitacional ϕ , daí:

$$\nabla^2 \phi = -4\pi G\rho \quad (3.31)$$

Sendo a equação 3.31 conhecida como equação de Poisson. Um caso especial é quando esse termo se iguala a zero, passando a ser conhecida como equação de Laplace, THORTON e MARION (2011).

Boa parte das relações descritas anteriormente mostram uma relação entre o campo gravitacional g e a densidade do objeto, logo o campo gravitacional terrestre está intrinsecamente relacionada à densidade ρ do planeta. O mesmo vale para rochas e minerais, que podem gerar valores anômalos de gravidade ⁷ em certas regiões. A quantidade de um certo elemento químico, influenciará diretamente em sua densidade e conseqüentemente nos valores gravitacionais, a tabela 3.2 mostra uma lista de rochas e suas respectivas variações de densidades, TELFORD *et al.* (1990).

Tabela 3.2: Tabela da Densidade de Rochas Comuns e Alguns tipos de Minérios

Rochas Sedimentares	Densidade em g/cm³
Dolomita	2.28 - 2.90
Arenito	1.61 - 2.76
Xisto	1.77 - 3.20
Calcário	1.93 - 2.90
Rochas Metamórficas	Densidade em g/cm³
Xisto	2.39 - 2.90
Mármore	2.60 - 2.9
Gneisse	2.59 - 3.00
Ardósia	2.70 - 2.9
Rochas Ígneas	Densidade em g/cm³
Granito	2.50 - 2.81
Riolito	2.35 - 2.70
Diabásio	2.50 - 3.20
Basalto	2.70 - 3.30
Gabbro	2.70 - 3.50

Fonte: Adaptado TELFORD *et al.* (1990)

Na tabela 3.2 fica evidente que entre os minérios que foram apresentados, há elementos mais densos em sua composição e acabam apresentando altos valores de densidade. Estando a densidade definida pelo conteúdo mineralógico e a porosidade da rocha.

3.5 Breve Histórico Sobre a Radiação

Novamente, as primeiras ideias sobre a composição da matéria remontam aos gregos no século V a.C., que tentavam descobrir como a matéria era formada. Inicialmente acreditavam que os elementos eram formados por quatro elementos básicos, terra, água, ar e fogo, elementos que eram observados pelos gregos, PIRES (2008).

Mesmo que essa concepção parecesse razoável para a época, ainda assim muitos gregos queriam descobrir a estrutura da matéria, e realizavam assim experimentos

⁷Diferenças entre os valores teórico e real da gravidade

com esse propósito. Um deles consistia em pegar rochas e quebrar a amostra quantas vezes forem necessárias até chegar um pedaço mínimo que não pudesse ser mais dividido, pedaço esse que veio a ser chamado de átomo ⁸, HEWITT (2015).

Essa ideia permaneceu esquecida durante séculos retornando à pauta no início do século XIX, quando o meteorologista Jonh Dalton (1766 - 1844), explicou as reações químicas supondo a existência dos átomos, HEWITT (2015).

Só anos depois, foi que ocorreram os primeiros passos que acarretaram no surgimento da física nuclear, mais especificamente no ano de 1896, quando o físico francês Antoine-Henri Becquerel (1852 - 1908) descobriu a radioatividade em compostos de urânio, SERWAY e JEWETT JR. (2012). Logo em seguida Marie Curie (1867 - 1934) fez a descoberta do polônio e rádio, dando origem ao termo radioativo, para se referir a esses elementos.

Esse passo dado por Becquerel e Curie incentivou inúmeros cientistas a investigarem a radioatividade e a natureza da matéria. No ano de 1897 foi descoberta a existência do elétron, descoberta essa que foi realizada por Sir Joseph John Thomson (1856 - 1940). A sua existência já era discutida entre os cientistas, tendo por definição uma carga negativa, mesmo que não soubessem a massa do elétron e a quantidade deles em um átomo. Como se sabiam que o átomo era eletricamente neutro, confirmava se então a existência de cargas positivas em igual quantidade a do número de elétrons, HALLIDAY *et al.* (2016c).

Outro avanço importante foi dado por Ernest Rutherford (1871 - 1937) no ano de 1911 ao descobrir que a radiação emitida pelos corpos poderia ser dividida em três categorias que dependiam da sua carga elétrica, habilidade de penetrar a matéria e ionização do ar, sendo então definidas como, **alfa** ⁹, **beta** ¹⁰ e **gama** ¹¹, SERWAY e JEWETT JR. (2012).

A emissão dessa energia se deve ao fato de certos isótopos serem instáveis, como mostra a Figura 3.4, logo para atingirem o equilíbrio emitem radiação, sendo conhecidos como isótopos radioativos.

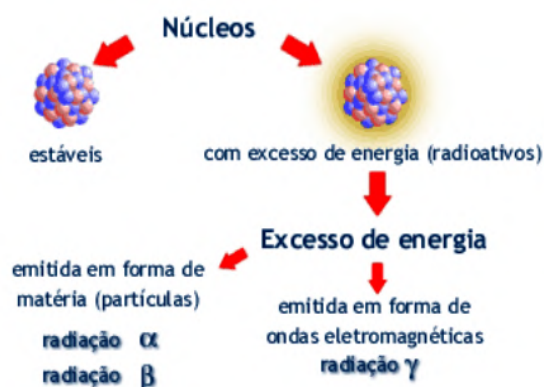
⁸a=não, tomo=divisão

⁹ α , a amostra perde dois prótons e dois nêutrons

¹⁰ β , o número de núcleos permanece o mesmo o que acontece é a emissão de um elétron ou pósitron)

¹¹ γ , núcleos excitados que emitem fótons de alta energia

Figura 3.4: Modelo simplificado do processo de emissão de radiação



Fonte: Extraído CARDOSO (2006)

Existem cerca de 50 elementos naturais que têm características radioativas, mas em sua maioria são raros ou com sinais muito fracos, KEAREY *et al.* (2009). Cabe ressaltar os três principais contribuintes da radiação das rochas: o potássio (^{40}K), tório (^{232}Th) e urânio (^{235}U e ^{238}U).

Outros elementos podem ser utilizados para estudo da radiometria, como por exemplo rubídio (^{87}Rb) e samário (^{147}Sm), mas por serem encontrados em menor quantidade, são utilizados em situações bem particulares, TELFORD *et al.* (1990).

O método radiométrico teve suas primeiras aplicações na geofísica na década de 30 do século XX, sendo utilizado para relacionar dados estratigráficos e poços de petróleo. Essa utilização teve um aumento significativo entre os anos de 1945 e 1957, voltando à cena nos anos 60 e 70 no auge da guerra fria. O uso desse método geofísico se deu pela procura de materiais que servissem como fonte de energia nuclear e conseguissem responder ao aumento da demanda energética do mundo, TELFORD *et al.* (1990).

3.6 Fundamentos Teóricos da Radiação

Para uma melhor compreensão desse tema se torna importante a definição das propriedades dos átomos, sendo esses formados, a grosso modo, por três partes: o nêutron (sem carga), próton (carga positiva) e elétron (carga negativa), HEWITT (2015). O núcleo de um átomo é formado pelas cargas positivas e neutras sendo envolvido pela eletrosfera, região onde se encontram os elétrons. Vale definir certas propriedades e como se simbolizar um átomo.

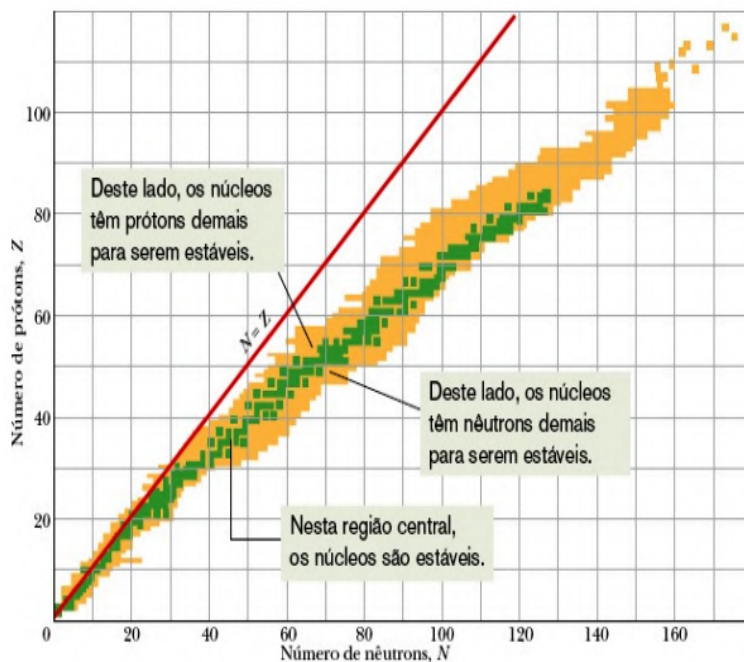
Define-se então o número atômico Z , como sendo igual ao número de prótons no núcleo, o número de nêutrons como N , e número de massa $A = N + Z$, SERWAY e JEWETT JR. (2012), adotando então a seguinte simbologia para representar um núcleo de um certo elemento:

$${}^A_ZX \quad (3.32)$$

Essa maneira de representar um núcleo, expressa na equação 3.32, é conhecida como nuclídeo. Os núcleos de um dado elemento podem conter o mesmo número Z , mas em sua maioria podem apresentar números diferentes de N , sendo que esses núcleos distintos, mas de um mesmo elemento são conhecidos como isótopos, SERWAY e JEWETT JR. (2012).

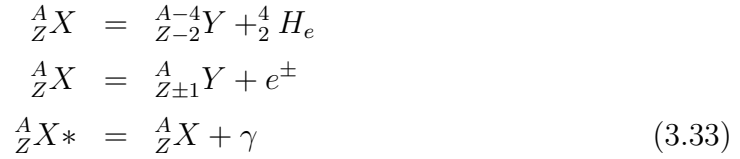
Um determinado elemento pode ter inúmeros isótopos, mas apenas um estável, os demais são instáveis e passarão pelo processo conhecido como decaimento que consiste na liberação de partículas e/ou energia e se tornarão núcleos estáveis, HALLIDAY *et al.* (2016c).

Figura 3.5: Esquemático com a representação dos nuclídeos relacionados pelos seus nêutrons e prótons



Fonte: Extraído HALLIDAY *et al.* (2016c)

A Figura 3.5, mostra como átomos mais leves e estáveis se encontram perto da reta onde $N = Z$ adquirindo assim a estabilidade, enquanto os instáveis apresentam um número diferente de N e Z . Para que os átomos instáveis se estabilizem eles devem emitir radiação de umas das maneiras descritas na seção 3.5, sendo elas **alfa**, **beta** e **gama** sendo que esses processos podem ser expressos em função dos nuclídeos, HALLIDAY *et al.* (2016c).



O conjunto de equações mostra 3.33 mostra de maneira simples as fórmulas que descrevem cada um dos processos de emissão de radiação **alfa**, **beta** e **gama**¹² respectivamente, que também são conhecidos como decaimentos radioativos, pode-se definir então, como ocorre o decaimento em certa amostra, SERWAY e JEWETT JR. (2012).

$$\frac{dN}{dt} = \lambda N
\tag{3.34}$$

A equação 3.34 mostra que a taxa de decaimento de um elemento é proporcional ao número de núcleos **N** não decaídos de uma amostra. Um cuidado que deve ser levado em conta é o fato de utilizarmos letras idênticas para o número de nêutrons e para o número de núcleos que não decaíram. O decaimento irá depender diretamente de uma constante chamada de constante de decaimento **λ**, SERWAY e JEWETT JR. (2012). Realizando algebrismos necessários na equação 3.34 iremos obter a equação 3.35, que mostra o comportamento exponencial dos núcleos de uma amostra que não sofreram o decaimento.

$$N = N_0 e^{-\lambda t}
\tag{3.35}$$

Onde **N₀** é quantidade inicial de núcleos que não decaíram. Vale definir então uma grandeza que mede a taxa de decaimento, definida como **R** mostrada na equação 3.36.

$$\left| \frac{dN}{dt} \right| = R
\tag{3.36}$$

Do mesmo modo em que podemos escrever a quantidade de núcleos com uma função exponencial o mesmo pode ser feito com a taxa de decaimento **R**, como pode ser visto na equação 3.37.

$$R = R_0 e^{-\lambda t}
\tag{3.37}$$

Percebe-se assim que tanto **N** quanto **R** diminuem com o tempo. Baseado nessa concepção de que ambos diminuem é interessante definir outro parâmetro o de meia vida, que consiste basicamente no tempo necessário para que metade de uma dada

¹²O termo * serve para representar um núclideo excitado

amostra decaia. Utilizando a equação 3.35 mas para uma determinada situação onde a quantidade de núcleos finais será metade da quantidade inicial, HALLIDAY *et al.* (2016c).

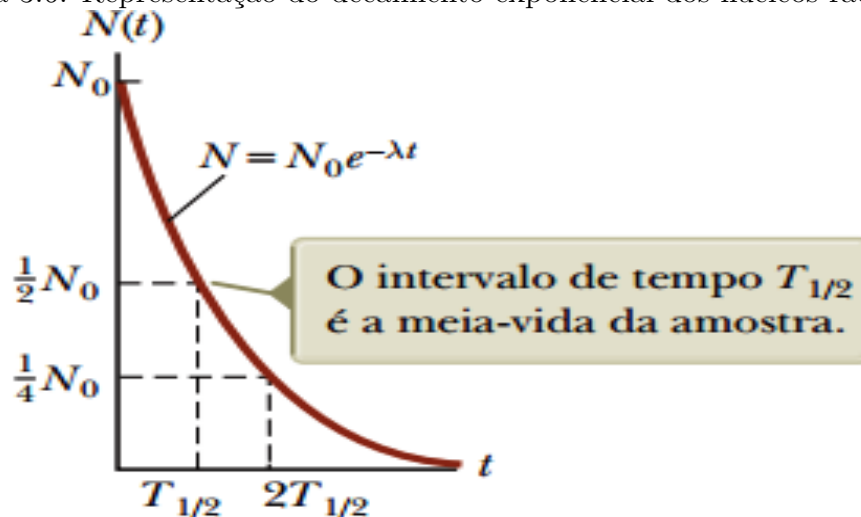
$$\begin{aligned} N &= N_0 e^{-\lambda t} \\ \frac{N_0}{2} &= N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \\ T_{1/2} &= \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \end{aligned} \quad (3.38)$$

A equação 3.38 descreve como obter a meia vida de um elemento. Um cuidado que deve ser tomado é que quando transcorrem duas meias vidas, não significa que todo o material decaiu e sim que decaiu a metade da amostra inicial e depois a metade que sobrou e assim por diante, HALLIDAY *et al.* (2016c).

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad (3.39)$$

A equação 3.39 relaciona quantos núcleos de uma amostra irão sobrar após n meias vidas, a Figura 3.6 expressa o comportamento exponencial da meia vida.

Figura 3.6: Representação do decaimento exponencial dos núcleos radioativos



Fonte: Extraído SERWAY e JEWETT JR. (2012)

A unidade em que se mede o decaimento pelo Sistema Internacional (**SI**) é o becquerel (**Bq**) que expressa um decaimento em um segundo, outra unidade é a Curie (**Ci**), onde $1 \text{ Curie} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$, mas por se tratar de um valor muito grande é muito comum medir em mili ou micro Curie, HALLIDAY *et al.* (2016c), para a emissão de radiação gama utiliza comumente o mega elétron-Volt (**MeV**) que equivale a $1,6022 \times 10^{-13} \text{ Joules}$.

A radioatividade das rochas surge quando em sua composição tem traços desses materiais radioativos, que são entrelaçados a sua estrutura durante o processo de formação da rocha, mas a rocha em si não importa já que os métodos procuram apenas pelos elementos radioativos, TELFORD *et al.* (1990).

Tabela 3.3: Tabela de Concentração de Potássio, Tório e Urânio nas Rochas

Tipos de Rochas	K em %	Th em ppm	U em ppm
Intrusivas			
Granitoides	0,3 - 4,5	0,4 - 7,8	2,3 - 45,0
Gnaisses	2,4 - 3,8	2,4 - 3,6	18,0 - 55,0
Pergmatito	2,5 - 5,5	0,3 - 1,0	0,3 - 9,6
Aplito	0,6 - 4,0	1,0 - 8	3 - 20,0
Quartzo Feldspato Pórfiro	1,0 - 5,0	1,3 - 2,9	6,0 - 14,0
Intrusivas Intermediárias	0,7 - 5,6	0,1 - 1,2	0,8 - 6,1
Intrusivas Máficas	0,1 - 0,8	0,0 - 1,1	0,0 - 3,1
Extrusivas			
Vulcânicas Extrusivas	2,0 - 4,4	1,4 - 13	13,0 - 28,0
Vulcânicas Intermediárias	1,8 - 4,1	0,9 - 5,6	1,5 - 15,0
Andesito Baixo valores de K	0,7 - 0,9	1,0 - 2,5	3,0 - 8,0
Vulcânicas Máficas	0,3 - 1,3	0,3 - 1,3	2,0 - 5,0
Vulcânicas Ultramáficas	0,2 - 0,9	0,3 - 0,9	0,0 - 4,0
Sedimentares			
Xisto Arqueano	0,4 - 1,6	0,3 - 0,8	1,5 - 5,0
Outros Xistos	0,1 - 4,0	1,6 - 3,8	10,0 - 55,0
Arenitos	0,0 - 5,5	0,7 - 5,1	4,0 - 22,0
Cabonáticas	0,0 - 0,5	0,4 - 2,9	0,0 - 2,9

Fonte: Adaptado DICKSON e SCOTT (1997)

Na tabela 3.3 retirada do trabalho DICKSON e SCOTT (1997), mostram as principais rochas que podem apresentar concentrações de potássio, tório e urânio. Onde potássio é um dos principais componentes da crosta terrestre com concentração média de 2,5% na parte continental e 0,4% na parte oceânica, sendo as rochas ácidas as principais que apresentam concentração desse elemento. O Tório aparece como elemento traço na crosta terrestre, chegando a ser três vezes mais abundante que o urânio, onde o urânio pode ser encontrado em maior concentração em rochas ácidas como granitos e riolitos. MIRANDA (2019).

Capítulo 4

Métodos

O estudo do planeta Terra envolve inúmeras ciências, dentre elas a que tem ganhado muito espaço, e adeptos seja pela sua qualidade, utilidade e/ou diferentes aplicações é a geofísica. De uma maneira simplista consiste na aplicação de princípios físicos no estudo da superfície, subsuperfície e interior do planeta. Ao realizar as medições de grandezas físicas na superfície, os resultados obtidos obviamente terão seus valores influenciados por características únicas das camadas do interior do planeta Terra, KEAREY *et al.* (2009). Logo a utilização dessas propriedades físicas abre um enorme leque de possibilidades, mas existe a necessidade de apontar seus prós e contras.

Segundo KEAREY *et al.* (2009), a geofísica tornou-se uma ciência extremamente vantajosa, pois como abrange uma variedade de métodos, é muito versátil, podendo ser aplicada em diferentes escalas, em ambientes remotos, além de uma aquisição rápida e de baixo custo operacional na maioria dos métodos.

Entretanto, segundo ROY (1962) devemos ressaltar a possibilidade da ambiguidade na interpretação, pois diferentes fatores podem influenciar as medidas realizadas na superfície. Sendo assim, necessitamos utilizar outras informações para amarração como dados de poços e/ou dois ou mais métodos geofísicos. Desta forma é praxe a utilização de pelo menos dois métodos geofísicos para eliminar essa ambiguidade.

Segundo TELFORD *et al.* (1990) os métodos geofísicos podem ser divididos em duas vertentes, os que utilizam as fontes naturais e os de fontes artificiais. Dentre os métodos que utilizam fontes naturais temos a magnetometria e a gravimetria, também conhecidos como métodos potenciais, por utilizarem os campos potenciais terrestres. Esse tipo de abordagem consiste em realizar estudos dos campos geomagnético e gravitacional da Terra e as variações registradas em relação ao campo principal na região, KEAREY *et al.* (2009).

As fontes artificiais utilizam técnicas de aplicação de energia de fontes controladas na superfície, como no caso dos métodos elétricos, eletromagnéticos e a sísmica, medindo os valores de grandezas físicas após a interação com solo. Assim fazem um mapeamento geofísico em profundidade das camadas em subsuperfície. Cada

método tem as suas particularidades, e apresenta respostas diferentes que devem ser compiladas e georeferenciadas para se obter assim, uma visão das estruturas geológicas em subsuperfície. O tipo de propriedade física à qual cada método responde determina o seu campo de atuação, KEAREY *et al.* (2009). Na tabela 4.1 estão listados alguns métodos e suas propriedades físicas.

Tabela 4.1: Métodos Físicos e Propriedade Medidas

MÉTODO GEOFÍSICO	PARÂMETRO MEDIDO	PROPRIEDADES FÍSICAS
Gravimétrico	Variações Espaciais do Campo Gravitacional	Densidade
Magnetométrico	Variações Espaciais do Campo Geomagnético	Suscetibilidade Magnética e Remanência
Radiométrico	Contagem por tempo	Radiação Ionizante
Sísmico	Tempo de Trajeto das Ondas Sísmicas refletidas e refratadas	Densidade e Módulos Elásticos das Ondas Sísmicas
Resistividade	Resistência da Terra	Condutividade Elétrica
Polarização Induzida	Voltagens de Polarização	Capacitância Elétrica
Potencial Espontâneo	Potenciais Elétricos	Condutividade Elétrica
Eletromagnético	Resposta a Radiações Eletromagnéticas	Condutividade e Indutância Elétrica
Radar	Tempo de Percurso de Pulsos de Radar refletido	Constante dielétrica

Fonte: Adaptado KEAREY *et al.* (2009)

A tabela 4.1 mostra as grandezas medidas junto com as propriedades físicas estudadas. De acordo com o foco do seu estudo, procura-se a propriedade física que responda mais adequadamente ao seu objetivo, por exemplo, enquanto o método magnético estuda materiais magnetizados, os métodos elétricos são apropriados para localização de lençóis freáticos, KEAREY *et al.* (2009) .

Os métodos como a magnetometria e a gravimetria muitas vezes são utilizados em conjunto, seja pela facilidade, pelo custo ou pela rápida aquisição, e em alguns casos em menor quantidade utiliza-se também o método radiométrico em conjunto com os dois citados, NAIDE e MATHEW (1998). Sendo esses três métodos utilizados neste projeto de pesquisa, onde os mesmos serão melhor explanados nas seções seguintes.

4.1 Métodos Magnetométricos

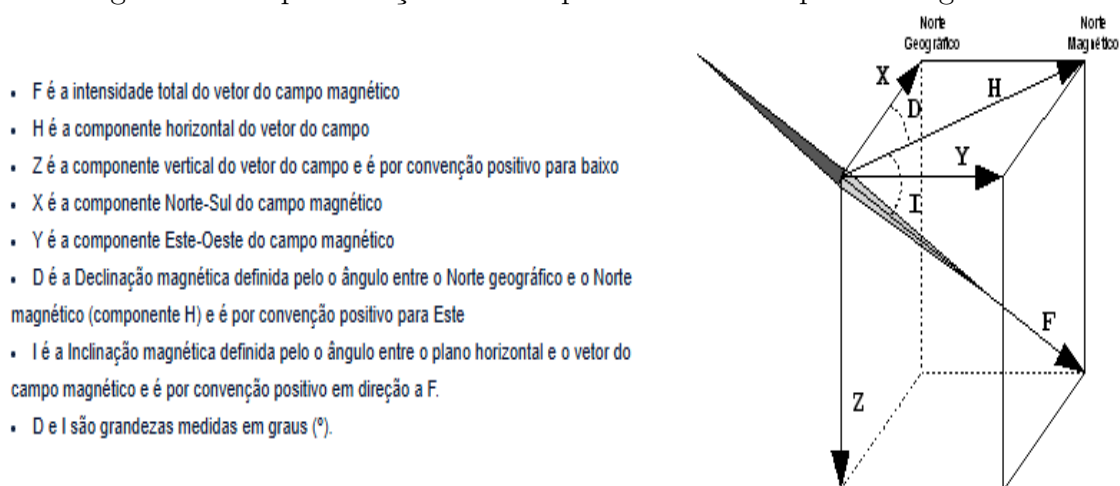
Esse método se baseia nas medidas do campo magnético e nas anomalias da crosta terrestre, já que as rochas com grande concentração de minerais ferromagnéticos causam uma distorção no campo magnético terrestre, distorção essa, provocada pelas diferenças entre as susceptibilidades das rochas da região.

Como boa parte das rochas não apresentam uma quantidade significativa de minerais ferromagnéticos em sua composição, TELFORD *et al.* (1990), quando observamos uma variação expressiva nos valores medidos, podemos supor tratar-se

de uma anomalia e então através de formulações matemáticas, estimar a sua possível forma e profundidade.

Nos levantamentos de campo, as anomalias magnéticas não são medidas diretamente e sim as suas componentes e podemos medir de três maneiras: I - medir X , Y e Z ¹; II – medir o campo total F ² com os ângulos de inclinação (I) e declinação (D); III – medir as duas componentes desse campo H e Z e o ângulo D . Na Figura 4.1 está representado um esquemático das componentes do campo magnético citadas.

Figura 4.1: Representação das componentes do Campo Geomagnético



Fonte: Extraído em

<<https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/geofisica/geomagnetismo/index.html>>

Acessado Março de 2021

Os elementos medidos que definem o campo magnético da Terra, são associados através das relações descritas em 4.1, LOWRIE (2007):

$$\begin{aligned}
 X &= F \cos I \cos D \\
 Y &= F \cos I \sin D \\
 Z &= F \sin I \\
 F^2 &= X^2 + Y^2 + Z^2 \\
 D &= \arctan \frac{Y}{X} \\
 I &= \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Qualquer que seja a opção utilizada na caracterização do campo magnético, as medidas são coletadas em observatórios, em estações fixas distribuídas pelo

¹Coordenadas Ortogonais

²Pode também utilizar a letra B, muito comum utilizar essas duas letras

planeta, ou através de levantamentos. No geral essas componentes deveriam ter um comportamento uniforme na superfície da Terra, mas segundo LOWRIE (2007) não é o que ocorre, devido às variações temporais do campo magnético, fortes alterações nas variações diurnas provocadas por efeitos externos, e outras interações como as explosões solares que afetam a ionosfera. Elas acarretam mudanças de valores do campo em toda a superfície do planeta, onde o campo magnético total varia de 25.000 nT a 70.000nT, entre as regiões do Equador e dos polos geográficos respectivamente, KEAREY *et al.* (2009).

Segundo KEAREY *et al.* (2009) podemos considerar que no centro da Terra, com uma inclinação de 11,5° em relação ao norte geográfico, estaria localizado um dipolo magnético teórico que corresponde a 90% do campo terrestre. Assim esse dipolo fictício centrado poderia ser calculado através de observações do campo.

Se este campo dipolar for subtraído do campo magnético observado, o campo residual pode então ter valores aproximados pelo efeito de um segundo dipolo, menor. O processo pode ser repetido para outros momentos dipolares, sempre subtraindo até que o campo geomagnético observado teórico atinja o grau de exatidão requerido. O efeito de cada dipolo fictício contribui para uma função conhecida como harmônica e a técnica de aproximações sucessivas do campo observado é conhecido como estudo dos harmônicos esféricos ³, KEAREY *et al.* (2009).

O método de harmônicos esféricos é adotado para obter a fórmula do Campo Geomagnético de Referência Internacional (IGRF), MILSOM (2002). O IGRF tem como propósito obter o valor do campo magnético teórico em qualquer parte do planeta. Sendo assim, em um levantamento, ao se subtrair o valor do IGRF regional dos dados medidos, obtêm-se apenas os valores magnéticos correspondentes às anomalias magnéticas das rochas na crosta e a variação diurna.

Um cuidado que deve ser tomado é o fato de que não existe propriamente dito um ímã gerando esse dipolo no interior do planeta, já que a temperatura do interior do planeta ultrapassa a temperatura de Curie (580°C). A explicação mais aceita sobre o campo dipolar é que ele é gerado no núcleo da Terra, que funciona como um grande dínamo. Esse campo magnético resulta do movimento de cargas energizadas ⁴, e do movimento de grande quantidade ⁵ de matéria no interior da Terra, KEAREY *et al.* (2009).

Sendo assim, o processo de levantamento dos dados magnéticos mede o campo gerado por esses dipolos fictícios, além das anomalias de interesse. A Figura 4.2 exemplifica uma situação ao mostrar duas fontes magnéticas, a fonte **A** por estar mais superficial causa um pico de maior amplitude no perfil, e a fonte **B**, por estar

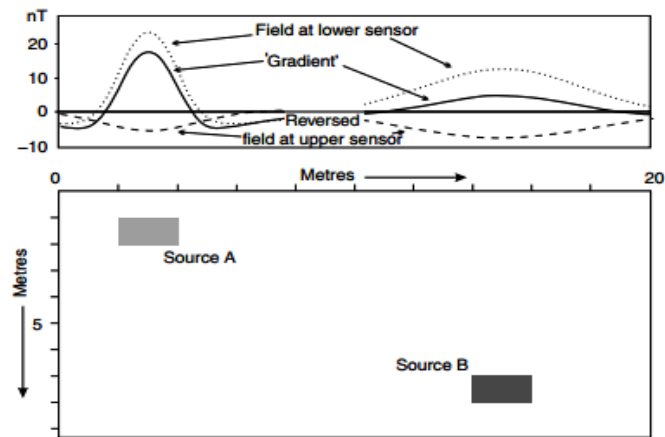
³Equivalente à análise de Fourier em coordenadas esféricas polares

⁴Correntes Elétricas

⁵Convecção

localizada mais profunda causa um sinal de menor amplitude. Assim percebemos que essas anomalias podem causar picos na escala de centenas de nT . A maioria das anomalias está nessa escala, sendo um valor muito menor do que o campo magnético total, por isso a necessidade de filtrá-lo, MILSOM (2002).

Figura 4.2: Exemplo de como as anomalias magnéticas devem ser apresentadas após a retirada do IGRF



Fonte: Extraído MILSOM (2002)

Os levantamentos magnetométricos têm uma fácil e rápida aquisição, por isso são muito utilizadas em diferentes áreas, podendo ser realizadas aquisição de dados na terra, mar e ar. A maioria das aquisições dos dados magnéticos é feita por levantamentos aéreos, que além de ser uma aquisição rápida, aumenta significativamente a área que pode cobrir em um dia, e permite acessar áreas mais remotas que seriam de difícil acesso em um levantamento terrestre. Independentemente da maneira que sejam aqistados os dados, poderão surgir interferências nas medidas, seja por agentes internos ou externos, assim são necessárias correções e compensações desses valores, MILSOM (2002).

4.1.1 Correções e Compensações dos dados Magnéticos

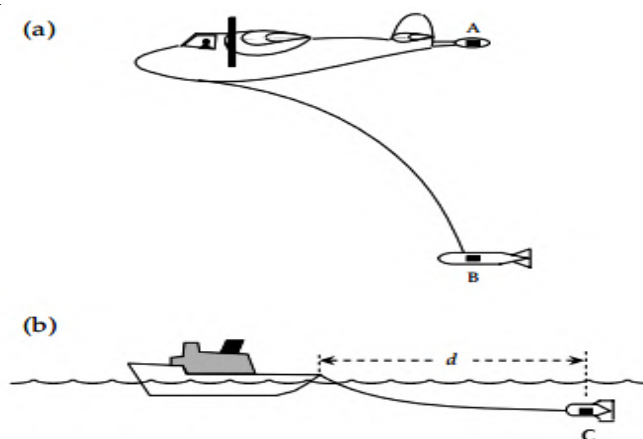
Os levantamentos (terrestres, aéreos e marítimos) realizados, além de medir o campo magnético terrestre (direção, sentido e/ou intensidade) podem captar falsas anomalias que são causadas por agentes externos. Então para garantir a qualidade dos dados é importante planejar a técnica de aquisição e equipamentos utilizados no projeto. Essas escolhas vão desde a experiência do observador, aparelhos de medições (alcance, precisão e exatidão), tipo de aeronavane (avião ou drone), hora da aquisição dos dados, além do tipo de sensor adotado (stinger, bird e fish). Todas as situações devem ser levadas em consideração, antes, durante, e depois da aquisição dos dados, MILSOM (2002)

Antes de serem usados como fonte de pesquisas e estudo, os dados devem ser analisados e tratados de tal maneira que sejam removidos quaisquer efeitos indesejados, que possam mascarar as anomalias foco do estudo.

Correção Magnética Dinâmica

Esta é a primeira etapa a ser realizada, ao definir qual sensor será adotado. Entre os sensores temos Stinger, Bird (a) e Fish (b) (Padrão fish é exclusivo de embarcações), sendo visto esses padrões na Figura 4.3.

Figura 4.3: Exemplo dos tipos de sensores: A é conhecido como Stinger, o B como Bird e C como Fish

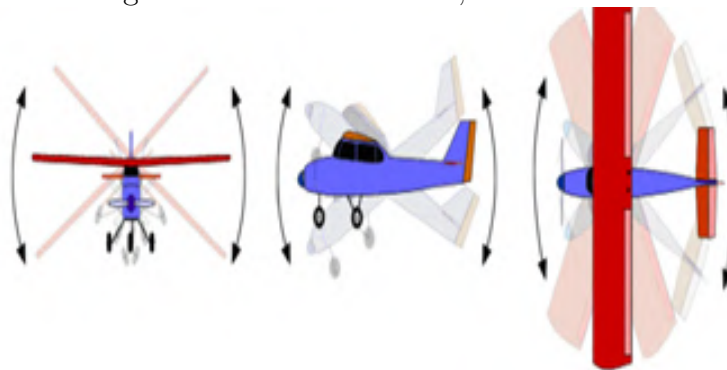


Fonte: Extraído LOWRIE (2007)

Definido o sensor utilizado para coleta dos dados então começa-se a correção propriamente dita, que consiste em verificar como a carcaça da aeronave e seu voo irão influenciar nos dados coletados. Este processo é realizado antes mesmo da aeronave começar o voo, e repetido durante o voo em diferentes alturas para controle, sendo que essa correção dinâmica está associada à fuselagem e ao movimento da aeronave, que podem interferir nas medições, MILSOM (2002).

Depois das medidas de checagem em terra, começa o processo de medida em diferentes alturas, que consiste em analisar como a variação na velocidade e pequenas oscilações na direção das linhas de voo podem influenciar nos dados. Nesta etapa são realizadas certas manobras ao longo das linhas de voo, com variação angular entre cinco e dez graus, como mostra a Figura 4.4. Sendo esses movimentos controlados, reproduzem possíveis desvios que podem ocorrer durante a aquisição dos dados, CPRM (2010).

Figura 4.4: Manobras Roll, Pitch e Yaw.



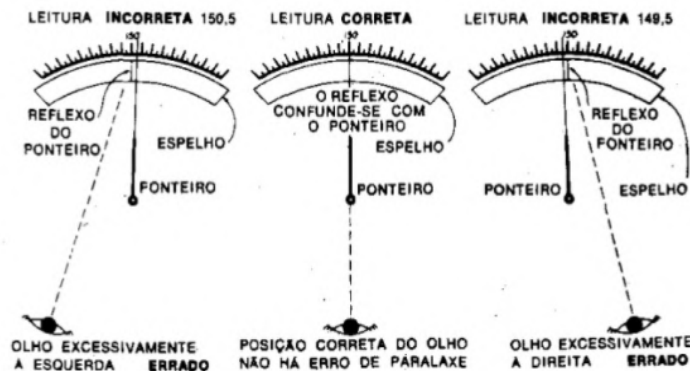
Fonte: Extraído CPRM (2010)

Essas manobras são conhecidas como Roll (movimento onde as asas inclinam-se sobre o eixo longitudinal) , Pitch (onde o bico do avião e cauda inclinam-se transversalmente em relação a linha de voo) e Yaw (onde o bico e a cauda se movem no plano das linhas de voo). Estas manobras são realizadas em cada eixo do plano das linhas de voo. Assim obtêm-se os coeficientes das variações que surgem nas medições em relação à fuselagem, movimento, velocidade e oscilações na rota. Esses coeficientes são adicionados aos dados adquiridos, realizando assim a primeira correção, CPRM (2010).

Correção erro de Paralaxe (Lag)

O erro de paralaxe é um grande problema que pode surgir em medições realizadas em aparelhos analógicos, pois estão sujeitos a desvios ópticos que levam a erros de leituras, como visto na Figura 4.5, onde o ângulo em que é realizada a medição gera valores discrepantes.

Figura 4.5: Exemplo de um erro de Paralaxe



Fonte: Extraído <<https://pt.slideshare.net/tomvgp/apresentaoprominpmidas2-100121162547phpapp02>>
Acesso Março de 2021

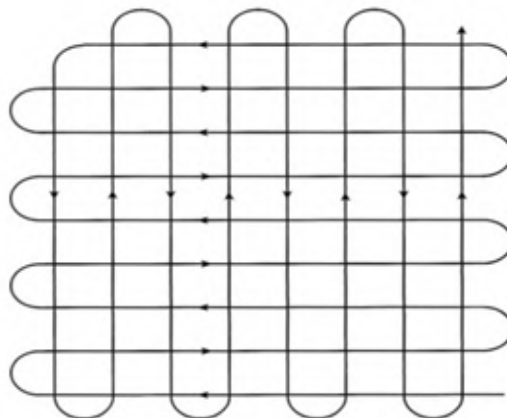
Em aparelhos digitais esse erro de leitura não surge devido ao desvio óptico durante a medição, logo não deveria ser considerado em aerolevantamentos com aparelhos digitais. Mas esse problema surge devido a outro efeito, o movimento da aeronave e o momento em que ocorrem às medições. O aparelho, por melhor que seja sua eficiência, não consegue medir o valor de campo em um local instantaneamente. Então, enquanto o aparelho tenta medir a aeronave já se trasladou, e sendo assim, surge uma defasagem entre os tempos das aquisições dos dados e do movimento da aeronave.

Para corrigir esse erro é necessário que o avião sobrevoe uma região de uma anomalia conhecida, ou em grandes altitudes, para medir apenas o campo magnético, sem a influência das anomalias. Pode ser útil, alternativamente, fazer o voo em sentidos opostos sobre a mesma região. Com isso, as duas medidas estarão defasadas por causa do erro de paralaxe. Ao fazer coincidir as feições nas linhas de voo iremos corrigir esse erro, que basicamente consiste em deslocar a medição do campo magnético em função do tempo, CPRM (2010).

Correção da Variação Diurna

Os dados aqúistados estarão sujeitos a variações do campo magnético ao longo do dia, sendo necessário a sua correção. A maneira mais comum é a implantação de uma estação base, que consiste na utilização de um magnetômetro de base, um aparelho dentro da área de levantamento, pois assim qualquer variação no campo será captada, como por exemplo, tempestades magnéticas, MILSOM (2002).

Figura 4.6: Exemplo de linhas de voo.



Fonte: Extráido KEAREY *et al.* (2009)

A Figura 4.6 mostra um exemplo de planejamento das linhas de voo e linhas de controle. Os pontos de interseção servirão para verificar a diferença de medidas do campo magnético, conseguindo fazer o nivelamento dos conjuntos de dados, KEAREY *et al.* (2009).

Correções de Erros não Sistemáticos (Nivelamento e Micronivelamento)

Como descrito anteriormente, inúmeros fatores podem acarretar em erros e um erro muito comum do aerolevanteamento é o aparente deslocamento das linhas paralelas, que pode surgir ao longo do processo de aquisição e tratamento dos dados.

A maneira de corrigir isso seria o nivelamento e o micronivelamento. O modo mais simples é a utilização de filtros para o nivelamento e para o micronivelamento, fazendo com que qualquer desnível e ruído que existam nas medições sejam eliminados, CPRM (2010).

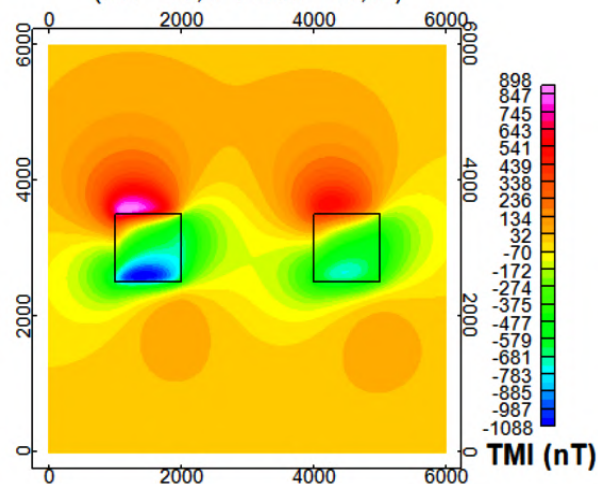
Correção Geomagnética - IGRF

Este processo consiste na remoção do IGRF regional dos dados coletados. Como já descrito anteriormente o IGRF é o campo magnético teórico não perturbado usado com referência para determinar o campo teórico de um determinado local, permitindo assim que os dados resultantes sejam apenas das anomalias, KEAREY *et al.* (2009). Na construção do IGRF foi utilizada a rotina com mesmo nome do Oasis Montaj, onde leva-se em consideração a latitude e longitude de toda a região de estudo, ou seja, obtêm o IGRF de toda a região.

4.1.2 Filtragem dos Dados magnéticos

As filtragens consistem basicamente em pegar os dados corrigidos e compensados, e aplicar filtros que melhor caracterizem as anomalias das fontes geradoras. Existe uma variedade significativa de filtros, aqui serão discutidos alguns deles e seus propósitos.

Figura 4.7: Exemplo de uma anomalia magnética sintética gerada por dois cubos (Inc=-17,9° / Dec=-19,5°)



Fonte: Extrair de BELLO (2014)

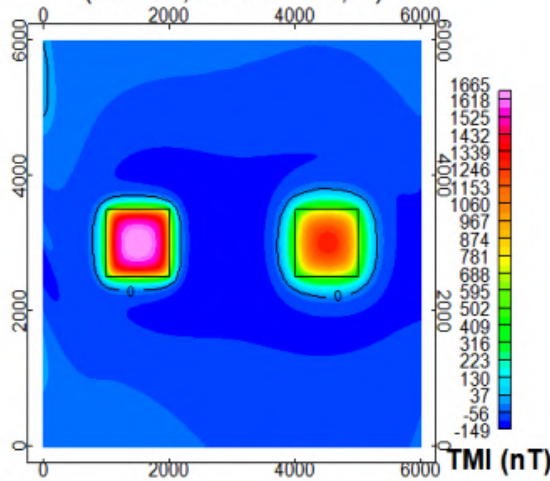
A Figura 4.7 mostra duas anomalias sintéticas com formatos cúbicos que serão usadas como referência para explicar melhor os filtros utilizados.

Redução ao Polo (RTP)

O filtro RTP é uma ferramenta que auxilia na interpretação, pois transforma uma anomalia de caráter dipolar em uma anomalia monopolar, BARANOV (1957) e BARANOV e NAUDY (1964). Segundo BELLO (2014) este filtro desloca o máximo da anomalia, fazendo com que se localize exatamente em cima do corpo causador.

Este filtro consiste, basicamente, em eliminar os efeitos gerados pela inclinação e pelo azimute, ou seja, a remoção faz com que os dados simulem a situação de polarização na vertical, que só é vista nos polos, permitindo assim definir melhor as anomalias da região, já que simplifica a interpretação das fontes magnéticas, como pode ser visto na Figura 4.8, eliminando assim a dependência da direção da indução do campo geomagnético TELFORD *et al.* (1990).

Figura 4.8: Exemplo de uma anomalia magnética Reduzido ao Polo
(Inc=-17,9° / Dec=-19,5°)



Fonte: Extráido BELLO (2014)

Esse filtro regido pela equação 4.2, mostra como a redução L é definida, dependendo da inclinação, I , e da declinação, D , do local das medições, levando em conta a inclinação, I_α , que será usada para a correção.

$$L = \frac{[\sin(I) - i \cos(I) \cos(D - \theta)]^2}{[\sin^2(I_\alpha) + \cos^2(I_\alpha) \cos(D - \theta)][\sin^2(I) + \cos^2(I) \cos(D - \theta)]} \quad (4.2)$$

Segundo BELLO (2014) esse filtro torna-se instável quando, na equação 4.2, todo o denominador é igual a zero, causando uma descontinuidade na equação. Por isso, este filtro se torna instável quando é aplicado em dados de muito baixa latitudes, podendo ser utilizado para valores de mais ou menos 20 graus de latitude.

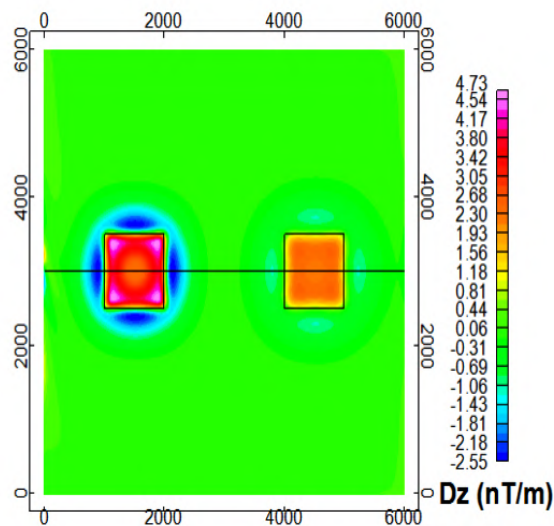
Primeira Derivada Vertical

É um procedimento teórico-matemático aplicado com o objetivo de realçar as anomalias magnéticas, na fase de interpretação, e associa-las a estruturas geológicas. A primeira derivada vertical mede a taxa de variação do campo magnético anômalo na proporção em que se distancia ou se aproxima verticalmente da fonte causativa, BLAKELY (1995), podendo ser aplicadas derivadas direcionais de ordem N .

$$F\left(\frac{\partial^n f}{\partial z^n}\right) = k^n F(f) \quad (4.3)$$

Na equação 4.3 temos \mathbf{F} como a representação de Fourier, \mathbf{k} pode ser o número de onda ou a frequência, onde a equação é dependente da ordem \mathbf{n} aplicada na derivação. Mas é pouco provável a utilização de ordem superior a dois, pois os efeitos de filtragem podem acabar filtrando demais as frequências dos seus dados excluindo algum corpo causador de alguma anomalia. Mesmo com essa “limitação” esse filtro continua sendo muito útil para determinar os contatos entre os corpos e realçar as anomalias magnéticas causadas por fontes mais rasas.

Figura 4.9: Aplicação da Derivada em Z



Fonte: Extráido BELLO (2014)

Esse filtro tem como principal objetivo definir melhor as bordas das anomalias rasas, CORDELL e GRAUCH (1985), já que as anomalias de curto comprimento

e maior gradiente são realçadas, sobressaindo falhas e contatos. A aplicação desse filtro pode ser visto na Figura 4.9.

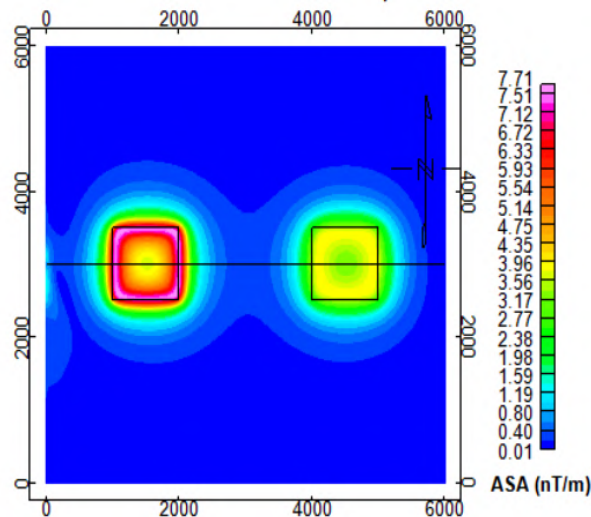
Amplitude de Sinal Analítico (ASA)

A amplitude do sinal analítico (equação 4.4) é obtida pela combinação do gradiente vertical z e do gradiente horizontal (x, y) do campo magnético anômalo (\mathbf{T}) . Este método define a forma geométrica (bordas) do corpo magnético e não depende das suas direções de magnetização, NABIGHIAN (1972) e NABIGHIAN (1974).

$$|ASA(x, y)| = \sqrt{\left[\frac{\partial T}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{\partial T}{\partial y}\right]^2 + \left[\frac{\partial T}{\partial z}\right]^2} \quad (4.4)$$

Aplicando o filtro ASA nota-se que as amplitudes máximas surgem nos limites dos corpos que se encontram em profundidades rasas. Ele tem como objetivo obter regiões com magnetização remanescente intensa, visto na Figura 4.10.

Figura 4.10: Amplitude de Sinal Analítico aplicado aos dados sintéticos



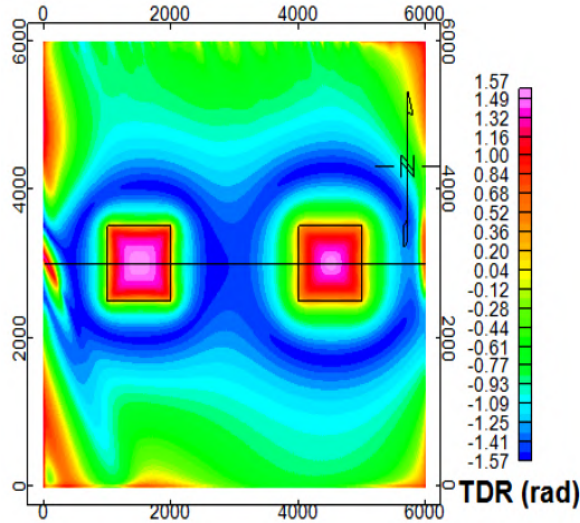
Fonte: Extráido BELLO (2014)

Percebe-se na Figura 4.10 que as anomalias são posicionadas no centro dos corpos, sendo assim em muitos casos pode ser usado para estimar profundidade de contatos verticais, LI (2006)

Derivada Tilt (TDR)

Esse filtro (equação 4.5) é usado para mostrar estruturas de fontes rasas, que podem ser alvo de exploração, que foram encobertas por outras fontes ao calcular a inclinação da derivada de um mapa, mostrando assim estruturas com tendência linear, como mostra 4.11.

Figura 4.11: TDR aplicado aos dados sintéticos



Fonte: Extráido BELLO (2014)

Sendo muito comum utilizar esse filtro após aplicar o filtro redução ao polo concluindo que as maiores intensidades se encontram no centro do corpo e não nos limites dos mesmos, MILLER e SINGH (1994). Sendo esse filtro descrito pela equação 4.5

$$TDR = \arctan \left(\frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\sqrt{\left[\frac{\partial T}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{\partial T}{\partial y}\right]^2}} \right) \quad (4.5)$$

É facilmente percebido que a equação do tilt (4.5) é formada pela divisão da derivada vertical de primeira ordem na equação 4.3, pelo gradiente horizontal total.

Continuação para cima e Continuação para baixo (Upward Continuation e Downward Continuation)

Esses filtros (equação 4.6) têm como objetivo simular os dados magnéticos com diferentes distâncias em relação à superfície do solo, como se o levantamento tivesse ocorrido em alturas diferentes daquelas à qual foram adquiridos os dados. O fato de o campo magnético obedecer à equação de Laplace implica na possibilidade de uso desse método, pois pode se criar diferentes superfícies arbitrárias desde que não haja perda ou acréscimo de massa, BLAKELY (1995).

$$L(k) = e^{\pm 2\pi kh} \quad (4.6)$$

A equação apresentada (4.6) engloba a continuação para cima e para baixo, onde a continuação para cima utiliza o sinal (-) sendo muito útil para remover a influência de anomalias mais superficiais e com baixa intensidade, que podem estar funcionando como fontes de ruídos. A continuação para baixo que utiliza o sinal (+), tem como objetivo se aproximar da superfície do terreno, ou seja, das fontes mais rasas que geram anomalias. Sendo que em ambos os casos a equação dependerá dos índices \mathbf{h} e \mathbf{k} , que respectivamente equivalem a altura e ao número de onda. O filtro de continuação para cima pode ser usado também para separação regional/residual, MILLIGAN e GUNN (1997).

Passa Baixa, Passa Alta e Passa Banda

São filtros com objetivo de selecionar determinadas frequências de interesse nos dados, definido por FRASER *et al.* (1966). Na aplicação desses filtros, certas frequências são mantidas e outras eliminadas. O filtro passa baixa manterá um valor abaixo do definido pelo observador, como era de se esperar o passa alta deixará passar valores acima do definido, enquanto que o passa banda deixará dados dentro de uma janela definida, BLAKELY (1995).

Deconvolução de Euler

Esta técnica se baseia na equação da homogeneidade de Euler, descrita por Leonhard Euler (1707 – 1783), quem demonstrou que para funções homogêneas ⁶ a seguinte equação é válida:

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = \eta f \quad (4.7)$$

A deconvolução de Euler (4.8) baseia-se na resolução da equação de homogeneidade de Euler apresentada acima, sendo desenvolvida nos trabalhos de THOMPSON (1982) e REID *et al.* (1990), onde o segundo trabalho implementou o algoritmo do primeiro para estudo em três dimensões.

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = \eta(B - T) \quad (4.8)$$

Sendo uma técnica que tem como objetivo estimar a profundidade do topo de diferentes tipos de corpos. A deconvolução de Euler pode ser utilizada nos dados dos métodos, gravimétricos e/ou magnetométricos. Mas, segundo OLIVEIRA (2005) não é possível estimar a geometria das camadas. As estruturas são identificadas pelo termo η chamado de índice estrutural (SI) que tem como propósito identificar a

⁶Uma função homogênea é aquela que, se sofrer transformação em suas variáveis, resulta em uma outra função que é proporcional à função original, INTRILIGATOR (1971)

forma do corpo, tendo seus valores mostrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores do índice estrutural e as respectivas formas dos corpos.

Índice	Campo Magnético	Campo Gravimétrico
0	Contato	Dique Vertical, soleira ou falha
0.5	Contato Inclinado (Falha)	Dique Fino
1	Dique Vertical ou Soleira	Cilindro Vertical
2	Cilindro Vertical (Chaminé) ou Horizontal	Esfera
3	Esfera ou Dipolo	-

Fonte: Tabela baseada nos valores de índices estruturais apresentados no Oasis Montaj, utilizando os valores estabelecidos por REID *et al.* (1990).

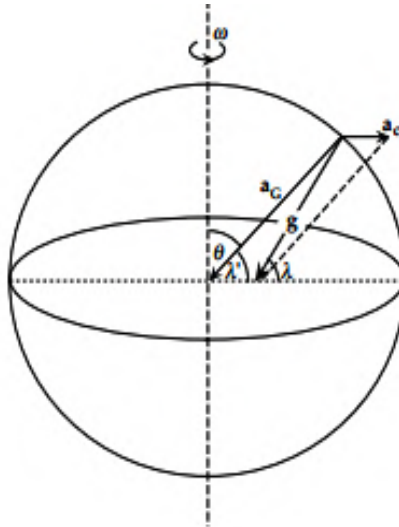
O método descrito na deconvolução de Euler tornou-se uma ferramenta utilizada na área da geofísica devido a possibilidade de sua aplicação para determinação de diferentes estruturas geológicas, mesmo que a deconvolução não crie modelos geológicos propriamente ditos e sim forneça informações que podem ser usadas para criar esses modelos.

4.2 Métodos Gravimétricos

Esse método se baseia na medição do campo gravitacional terrestre e as variações oriundas das rochas existentes na crosta. Diferentes do método magnetométrico, que se baseia na medida da susceptibilidade das rochas, aqui a propriedade a ser estudada é a variação da densidade das rochas em subsuperfície. Na literatura RIBEIRO e MOLINA (2018), utilizam o termo corpo causador, ou fonte, para definir um corpo gerador de uma perturbação (anomalia) no campo gravitacional em comparação a outras rochas ao seu redor. Sendo assim, as anomalias que irão surgir em levantamentos gravimétricos ocorrem pela diferença de densidades entre o corpo causador e as rochas vizinhas.

As anomalias Gravimétricas, não existiriam se a Terra fosse homogênea, tivesse a massa distribuída de maneira igualitária, não existisse diferença de raio entre os polos e o equador, não existisse diferença na topografia, estivesse estática e não estivesse sujeita a atração gravitacional de outros corpos celestes. A existência desses fatores acaba influenciando no campo gravitacional, surgindo assim inúmeras alterações nos valores esperados, variações estando na casa do $100 \mu \text{ m/s}^2$, um valor irrisório se comparado com o valor do campo gravitacional de $9,8 \text{ m/s}^2$. Logo é comum trabalhar com a unidade de **mGal** que equivale a 10^{-3} cm/s^2 , KEAREY *et al.* (2009).

Figura 4.12: A Força Gravitacional na superfície da Terra é influenciada por inúmeros fatores



Fonte: Extraído LOWRIE (2007)

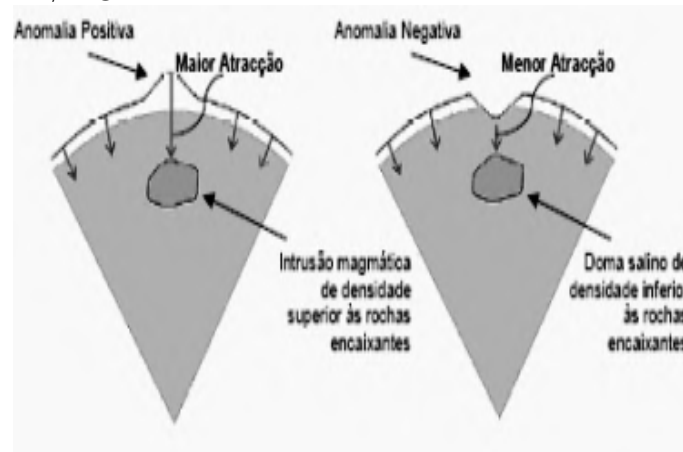
A Figura 4.12 exemplifica uma situação onde os efeitos de rotação e o formato da Terra não podem ser desprezados na obtenção da gravidade. Do mesmo modo que existe uma equação para obter o campo magnético, foi definida uma equação para obter o campo gravimétrico, nomeado de Fórmula Internacional da Gravidade, adotada em 1967, MILSOM (2002), mostrada na equação 4.9:

$$g_{normal} = 9780318.5 + 51629.27 \sin^2 \lambda + 229.5 \sin^4 \lambda \quad (4.9)$$

Essa equação 4.9 descreve a gravidade levando em consideração a latitude do ponto onde foi realizada a medição, MILSOM (2002), sendo esta equação medida em gu (gravity unit), onde $1 \text{ gu} = 0,1 \text{ mGal}$, TELFORD *et al.* (1990). Tomando como base a gravidade no Equador, ela tem o mesmo propósito do IGRF, pois serve para obter o valor de gravidade em qualquer ponto do globo. Ao retirarmos os valores do campo gravitacional dos valores medidos nos levantamentos obtêm então o valor de gravidade associado as anomalias gravimétricas na área de estudo, associadas aos diferentes valores de densidade das rochas.

A Figura 4.13 mostra como as diferenças de densidade entre as rochas influenciam em seus dados. A imagem da esquerda mostra uma rocha com maior densidade que a rocha que a circunda e com isso resulta numa anomalia positiva nos dados. Enquanto que a imagem da direita mostra uma rocha com densidade menor gerando uma anomalia negativa, KEAREY *et al.* (2009).

Figura 4.13: Exemplo de como rochas com diferentes densidades podem gerar anomalias positivas/negativas nos dados



Fonte: Extraído <<https://blogarciencia.files.wordpress.com/2012/01/2-metodos-estrutura-e-dinc3a2mica-da-geosfera.pdf>>

Acesso Março de 2021

Os primeiros aparelhos de medições gravimétricas surgiram ao acaso, inicialmente tinham como propósito a criação de um aparato sísmico. Além de serem muito robustos e de necessitarem muito tempo para realizar as medições, não eram muito práticos nem precisos. Hoje em dia, com a evolução tecnológica surgiram novos tipos de aparelhos bem menores e que são muito mais rápidos em adquirir os dados, KEAREY *et al.* (2009).

A aquisição dos dados gravimétricos hoje em dia ocorre em áreas terrestres e marinhas, pois as aquisições aéreas têm custos muito elevados.

4.2.1 Reduções Gravimétricas

Do mesmo modo que os dados magnéticos, os dados gravimétricos podem sofrer com agentes externos. Segundo LAFEHR (1991), antes de utilizar os dados adquiridos de um levantamento gravimétrico para interpretação, é necessário aplicar as reduções necessárias referentes às variações do campo gravitacional da Terra, que não representem os contrastes de densidade das rochas subjacentes. São elas:

Fator de Escala Instrumental

Em muitos casos os aparelhos usados na gravimetria não expressam os valores medidos nas unidades básicas, miliGal ou microGal e sim em valores instrumentais. Para essas situações se deve então aplicar a correção do fator de escala instrumental. Desta forma converte-se uma leitura do aparelho para um valor relativo (em miligal), baseado em uma tabela de calibração do gravímetro, fornecida pelo fabricante, que

varia de aparelho para aparelho (equação 4.10).

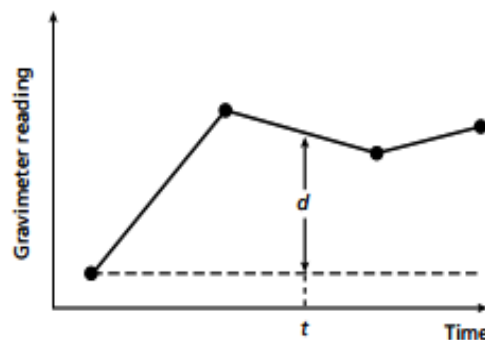
$$r_c = rS_r \quad (4.10)$$

Onde r_c é o valor da medida corrigida para miliGal pelo fator de escala do instrumento, r é a leitura do aparelho, em unidades do contador e S_r o fator de conversão da tabela do gravímetro.

Correção de Deriva Instrumental

Esta correção é baseada na realização de medidas sucessivas ao longo do dia em bases gravimétricas onde se conhece o valor de g previamente. Feito isso plota-se um gráfico da relação das medidas de g em função do tempo, para que então se obtenha o desvio das medidas, visto na Figura 4.14 um exemplo de gráfico da deriva.

Figura 4.14: Deriva Instrumental: Curva construída com valores de leituras repetidas em um ponto



Fonte: Extraído KEAREY *et al.* (2009)

O valor de deriva é calculado com base no erro de fechamento em cada loop ou jornada diária entre a primeira e última leitura feita na estação base, estando expressa na equação 4.11:

$$d = \frac{(r_{b2} - r_{b1})(g_{b2} - g_{b1})}{t_{b2} - t_{b1}} \quad (4.11)$$

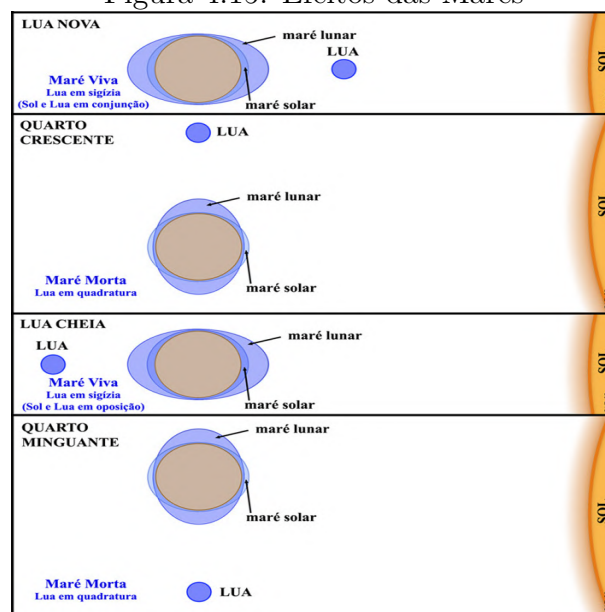
Onde d será a deriva que deverá ser subtraída do valor observado, r_b é a medida realizada na base ocupada, g_b o valor de gravidade conhecida e t_b a hora em que foi realizada a medição.

Correção de Maré

Ao medir a gravidade em um lugar fixo ao longo do dia o seu valor está sujeito a mudanças devido às grandes massas do Sol e Lua que estão em movimentos periódicos.

A superfície da Terra não é um sistema inercial, estando sujeita ao efeito de maré causada pela atração gravitacional entre esses corpos celestes, além do movimento rotacional em seu próprio eixo, THORTON e MARION (2011). O efeito de maré não surge apenas para as grandes massas de água, surge também devido à maré terrestre, que consiste na deformação elástica da crosta devido as interações gravitacionais entre a Terra, Sol e Lua. Surge assim um efeito de elevação em alguns centímetros da estação quando posicionada sobre a crosta terrestre. A intensidade dessas alterações varia de acordo com a latitude, a hora do dia, o mês, o ano, onde o ciclo completo acarreta em oscilações aproximadamente de 0.3 mGal, LUIZ e SILVA (1995)

Figura 4.15: Efeitos das Marés



Fonte: Extraído CARDOSO (2007)

Esse efeito é conhecido por variações de maré, visto na Figura 4.15. Sendo extremamente necessário ser anotado o dia e a hora em que foram realizadas as medições para então aplicar está correção (equação 4.12).

$$r_t = r_c + tide \quad (4.12)$$

Onde r_c é o valor da medida corrigida pelo fator de escala do instrumento, **tide** é o efeito de maré e r_t é o valor corrigido de maré. A equação que descreve o efeito de maré é uma equação muito complexa, sendo essa baseada no trabalho de LONGMAN (1959).

Caso o processo de aquisição dos dados ocorra em um intervalo de tempo onde não ocorra um efeito de maré significativo, ao aplicar a correção de deriva instrumental já estará eliminando o efeito de maré, KEAREY *et al.* (2009).

Correção de Altura do Instrumento

Do mesmo modo em que o efeito de maré causa a variação de alguns centímetros que devem ser corrigidos, vale o mesmo para a altura do aparelho, fazendo correção em cada medida r_h .

$$r_h = r_t + 0.308596h \quad (4.13)$$

Onde na equação 4.13, temos que r_h é o valor da medida corrigida em função da altura do aparelho em relação ao solo, r_t é o valor corrigido pelo efeito de maré e h a altura do aparelho no solo usada para correção.

Gravidade Absoluta

A gravidade absoluta consiste na conversão da atração gravitacional da Terra para a estação onde foram feitas as medidas.

$$g_{obs} = g_b + (r_h - r_b) - (t_h - t_b)d \quad (4.14)$$

Obtemos assim através da equação 4.14, g_{obs} , sendo essa a gravidade absoluta ou observada, utilizando g_b como o valor da gravidade medido na estação base, r_h medições realizadas no local de interesse corrigidas da altura do instrumento, r_b medições realizadas na estação base, t_h hora da medida na estação de interesse, t_b hora da medida na estação base e da correção da deriva instrumental do aparelho, d .

Correção de Latitude

O valor da gravidade varia de acordo com a localização da estação na Terra, e por isso é necessário ter conhecimento de um valor teórico da gravidade na estação, assim como a latitude da região onde foi realizada a aquisição de dados, sobre o esferoide terrestre.

$$g_\phi = g_o + [1 + c_1 \sin^2(\phi) + c_2 \sin^4(\phi)] \quad (4.15)$$

A equação 4.15 é conhecida como fórmula de Clairaut, onde g_o é a gravidade observada no equador ao nível do mar com valor de **978031,85 mGal**, c_1 e c_2 , ambas constantes, com valores respectivos de **0.005278895** e **0.000023462**, definem a formula Internacional da Gravidade (1967). Esses valores foram melhor definidos por ECKER e MITTERMAYER (1969), para tentar minimizar os erros. O valor de gravidade obtido também é conhecido como gravidade teórica, MILSOM (2002).

Anomalia Ar Livre

A anomalia free-air (equação 4.16) é obtida ao subtrair do valor \mathbf{g}_{obs} a correção de latitude e adicionando uma correção para a elevação das estações medidas, LOWRIE (2007).

$$g_{al} = g_{obs} - g_{\phi} + 0.308596h_e \quad (4.16)$$

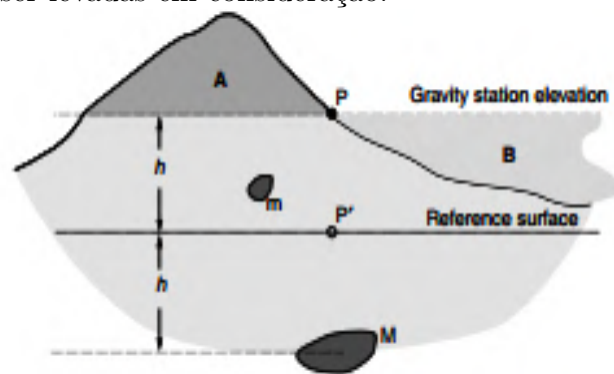
Anomalia Bouguer

Na anomalia free-air não levamos em consideração os efeitos gravitacionais geradas pelas rochas ao redor, a anomalia Bouguer considera e remove esses efeitos, LOWRIE (2007).

$$g_{bou} = g_{obs} - g_{\phi} + 0.308596h_e + 0,0419088\rho h_e \quad (4.17)$$

Com a equação 4.17 obtém-se a anomalia Bouguer ao somar ou subtrair um fator que depende da densidade ρ ⁷ e da elevação \mathbf{h}_e da estação. Soma-se essa anomalia ao valor da gravidade \mathbf{g}_{ϕ} , caso as medidas tenham sido feitas em alto mar e subtrai caso tenha sido feito em terra.

Figura 4.16: Exemplo de correção de Bouguer, mostrando como as diferenças de topografia devem ser levadas em consideração.



Fonte: Extraído MILSOM (2002)

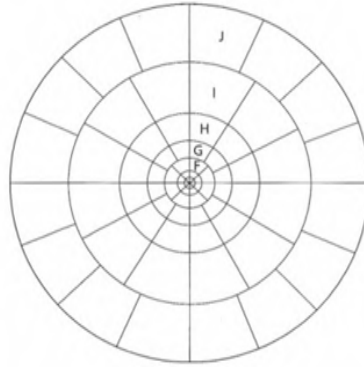
A Figura 4.16 mostra como diferentes topografias e corpos podem alterar seus dados.

Correção de Terreno

É realizada através das cartas de Hammer, KEAREY *et al.* (2009), visualizadas na Figura 4.17.

⁷Considerando a densidade média da crosta, nesse caso 2,67 kg/m³

Figura 4.17: Divisão de setores em forma de discos concêntricos em relação à região de medição.



Fonte: Extraído KEAREY *et al.* (2009)

A carta de Hammer consiste em dividir a região observada em vários setores em formato de anéis concêntricos em relação, ao ponto de medição, com raios que variam de 2 m a 21,9 km, pois acima desse valor a contribuição gravimétrica pode ser desprezada, permitindo assim calcular a atração gravitacional de cada setor.

$$g_{ct} = 04191 \frac{\rho}{n} (r_{ext} - r_{int} + \sqrt{r_{int}^2 + z^2} - \sqrt{r_{ext}^2 + z^2}) \quad (4.18)$$

Essa correção, como visto na equação 4.18 dependerá da densidade do ambiente ρ , dos números de setores n , dos raios internos r_{int} , externos r_{ext} de cada setor junto com o módulo, z , da diferença entre a elevação média do setor e da elevação do ponto de observação.

Essa anomalia é a que mais necessita de tempo durante o processamento de dados gravimétricos, mas em situações onde a topografia é suave, sem muitas variações de terreno, ela pode ser descartada.

Anomalia Bouguer Completa

A anomalia Bouguer Completa, redefine o cálculo da Bouguer levando em conta as atrações gravimétricas das massas topográficas existentes nas vizinhanças da estação de medida. Sendo a contribuição de todas as anomalias descritas acima, a equação 4.19 define como obter o valor que pode ser usado para estudar as anomalias gravitacionais da região, LOWRIE (2007).

$$g_{cbou} = g_{bou} + g_{ct} \quad (4.19)$$

A equação 4.19 mostra como obter a anomalia bouguer completa levando em consideração todas as reduções.

Correção Residual

Os dados gravimétricos podem estar afetados em muitas situações por anomalias de grande amplitude, já que representa o campo total, contendo componentes com diferentes frequências, associadas a diferentes profundidades, onde todas essas camadas contribuem para os valores gravimétricos.

Sendo então necessário para a realização a separação regional-residual, a aplicação de tratamentos e filtragens com esse propósito, eliminando assim sinais oriundos de grandes profundidades para que possamos estudar anomalias mais rasas, segundo NETTLETON (1971) a separação regional-residual pode ser realizada de várias formas: via gráfico, espectro e filtro polinomial.

A técnica adotada nesse trabalho, é o método de mínimos quadrados (melhor ajuste polinomial) para a obtenção da anomalia Bouguer Residual, com intuito de observar a tendência da anomalia, minimizando os valores entre os dados medidos e os estimados, utilizando polinômios de grau variados (entre 0 e 9), onde cada grau acarretará em uma superfície, e onde quanto maior for o grau maior será a remoção dos dados.

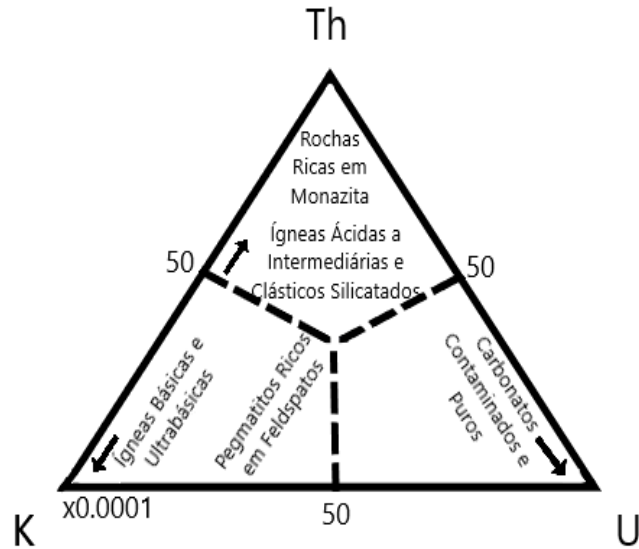
4.3 Métodos Radiométricos

O método radiométrico é uma técnica geofísica que mede a intensidade da radiação emitida pelos radioelementos Potássio, Tório e Urânio, encontrados nas rochas, KEAREY *et al.* (2009). As principais fontes de radiação detectadas na superfície são oriundas da desintegração natural do potássio (^{40}K) e dos elementos da série urânio (^{235}U e ^{238}U) e do tório (^{232}Th).

A principal aplicação do método radiométrico é o chamado mapa ternário dos elementos radiométricos, que é gerado a partir da associação de determinadas cores a cada um dos radioelementos.

Geralmente sendo as cores RGB (Red, Green e Blue), para o potássio (%) e o tório e urânio em (ppm). Dessa forma as cores se associam a cada um dos vértices de um triângulo equilátero, com gradações variando de acordo com cada um dos elementos.

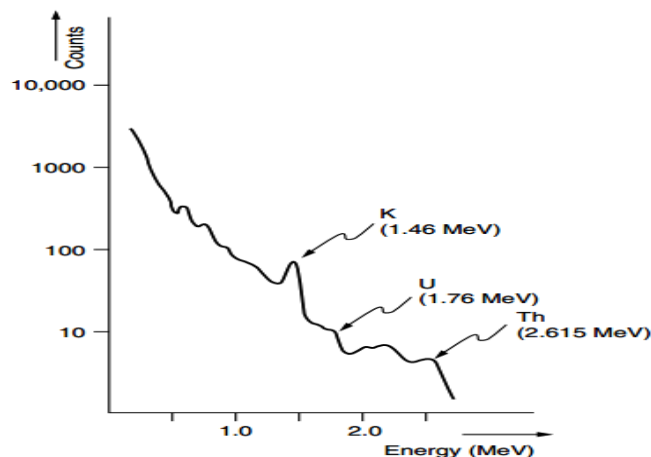
Figura 4.18: Quantidade Relativa dos elementos radioativos das rochas.



Fonte: Extraído KEAREY *et al.* (2009)

A Figura 4.18 mostra um diagrama ternário da composição dos três elementos representando a intensidade relativa, este mapa temático é muito utilizado nos levantamentos radiométricos, sejam eles, terrestres, ou aéreos. O objetivo é captar a emissão natural de raios gama dos isótopos de potássio, tório e urânio. Como a emissão desses elementos é bem distinta, pode-se então estimar a concentração desses elementos nas rochas.

Figura 4.19: Gráfico do espectro de emissão de raios gama indicando a faixa de energia e seus radionuclídeos



Fonte: Extraído MILSOM (2002)

A Figura 4.19 um gráfico do comportamento das radiações emitidas pelos elementos, onde tem-se picos de **1,46 MeV** para o potássio, **2.615 MeV** para o tório e **1,76 MeV** para urânio. Uma observação importante é que os isótopos de tório e

urânio não emitem radiação gama e sim os isótopos filhos que são os produtos que nascem do decaimento desses elementos, RIBEIRO *et al.* (2013). Por isso não se refere a porcentagem desses elementos nas rochas como é feito no caso do potássio, e sim se utiliza o termo tório equivalente (**eTh**) e urânio equivalente (**eU**) para representar as estimativas das concentrações desses elementos nas rochas.

As radiações gama emitidas pelos elementos nas rochas são inversamente proporcionais à densidade das mesmas, sofrendo uma grande atenuação em seus valores. Logo pode sofrer influências de agentes externos que estejam localizados entre os sensores de medições e a superfície. A melhor situação onde se devem medir as emissões são os campos abertos, mas mesmo assim as medições só conseguem captar sinais bem rasos, cerca de 30 a 40 cm, RIBEIRO *et al.* (2013). Uma vantagem é que ela não é tão atenuada pelo ar, isso possibilita que os levantamentos possam ocorrer com a utilização de aeronaves, tornando assim um processo de aquisição bem rápido.

4.3.1 Correções Radiométricas

Como citado anteriormente, a radiação gama é atenuada por certos fatores que podem interferir nas medidas de concentração. Para garantir a qualidade dos dados devem-se adotar padrões rígidos na aquisição dos dados, semelhantes aos dos levantamentos magnetométricos. Segundo IAEA (2003), as medidas em taxas de contagem (cps) não dependem exclusivamente das concentrações dos radioelementos existentes na superfície, mas o equipamento utilizado e a altura nominal de voo também influenciam. Outro ponto a se destacar são os testes e calibração dos sensores, utilizados para correção nos dados das concentrações dos elementos radioativos (K, TH, U e CT) coletados durante os levantamentos.

As correções adotadas nos levantamentos radiométricos são as seguintes: tempo morto, cálculo da altura efetiva de voo, remoção do Background (Aeronave, Cósmico e Atmosférico), correção do efeito Compton, correção altimétrica, conversão para concentração dos elementos.

Tempo Morto

O tempo que o espectrômetro leva para processar cada pulso medido é chamado de tempo morto, pois durante esse processo o aparelho não registra novos dados, acarretando assim, em uma defasagem. A correção dessa lacuna consiste em pegar a quantidade de contagens realizadas durante o tempo total do levantamento e normalizar em relação a cada canal e suas respectivas contagens. Em média os valores obtidos estão na casa de **5-15 μ /pulso**, IAEA (2003).

$$N = \frac{n}{1 - C_t t} \quad (4.20)$$

A equação 4.20, calcula o valor \mathbf{N} das contagens corrigidas por segundo, utilizando \mathbf{n} o valor das contagens observadas por segundo, \mathbf{C}_t é a contagem total de todos os canais e \mathbf{t} o tempo morto do equipamento IAEA (2003).

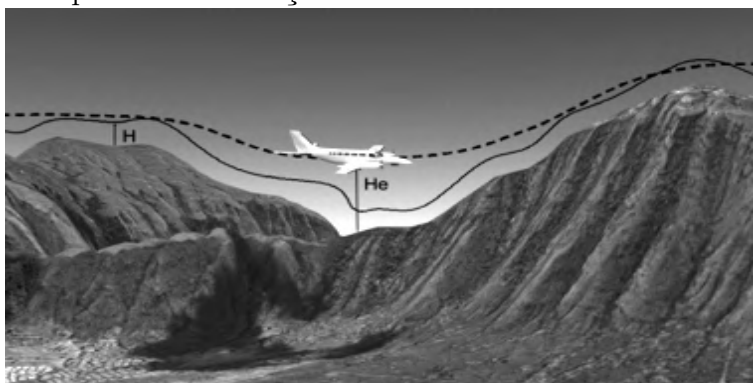
Cálculo da Altura Efetiva (H_e) do Voo

Pelo fato da altura de voo não se manter constante ao longo dos levantamentos, os valores medidos de contagem irão oscilar, mesmo que a radiação seja menos atenuada pelo ar, o ajuste dependerá diretamente da pressão e temperatura, IAEA (2003).

$$H_e = H \left(\frac{273,15}{T + 273,15} \right) \left(\frac{P}{1013,25} \right) \quad (4.21)$$

A equação 4.21 mostra como obter a altura \mathbf{H}_e nominal, dada em metros, que dependerá diretamente da altura real \mathbf{H} , da pressão dada em milibar e da temperatura dada em graus Celsius, IAEA (1991).

Figura 4.20: Esquema das variações de altura nominal e da altura real do voo



Fonte:Extraído RIBEIRO *et al.* (2013)

A Figura 4.20 mostra como as variações de altura ocorrem ao longo do levantamento.

Remoção do Background da Aeronave e Cósmico

Essa correção consiste em acrescentar a cada uma das janelas as influências da aeronave e a radiação cósmica de fundo.

$$n = a + bn_{cos} \quad (4.22)$$

A equação 4.22 mostra como obter \mathbf{n} que é a contribuição da aeronave e da radiação cósmica, que dependerá da influência \mathbf{a} da aeronave, do valor \mathbf{b} que é a razão entre a contagem em uma determinada janela e a contagem no canal cósmico e \mathbf{n}_{cos} sendo as contagens observadas no canal de radiação cósmica, IAEA (2003).

As estimativas dos valores associados aos coeficientes são feitas durante o Voo Cósmico (Cosmic Flight), realizado geralmente sobre uma grande superfície de água (um lago, por exemplo) em diferentes alturas de voo, RIBEIRO *et al.* (2013).

Remoção do Background do Radônio Atmosférico

Os efeitos da radiação associada a concentração de radônio atmosférico, influência os valores de contagem de urânio. Como radônio é um isótopo filho da série do tório, acarreta numa distribuição não uniformemente ao longo da atmosfera. Então será necessária a utilização de duas configurações nos detectores, chamadas de *downward – looking* e *upward – looking*, RIBEIRO *et al.* (2013). Essa configuração consiste de um detector upward parcialmente blindado, só captando radiação de uma direção, nesse caso capta a radiação vinda de cima, ou seja, da atmosfera. Já o detector downward, realiza o inverso.

$$U_r = \frac{u - a_1U - a_2Th + a_2b_t - b_u}{a_u - a_1 - a_2a_t} \quad (4.23)$$

A equação 4.23 mostra como obter a remoção da influência gerada pelo radônio U_r , que dependerá da contagem upward u de urânio, da contagem downward U de urânio, da contagem de tório e de constantes a_1 , a_2 , a_u , a_t , b_u e b_t que dependerão de uma calibração adequada dos aparelhos, IAEA (2003).

Correção do Efeito Compton

Essa correção consiste em retirar a influência de canais de maior energia dos canais de menor energia, ou seja, a influência do tório sobre o urânio, tório sobre o potássio e urânio sobre potássio.

Correção Altimétrica

As correções altimétricas devem ser feitas para eliminar falsas anomalias geradas pela topografia. Segundo IAEA (1991) a correção pode ser expressa como a seguir, pois as taxas de contagens têm variações exponenciais com a altura.

$$N_H = N_0 e^{-\mu H} \quad (4.24)$$

Sendo obtido através da equação 4.24 a correção altimétrica N_H que dependerá da contagem N_0 no solo, da μ atenuação e da altura H já corrigida pelo cálculo da altura efetiva do Voo.

Razões Radiométricas

As rochas podem apresentar concentrações distintas de **K**, **Th** e **U**, visto que esses elementos apresentam características distintas. Os primeiros produtos criados são os mapas das contagens individuais de cada elemento além do mapa de contagem total. Cria-se a partir disso, produtos secundários.

As razões entre esses elementos (**U/Th**, **U/K** e **Th/K**), é um produto secundário, possuindo como intuito, destacar a diferença de concentração entre os radionuclídeos, RIBEIRO *et al.* (2013), sendo útil no estudo de alterações hidrotermais ⁸.

Fator F

O **Fator F** é outro produto secundário derivado das contagens individuais, sendo representando pela equação 4.25

$$F = K \frac{eU}{eTh} \quad (4.25)$$

O **Fator F** descrito inicialmente por EFIMOV (1978), depende diretamente das contagens de cada elemento (**K**, **Th** e **U**), onde em seu mapa ocorre um realça de **K** e **U** em relação ao **Th**.

Regiões com um intenso intemperismo tendem a apresentar valores para o parâmetro **F** muito baixos, enquanto que maciços rochosos enriquecidos através de ação hidrotermal, tendem a apresentar altos valores de **F**, RIBEIRO *et al.* (2013).

Mapa Ternário

Sendo esse produto gerado ao contrastar as concentrações dos três elementos, associando a cada um deles uma cor, no padrão RGB, é associado o vermelho (R) para o potássio, verde (G) para o tório e azul (B) para o urânio.

As concentrações variam de acordo com o teor de cada um dos elementos, a cor branca representa altas concentrações dos três elementos, enquanto que a cor preta é associada às baixas concentrações, RIBEIRO *et al.* (2013).

⁸Originado por soluções aquecidas ascendentes, que podem depositar sais ou alterar minerais preexistentes.

Capítulo 5

Metodologia

Para desenvolver este trabalho, o primeiro passo foi realizar uma pesquisa bibliográfica para coletar informações geológicas, geomorfológicas e geofísicas da área. Em uma segunda etapa, foi feita uma avaliação se os dados geofísicos disponíveis recobriam toda área do trabalho.

Ao iniciar a montagem dos bancos de dados verificou-se que, devido à grande massa de dados e extensão da área, havia a necessidade de um computador com maior capacidade de processamento. Então o orientador disponibilizou um computador com as seguintes características: processador Intel® Core i7-8700 CPU 3200Hz 3.19Hz e memória Ram 16Gb. Neste computador foi instalada uma licença do programa Oasis Montaj, versão 9.8 da Geosoft, disponibilizada pelo co-orientador para desenvolvimento do trabalho, a Figura B.1 mostrada no apêndice B mostra de maneira simplista, os menus e a ordem de utilização.

Os dados magnéticos e radiométricos que foram utilizados como fonte desse estudo são do Projeto Aerogeofísico do Espírito Santo, código 1093, publicado em 2010. Estes dados em formato XYZ ASCII foram disponibilizados do repositório digital do Serviço Geológico Brasileiro - CPRM. As linhas de voo e de controle têm espaçamento de 0,5 km e 10 km, respectivamente, com altura de voo de 100 m. O período do levantamento foi entre 05/09/2009 e 18/01/2010, CPRM (2010). Durante a criação dos três bancos de dados foi adotado o método de projeção UTM 24 S.

Diferente dos dados magnetométricos e radiométricos, que são oriundos de apenas uma fonte, os dados gravimétricos terrestres em formato ASCII, são provenientes de diferentes fontes e foram coletados em datas distintas (CPRM, ON, Petrobras e IAG-USP). Após uma plotagem das estações e análise das informações dos canais, se optou pelos dados levantados pela USP, compostos por 642 estações (sendo apresentado na Figura C.1 do apêndice C.), por apresentarem uma distribuição espacial mais homogênea, recobrando a área de estudo na sua totalidade.

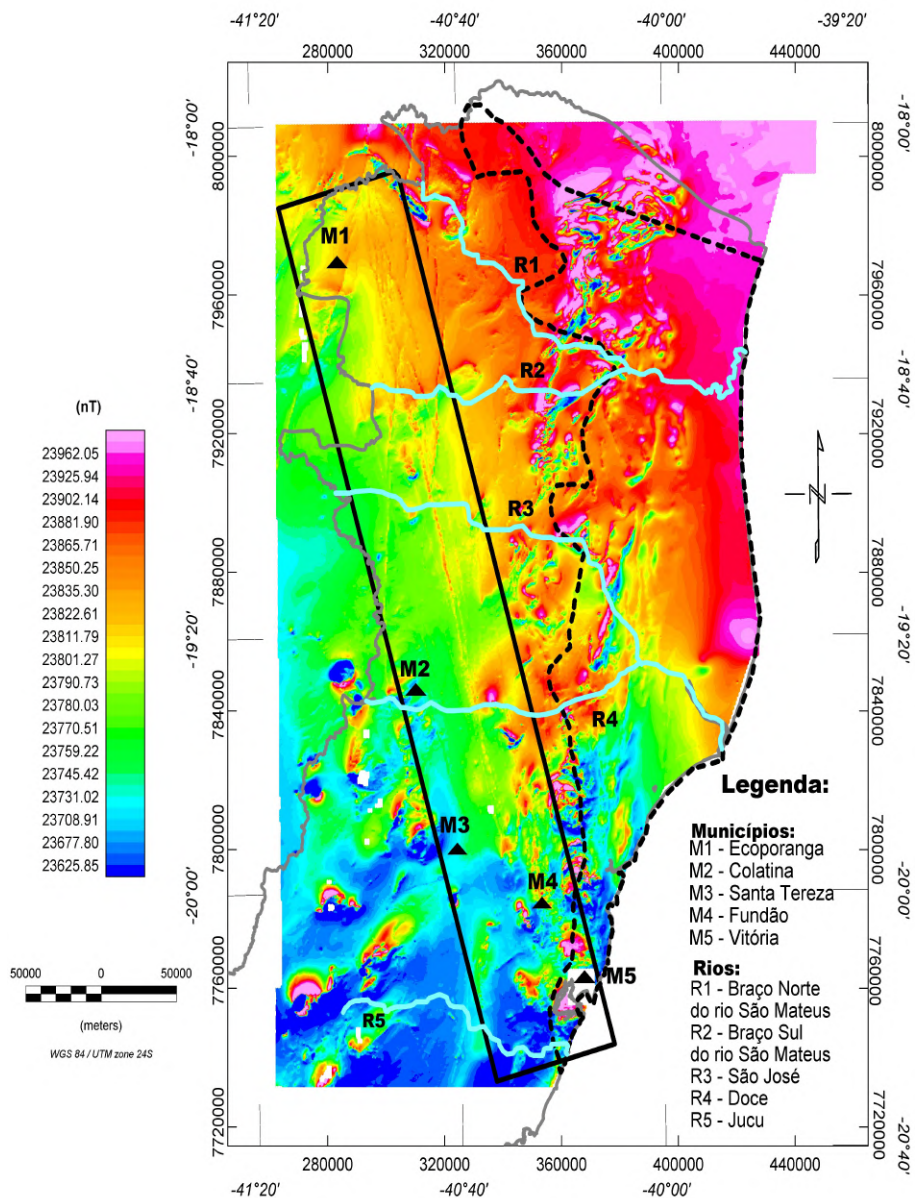
5.1 Dados Magnetométricos

O database dos dados magnéticos era composto pelos seguintes campos: coordenadas (UTM N, UTM E, Latitude e Longitude), elevação, data da aquisição, hora da aquisição, campo magnético bruto e campo magnético medido na base. Após a checagem dos campos, e definição do datum WGS 84 e método de projeção zona 24 S, foram aplicadas as compensações e correções aos dados, conforme descrito na 4.1.1

Assim, após a aplicação das correções dinâmicas, lag e variação diurna, retirada de rúidos e spikes, foram então realizadas a etapa de nivelamento e micronivelamento, CPRM (2010). A rotina Grid and Image/Oasis Montaj foi utilizada para geração dos grids pelo processo de mínima curvatura com malhas de 125 x 125 metros, correspondendo a 1/4 do espaçamento das linhas de voo. O primeiro mapa gerado, o do campo magnético total, é mostrado na Figura 5.1. O processo de gridagem consiste na criação de uma malha, com células do mesmo tamanho e espaçamento em um sistema de coordenadas definido.

Para realizar esse trabalho foi utilizada a rotina de Nivelamento e Micronivelamento do Oasis Montaj, pois FILHO e FERREIRA (2003) fizeram um estudo comparativo entre o método de MINTY (1991) e o método da GEOSOFT (2001), optando pela da geosoft, pois foi o que apresentou melhor resultado.

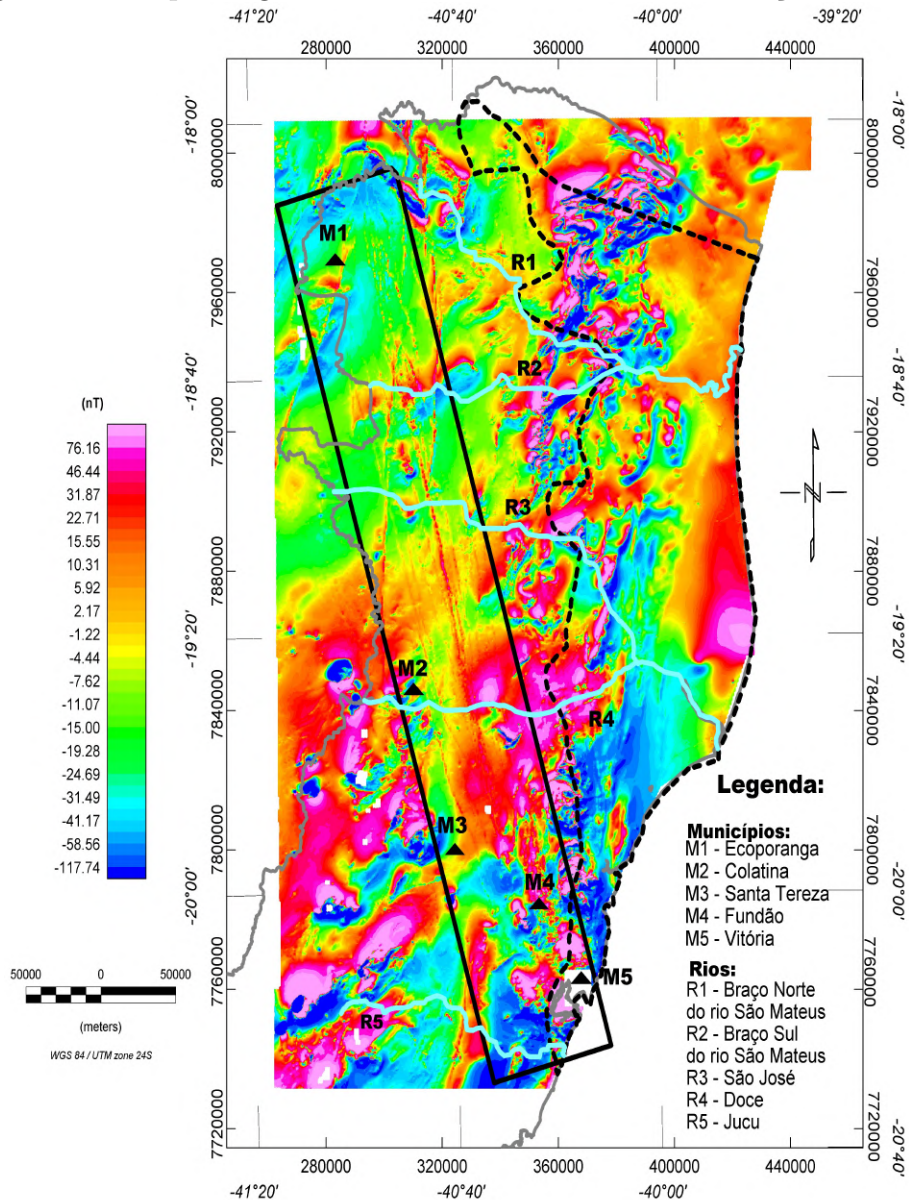
Figura 5.1: Mapa Magnético Total Nivelado e Micronivelado



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina, os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontra dentro da área de estudo são marcados com triângulo

Fonte: Produzido pelo Autor.

Figura 5.2: Mapa Magnético Anômalo: retirada a contribuição do IGRF



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina, os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontra dentro da área de estudo são marcados com triângulo

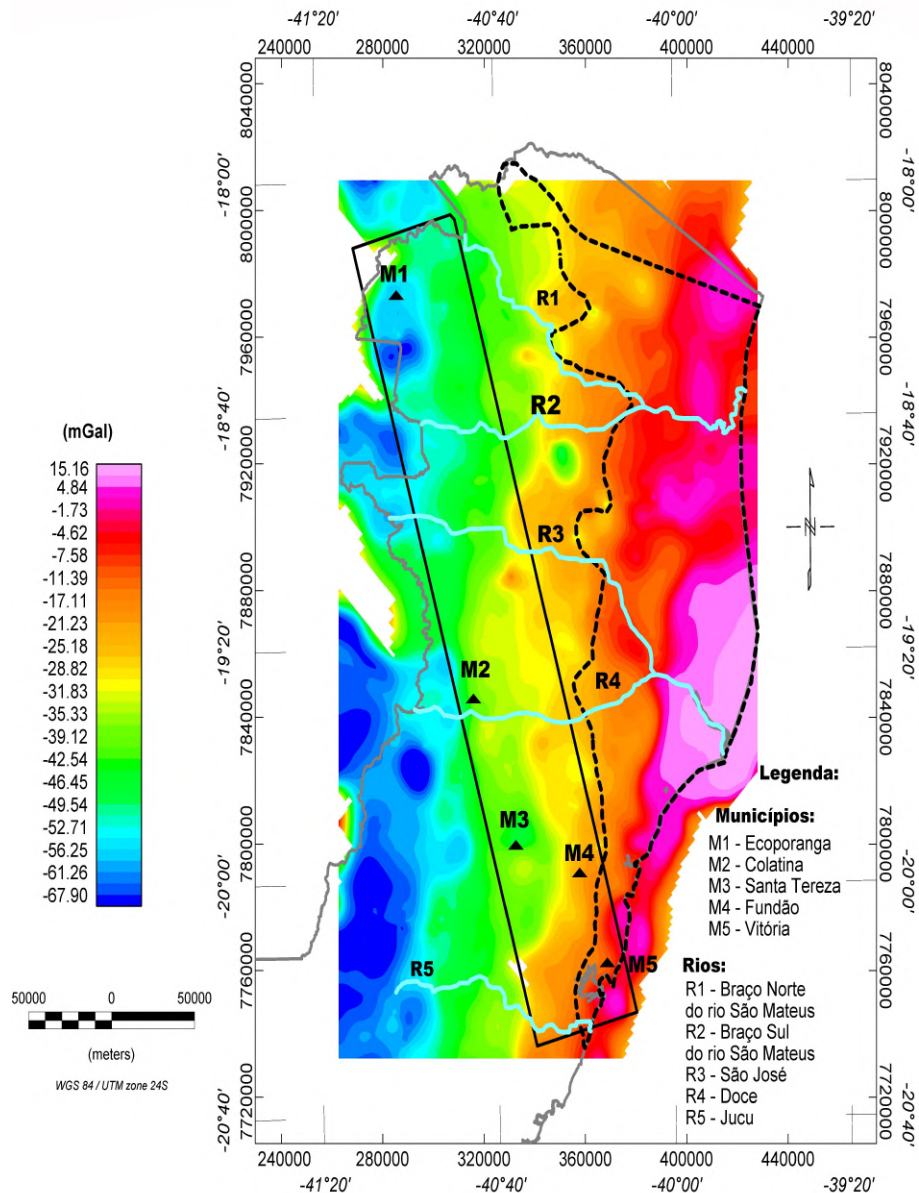
Fonte: Produzido pelo Autor

A Figura 5.2 mostra o mapa magnético residual com a remoção do IGRF, que leva em consideração as latitudes e longitudes de toda a região. Podemos observar as feições das anomalias magnéticas, destacado em especial o Lineamento Colatina e outros correlatos.

5.2 Dados Gravimétricos

O banco de dados gravimétricos é composto pelos seguintes canais: coordenadas (x,y), elevação, valor de gravidade (medido), hora e data. A partir disso foi utilizada a rotina Gravity/Oasi Montaj para aplicar as reduções gravimétricas, obtendo assim os canais de anomalia Ar Livre, anomalia Bouguer, além da anomalia Bouguer Completa e Bouguer Residual.

Figura 5.3: Mapa Gravimétrico Anômalo: Bouguer Completo



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina, os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontra dentro da área de estudo são marcados com triângulo

Fonte: Produzido pelo Autor

A partir dessas informações foram gerados vários grids, além de mapas, como o apresentado na Figura 5.3, utilizando as rotinas, Grid and Image/Display on Map do Oasis Montaj/Geosoft como mostrado na Figura B.1 do apêndice B. Para a construção dos grids foram utilizadas células de 200 x 200 m, datum WGS 84 e zona UTM 24 S.

Para finalizar o processo é necessário gerar o mapa gravimétrico Bouguer Residual, que neste caso foi utilizando o processo polinomial, através do menu Database Tools/Filters/Polynomial, que será descrito na seção 6.2.

5.3 Dados Radiométricos

Os dados radiométricos utilizados como fonte para esse estudo foram disponibilizados da base do projeto Projeto Aerogeofísico do Espírito Santo (Código 1093).

Neste trabalho foi utilizado um banco de dados de gama, que é composto pelos seguintes campos: coordenadas (UTM N, UTM E, Latitude e Longitude), elevação, data e hora da aquisição dos dados, assim como informações de radiação cósmica, potássio bruto, urânio bruto, tório bruto, suas contrapartes corrigidas, as quantidades em porcentagem e ppm. Com base nessas informações foram construídos os grids dos elementos K, Th e U, além do mapa ternário. Com a rotina, Grid and Image/Display on Map do Oasis Montaj/Geosoft como mostrado na Figura B.1. Para a construção das grids foram utilizados os mesmos parâmetros dos dados magnéticos, malhas de 125 x 125 m, datum WGS 84, zona de projeção zona UTM 24 S.

5.4 Menus e Rotinas Utilizados

A Figura B.1 apresentada no apêndice B, mostra os menus que foram utilizados descritos de maneira simplificada. Assim iremos explicar as principais rotinas de suma importância nesse projeto, sendo estas: Pdepth (12), GM-SYS profile (13), Voxi (14) e Voxel (15).

O primeiro passo foi através do menu pdepth (12) para fazer a definição de início e final de cada perfil, (Figura 6.9), de forma interativa sobre os grids do mapa magnético residual (Figura 6.2), mapa gravimétrico residual (Figura 6.5) e do mapa de elevação, este último obtido através do menu Data Service/Seeker acessado do servidor da Geosoft.

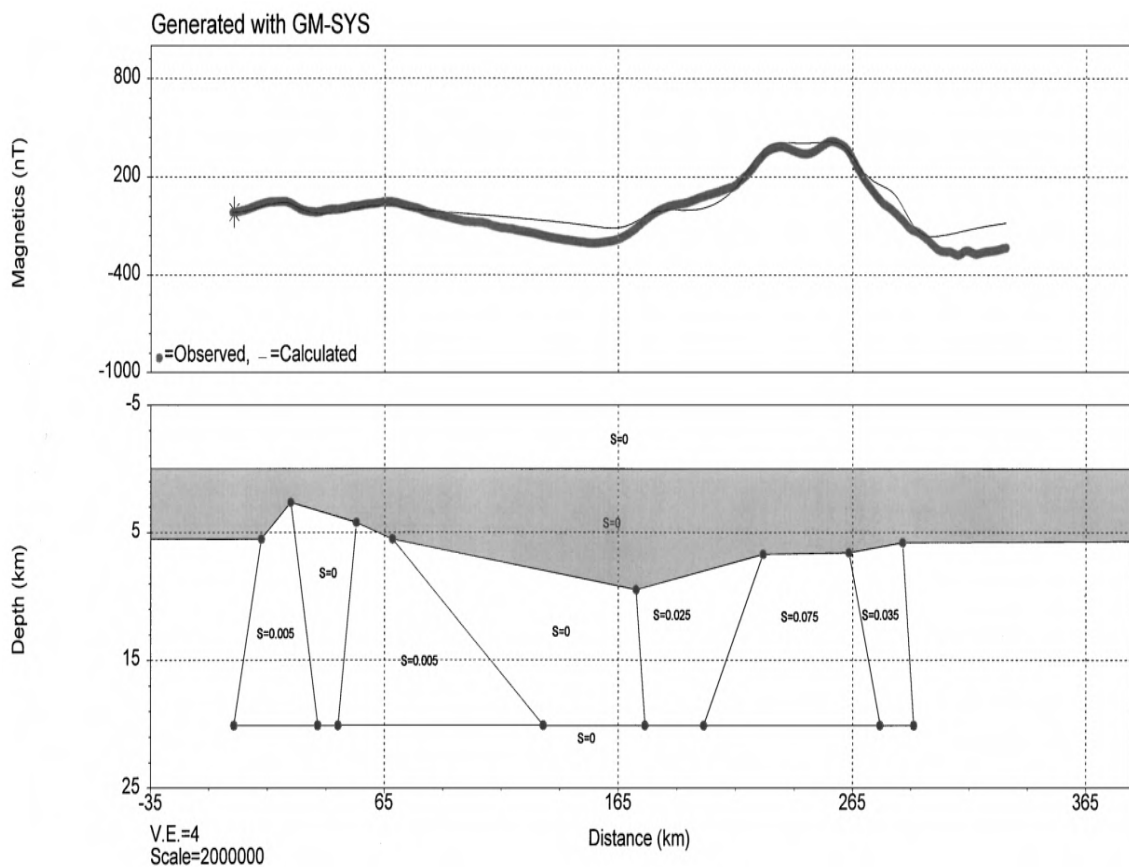
Dando prosseguimento foi rodado o menu pdepth que consiste na criação do banco de dados com as soluções da deconvolução, que são as seguintes rotinas: Werner, Sinal Analítico e Deconvolução de Euler, (THOMPSON (1982); REID *et al.* (1990)). Embora tenha rodado a deconvolução de Euler com os seguintes índices estruturais

(SI): 0; 0,5; 1; 1,5; 2 e 3, os índices que apresentaram melhores soluções foram os 0,5 e 1.

Cada rotina cria seu próprio conjunto de soluções, fornecendo as informações de profundidades e localização dos contatos e diques, além de fornecer as informações do mergulho e a susceptibilidade dos corpos, onde cada método se baseia em um autor distinto. A rotina Werner é baseada no trabalho de KU e SHARP (1983), Sinal Analítico foi definido por NABIGHIAN (1972) e a decolução de Euler por THOMPSON (1982), REID *et al.* (1990) MUSHAYANDEBVU *et al.* (2001).

Após a criação de cada banco de dados associado a cada método, começa o processo da modelagem 2D ao expostar as soluções para o GM-SYS Profile/Oasis Montaj, baseado nos algoritmos de TALWANI *et al.* (1959), TALWANI (1965) e WON e BEVIS (1987), rotina essa que permite a inversão de um número limitado de parâmetros, mantendo outros fixos (Geosoft, 2009). A modelagem tem como intuito a criação de superfícies e blocos com diferentes valores de susceptibilidade/densidade, de forma que a curva dos dados calculados esteja o mais próxima possível, da curva de dados observados. A Figura 5.4 exemplifica um modelo baseado em dados magnéticos.

Figura 5.4: Modelo de uma modelagem feita através do GM-SYS Profile/Oasis Montaj



Fonte: Extraído MUSHAYANDEBVU *et al.* (2001)

Os menus 14 e 15 tinham como propósito a criação das modelagens 3D, utilizando a rotina Voxi/Oasis Montaj, e posteriormente exportando para o Voxel/Oasis Montaj para realizar o processo de inversão. Inicialmente cria-se um polígono que deve abranger a anomalia de interesse, referente aos dados magnéticos ou gravimétricos que estejam dentro da região definida. Neste projeto foi realizado apenas o processo de inversão dos dados magnéticos. A licença disponibilizada tinha um limite de pontos (50x50) por polígono, caso utilizássemos apenas um grande polígono acarretaria em grande perda de resolução na modelagem. Logo, foi decidido particionar a área de interesse em vários polígonos. Foram criados 36 polígonos georeferenciados e posteriormente unificados, para formar apenas um corpo.

O processo de inversão 3D gerado pelo menu Voxel/Oasis Montaj, procura reproduzir a distribuição mais coerente dos parâmetros físicos das rochas que corroborem com os dados observados. Na maioria dos processos de inversão do Voxel a base para resposta magnética surge inteiramente a partir de indução magnética. Os dados do campo magnético devem ser bem conhecidos e são utilizados em muitas áreas da exploração geofísica, pois é a base para o processo de inversão do Voxi e Voxel 3D/Oasis Montaj, que poderá auxiliar na fase de interpretação dos dados, valendo citar LI e OLDENBURG (2000), PILKINGTON (1997) e PORTNIAGUINE e ZHDANOV (2002).

Capítulo 6

Resultados e Discursões

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos após a criação dos bancos de dados e geração dos grids, que serviram como base para os mapas e perfis. Assim, obtivemos as primeiras informações das anomalias inseridas na área de estudo, como por exemplo: lineamentos, possíveis contatos, corpos intrusivos, valores de susceptibilidade magnética, densidade, estimativas da largura e extensão das anomalias de grande expressão, associadas às principais feições estruturais.

As informações das anomalias observadas nos mapas temáticos (magnetométricos, gravimétricos e radiométricos), além das modelagens 2D e 3D obtidas através das rotinas do Oasis Montaj da Geosoft, foram associadas com as informações da geologia da região na etapa de interpretação.

6.1 Mapas Magnéticos

No tratamento dos dados magnéticos existe a necessidade de separar as anomalias oriundas da crosta terrestre do campo magnético da Terra. Então, para isolar a resposta magnética das rochas crustais, deve-se remover a componente devida ao campo geomagnético. O valor a ser removido de cada medida é calculado com o uso de modelo matemático teórico global do campo geomagnético, como o Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF).

O mapa do campo magnético anômalo foi gerado e depois aplicamos a rotina de remoção do IGRF para obtermos o mapa magnético residual. Notamos então, que as anomalias ficaram mais evidenciadas e com melhor definição, ressaltando em especial uma de grande expressão, correspondendo ao lineamento Colatina, foco do nosso trabalho.

O mapa magnético residual (Figura 5.2) mostra a estrutura do dique atravessando boa parte do estado do Espírito Santo, desde a cidade de Ecoporanga (M1) até a borda da bacia sedimentar, próximo à cidade de Vitória (M5). Nessa área nota-se que o lineamento Colatina, não está bem individualizado pois, segundo FLECK

(2014), nessa região ocorrem muitos plutões graníticos, charnockíticos e noróticos da suíte Intrusiva Espírito Santo e suíte Intrusiva Aimorés, IBGE/DGC (1987). Apoiados nas informações existentes na literatura, vimos então, a necessidade de aplicar rotinas de filtragem para separar a interferência de fontes magnéticas de maior comprimento de onda, e assim poder definir melhor as feições estruturais provenientes do(s) lineamento(s) que apresenta menor comprimento de onda.

6.1.1 Mapa da Continuação para cima - 1000 m

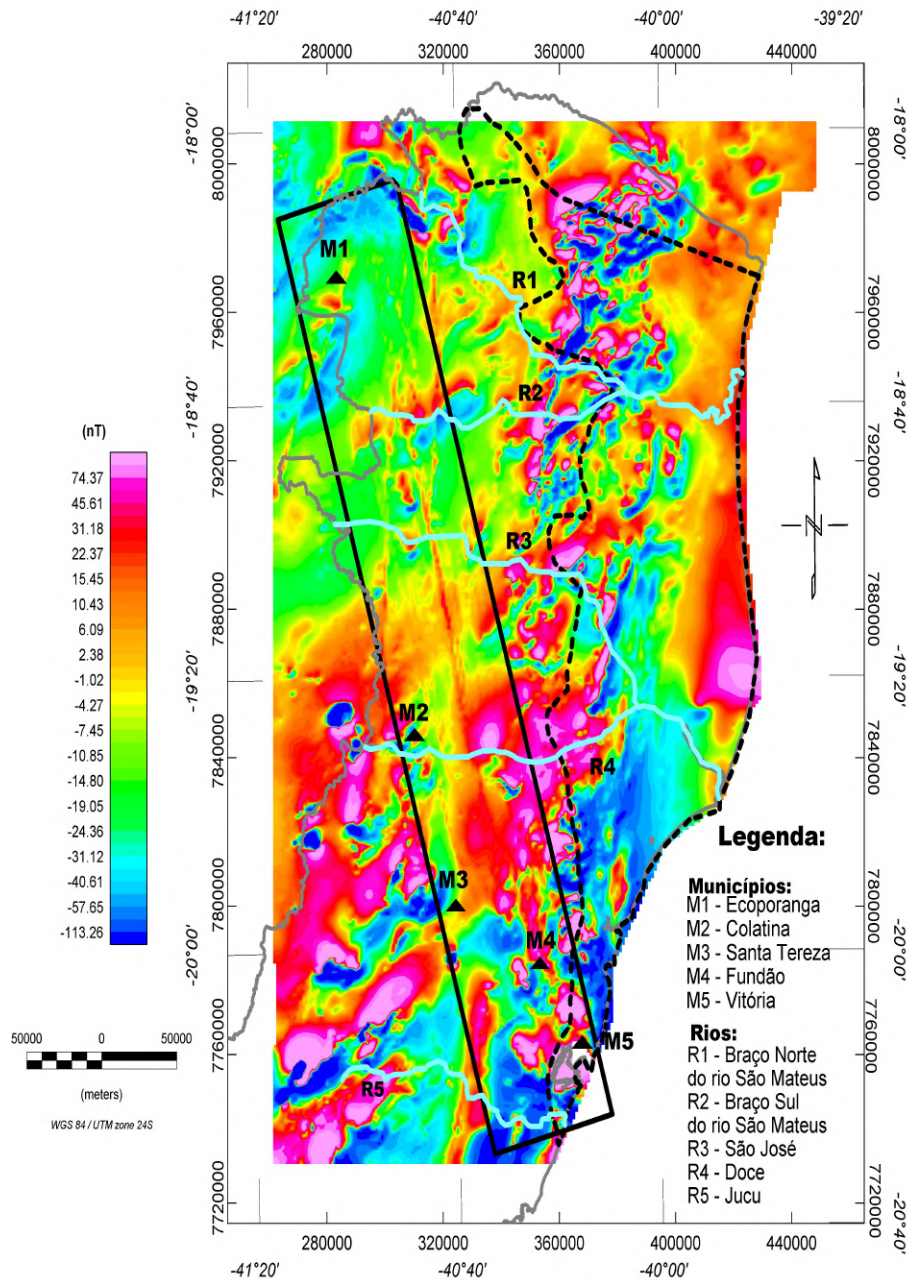
A continuação para cima é uma filtragem que elimina as anomalias de curto comprimento de onda, alta frequência, provocadas por fontes superficiais. O procedimento simula a aquisição dos dados do campo magnético em um nível superior ao original, ou seja, dados mais afastados das fontes. Esta técnica é muito adotada, seja no tratamento de dados magnéticos e/ou gravimétricos, pois permite simular a aquisição de dados a distâncias variadas da fonte, fazendo uma estimativa da profundidade das fontes rasas, intermediárias e profundas.

Nesse processo de filtragem foram gerados grids com as seguintes Alturas: 200, 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 5000 m, entretanto se notou que, em cada altura gerada algumas partes do sinal magnético do dique sumiam, sugerindo assim, que o dique apresenta profundidades variáveis. Segundo LOURENÇO (2015) esse filtro é aplicado para evidenciar anomalias de fontes mais profundas.

A Figura 6.1, é o resultado do filtro da continuação para cima a 1000 m. Nesse mapa se percebe ainda bem definido o limite entre a bacia e o cristalino. Apenas o lineamento principal (D1) continuou sendo notado, embora se perceba uma perda de sinal em algumas partes. Assim, podemos dividir o dique em dois setores. O primeiro é a região NW entre a cidade de Ecoporanga (M1) e o rio (R2), que representa um exame de dique com sinais menos intensos. Esse conjunto de diques sumiu na continuação para cima a 1000 m, mostrando assim, que estariam a profundidades inferiores a 1000 m. O segundo setor está entre o rio (R2) e cidade de Fundão (M4), onde mesmo após o filtro a 1000 m continuamos observando a presença de sinal magnético relativo ao dique principal. Sendo assim, podemos supor que, uma parte do lineamento principal apresenta profundidades superiores a 1000 m.

Esses resultados corroboram as informações do trabalho de NOVAIS *et al.* (2004), FLECK (2014) e ALKIMIN e MARTINS-NETO (2012) sugerindo a existência de diques com profundidades e largura variadas diminuindo na direção NW de acordo com as profundidades das fraturas.

Figura 6.1: Mapa Magnético Anômalo: Continuação para cima a 1000 m



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina. Os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontram dentro da área de estudo são marcados com triângulo

Fonte: Produzido pelo Autor

6.1.2 Mapa Magnético Reduzido ao Polo

Os mapas apresentados a seguir, realçam as anomalias magnéticas da região, a Figura 6.2 é o resultado da aplicação do filtro de redução ao polo, BARANOV (1957) e BARANOV e NAUDY (1964), nos dados magnéticos residuais.

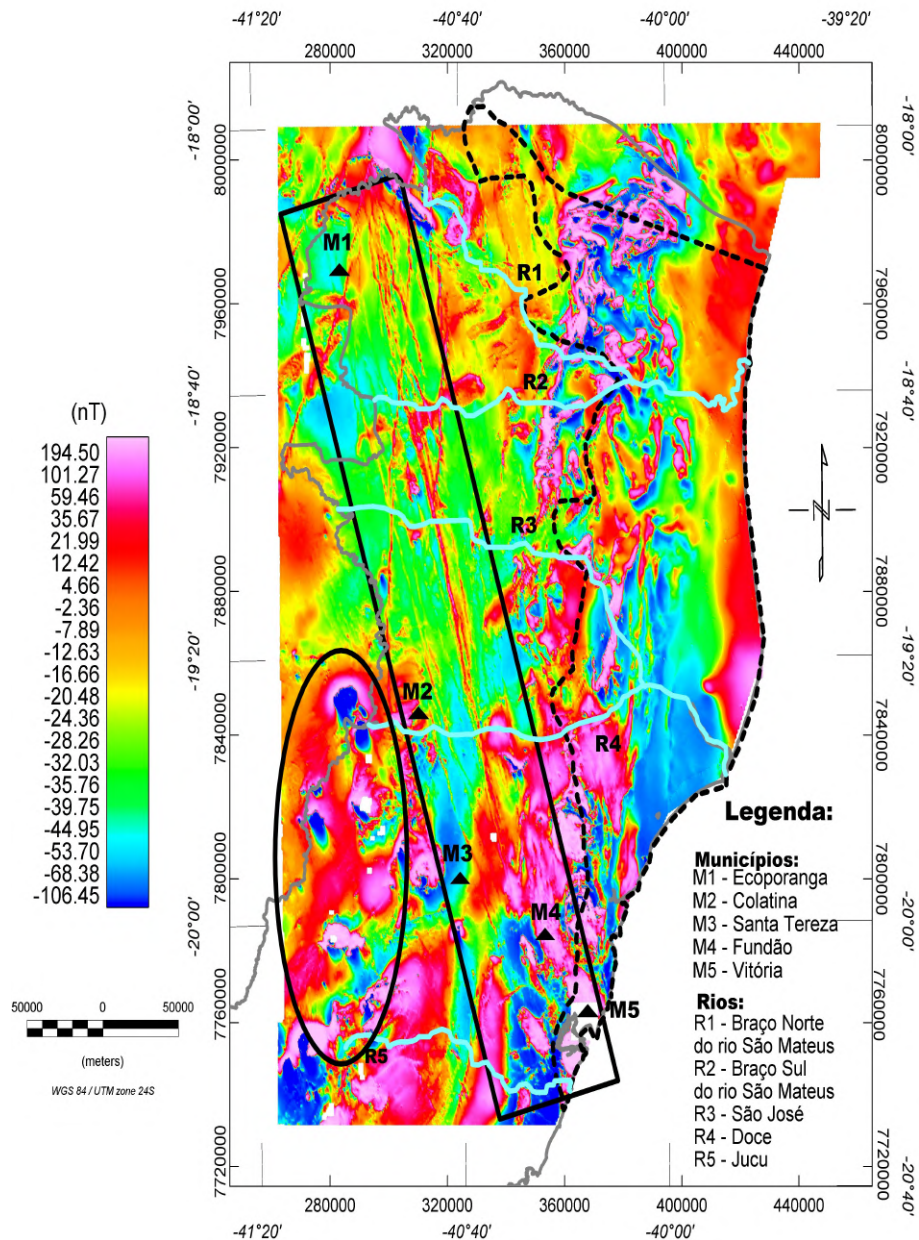
A aplicação do filtro de redução ao polo realçou várias estruturas na região, além do lineamento Colatina e outros sublineamentos existentes dentro da área de estudo. Um fato observado é que ocorre um contato brusco do feixe Colatina com as rochas encaixantes, evidenciando a diferença de composição mineralógica. FLECK (2014) citou que isso poderia estar relacionado as bordas de resfriamento rápidas, variavelmente desenvolvidas em espessura, mas sempre inferior a 1 cm, mesmo quando o dique tem espessura métrica.

No relatório técnico IBGE/DGC (1987) a estrutura foi classificada em sua maior parte sendo composta por rochas básicas, de característica máfica encaixada em rochas félsicas graníticas, explicando assim esses contrastes de sinais.

Outra proposição seria que, esse contraste ocorre devido as diferentes concentrações de minério de ferro nesses tipos de rochas. Resultado semelhante foi obtido por OLIVEIRA (2014a), em seu trabalho, identificando diferenças entre os contatos de rochas ultramáficas e a unidade Santa Quitéria. De acordo com SANTOS e MOREIRA (2018), essa unidade é uma região com intensa granitogênese.

Ao se comparar o mapa magnético residual (Figura 5.2) com o mapa reduzido ao polo (Figura 6.2), nota-se que nas proximidades da cidade de Ecoporanga (M1), ocorre um aumento significativo de lineamentos que antes estavam mitigados, devido ao efeito dipolar das anomalias. Na intersecção do lineamento com o braço sul do rio São Mateus (R2), outra feição que se observa é uma anomalia de caráter monopolar, atravessando o lineamento Colatina, podendo ser classificado como um ponto de extrusão do material magmático.

Figura 6.2: Mapa Magnético Anômalo: Reduzido ao Polo



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina. Os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontram dentro da área de estudo são marcados com triângulo

Fonte: Produzido pelo Autor

Ainda observamos que na região da borda da bacia com o cristalino, existe uma série de anomalias alongadas com direção N-S. Na área correspondente aos municípios Santa Tereza (M4) e Fundão (M5), se percebe um conjunto de anomalias de grande intensidade magnética entre o lineamento e a borda da bacia sedimentar, com características distintas das observadas na parte central e parte norte da área de estudo.

Vale ressaltar ainda que, na divisa entre os estados do Espírito Santo e Minas Gerais, observamos oito anomalias anelares correspondendo ao Complexo Aimorés (PEDROSA-SOARES *et al.* (2007)), que mesmo após a aplicação do filtro de redução ao polo magnético apresentam características dipolares (dentro da elipse de cor preta). Estas oito anomalias anelares podem corresponder a corpos multi-intrusivos, muito comuns na região. A estrutura do lineamento Colatina aparenta ser um divisor entre as anomalias anelares do complexo Aimoré (PEDROSA-SOARES *et al.* (2007)) do interior do estado com as anomalias alongadas do complexo Espírito Santo observadas na borda da bacia.

6.1.3 Mapa Magnético da Primeira Derivada Vertical

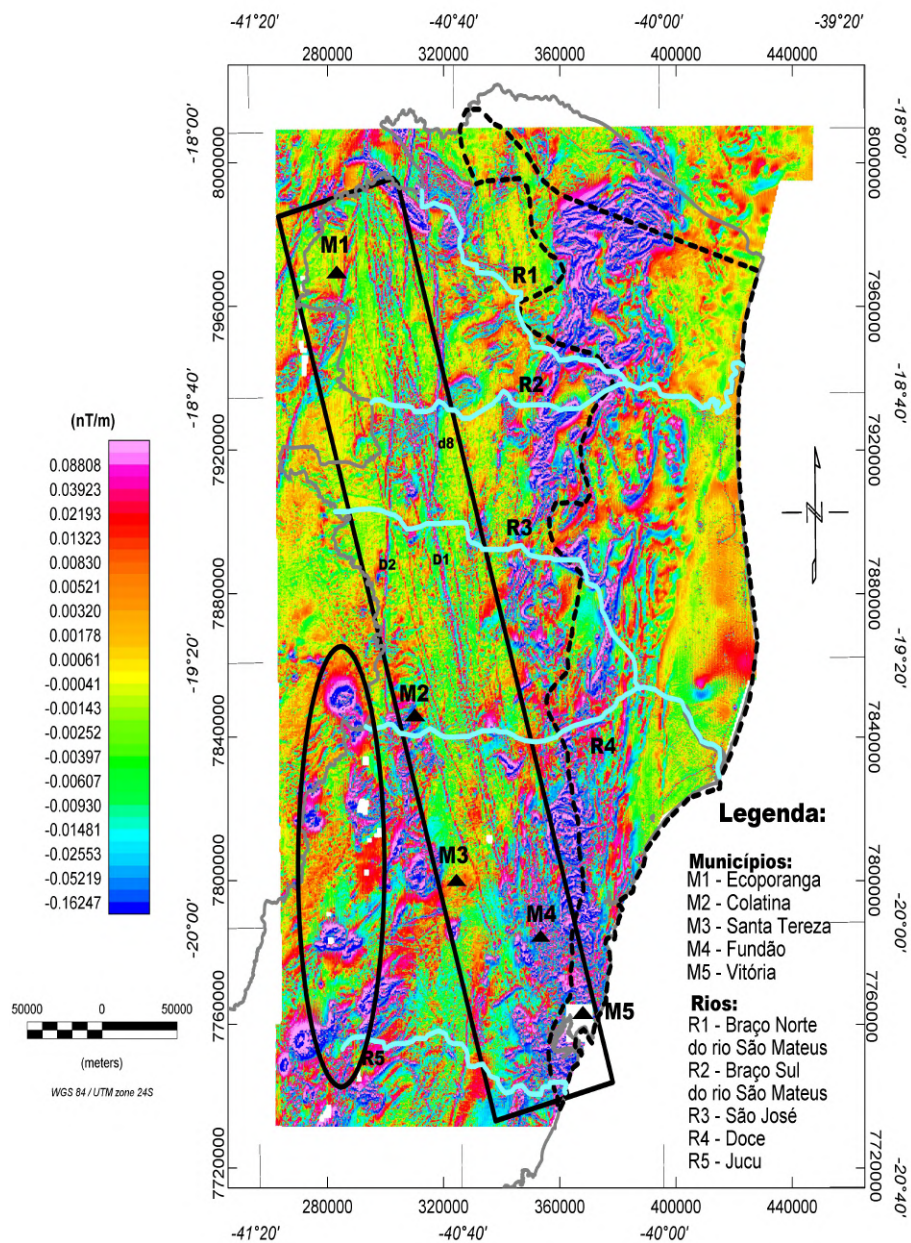
De acordo com NOVAIS *et al.* (2004), FLECK (2014) e outros trabalhos existentes na literatura, o feixe de diques Colatina é uma estrutura provenientes de fontes rasas, que em muitos pontos estaria aflorando. Sendo assim, aplicamos o filtro da primeira derivada, que tem como objetivo realçar os sinais de componentes de fontes mais rasas, eliminando as componentes de fontes intermediárias e profundas.

O filtro da primeira derivada tem sido aplicado na identificação de falhas, contatos e descontinuidades magnéticas, apresentando resultados expressivos. Como exemplo podemos citar: LOURENÇO (2015) que utilizou o filtro para realçar os principais lineamentos na região Onshore da bacia de Campos, e demarcou um sistema de falhas de direção SW – NE, assim como, o dique de diabásio Saquarema – Campos dos Goytacazes (DSC). Enquanto PESSANO *et al.* (2020) utilizou o filtro da primeira derivada para identificar um conjunto de diques em seu trabalho sobre exames de diques máficos utilizando dados aeromagnetométricos.

Na Figura 6.3 apresentamos o resultado da aplicação do filtro da primeira derivada (BLAKELY (1995)). As anomalias de alta frequência que estariam associadas a fontes rasas foram realçadas, notamos também, padrões de anomalias distintos, como na região litorânea, contrastando com as anomalias da borda da bacia. Destaca-se ainda, o contraste entre o padrão de anomalia do feixe de diques com as rochas ao seu redor. Outro ponto a destacar, é uma sequência de oito (8) anomalias anelares dentro da região delimitada pela elipse de cor preta (Complexo Aimorés) alinhadas na direção N-S, desde a cidade de Colatina até o extremo SW da área.

No mapa da primeira derivada (Figura 6.3), ficou evidente além do dique principal (D1), também outros dois correlatos de menor expressão (sendo expressos pela nomenclatura D2 e d8. Onde o termo D2 está associado a uma ramificação do dique principal. Já o termo d8 se refere a um dique correlato. Essa nomenclatura será adotada na modelagem GM-SYS profile) com direção N-S, cruzando os rios R2 e R3 próximos à cidade de Ecoporanga (M1).

Figura 6.3: Mapa Magnético Anômalo: Primeira Derivada Vertical



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina. Os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontram dentro da área de estudo são marcados com triângulo. O dique principal é expresso pela nomenclatura D1 e dois correlatos são expressos com as letras D2 e D8.

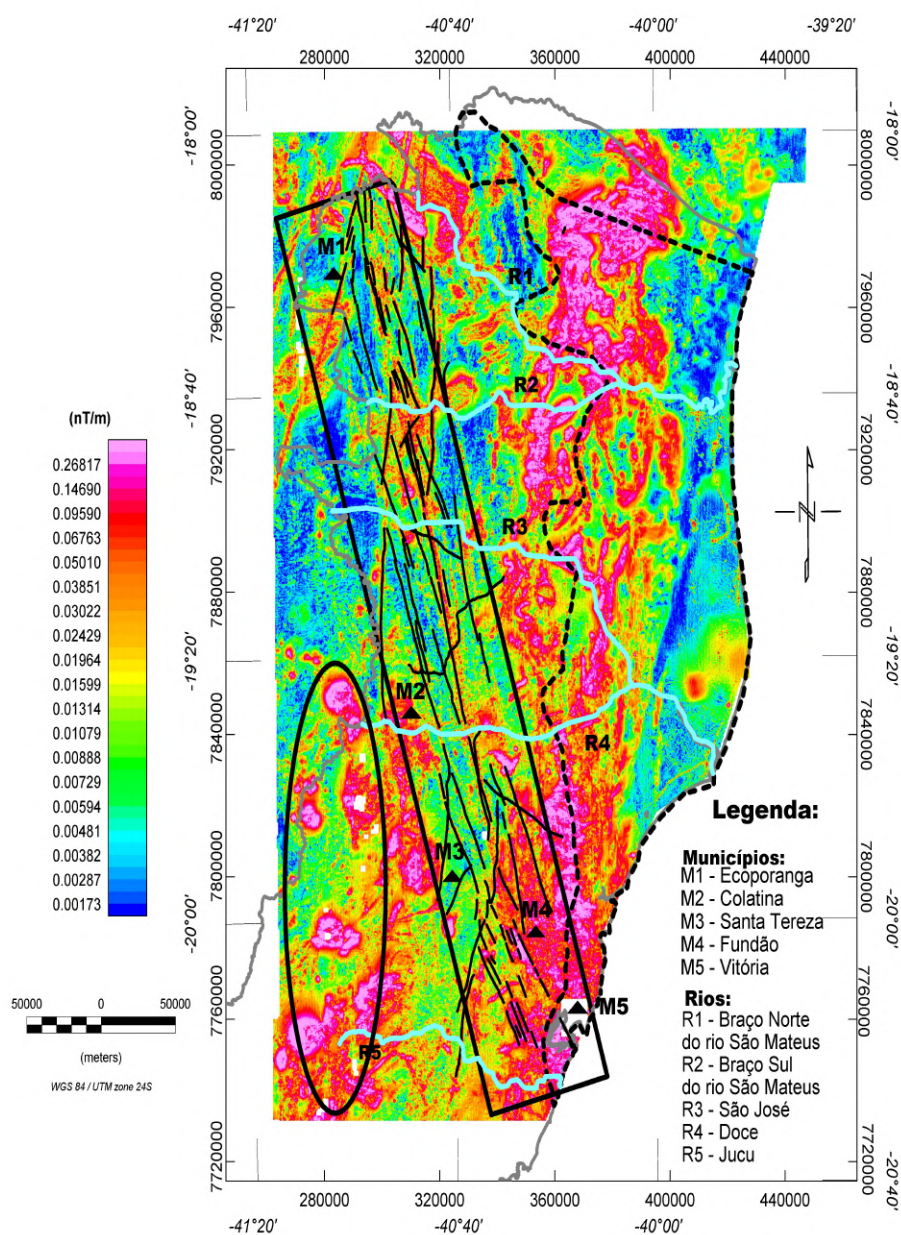
Fonte: Produzido pelo Autor

6.1.4 Mapa do Sinal Analítico

Enquanto alguns filtros servem para identificar fontes mais rasas. O método de filtragem do Sinal analítico (ASA), desenvolvido por NABIGHIAN (1972), NABIGHIAN (1974) e ROEST *et al.* (1992), tem como finalidade evidenciar as formas geométricas

dos corpos, sem depender da sua direção de magnetização.

Figura 6.4: Mapa Magnético Anômalo: Amplitude de Sinal Analítico (ASA)



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina, os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontra dentro da área de estudo são marcados com triângulo

Fonte: Produzido pelo Autor

O resultado da aplicação do filtro ASA, apresentado na Figura 6.4, realçou as oito anomalias anelares (dentro da elipse de cor preta), presentes próximas ao limite dos estados ES e MG, confirmando o que já havia visto na região SW do mapa da Figura 6.3. Notou-se também a possível ocorrência de superposição de anomalias

magnéticas geradas por diferentes corpos nessa região. Ao contrário do filtro de primeira derivada, que apresentou inúmeros lineamentos de menor expressão, no ASA ficou evidenciando o lineamento principal (D1) e dois lineamentos correlatos de direção N-S (d8 e D2), coincidindo com lineamentos mapeados na geologia de superfície. Além disso, evidenciou um contraste de sinais com Trend N-S, numa zona de transição, entre a bacia e o cristalino, coincidindo com o limite traçado pela Petrobras como borda da bacia sedimentar.

Como enfatizado por CAVALLARO (2013), é muito comum a utilização do shape de falhamentos sobreposto no mapa resultante do filtro ASA, de uma determinada região. Desta forma, se pode analisar a coincidência da resposta magnética do Sinal Analítico com as informações estruturais do mapa geológico.

6.2 Mapas Gravimétricos

No mapa de anomalia Bouguer (Figura 5.3), o limite da bacia sedimentar está bem delineado, por uma anomalia positiva de grande intensidade. Essa anomalia reflete bem a zona de transição do limite da bacia com o cristalino. Esta feição também foi notada por LOURENÇO (2015), já FILHO (2017) notou resultado semelhante na região da bacia de Barreirinhas.

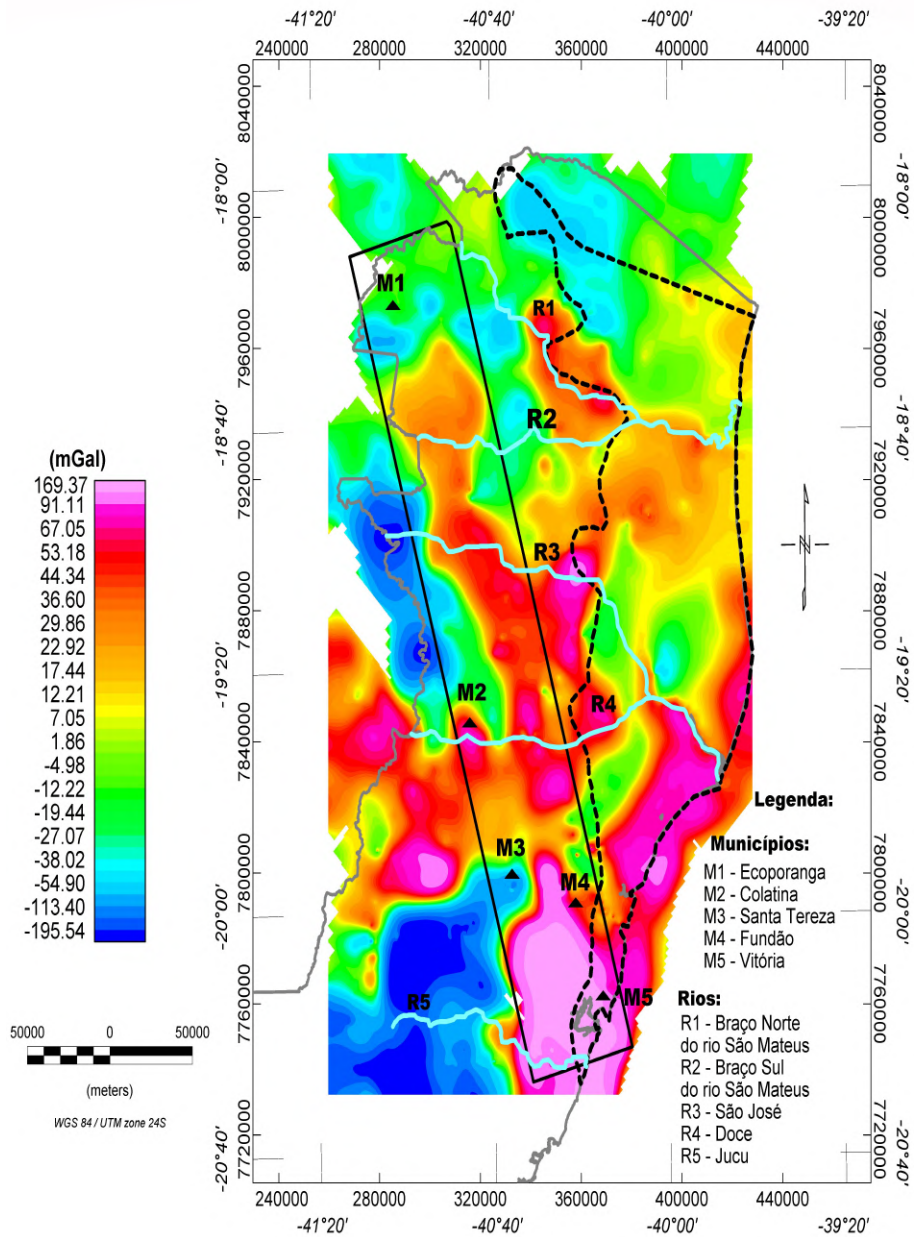
Um passo importante nos estudos gravimétricos é o processo de geração do mapa gravimétrico residual. Para geração desse mapa existem algumas técnicas como, por exemplo, através de gráficos, filtro da continuação para cima, filtro passa baixo (NETTLETON (1971); TELFORD *et al.* (1990)), compensação isostática (SIMPSON *et al.* (1986)), método polinomial e o método da mínima curvatura (MICKUS *et al.* (1991)).

Segundo FERNANDES (2010), o método polinomial tem por finalidade gerar superfícies de tendências variando o grau do polinômio. Assim, ao se efetuar a diferença destas tendências com os dados originais, obtêm-se o mapa residual. No trabalho citado acima, pode-se identificar sinais gravimétricos que estavam associados a feixe de diques.

6.2.1 Mapa Gravimétrico Residual

No presente trabalho, para realçar as fontes do lineamento, foi utilizada a técnica de filtragem do método polinomial do menu database tools/filters do Oasis Montaj. Durante o nosso estudo foram gerados grids aplicando polinômios variando o grau de 1 até 9, sendo que a remoção da superfície polinomial de grau 9 foi a que apresentou o melhor resultado, desta forma obtivemos o mapa da anomalia Bouguer Residual (Figura 6.5).

Figura 6.5: Mapa Gravimétrico Anômalo: Bouguer Completa Aplicada Correção Polinomial de Grau 9



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina, os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontra dentro da área de estudo são marcados com triângulo

Fonte: Produzido pelo Autor

No mapa (Figura 6.5) ficou proeminente, na região central, uma forte anomalia positiva, que se estende desde a cidade de Vitória (M5) até próximo à cidade de Ecoporanga (M1). Esta anomalia teria relação com a faixa do feixe de diques. Neste mapa ficou evidenciada também uma anomalia gravimétrica intensa entre a cidade de Vitória (M5) e a cidade de Fundão (M4). Outra feição existente é um conjunto

de anomalias positivas de orientação N-S, coincidindo com a borda da bacia.

6.2.2 Mapa Gravimétrico Residual com filtro da Derivada Tilt

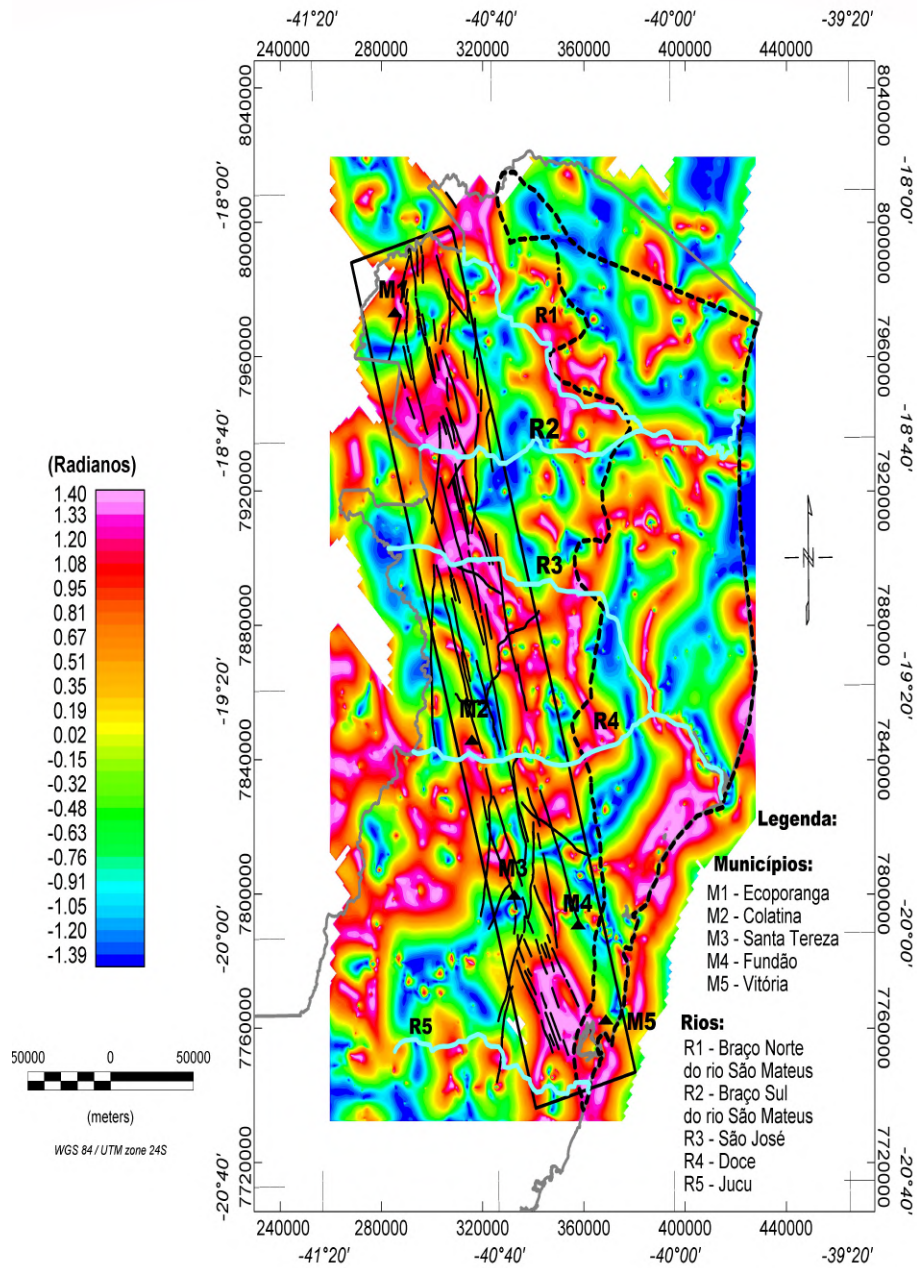
Outra rotina muito utilizada para realçar lineamentos que podem estar associados a falhas geológicas, diques ou contrastes litológicos é a inclinação do sinal analítico ou derivada Tilt (MILLER e SINGH (1994) e VERDUZCO *et al.* (2004)).

O procedimento de derivada Tilt vem sendo utilizado em várias partes do mundo. Podemos citar trabalhos como o de CASTRO (2011), com objetivo de realçar as bordas dos corpos associados aos contatos geológicos na sua região e o de ARAÚJO (2018), que destaca a aplicação deste filtro em dados magnéticos e gravimétricos, para realçar as informações das variações horizontais, com objetivo de individualizar os diferentes domínios oriundos de fontes rasas.

No nosso caso, ficou bem demarcado o limite da bacia por uma anomalia positiva que bordeja todo esse limite. Outra feição que se destaca é um conjunto de anomalias coincidindo com o feixe de diques do lineamento Colatina. Esse conjunto de anomalias estaria particionado, coincidindo com lineamentos mapeados nos levantamentos geológicos, e no mapa magnético da primeira derivada (Figura 6.3).

Diferente dos mapas magnéticos, os mapas gravimétricos não refletem os sinais dos lineamentos tão individualizados. Existindo três hipóteses possíveis para esse fato: I - o grande espaçamento entre as estações, devido a condições de acesso, II - não ocorrer uma diferença significativa no contraste de densidades entre os diques e as rochas circundantes, e por último, III - com base nas informações dos trabalhos de IBGE/DGC (1987), ALKIMIN e MARTINS-NETO (2012), GRADIM (2013) e FLECK (2014), citando que o feixe de diques apresenta profundidade e largura variáveis, sendo que a largura vai de dezenas de metros a poucos centímetros.

Figura 6.6: Mapa Gravimétrico Anômalo: Derivada Tilt



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina. Os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontram dentro da área de estudo são marcados com triângulo

Fonte: Produzido pelo Autor

6.3 Mapas Radiométricos

Os mapas radiométricos, como descrito anteriormente, têm como objetivo identificar a presença dos elementos químicos radioativos potássio, tório e urânio nas rochas.

Uma rotina utilizada para classificar as rochas em relação à concentração dos elementos radioativos, é a criação de um mapa que sirva para realçar os contrastes entre esses elementos, sendo apresentado apenas dois mapas aqui o mapa de fator F e o mapa ternário ¹.

A utilização dos dados radiométricos neste trabalho visa classificar os feixes de diques junto com as rochas onde o mesmo encontra-se encaixado, quanto a sua natureza (rocha máfica ou félsica). O primeiro passo nessa etapa foi gerar o mapa de cada elemento, e após isso, juntamos as informações no mapa ternário.

6.3.1 Mapa Radiométrico do Fator F

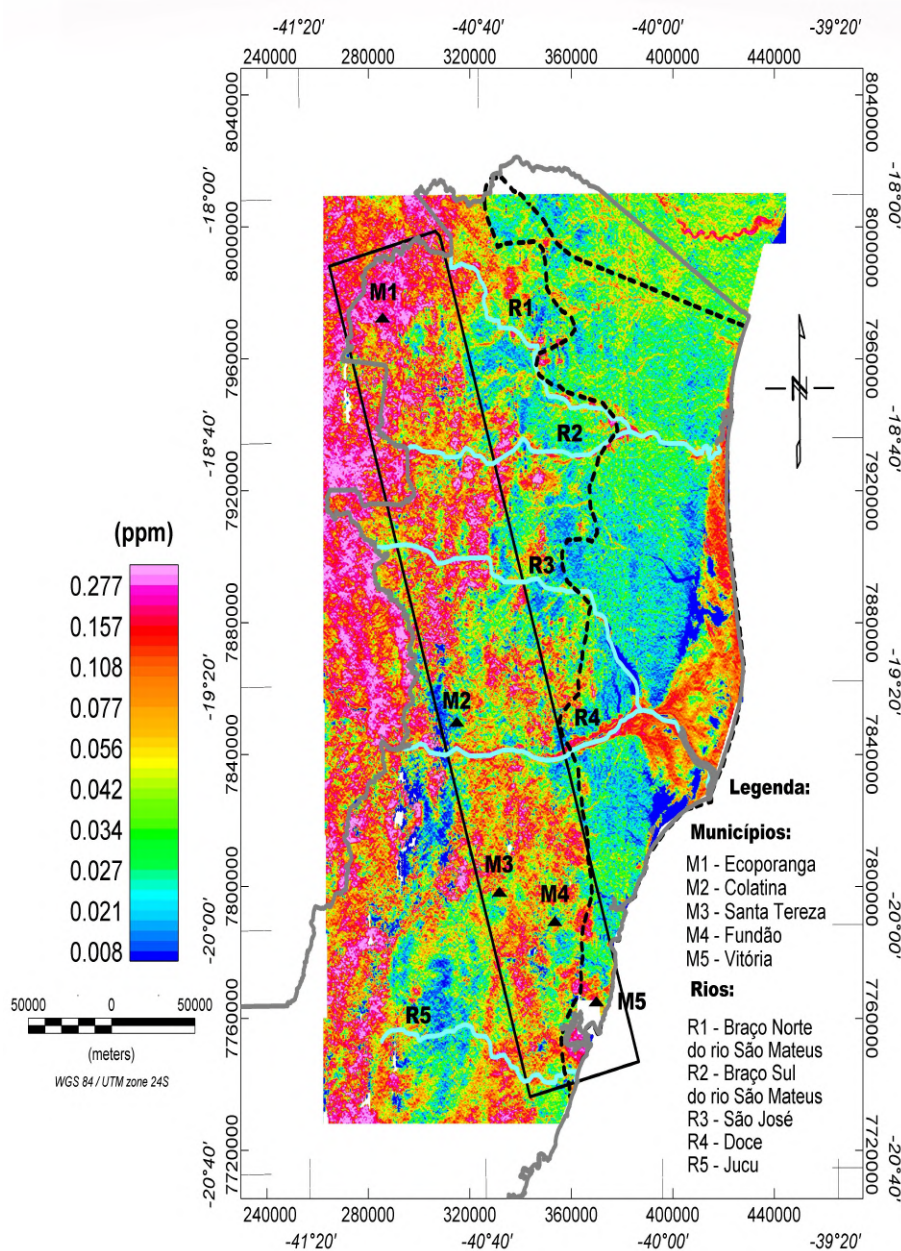
A Figura 6.7 representa a integração entre os três elementos (K, Th e U), através do parâmetro conhecido como fator **F**.

Nota-se no mapa 6.7 uma maior intensidade de sinal do fator na região com maior concentração rochas plutônicas, na região noroeste do estado. Além também de um sinal significativo ao longo do rio R4, podendo ser associado ao lixiviação ² do potássio.

¹Outros mapas foram criados, que são apresentados no apêndice D, que não foram apresentados aqui pois não deram resultados importantes na interpretação.

²Movimento de materiais solúveis na matriz do solo pelo efeito da água que escorre e causa erosão.

Figura 6.7: Mapa Radiométrico: Fator F



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina. Os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontram dentro da área de estudo são marcados com triângulo

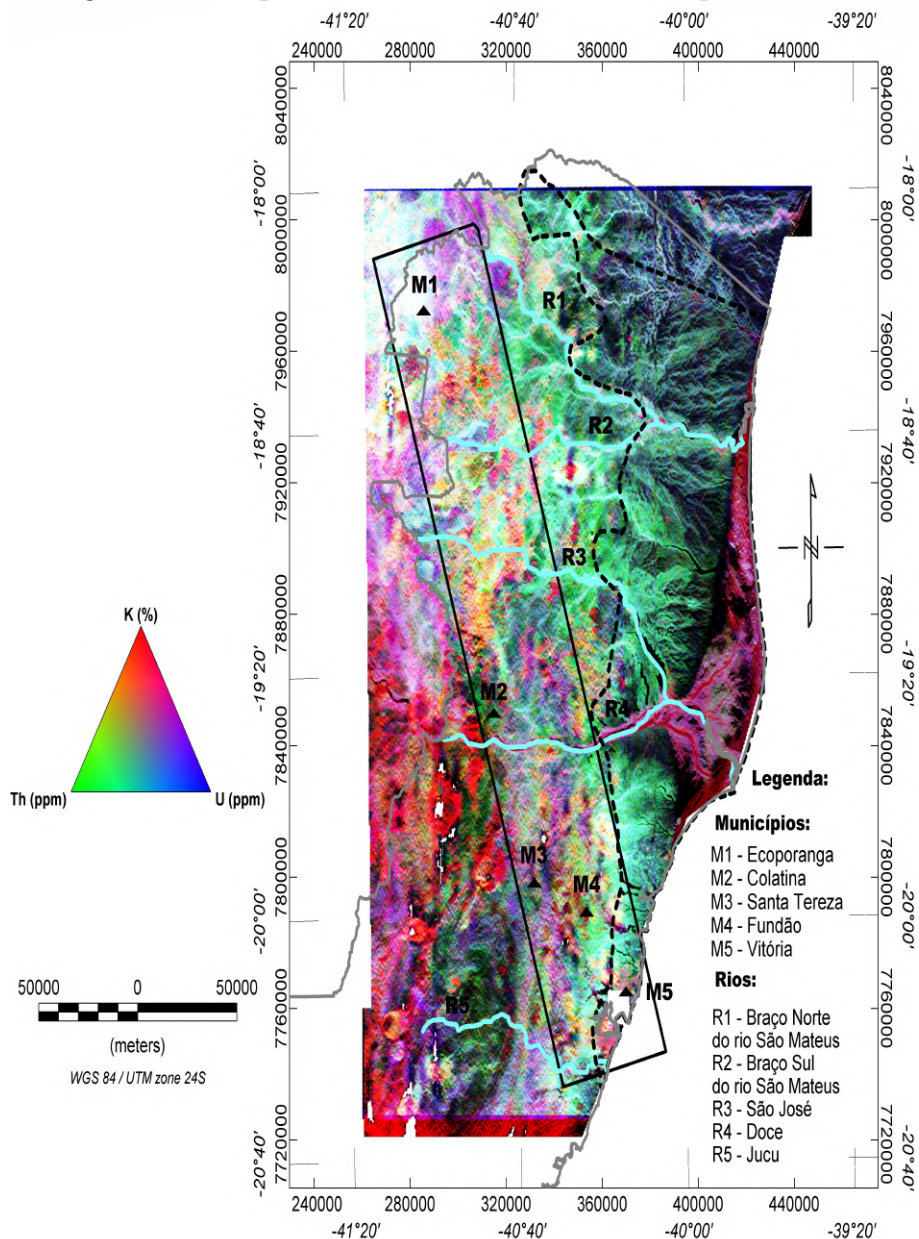
Fonte: Produzido pelo Autor

6.3.2 Mapa Radiométrico: Ternário com Padrão RGB

A Figura 6.8 representa a integração entre os três elementos (K, Th e U), onde a cor vermelha está associada ao potássio, verde ao tório e azul ao urânio. Nas áreas de cor branca ocorre a concentração dos três elementos concomitantemente, já nas

áreas de cor preta não há concentração de nenhum dos três elementos.

Figura 6.8: Mapa Radiométrico: Ternário com padrão RGB



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina. Os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontram dentro da área de estudo são marcados com triângulo

Fonte: Produzido pelo Autor

No nosso mapa ternário observamos que o sinal radioativo do lineamento do feixe de dique não está refletido, de onde podemos concluir que existe uma predominância de rochas de natureza máficas, corroborando com a nossa proposta e de FLECK (2014) de que os diques são de natureza basáltica. De acordo com PESSANO *et al.*

(2020), no mapa ternário as rochas máficas não apresentam sinal significativo, por isso as áreas brancas apresentadas estariam associadas a rochas graníticas.

Segundo MIRANDA (2019) se espera uma maior concentração dos elementos radioativos em rochas plutônicas, em comparação com as rochas ígneas básicas como basalto. As rochas graníticas têm a sua formação a grandes profundidades, têm um tempo maior para formação dos seus cristais, e assim, maior possibilidade de absorção de elementos químicos radioativos como K, Th e U, que se encontram "livres".

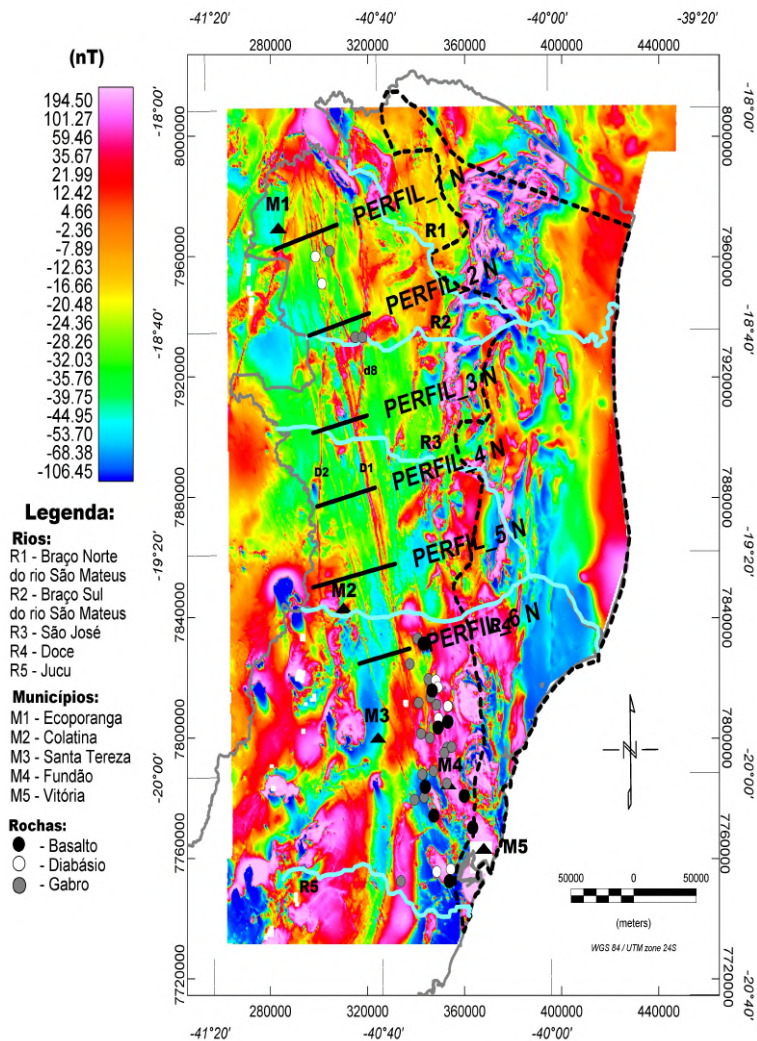
6.4 Gm-SYS Profile e Seções

A rotina de modelagem GM-SYS Profile do Oasis Montaj, tem sido muito utilizada e se tornou uma ferramenta poderosa e importante na área das geociências. Sendo assim, podemos citar trabalhos como FERNANDES (2010), LOURENÇO (2015), ARAÚJO (2018), MIRANDA (2019), MOUSAVI e EBBING (2018). Em todos esses autores existia um propósito em comum, o de gerar um modelo que estivesse mais próximo da realidade geológica, com base em medições geofísicas e informações geológicas das regiões, pois essa modelagem é um método direto de interpretação dos dados.

O GM-SYS é uma rotina do Oasis Montaj para realizar a modelagem 2D através das propriedades físicas das rochas. Além dos parâmetros físicos, essa rotina exige um tempo significativo de processamento, e uma máquina com alta performance. Na criação das modelagens foram adicionadas informações georeferenciadas de mapeamentos geológicos, soluções da deconvolução de Euler ($SI = 0$ e $SI = 1$) sobre os dados magnéticos, para definir contatos, diques, e suas profundidades, assim como, valores de densidade das rochas citadas nos levantamentos geológicos.

Nesta etapa, os perfis foram criados transversais ao lineamento e identificados de NW para SE, conforme mostra a Figura 6.9. Assim, criou-se um novo banco de dados com as seguintes informações: coordenadas (Leste, Norte), dados magnéticos, dados gravimétricos, altitude. Após a geração das soluções da deconvolução de Euler (Figuras E.1, E.2, E.3, E.4, E.5 e E.6, apresentadas no apêndice E) sobre os dados magnéticos, exportamos para o GM-SYS e iniciamos a modelagem.

Figura 6.9: Mapa Magnético Reduzido ao Polo com os perfis de trabalho.



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina. Os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontram dentro da área de estudo são marcados com triângulo. Pontos de cores distintas simbolizam as coletas realizadas por FLECK (2014)

Fonte: Produzido pelo Autor

As modelagens 2D apresentadas a seguir, foram feitas com os dados magnetométricos e gravimétricos dos perfis definidos na Figura 6.9. As simbologias utilizadas estão baseadas e adaptadas segundo a norma ABNT (1995). Nas modelagens dos perfis, foram utilizadas informações dos tipos de rochas mapeadas, e suas respectivas densidades médias.

Após plotagem e análise dos seis perfis sobre o mapa geológico, consulta a trabalhos de pesquisa como IBGE/DGC (1987), ALKIMIN e MARTINS-NETO (2012), FLECK (2014) e GRADIM (2013) dentre outros, relacionamos as rochas encontradas na região, as classificamos em três grupos: I - rochas ígneas que nesse

caso serão basalto, diabásio, gabro, granito e em menor quantidade riolito, II - rochas carbonáticas como mármore ³ e por último, III - arenito que englobam as rochas sedimentares. Assim, com base na literatura e informações voltadas para a geologia do estado, associamos as informações do tipo de rocha aos seus respectivos valores de densidades médias nas modelagens.

No grupo I temos, como citado por IBGE/DGC (1987), o feixe de lineamentos que atravessam boa parte do estado, é formado por rochas básicas, categorizados inicialmente como diabásios e gabros. Após análises litogeoquímicas dos diques, realizadas por VALENTE *et al.* (2009), parte dos diques de diabásio foram classificados como basalto. Com densidades variando entre valores de 2.7 - 3.3 g/cm³, 2.5 - 3.2 g/cm³ e 2.7 - 3.5 g/cm³, para o basalto, diabásio e gabro, respectivamente, na modelagem foi adotada a densidade média do basalto como padrão para os lineamentos.

O segundo tipo de rocha do grupo I, são os granitos. Algumas rochas ornamentais existentes são comumente generalizadas como granito (rochas silicáticas), mas na verdade englobam uma gama de rochas: granitos, granodioritos, sienitos, migmatitos entre outros. Assim, para simplificar na nomenclatura, simbologia e cores, nas modelagens iremos adotar apenas o termo granito. Por isso, ao longo dos perfis os blocos que tinham densidade variando entre 2.50 - 2.81 g/cm³, foram generalizados como granitos, VIEIRA *et al.* (2014). Finalizando esse grupo temos os blocos de riolito, apresentando dimensões e valores de densidade ligeiramente menores, não aflorantes, com densidade variando entre 2.35 - 2.70 g/cm³.

No grupo II, temos o mármore e o calcário que são rochas ornamentais encontradas na região. Estas rochas foram generalizadas como rochas carbonáticas (FILHO *et al.* (2013)), pois no estado existem grandes concentrações de calcário e mármore e outras rochas que são derivadas dessas duas, (FILHO *et al.* (2013)). Desta forma, simplificando, foi utilizada uma única simbologia e nomenclatura, para as rochas com densidade entre 1,50 - 2,75 g/cm³ que não se encaixavam no basalto, granito e nem o riolito.

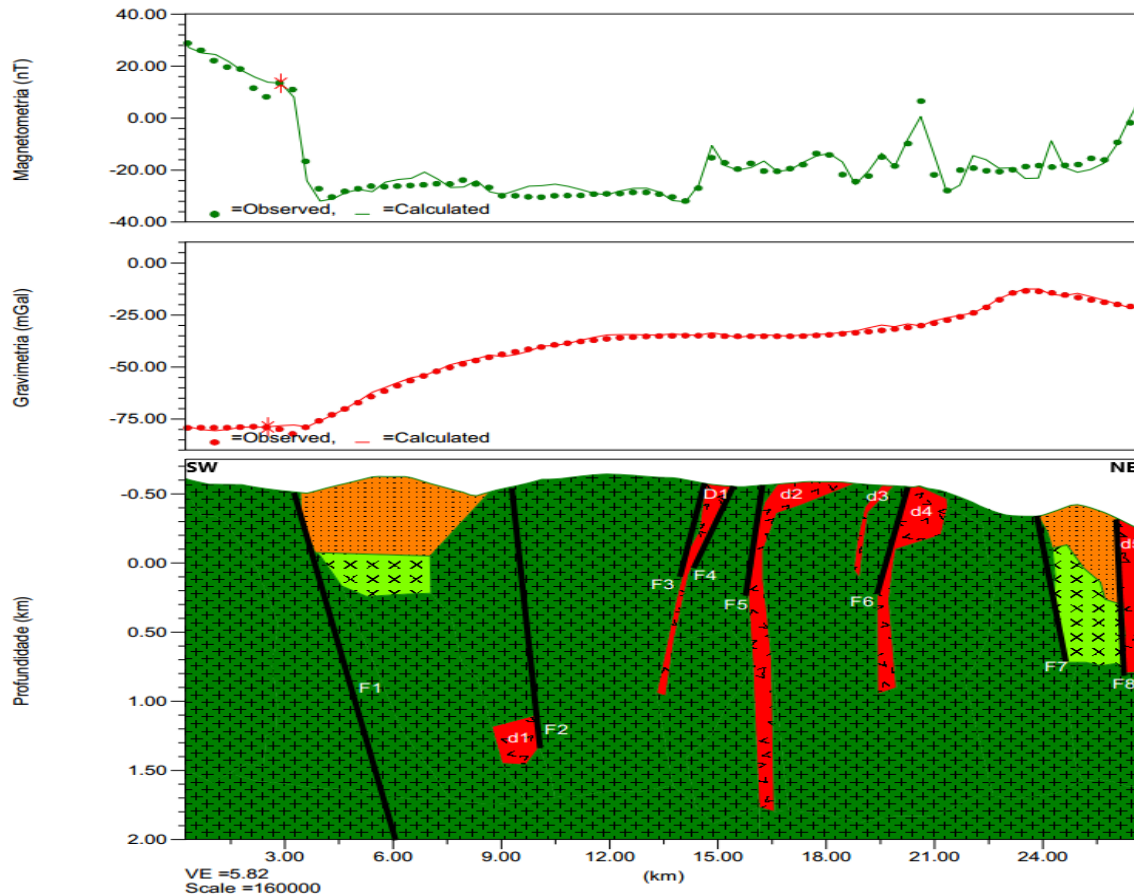
No grupo III, temos o arenito, termo utilizado para generalizar as rochas sedimentares, que não se encaixam no grupo de rochas carbonáticas. A região onde se encontra o lineamento e conseqüentemente os perfis modelados tem uma grande concentração de pontos de vazão. Então, se espera a existência de rochas de cunho sedimentar e argiloso. Sendo assim, na modelagem se adotou a densidade entre 1.61 - 2.76 g/cm³ para o arenito.

Nas Figuras a seguir estão representadas as modelagens geradas para os seis perfis com a rotina GM-SYS do Oasis Montaj, utilizando as informações anteriores de densidade e soluções da deconvolução de Euler.

³Aqui serão englobados nesse conjunto as rochas metamórficas e rochas sedimentares que derivem de calcita ou dolomita






6.4.1 Modelagem do Perfil 01

Figura 6.10: Modelagem 2D Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 1



Legenda: A seguinte simbologia foi adotada: Dique principal foi referido com o termo "D", enquanto que diques menores e correlatos foram adotados o "d" e para as falhas foi utilizado o "F", traço preto representa as falhas.

Rochas apresentadas nos perfis e seus respectivos valores de densidade.

				
2,05 g/cm ³	2,97 g/cm ³	2,28 g/cm ³	2,64 g/cm ³	2,41 g/cm ³

Fonte: Produzido pelo Autor

A modelagem do perfil 1 (Figura 6.10) apresenta uma curva dos dados magnéticos com valores máximo e mínimo entre 30 nT e -30 nT, respectivamente, com erro de 3,353%. Observa-se na posição 4.5 km uma diminuição do sinal, correspondendo a uma falha profunda e de alto ângulo (F1). Entre a posição 4.5 km e 15 km o perfil magnético está quase constante na horizontal apresentando uma pequena variação na posição 9 km coincidente com uma falha (F2) e com a mudança na

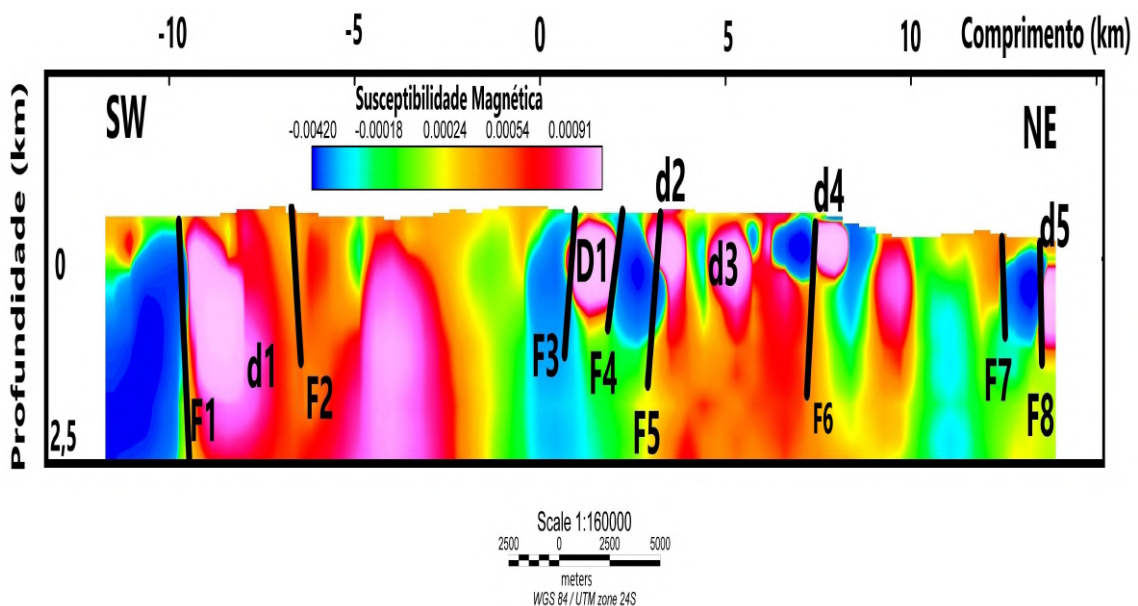
litologia. Na posição 15 km tem-se um aumento no valor magnético, associado ao dique principal (D1) seguido de uma falha (F3). Em seguida mais duas falhas (F4 e F5) que correspondem a diques secundários (d2, d3 e d4), ocorrendo o mesmo fato entre as posições 18 km e 21 km, (F6, F7 e F8) e um possível dique (d5).

A curva dos dados gravimétricos tem valores máximo e mínimo entre - 10 mGal e - 80 mGal, respectivamente, com erro de 0,967%. Percebe-se na posição de 4.5 km um aumento do sinal, coincidindo com a falha de alto ângulo (F1), onde essa curva apresenta uma tendência de aumento da densidade na direção da borda da bacia sedimentar.

A modelagem do perfil 1 (Figura 6.10) mostra uma grande quantidade de corpos descritos possivelmente como basalto, onde um deles representa o dique principal (D1), apresentando densidade de 3.1 g/cm³, com profundidade próxima a 1.5 km. Existem alguns correlatos (d1 até d5), com profundidade variando entre 0.5 até 2.5 km, sendo todos eles associados ao feixe de lineamento. Próximo à cidade de Ecoporanga (M1) existe uma concentração maior desses lineamentos, com muitos afloramentos ou próxima a superfície, algo visto no mapa da primeira derivada (Figura 6.3).

Nota-se também algumas falhas, a maior de todas está localizada na região onde ocorre a mudança de litologia, referenciada como falha F1. Na modelagem apresentada vemos corpos definidos como riolitos, que são rochas extrusivas não aflorantes. Elas apresentam magma mais viscoso, entretanto podendo ser visíveis após anos de soerguimento e erosão, VIEIRA e MENEZES (2015).

Figura 6.11: Seção 1 retirada da modelagem 3D Magnetométrica

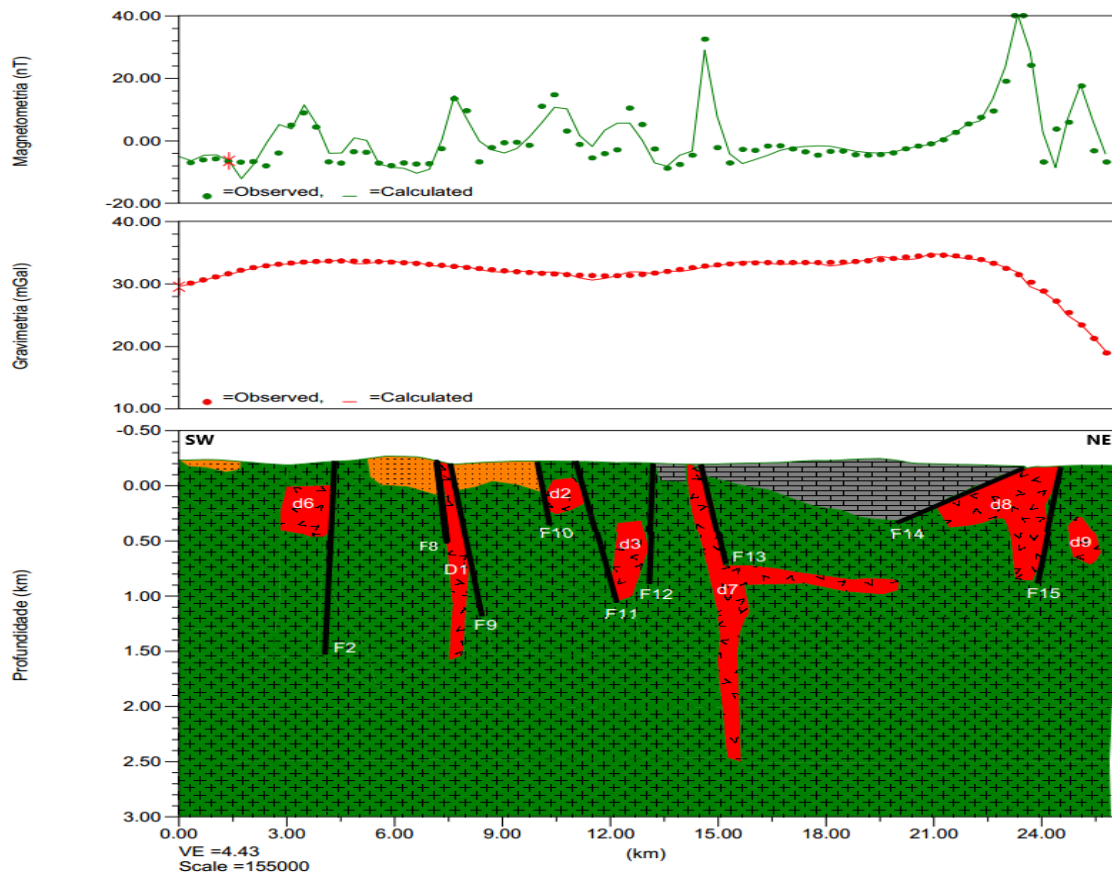


Fonte: Produzido pelo Autor

A Figura 6.11 mostra a seção (Slice) extraída da modelagem Voxi e Voxel do Oasis Montaj. Ao comparar as Figuras 6.10 e 6.11, percebem-se pontos de correspondência, como com a falha F1 mostrando o limite de uma anomalia magnética positiva. Além disso, estão evidenciadas anomalias positivas que possivelmente são corpos de basalto. As localizações das falhas traçadas coincidem com as anomalias magnéticas observadas e as informações integradas da geologia local.

6.4.2 Modelagem do Perfil 02

Figura 6.12: Modelagem 2D Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 2



Legenda: A seguinte simbologia foi adotada: Dique principal foi referido com o termo "D", enquanto que diques menores e correlatos foram adotados o "d" e para as falhas foi utilizado o "F", traço preto representa as falhas.

Rochas apresentadas nos perfis e seus respectivos valores de densidade.

2,05 g/cm ³	2,97 g/cm ³	2,28 g/cm ³	2,64 g/cm ³	2,41 g/cm ³

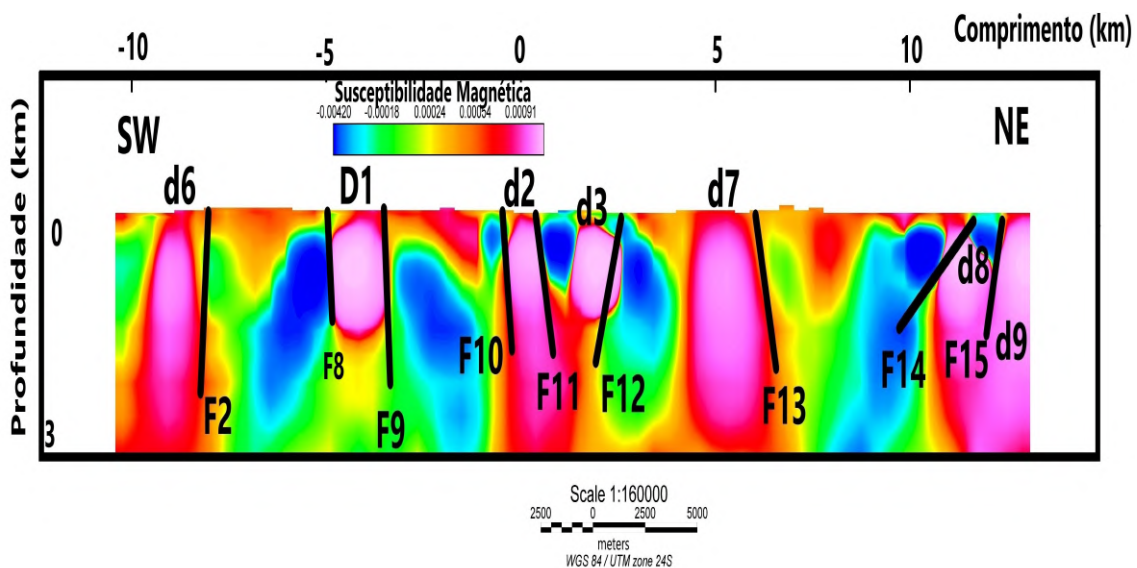
Fonte: Produzido pelo Autor

A modelagem do perfil 2 (Figura 6.12) apresenta uma curva dos dados magnéticos com valores máximo e mínimo de 40 nT e - 10 nT, respectivamente, com erro de 4,157%. Observa-se na posição 3 km um aumento no sinal correspondendo ao dique correlato (d6), e uma diminuição no sinal logo em seguida que coincide com uma falha (F2). Esse fato se repete com o dique principal (D1) na posição 7.5 km e a falha (F9). O mesmo ocorre com outros diques nas posições 10.5 km, 12 km, 15 km, 14 km e 25.5 km (corpos d2, d3, d7, d8 e d9), e as falhas (F10, F11, F12, F13, F14 e F15). Entre a posição 16.5 km e 22.5 km o perfil magnético está quase constante na horizontal, está parte do perfil coincide com um corpo modelado como rocha carbonática, encaixada entre dois corpos classificados como basalto.

A curva dos dados gravimétricos apresenta pequenas variações e tem valores máximo e mínimo entre 35 mGal e 16 mGal, respectivamente, com erro de 0,261%. Nota-se uma diminuição de sinal entre as posições 10.5 km e 13.5 km, região que apresenta três falhas e mudança de litologia. Observa-se também uma variação significativa na posição 24 km, onde ocorre uma nova mudança de litologia.

No perfil 2 (Figura 6.12) observa-se uma grande quantidade de anomalias, correspondendo possivelmente a vários corpos que se encaixariam na descrição como basalto. O dique principal (D1) está bem evidente, com profundidade aproximada de 2 km, e temos alguns diques correlatos e soleiras (d2, d3, d6, d7, d8 e d9), com profundidades variáveis. Na modelagem apresentada vemos corpos que foram definidos como arenitos e rochas carbonáticas, aflorando ou subaflorando. Estes corpos estão localizados em regiões onde ocorre diminuição dos sinais magnéticos no perfil.

Figura 6.13: Seção 2 retirada da modelagem 3D Magnetométrica

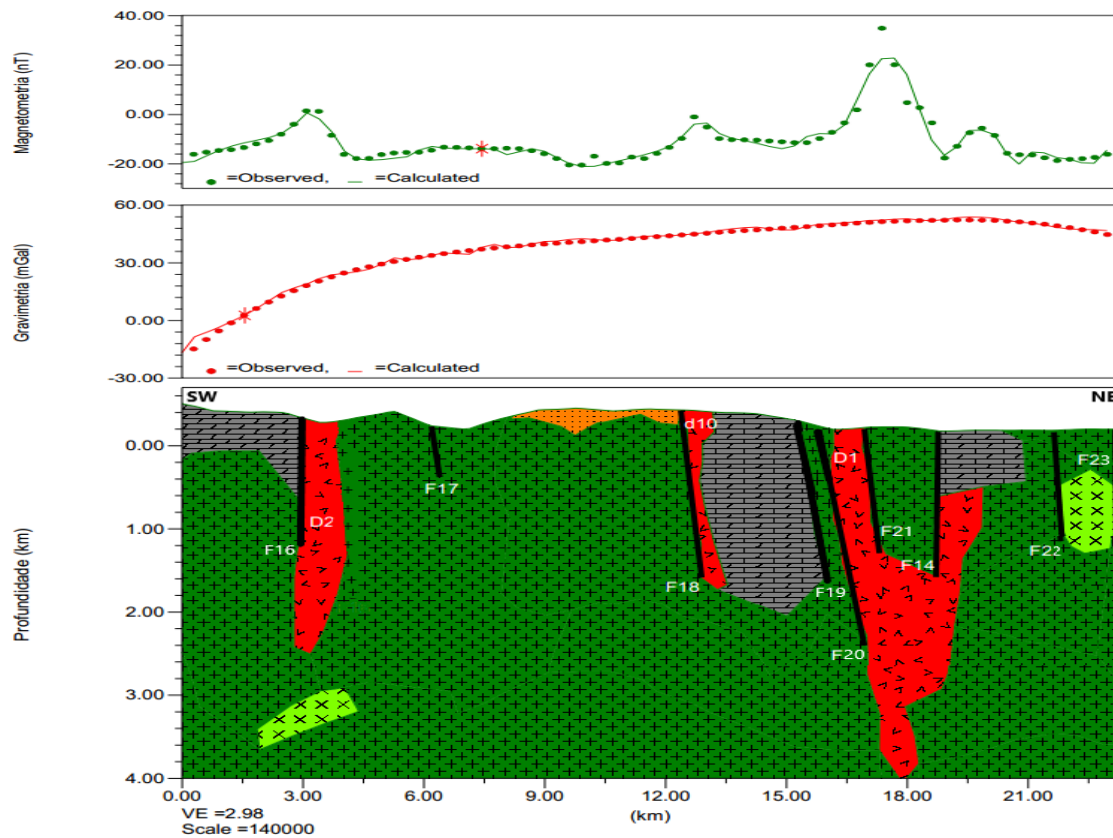


Fonte: Produzido pelo Autor

A Figura 6.13 mostra a seção (Slice) extraída da modelagem Voxi e Voxel do Oasis Montaj. Ao comparar as Figuras 6.12 e 6.13, percebem-se pontos de coincidência, as anomalias positivas estão de acordo com corpos definidos como diques de basalto (d6, d2, d3, d7, d8 e d9). Além disso, o dique principal (D1) está encaixado entre duas anomalias negativas, coincidente com blocos de arenito. Nota-se também uma grande anomalia negativa ao lado de uma positiva sendo delimitada pela falha F14, correspondendo ao contraste de um corpo carbonático com um corpo de basalto (d8).






6.4.3 Modelagem do Perfil 03

Figura 6.14: Modelagem 2D Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 3



Legenda: A seguinte simbologia foi adotada: Dique principal foi referido com o termo "D", enquanto que diques menores e correlatos foram adotados o "d" e para as falhas foi utilizado o "F", traço preto representa as falhas.

Rochas apresentadas nos perfis e seus respectivos valores de densidade.

				
Arenito	Basalto	Carbonáticas	Granito	Riolito
2,05 g/cm ³	2,97 g/cm ³	2,28 g/cm ³	2,64 g/cm ³	2,41 g/cm ³

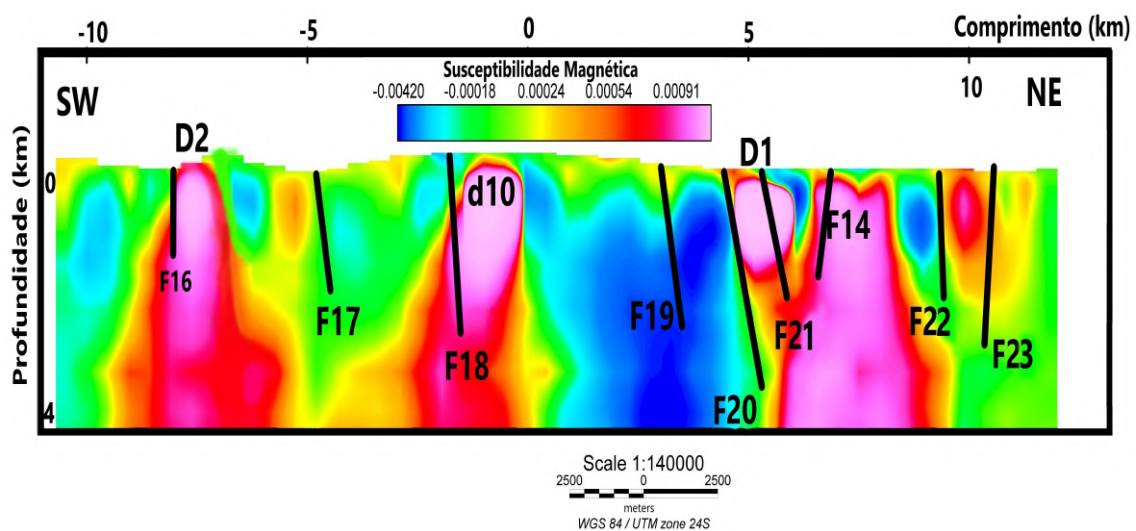
Fonte: Produzido pelo Autor

O perfil magnético da modelagem 3 (Figura 6.14) apresenta uma curva dos dados magnéticos com valores máximo e mínimo de 40 nT e -20 nT, respectivamente, com erro de 2,658%. Observa-se na posição 3 km uma anomalia positiva, correspondendo a uma ramificação do dique principal (D2). A sua profundidade é de aproximadamente 3 km, estando encaixada entre uma rocha definida como carbonática e a falha F16. Entre a posição 9 e 12 km notamos uma diminuição do sinal magnético que coincide com uma possível cobertura de arenito. Na posição 12 km temos uma anomalia positiva associada a um dique secundário (d10), com aproximadamente 2.2 km de profundidade, encaixada entre a cobertura de arenito, limitada pela falha (F18) e a rocha carbonática.

Na posição 16.5 km observa-se, uma anomalia coincidindo o com dique principal (D1) que aflora, e chegando a profundidade aproximada de 4.5 km. Ao lado ocorre uma ramificação desse dique não aflorante intercalado por um bloco de granito limitado pelas falhas F20, F21 e F14.

A curva dos dados gravimétricos tem valores máximo e mínimo entre 55 mGal e -25 mGal, respectivamente, com erro de 0,745%. Percebe-se entre a região de 0 km e 3 km, um sinal magnético menor que no resto do perfil, correspondendo a um corpo carbonático. O campo se mantém aumentando gradativamente em boa parte do perfil, tendo uma pequena queda na posição 21 km, onde ocorre uma mudança de litologia, região de contato de um corpo granítico, com um riolito.

Figura 6.15: Seção 3 retirada da modelagem 3D Magnetométrica



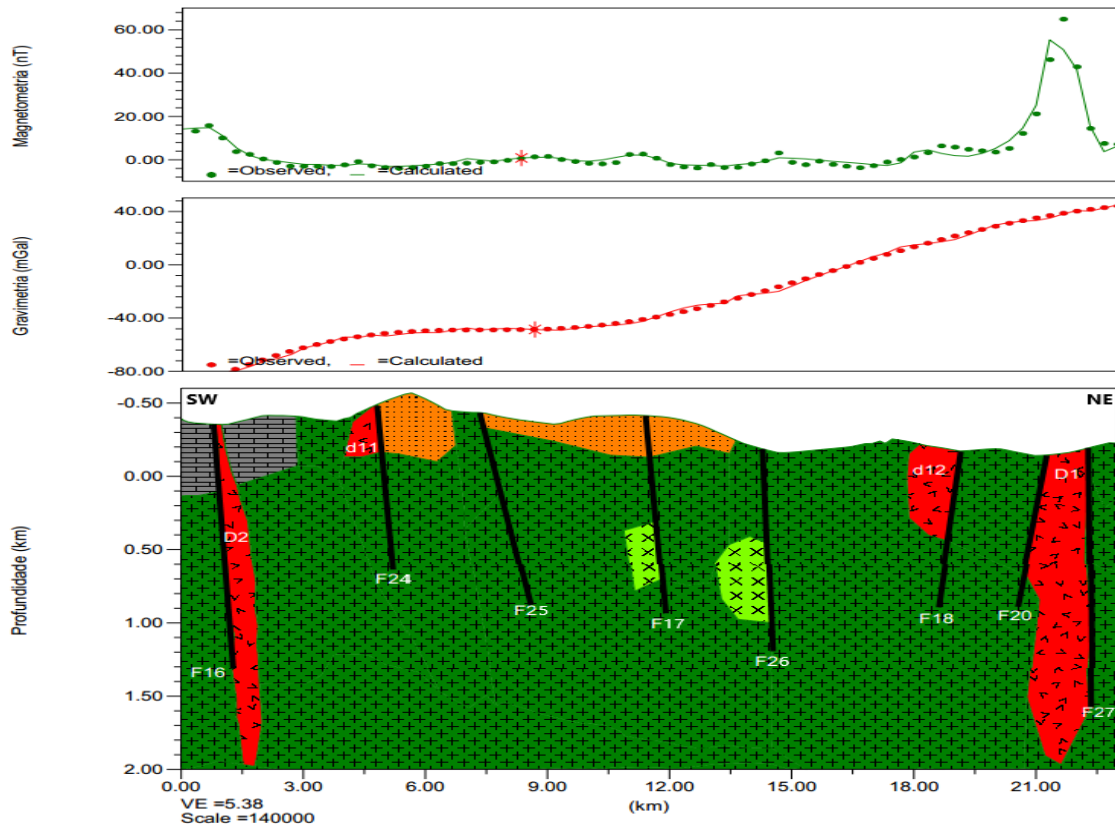
Fonte: Produzido pelo Autor

Ao realizar a comparação entre as 6.14, 6.15 nota-se que os 3 corpos definidos como basalto, coincidem com as maiores anomalias positivas da seção, (D1, d10 e D2). Observa-se também uma anomalia negativa coincidindo com o contato de uma

rocha carbonática com um dique de basalto, limitada pela falha F20.

6.4.4 Modelagem do Perfil 04

Figura 6.16: Modelagem 2D Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 4



Legenda: A seguinte simbologia foi adotada: Dique principal foi referido com o termo "D", enquanto que diques menores e correlatos foram adotados o "d" e para as falhas foi utilizado o "F", traço preto representa as falhas.

Rochas apresentadas nos perfis e seus respectivos valores de densidade.

Arenito	Basalto	Carbonáticas	Granito	Riolito
2,05 g/cm ³	2,97 g/cm ³	2,28 g/cm ³	2,64 g/cm ³	2,41 g/cm ³

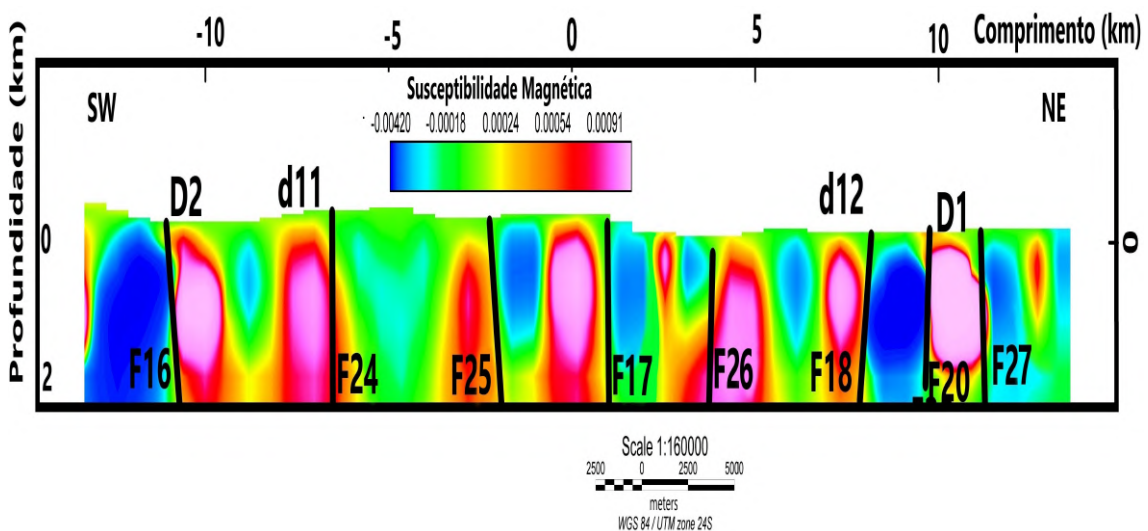
Fonte: Produzido pelo Autor

A modelagem do perfil 4 (Figura 6.16) apresenta uma curva dos dados magnéticos com valores máximo e mínimo de 60 nT e -5 nT, respectivamente, com erro de 2,443%. Observa-se na posição 2 km uma anomalia positiva, correspondendo a uma ramificação do dique principal (D2), com profundidade de aproximadamente de 2 km, limitado pela falha F16. Outra anomalia positiva é notada na posição 4.5 km

correspondendo a um corpo de menor dimensão de basalto (d11), com uma queda no sinal logo em seguida coincidindo com uma falha (F21) e um corpo de arenito. A seguir temos repetidas variações leves, alternando altos e baixos entre a posição 9 km e 15 km, associados a separação de blocos pelas seguintes falhas F25, F17 e F26. Na posição 18 km volta a ter um aumento de sinal coincidindo com um bloco de basalto (d12) limitado pela falha (F18). O sinal mais intenso apresentado está relacionado ao dique principal (D1), com profundidade de 2 km, estando encaixado entre duas falhas (F20 e F27).

A curva dos dados gravimétricos tem valores máximo e mínimo entre 40 mGal e -80 mGal, respectivamente, com erro de 0,749%. Percebe-se um aumento gradativo do sinal, em direção à borda da bacia sedimentar, mas entre as posições 9 km e 15 km o sinal tem um leve declínio, região onde tem um bloco que pode ser uma rocha sedimentar.

Figura 6.17: Seção 4 retirada da modelagem 3D Magnetométrica

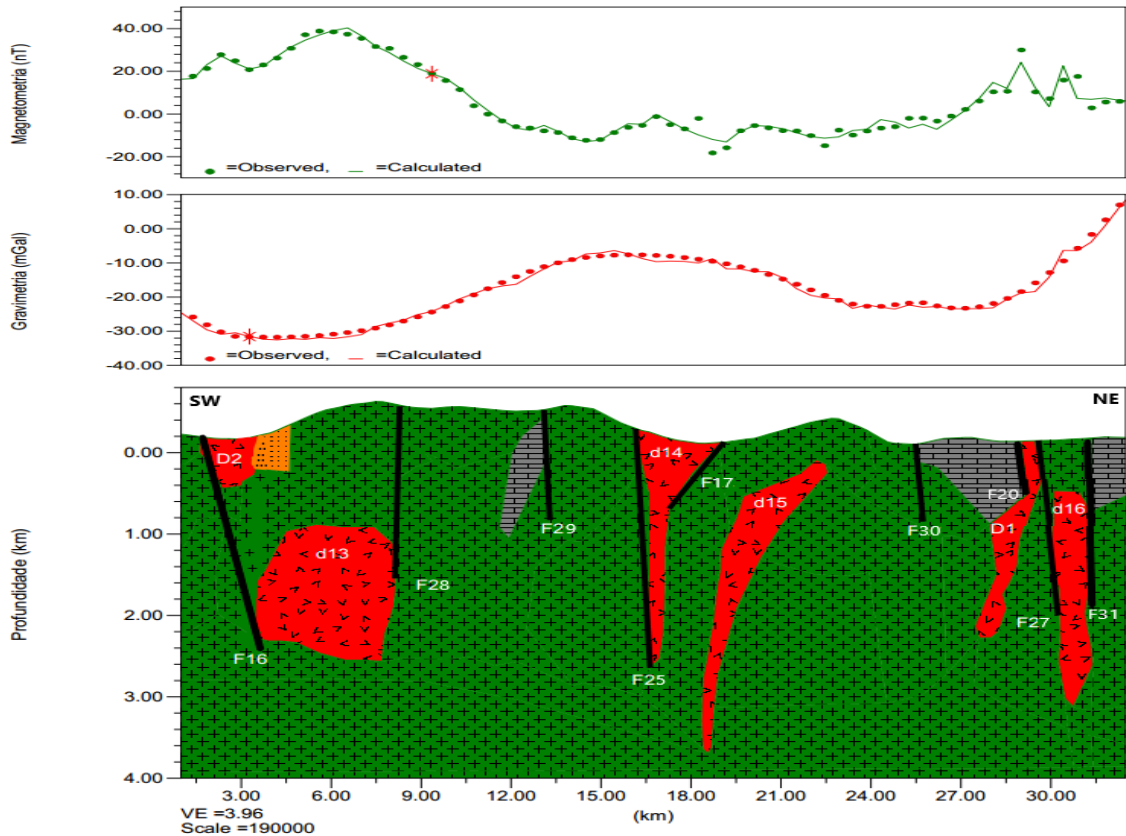


Fonte: Produzido pelo Autor

Ao realizar a comparação entre as Figuras 6.16, 6.17, semelhante aos perfis anteriores, ocorre a coincidência dos corpos definidos como basalto com anomalias magnéticas positivas, como D2 encaixado entre duas anomalias magnéticas negativas, o mesmo ocorrendo com D1. Vê-se uma serie de corpos intercalados entre os diques D1 e D2, separados por um conjunto de falhas (F16, F20 e F27)






6.4.5 Modelagem do Perfil 05

Figura 6.18: Modelagem 2D Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 5



Legenda: A seguinte simbologia foi adotada: Dique principal foi referido com o termo "D", enquanto que diques menores e correlatos foram adotados o "d" e para as falhas foi utilizado o "F", traço preto representa as falhas.

Rochas apresentadas nos perfis e seus respectivos valores de densidade.

				
2,05 g/cm ³	2,97 g/cm ³	2,28 g/cm ³	2,64 g/cm ³	2,41 g/cm ³

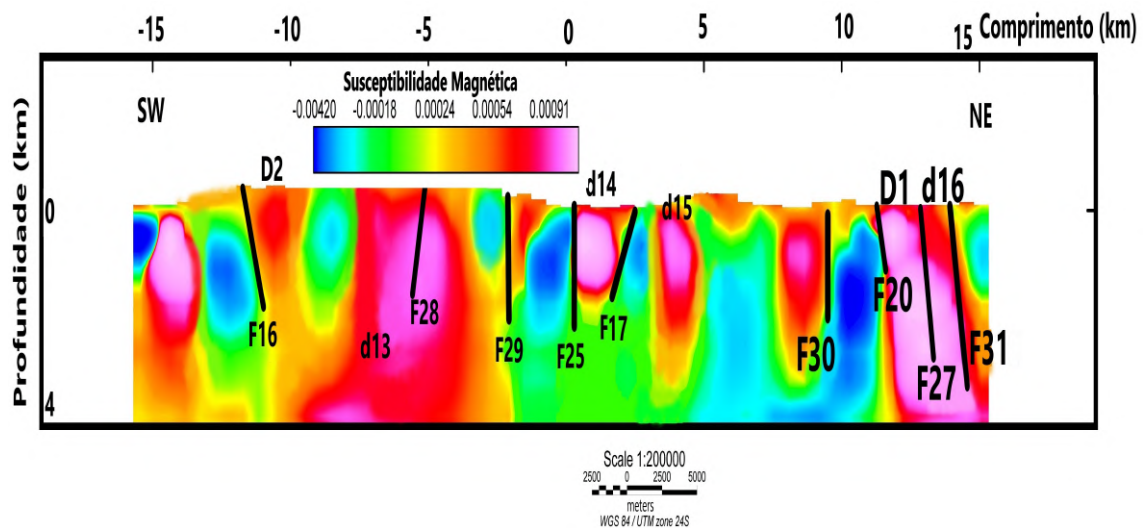
Fonte: Produzido pelo Autor

A modelagem do perfil 5 (Figura 6.18) apresenta uma curva dos dados magnéticos com valores máximo e mínimo de 40 nT e -20 nT, respectivamente, com erro de 2,693%. Observa-se na posição 3 km uma anomalia positiva correspondendo a uma ramificação do dique principal (D2), com profundidade de 400 m, sendo limitado por uma falha (F16). A outra anomalia ocorre entre as posições 4.5 km e 7.5 km relacionada a um corpo definido como basalto (d13), com limite superior de 1 km e inferior de 2.4 km. Observa-se então, um declínio no sinal até a posição 15 km,

mas a partir dessa posição ocorre um aumento gradativo no sinal, podendo estar relacionado a um corpo de basalto (d14), com profundidade de 2.8 km, encaixado entre duas falhas (F25 e F17). Outra anomalia positiva ocorre na posição 18 km relativo a outro bloco de basalto (d15), com profundidade de 3.8 km. As duas últimas anomalias estão associadas ao dique principal (D1), com profundidade de 2.2 km, e outro correlato (d16) com profundidade de 3 km separados pela falha (F27).

A curva dos dados gravimétricos tem valores máximo e mínimo entre 10 mGal e -30 mGal, respectivamente, com erro de 2,153%. Observa-se entre as posições de 3 km e 12 km uma anomalia negativa onde se encontram três falhas (F16, F28 e F29) coincidindo com uma mudança na litologia. Outra variação no sinal ocorre entre 21 km e 30 km, região também repleta de falhas, voltando a apresentar um aumento de sinal após a posição 20 km, região proximal da bacia.

Figura 6.19: Seção 5 retirada da modelagem 3D Magnetométrica

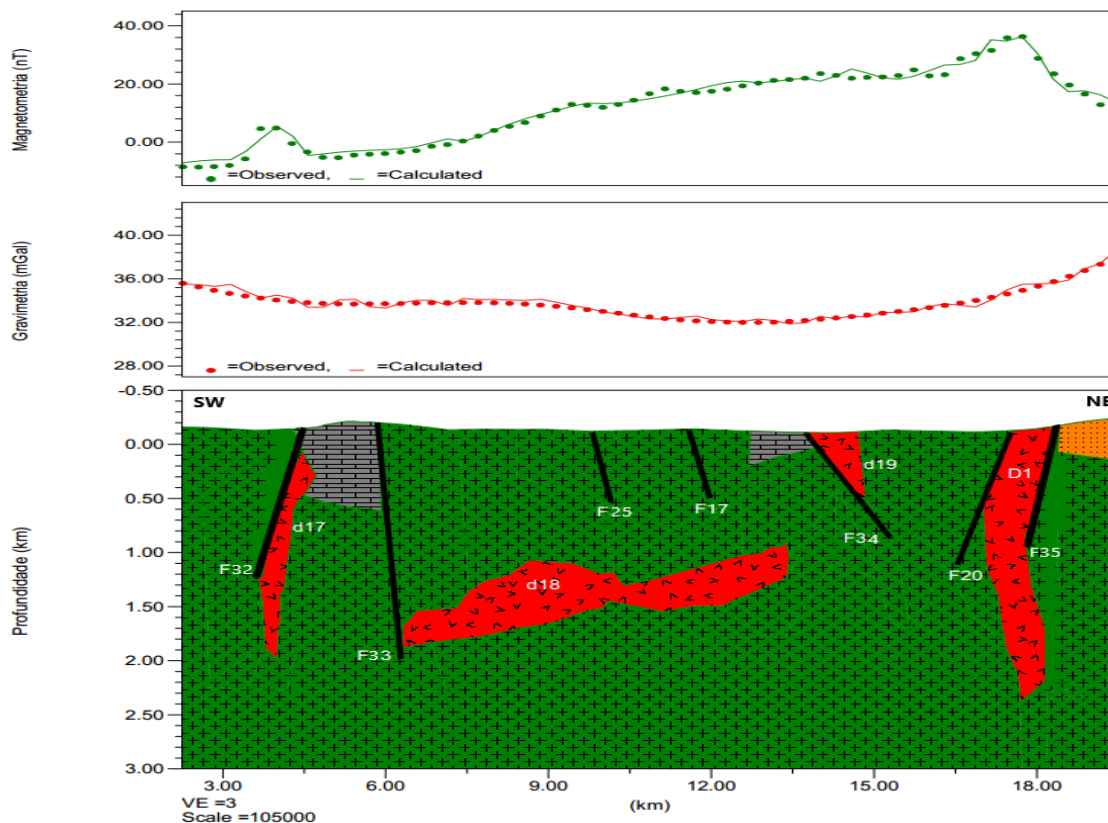


Fonte: Produzido pelo Autor

Ao realizar a comparação entre as Figuras 6.18, 6.19 nota-se uma anomalia positiva coincidindo com o corpo definido como o dique correlato (D2), além de um bloco possivelmente carbonático coincidindo com uma anomalia negativa limitada pelas falhas F30 e F20. Outro ponto é uma anomalia positiva coincidindo com um grande bloco de basalto (d13). Além disso, existe uma anomalia positiva entre duas falhas que está em acordo com um corpo definido basalto (d14), junto com o corpo d15. Por último existe uma grande anomalia de um corpo único, embora que na modelagem apareçam dois corpos separados, que pode ser devido a um artifício matemático.






6.4.6 Modelagem do Perfil 06

Figura 6.20: Modelagem 2D Magnetométrica e Gravimétrica do perfil 6



Legenda: A seguinte simbologia foi adotada: Dique principal foi referenciado com o termo "D", enquanto que diques menores e correlatos foram adotados o "d" e para as falhas foi utilizado o "F", traço preto representa as falhas.

Rochas apresentadas nos perfis e seus respectivos valores de densidade.

				
2,05 g/cm ³	2,97 g/cm ³	2,28 g/cm ³	2,64 g/cm ³	2,41 g/cm ³

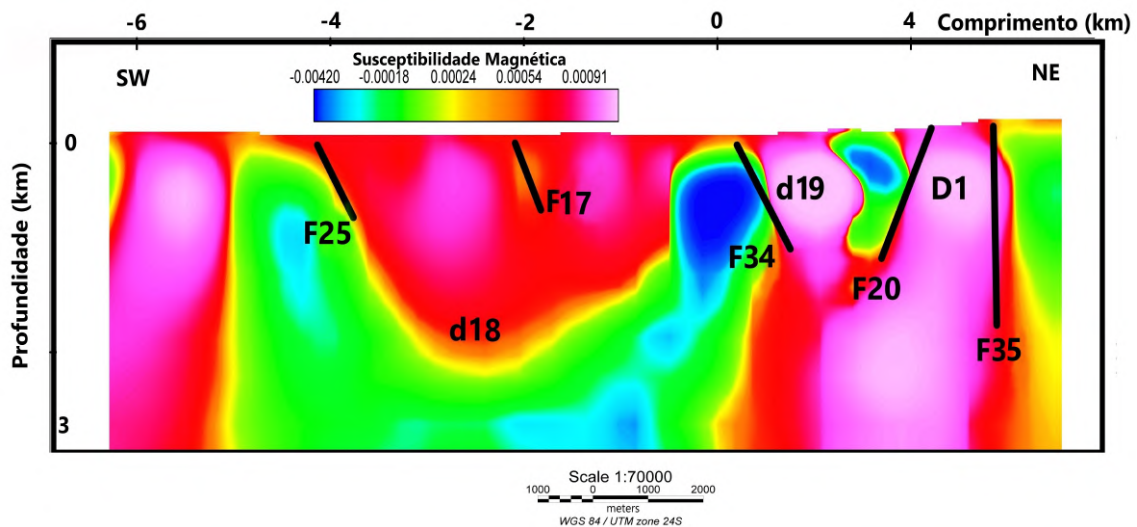
Fonte: Produzido pelo Autor

A modelagem do perfil 6 (Figura 6.20) apresenta uma curva dos dados magnéticos com valores máximo e mínimo de 40 nT e - 5 nT, respectivamente, com erro de 1,575%. Observa-se entre as posições 3 km e 4 km um aumento no sinal do perfil correspondendo a um bloco que pode ser um basalto (d17), com profundidade de 2 km. O sinal volta a aumentar gradativamente ao coincidir com o bloco (d18), caracterizado como uma soleira com espessura média de 0.7 km e profundidade média de 1.5 km. O bloco seguinte apresenta alguns falhamentos, caracterizados

pelas falhas F25, F17 e F34, e o corpo d19. A última anomalia está associada ao dique principal (D1) encaixado entre duas falhas (F20 e F35), com profundidade de 2.5 km.

A curva dos dados gravimétricos tem valores máximo e mínimo entre 40 mGal e 30 mGal, respectivamente, com erro de 2,341%. Nota-se um pequeno aumento no sinal na posição 8 km. Além disso, entre as posições 11.5 km e 16.5 km ocorre uma diminuição no sinal (baixo gravimétrico), coincidindo com uma grande quantidade de falhamentos (F25, F17, F34, F20 e F35).

Figura 6.21: Seção 6 retirada da modelagem 3D Magnetométrica



Fonte: Produzido pelo Autor

Ao realizar a comparação entre as Figuras 6.20, 6.21, podemos descrever a existência de grandes anomalias positivas, diferente do observado nas outras seções. A primeira poderia ser relacionada com o corpo d17, a segunda seria o corpo d18 e a terceira corresponde ao dique principal D1, junto com o corpo d19. Além disso, percebe-se uma falha (F34) separando uma anomalia negativa de uma positiva, estando de acordo com a modelagem onde temos um bloco carbonático sendo separado de outro de basalto.

6.4.7 Comparativo entre diferentes modelagens: GM-sys Profile e Seções (Slices) do Voxi Voxel

Os modelos construídos no GM-SYS Profile do Oasis Montaj, apresentados nas Figuras 6.10, 6.12, 6.14, 6.16, 6.18 e 6.20, foram obtidos utilizando como base as soluções de Euler mostradas nas Figuras E.1, E.2, E.3, E.4, E.5 e E.6 (no apêndice E), em conjunto com o contexto geológico de trabalhos existentes na literatura.

As comparações feitas entre os modelos GM-SYS Profile do Oasis Montaj e as seções extraídas dos modelos 3D Voxi e Voxel do Oasis Montaj, têm como objetivo mostrar que as anomalias e as estruturas geológicas apresentadas, têm pontos de concordância entre as modelagens mesmo que tenham sido usadas técnicas de concepção diferentes. Nos trabalhos de MARELLO *et al.* (2010) e ARAFFA *et al.* (2015), traçaram falhas sobre as seções dos perfis, semelhante ao realizado aqui nesse trabalho, com dados de resistividade e magnéticos respectivamente, o intuito desse procedimento é de verificar concordâncias entre mudanças de sinais com possíveis mudanças litológicas.

Em síntese, analisando as seis modelagens, podemos fazer as seguintes considerações, dividindo as modelagens em dois grupos:

I - Nas modelagens 1 a 3 na região NW do lineamento, notamos uma maior quantidade de diques estreitos, e pelas modelagens esses estariam aflorando ou a profundidades de no máximo 2 Km. Esse corpo tem forma tabular, o mergulho estaria oscilando de subvertical a vertical. Essas observações corroboram com os trabalhos de NOVAIS *et al.* (2004), PEDROSA-SOARES *et al.* (2007), ALKIMIN e MARTINS-NETO (2012) e FLECK (2014). As amostras coletadas em afloramentos e analisadas por FLECK (2014) nessa área demonstraram uma grande quantidade de rochas de diabásio.

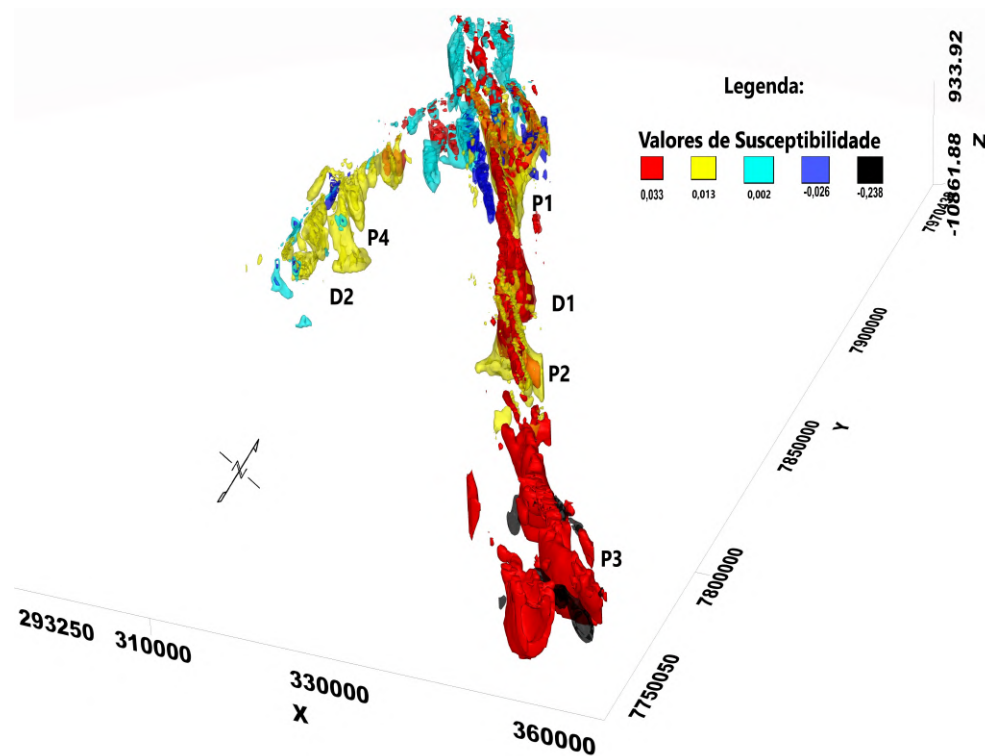
II – Nas modelagens 3 a 6, notamos que se destaca o dique principal (D1) na parte central do Lineamento e o dique D2 a oeste entre os perfis 3 a 5. Mas na região após o perfil 6 o sinal magnético correspondente ao dique principal e/ou outros correlatos está encoberto por fortes anomalias na borda da bacia. Segundo FLECK (2014) ocorre grandes quantidades de afloramentos nessa região após o perfil 6, onde foram analisadas amostras e encontradas rochas de basalto, gabro e diabásio em maior quantidade. Esses corpos têm forma tabular, o mergulho estaria oscilando de subvertical a vertical, assim como na região NW do lineamento.

6.5 Voxi e Voxel

A técnica de modelagem 3D através das rotinas Voxi e Voxel, tem muita eficácia na realização do processo de inversão e construção de modelos 3D de estruturas em subsuperfície. GIACOMINI (2015) utilizou as rotinas 3D para modelagem em dados gravimétricos no cerro do Jarau - RS. SILVA (2019), realizou a inversão com o objetivo de caracterizar estruturas associadas a ouro e cobre. JUNIOR (2019) em seu trabalho tinha como foco caracterizar melhor o batólito de Catolé na região PB-RN, onde se encontra o lineamento Caicó-Bom Jesus, ambos com a finalidade de obter uma imagem da subsuperfície. As próximas modelagens apresentadas são as modelagens 3D do lineamento Colatina.

As Figuras 6.23, 6.22 e 6.24 mostram a estrutura do lineamento Colatina dividido em 5 blocos, por apresentar susceptibilidades variáveis. As medidas de susceptibilidade apresentam um range muito amplo de valores, diferentemente da densidade, que apresentam um range reduzido. FLECK (2014) ao analisar amostras coletadas ao longo do lineamento, observou que na região SE próximo à cidade de Vitória (M5), existia uma grande quantidade de afloramentos de rochas basálticas. Enquanto que na região NW próximo a cidade de Ecoporanga (M1) a predominância era de rochas de diabásio. Desta forma, os valores apresentados na legenda são as médias desses valores de susceptibilidade, uma vez que o range utilizado para o basalto, diabásio e gabro são muito amplos.

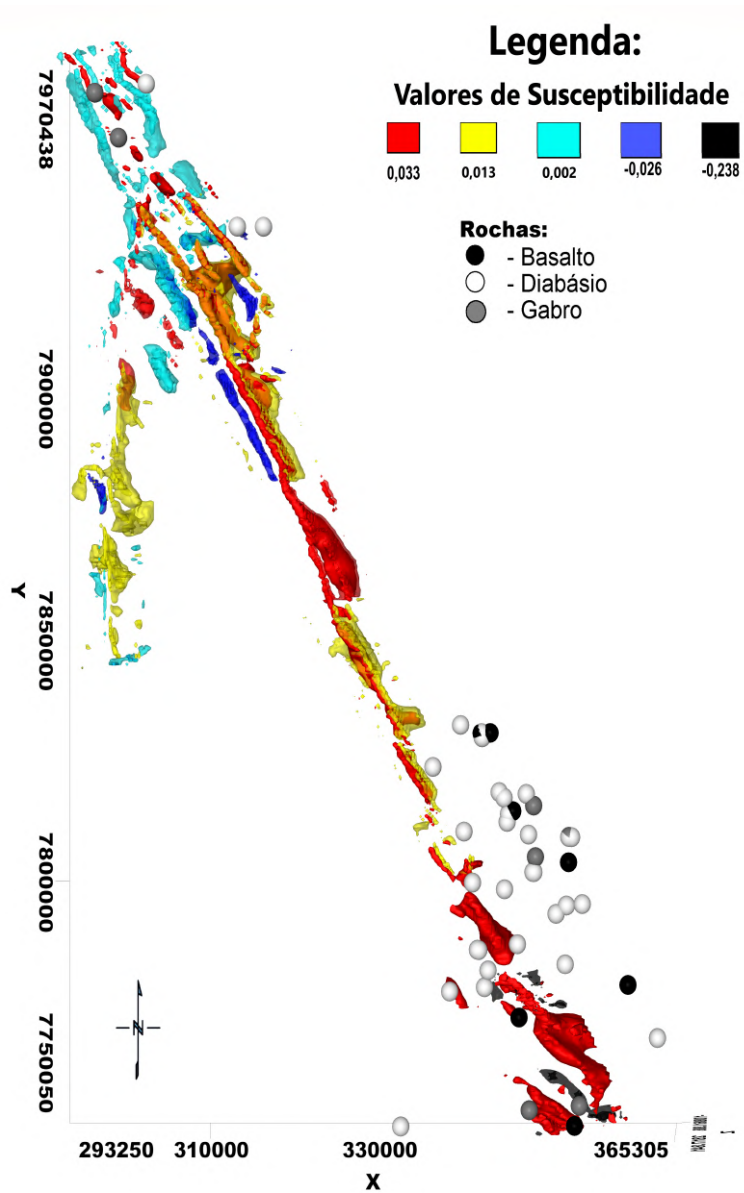
Figura 6.22: Vista Lateral 1 do Lineamento Colatina



Legenda: Os diques são expressos com a letra "D" e possíveis pontos extrusão com a letra "P".

Fonte: Produzido pelo Autor

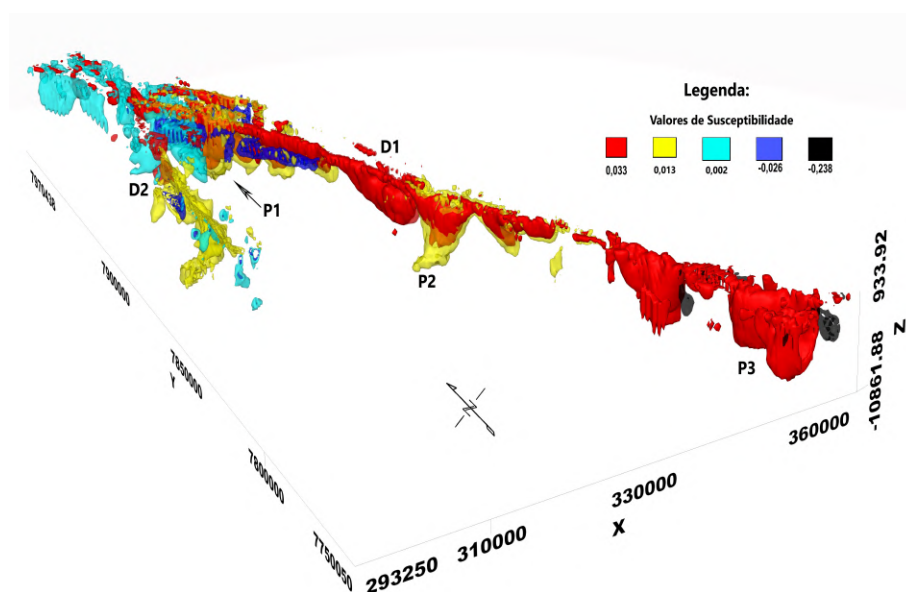
Figura 6.23: Vista Superior do Lineamento Colatina



Legenda: As esferas com diferentes cores são as amostras coletadas por FLECK (2014)

Fonte: Produzido pelo Autor

Figura 6.24: Vista Lateral 2 do Lineamento Colatina



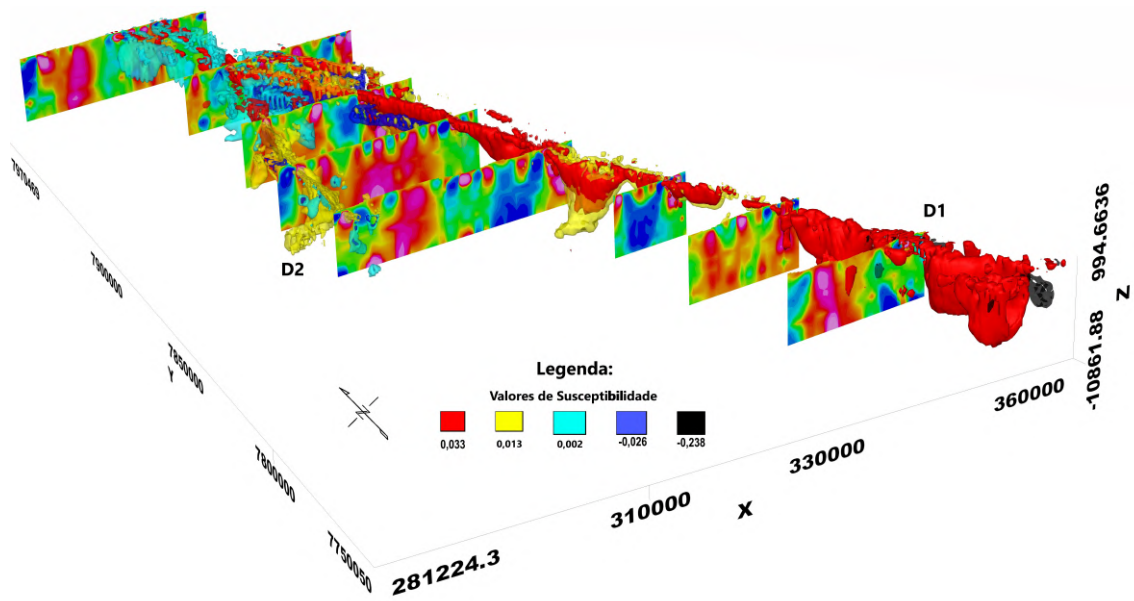
Legenda: Os diques são expressos com a letra "D" e possíveis pontos extrusão com a letra "P".

Fonte: Produzido pelo Autor

As três figuras mostram o lineamento com valores distintos de susceptibilidade, isso pode ter ocorrido devido aos diferentes tempos de formação dos cristais desses blocos. Nessa modelagem fica aparente o lineamento principal (D1) com direção N10-15W e um dique correlato (D2) com direção N-S. Um ponto observado é que o lineamento Colatina na região próxima à borda da bacia esta fragmentado.

Nota-se também, possíveis pontos de extrusão do material P1 até P4, sendo essa, uma possível explicação para os diferentes valores de suscetibilidade dos blocos. Nesses pontos o dique chegou a aproximadamente 8 km de profundidade, mas em sua maioria estão aflorando ou próximos a superfície com cerca de 1 a 2 km de profundidade. Entretanto, COSTA (2005) ao realizar um imageamento MT ao longo do rio Doce, mapeou uma anomalia condutiva a uma profundidade de 8 km, entre as suas estações 19 e 20. Essa região coincide com um possível ponto de extrusão (P2) do nosso lineamento principal, entre os perfis 5 e 6, (Figura 6.9) e corrobora com as profundidades determinadas pela nossa modelagem, atingindo os 8 km.

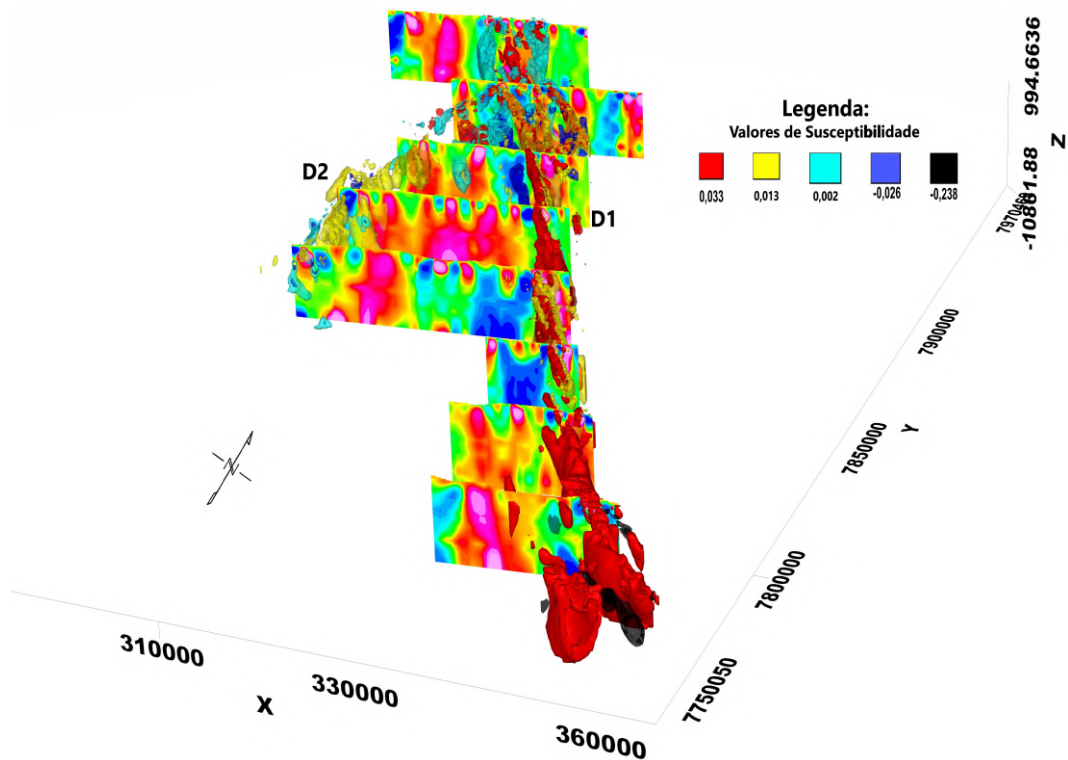
Figura 6.25: Vista lateral 1 do Lineamento atravessando os seções dos mapas das anomalias magnéticas



Legenda: Os diques são expressos com a letra "D".

Fonte: Produzido pelo Autor

Figura 6.26: Vista lateral 2 do Lineamento atravessando os seções dos mapas das anomalias magnéticas



Legenda: Os diques são expressos com a letra "D".

Fonte: Produzido pelo Autor

As Figuras 6.25 e 6.26, mostram a imagem obtida da união da inversão 3D (Voxel) do lineamento atravessando as seções (Slices) extraídas da inversão dos dados magnéticos através do Voxi. Essa junção das seções com a imagem 3D tem como objetivo observar a concordância das estruturas. Isso foi realizado também, nos trabalhos de CASTRO (2011) e PEREIRA *et al.* (2015), que constataram existir uma concordância das estruturas mostradas nas seções com os modelos 3D.

Capítulo 7

Conclusão

A pesquisa tinha como objetivo realizar modelagens 2D e 3D do lineamento Colatina e correlatos. Além disso, construímos os mapas temáticos dos três métodos geofísicos, sendo que os dados magnetométricos e gravimétricos foram utilizados com o propósito de identificar os falhamentos e o feixe de lineamentos, e assim, termos a noção de distribuição espacial dos lineamentos na área de estudo.

Segundo IBGE/DGC (1987), a maior parte dos diques dentro da região do lineamento são formados por rochas básicas provenientes de uma pluma mantélica. Este material foi extrudido através das falhas e depositado em locais onde ocorreu o resfriamento.

Os dados gravimétricos foram utilizados para delimitar discontinuidades na extensão do lineamento, e mostraram fraturamento na região próxima à borda da bacia. Estes dados também foram importantes no processo de modelagem 2D, pois contribuíram na individualização dos diques em relação às outras rochas.

O uso dos dados radiométricos teve como finalidade identificar a presença de elementos radioativos e demarcar a diferença na litologia do dique em relação a outras rochas, mas não apresentou respostas significativas. Isto confirmou a pesquisa de FLECK (2014), que classificou as rochas do dique, pelo método geoquímico, como máficas, o que corrobora a afirmação de PESSANO *et al.* (2020), de que não se espera concentrações relevantes de elementos radioativos em rochas máficas.

Os dados magnetométricos foram fundamentais para a caracterização do feixe Colatina, através dos mapas temáticos em superfície e subsuperfície. Eles evidenciaram a diferença de litologia entre os corpos encontrados na região. Estes dados realçaram o feixe de diques de composição basáltica em relação ao restante das rochas da área de estudo, que em sua maioria é composta por granitos. Esses dados foram, ainda, utilizados como base na etapa da modelagem 2D e 3D.

Nas modelagens 2D foi de grande importância para correlacionar as informações dos perfis magnetométricos, gravimétricos e as informações dos dados geológicos, associados aos resultados da deconvolução de Euler. Desta forma, foi possível associar

as maiores anomalias magnéticas com possíveis diques de basalto, VALENTE *et al.* (2009), e também definir os falhamentos.

As profundidades obtidas através dessa rotina mostram pontos que atingem cerca de 4 km, embora que, em sua maioria encontrem-se a pouca profundidade. Podemos dizer então, que a modelagem atendeu perfeitamente a delimitação dos corpos encontrados na área de estudo. Por se tratar de uma região geologicamente complexa e caracterizada como uma zona de dobramentos remobilizados, e assim, sendo uma zona suscetível a movimentos crustais, COELHO *et al.* (2012), apresenta grande quantidade de falhamentos e dobramentos, como observado nas modelagens.

A modelagem 3D foi realizada com dados magnetométricos e mostra o lineamento principal, sua extensão e profundidade. Em certas regiões chega próximo dos 8 km de profundidade, que poderiam ser considerados como os pontos de extrusão do material mantélico. No ponto de extrusão (P2) entre os perfis 05 e 06, a profundidade do dique encontra-se a 8 km, coincidindo com as informações obtidas por COSTA (2005) para um condutor em sua modelagem de dados MT.

A nossa modelagem 3D mostrou variações dos valores de susceptibilidade do dique principal. Isso pode ocorrer, caso os materiais extrudidos tenham origem em diferentes pontos e tenham se solidificado em tempos diferentes, acarretando assim, diferentes concentrações dos minerais, já que na composição química de rochas básicas podem existir pequenas variações, SCHIAVON *et al.* (2007) e SGARBI (2007).

Outro ponto observado nas modelagens 3D é o fraturamento do dique principal, na região próxima à borda da bacia, uma possível causa do fraturamento do dique estaria relacionada ao estiramento da crosta continental durante o processo de rifteamento dos continentes Sul-Americano e Africano. Segundo BUENO (2004), este evento foi finalizado por volta de 115 milhões de anos atrás, então o processo ocorreu em um período após a formação do dique, de 136 a 128 milhões de anos atrás (PESSANO *et al.* (2020)).

Ao final desta pesquisa, esperamos que os resultados obtidos sejam de utilidade e importância para a área de Geociências, ilustrando a utilização do software Oasis Montaj da Geosoft, para tratamento dos dados dos métodos geofísicos empregados, associando estes aos dados geológicos de superfície.

Capítulo 8

Perspectivas Futuras

Os resultados apresentados nessa dissertação são apenas um passo para o melhor conhecimento geológico da região de estudo. Existem alternativas que poderiam ser empregadas para enriquecer esta pesquisa, como a utilização de outros métodos geofísicos descritos abaixo.

I – Utilização de informações de dados de perfilagem de poços da região para correlacionar com os obtidos neste estudo.

II – Realizar medições de susceptibilidade magnética *in situ*, para associar as informações de análise geoquímica existente.

III – Realizar um estudo geotérmico da região.

IV – Realizar um estudo magnetotelúrico (AMT ou CSMT) sobre os perfis magnéticos para imaginar a subsuperfície e correlacionar as informações.

Eu gostaria de agradecer pela oportunidade de participar deste projeto durante 2 anos e meio, o que contribuiu muito para o meu desenvolvimento técnico/científico.

Referências Bibliográficas

- ABNT, 1995, *NBR 13441 - Rochas e solos - Simbologia*. Rio de Janeiro.
- ALKIMIM, F. F., MARSHAK, S., PEDROSA-SOARES, A. C., et al., 2007, “Sobre a Evolução Tectônica do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental”, *Geonomos*, v. 1, n. 15, pp. 25–43.
- ALKIMIM, F., PEDROSA-SOARES, A., RONCATO, J., et al., 2012/2013, “O Feixe de Lineamentos Colatina. Roteiro de Excursão.” *Rede de Estudos Geotectônicos - Petrobrás*.
- ALKIMIN, F. F., 2004, “O que faz de um Cráton um Cráton? O Cráton do São Francisco e as Revelações Almeidianas ao Delimitá-lo”. In: MANTESSONETO, V., BARTORELLI, A., CARNEIRO, C. D. R., et al. (Eds.), *Geologia do continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, Editora Beca, pp. 6–24, São Paulo.
- ALKIMIN, F. F., MARTINS-NETO, M. A., 2012, “Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil”, *Elsevier*, v. 33 (Set), pp. 127–139.
- ALMEIDA, F. F. M., 1976, “Distribuição Regional e Relações Tectônicas do Magmatismo Pós-Paleozóico no Brasil”, *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16, n. 4, pp. 325–349.
- ALMEIDA, F. F. M., 1977, “O Cráton São Francisco”, *Revista Brasileira de Geociências*, v. 48, n. 7, pp. 349–364.
- ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., CARNEIRO, C., 1975, “Lineamento de Além Paraíba”, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro: ABC, v. 47, n. 3, pp. 575.
- ALMEIDA, F., HASUI, Y., BRITO NEVES, B., et al., 1981, “Brazilian Structural Provinces: an introduction”, *Earth Science Reviews*, v. 13, n. 17, pp. 1–29.

- ARAFFA, S. Q. S., HELALY, A. S., KHOZIUM, A., et al., 2015, “Delineating groundwater and subsurface structures by using 2D resistivity, gravity and 3D magnetic data interpretation around Cairo–Belbies Desert road, Egypt”, *NRIAG - Journal of Astronomy and Geophysic*, , n. 4 (Dez), pp. 134–146.
- ARAÚJO, P. A., 2018, *Inversão 2D de dados magnéticos e modelagem gravimétrica para caracterização do embasamento adjacente à bacia Sergipe-Alagoas*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal da Bahia - Instituto de Geociências - Curso de Graduação em Geofísica.
- BARANOV, V., 1957, “Ambighity in Geophysical Interpretation a New Method for Interpretation of Aeromagnetic Maps: Pseudo-Gravimetric Anomalies”, *Geophysics*, v. 22, n. 2 (Abr), pp. 359–383.
- BARANOV, V., NAUDY, H., 1964, “Numerical Calculation of the Formula of Reduction to the Magnetic Pole”, *Geophysics*, v. 29, n. 1 (Fev), pp. 67–79.
- BARTON, D. C., RITZ, C. H., HICKEY, M., 1932, “Gulf Coast geosyncline”, *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, v. 17 (Oct), pp. 1446–1458.
- BELLO, A. M., 2014, *Avaliações comparativas de filtros espaciais para mapeamento de contatos geológicos com contrastes de densidades e suscetibilidades magnéticas*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ.
- BIZZI, L. A., SCHOBENHAUS, C., GONÇALVES, J. H., et al., 2003, *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília, CPRM.
- BLAKELY, R. J., 1995, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Primeira ed. , Cambridge University Press.
- BUENO, G. V., 2004, “Diacronismo de eventos do rifte Sul-Atlântico”, *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 12, n. 2 (Jul), pp. 203–229.
- CAMPANHA, G. A. C., 1981, “O lineamento Além Paraíba na área de Três Rios (RJ)”, *Revista Brasileira de Geociências*, v. 11, n. 3 (Set), pp. 159–171.
- CARDOSO, E. M., 2006, *Apostila Educativa Radioatividade*. 1 ed. Rua General Severiano, 90 - Botafogo - Rio de Janeiro - RJ, Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN.

- CARDOSO, M., 2007, “Gestão Costeira Integrada. Maré”, *Disponível em: <<https://www.aprh.pt/rgci/glossario/mare.html>>*.
- CASTRO, D. L., 2011, “Gravity and magnetic joint modeling of the Potiguar Rift Basin (NE Brazil): Basement control during Neocomian extension and deformation”, *Journal of South American Earth Sciences*, (Jan).
- CAVALLARO, F. A., 2013, *Investigação Geofísica do Alto de Anhami - SP*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo - Instituto de Geociências.
- CHANG, H., KOWSMANN, R., FIGUEIREDO, A., et al., 1992, “Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview.” *Tectonophysics*, v. 213, pp. 97–138.
- CHAVES, A. O., NEVES, J. M. C., 2005, “Radiometric ages, aeromagnetic expression, and general geology of mafic dykes from southeastern Brazil and implications for African-South American correlations”, *Journal of South American Earth Sciences*, v. 19, pp. 387–397.
- CHRISMANN, J. V. V., 2014, *Mapeamento da Formação Barreiras na Região Norte Fluminense, entre os Rios Paraíba do Sul E Itabapoana*. Trabalho de conclusão de curso, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.
- COELHO, A. L. N., GOULART, A. C. O., BERGAMASCHI, R. B., et al., 2012, *Mapeamento Geomorfológico do Estado do Espírito Santo*. In: Report 28, Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN), Vitória.
- COELHO, R. M., 2016, *Petrografia, litoquímica e idades ar-ar de diques máficos mesozóicos (e cambrianos ?) De Minas Gerais: comparações com basaltos da província Paraná-Etendeka e com diques da suíte Fundão*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais Instituto de Geociências Programa de Pós-Graduação em Geologia, Belo Horizonte - MG.
- CORDELL, L., GRAUCH, V. J. S., 1985, “Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan basin, New Mexico”, *Society of Exploration Geophysicists*, (Jan), pp. 181–197.
- COSTA, F. A., 2005, *Investigações Eletromagnéticas na Porção Continental da Bacia do Espírito Santo e suas Adjacências Cristalinas*. Dissertação de mestrado, Observatório Nacional.
- CPRM, 2010, *Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos*. In: Report Volume I, Companhia de

Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. Secretaria de Geologia, Mineração E transformação Mineral., Minas Gerais.

- D'AGRELLA-FILHO, M. S., PACCA, I. G., RENNE, P. R., et al., 1990, "Paleomagnetism of Middle Proterozoic (1.01 to 1.08 Ga) mafic dykes in southeastern Bahia State Sao Francisco Craton, Brazil", *Earth and Planetary Science Letters*, v. 101, pp. 332–348.
- DE WIT, M. J., JEFFREY, M., BERGH, H., et al., 1988, "Geological map of sectors of Gondwana: reconstructed to their disposition *150 Ma. scale 1:10.000.000: Lambert equal area projection-centred at 20°S, 40°E", *American Association of Petroleum Geologists*,.
- DICKSON, B. L., SCOTT, K. M., 1997, "Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors", *Elsevier*, v. 14, n. 2, pp. 187–200.
- ECKER, E., MITTERMAYER, E., 1969, "Gravity Correction for the Influence of the Atmosphere." *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, v. 11, n. 4142 (Jun), pp. 70–80.
- EFIMOV, A. V., 1978, *Multiplikativnyj pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud po aerogamma-spektrometriceskim dannym*. Metody rudnoj geofiziki. Leningrad, Naucno-proizvodstvennoje objedinenie geofizika.
- EÖTVÖS, B. R., 1908, *Die Niveauflächen und Die Gradienten Der Schwerkraft am Balatonsee*. Primeira ed. Budapeste, Geophysischer Anhang II.
- FERNANDES, M. A., 2010, *Análise, modelagem e interpretação de dados gravimétricos no lineamento guapiara – região sudeste do estado de São Paulo*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista - Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Campus de Rio Claro.
- FILHO, C. V. P., FERREIRA, F. J. F., 2003, "Processamento e interpretação de dados aeromagnéticos da região central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná)", *SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica*, (Set), pp. 14–18.
- FILHO, N. L. R., 2017, *Anomalia gravimétrica residual da bacia de barreirinhas obtida a partir da modelagem crustal*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Pará - Instituto de Geociências - Faculdade de Geofísica.
- FILHO, R. S., MATOS, G. M. M., MENDES, V. A., et al., 2013, *Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo*. Brasília, CPRM.

- FLECK, J. B. F., 2014, *Geoquímica, Geocronologia e Contexto Geotectônico do Magmatismo Máfico Associado Ao Feixe de Fraturas Colatina, Estado do Espírito Santo*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais - Instituto de Geociências - Programa de Pós-Graduação em Geologia.
- FONTES, C. Q., NETTO, C., COSTA, M. R. A., et al., 1978, *Projeto Jequitinhonha - Relatório Final*. Primeira ed. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais Supintendência Regional - Belo Horizonte, Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral - Convênio DNPM - CPRM.
- FRASER, D. C., FULLER, B. D., WARD, S. H., 1966, “Some Numerical Techniques for Application in Mining Exploration”, *Geophysics*, v. 31, n. 6 (Dez), pp. 1066–1077.
- GALLARDO, C., SERRÃO, M., MUNIS, M., 1987, “O intemperismo dos gnaisses do sistema montanhoso do litoral sudeste: Um exemplo de atividade tectônica atual no Município de Nova Venécia, ES.” In: *Simpósio de Geologia Regional, RJ-ES. Sociedade Brasileira de Geologia*, pp. 210–217, Rio de Janeiro.
- GEOSOFT, 2001, *Micronivelling using Bi-Directional Gridding*. In: Report, Geosoft.
- GIACOMINI, B. B., 2015, *Inversão gravimétrica 3D da estrutura do cerro do Jarau (RS)*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas - Instituto de Ciências.
- GRADIM, C. T., 2013, *Complexo Nova Venécia e magmatismo associado, Orógeno Araçuaí, Estado do Espírito Santo*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Minas Gerais.
- GRIFFITHS, D. J., 2011, *Eletrodinâmica*. 3 ed. , Pearson, Tradução: Heloisa Coimbra Souza, Revisão Técnica: Antônio Manoel Mansanares.
- HALLIDAY, H., RESNICK, R., WALKER, J., 2016a, *Fundamentos de física, volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. 10 ed. , LTC — Livros Técnicos e Científicos Editor e Ltda, Tradução e Revisão Técnica: Ronaldo Sérgio de Biasi.
- HALLIDAY, H., RESNICK, R., WALKER, J., 2016b, *Fundamentos de física, volume 3: Eletromagnetismo*. 10 ed. , LTC — Livros Técnicos e Científicos Editor e Ltda, Tradução e Revisão Técnica: Ronaldo Sérgio de Biasi.

- HALLIDAY, H., RESNICK, R., WALKER, J., 2016c, *Fundamentos de física, volume 4: Óptica e Física Moderna*. 10 ed. , LTC — Livros Técnicos e Científicos Editor e Ltda, Tradução e Resiãõ Técnica: Ronaldo Sérgio de Biasi.
- HEILBRON, M., GORDANI, U. G., ALKIMIN, F. F., 2017, “The São Francisco Craton and Its Margins”. In: Heilbron, M., Gordani, U. G., Alkimin, F. F. (Eds.), *São Francisco Craton, Eastern Brazil*, Springer, pp. 11–21, Suíça.
- HEILBRON, M. C. P. L., PEDROSA-SOARES, A. C., CAMPOS-NETO, M. C., et al., 2004, “Província Mantiqueira”. In: MANTESSO-NETO, V., BARTORELLI, A., CARNEIRO, C. D. R., et al. (Eds.), *Geologia do continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, Editora Beca, pp. 180–212, São Paulo.
- HEWITT, P. G., 2015, *Física Conceitual*. 12 ed. Porto Alegre, Tradução: Trieste Freire Ricci, Bookman.
- IAEA, 1991, *Airborne GammaRaySpectrometer Surveying*. 1 ed. Vienna, Austria, IAEA.
- IAEA, 2003, *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. 1 ed. Vienna, Austria, IAEA.
- IBGE, 2009, *Manual Técnico de Geomorfologia*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- IBGE/DGC, 1987, *Folha SE. 24 Rio Doce : geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra*. Primeira ed. Rio de Janeiro, Fundação Instituto Brasileiro de Geofgrafia e Estatísitica - IBGE.
- INTRILIGATOR, M. D., 1971, *Mathematical Optimization and Economic Theory*. Primeira ed. Los Angeles, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- JUNIOR, N. Z., 2007, *Arcabouço morfoestrutural do embasamento adjacente e da parte emersa das bacias do Espírito Santo e Mucuri*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- KAHN, M. A., 1983, *Satellite Contributions to Geophysical Exploration at Sea*. Primeira edição ed. , CRC Press.
- KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I., 2009, *Geofísica de Exploração*. Primeira ed. São Paulo, Oficina de Textos: Tradução Maria Cristina Moreira Coelho.

- KU, C. C., SHARP, J. A., 1983, “Werner deconvolution for automated magnetic interpretation and its refinement using Marquardt’ s inverse modeling”, *GEOPHYSICS*, v. 48, n. 6 (Jun), pp. 754–774.
- LACOSTE, L. J. B., 1967, “Measurement of Gravity at Sea and in the Air”, *Reviews of Geophysics*, v. 5, n. 4 (Nov).
- LACOSTE JR, L. J. B., 1934, “Rock Density from Borehole gravity Surveys”, *PHYSICS*, v. 5 (Jul).
- LAFEHR, T. R., 1991, “An exact solution for the gravity curvature (Bullard B) correction”, *GEOPHYSICS*, v. 56, n. 8 (Ago), pp. 1179–1184.
- LAFEHR, T. R., 1983, “Rock density from borehole gravity surveys”, *GEOPHYSICS*, v. 48, n. 3 (Mar), pp. 341–356.
- LI, X., 2006, “Understanding 3D analytic signal amplitude”, *GEOPHYSICS*, v. 71, n. 2 (Mar-Abr), pp. 13–16.
- LI, Y., OLDENBURG, D. W., 2000, “3-D inversion of induced polarization data”, *GEOPHYSICS*, v. 65, n. 6 (Nov-Dez), pp. 1931–1945.
- LONGMAN, I. M., 1959, “Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun”, *Journal of Geophysical Research*, v. 64, n. 12 (Dez), pp. 2351–2355.
- LOURENÇO, F. S., 2015, *O lineamento Piúma: características gerais e história evolutiva no cenário tectônico da Província Mantiqueira Setentrional e margem continental*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas Departamento de Geologia - Programa de pós-graduação em evolução crustal e recursos naturais.
- LOWRIE, W., 2007, *Fundamentals of Geophysics*. Segunda ed. Universidade de Cambridge, Inglaterra, Cambridge University Press.
- LUIZ, J. G., SILVA, L. M. C., 1995, *Geofísica de Prospecção*. Primeira ed. Belém, Pará, Editora Universitária UFPA.
- MACEDO, J. M., 1989, “Evolução tectônica da bacia de Santos e áreas 29 continentais adjacentes.” *Boletim de Geociências da Petrobrás*, pp. 73–159.
- MARELLO, L., EBBING, J., GERNIGON, L., 2010, “Magnetic basement study in the Barents Sea from inversion and forward modelling”, *Tectonophysics*, v. 493, n. 4 (Jul), pp. 153–171.

- MEINESZ, F. A. V., 1929, *The Gravity Measuring Cruise of the U.S. Submarine S-21*. Primeira ed. Washington, U. S. Hydrographic Office.
- MICKUS, K. L., AIKEN, C. L. V., KENNEDY, W. D., 1991, “Regional-residual gravity anomaly separation using the minimum-curvature technique”, *Geophysics*, v. 56, n. 2 (Fev), pp. 279–293.
- MILLER, H. G., SINGH, V. J., 1994, “Potential Filed, tilt - A new concept for location field souces.” *Applied geophysics*, v. 32, pp. 213–217.
- MILLIGAN, P. R., GUNN, P. J., 1997, “Enhacement and presetation of airbone geophysical data”, *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, v. 17, n. 2, pp. 63–75.
- MILSOM, J., 2002, *Field Geophysics: The Geological Field Guide Series*. 3 ed. Londres, Jonh Wiley & Sons Ltd.
- MINTY, B. R. S., 1991, “Simple Micro-Levelling for Aeromagnetic Data”, *Exploration Geophysics*, v. 22 (Fev), pp. 591–592.
- MIRANDA, M. N. R., 2019, *Estudo Magnético e Gamaespectométrico da Magnesita e Formações ferríferas da Serra das Éguas, Brumado - BA*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da bahia, Salvador - Ba.
- MOUSAVI, N., EBBING, J., 2018, “Basement characterization and crustal structure beneath the Arabia–Eurasia collision (Iran): A combined gravity and magnetic study”, *Tectonophysics*, v. 731-732, n. 4 (Mar), pp. 155–171.
- MUSHAYANDEBVU, M. F., DRIEL, P. V., REID, A. B., 2001, “Magnetic source parameters of two-dimensional structures using extended Euler deconvolution”, *GEOPHYSICS*, v. 66, n. 3 (Mai-Jun), pp. 814–823.
- NABIGHIAN, M. N., 1972, “The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation”, *Geophysics*, v. 38, n. 3 (Jun), pp. 507–517.
- NABIGHIAN, M. N., 1974, “Additional Comments on the Analytic Signal of Two-Dimensioanal Magnetic Bodies With Polygonal”, *Geophysics*, v. 38, n. 29 (Fev), pp. 85–92.
- NAIDE, P. S., MATHEW, M. P., 1998, *Analysis Of Geophysical Potential Fields*. Elsevier Science B. B.
- NETTLETON, L. L., 1971, *Elementary Gravity and Magnetics For Geologists and Seismologists*. Tulsa, Society od Exploration Geophysicists.

- NOCE, C. M., PEDROSA-SOARES, A. C., SILVA, L. C., et al., 2007, “Evolution of polycyclic basement complexes in the Araçuaí Orogen, based on U–Pb SHRIMP data: Implications for Brazil–Africa links in Paleoproterozoic time”, *Elsevier*, v. 159 (Jun), pp. 60–78.
- NOVAIS, L. C. C., TEXEIRA, L.B. ;AND NEVES, M., RODARTE, J., et al., 2004, “Novas Ocorrências de diques de diabásio na faixa Colatina-ES: estruturas rúpteis associadas e implicações tectônicas para as Bacias de Campos e do Espírito Santo.” *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 12, pp. 191–194.
- OLIVEIRA, D. S., 2014a, *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, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - Departamento de Geofísica, São Paulo - SP, a.
- OLIVEIRA, F. M., 2016, *Mapeamento Geológico e Geoquímica da Ilha do Cabo Frio, Arraial do Cabo, RJ*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza - Instituto de Geociências, Departamento de Geologia.
- OLIVEIRA, I. B., 2014b, *Sob o Pico da Bandeira*. Belo Horizonte - MG, Usina do Livro.
- OLIVEIRA, N. V., 2005, *Modelagem e Inversão 2D de Dados Magnetométricos Aplicados na Caracterização da Geometria do Sinclinal Sinclinal Gandarela e Homoclinal Curral – Quadrilátero Ferrífero, MG*. Dissertação, FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, Minas Gerais.
- PEDROSA-SOARES, A. C. N. C. M., ALKIMIM, F. F., SILVA, L. C., et al., 2007, “Orógeno Araçuaí: Síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977.” *Geonomos*, v. 15, n. 1, pp. 1–16.
- PEDROSA-SOARES, A., NOCE, C., VIDAL, P., et al., 1992, “Towards a new tectonic model for the Late Proterozoic Araçuaí (SE Brazil) - West Congolian (SW Africa) Belt.” *Journal of South American Earth Sciences*, v. 6, pp. 33–47.
- PEREIRA, J. G., ANDO, J. L., BARBOSA, R. D., et al., 2015, “Inversão do vetor de Magnetização, com e sem o uso de vínculo Geológico, nas regiões de Araxá e Tapira, Minas Gerais – Brasil”, *SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica*, (Ago).

- PESSANO, P. C., GANADE, C. E., TUBINMBÁ, M., et al., 2020, “Updated Map of the mafic dikes swarms of Brazil based on airborne geophysical data”, *Elsevier*, (Nov).
- PEYVE, A. A., 2010, “Tectonics and Magmatism in Eastern South America and the Brazil Basin of the Atlantic in the Phanerozoic”, *Geotectonics*, v. 44, n. 1 (Jul), pp. 68–85.
- PILKINGTON, M., 1997, “3-D magnetic imaging using conjugate gradients”, *Geophysics*, v. 62, n. 4 (Ago-Set), pp. 1132–1142.
- PIRES, A. S. T., 2008, *A Evolução das Ideias da Física*. Primeira ed. São Paulo, Livraria da Física.
- PORADA, H., 1989, “Pan-African rifting and orogenesis in southern to equatorial Africa and Eastern Brazil”, *Precambrian Research*, v. 44, pp. 103–136.
- PORTNIAGUINE, O., ZHDANOV, M. S., 2002, “3-D magnetic inversion with data compression and image focusing”, *Geophysics*, v. 67, n. 5 (Set-Out), pp. 1532–1541.
- RADAMBRASIL, 1976, *Projeto RADAMBRASIL. Folha NA. 19 Pico da Neblina; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. Primeira ed. Rio de Janeiro, Departamento Nacional da Produção Mineral.
- RADAMBRASIL, 1982, *Projeto RADAMBRASIL: Folha SD.21 Cuiabá; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. Primeira ed. Rio de Janeiro, Departamento Nacional da Produção Mineral.
- RADAMBRASIL, 1983a, *Folhas SF. 23/24, Rio de Janeiro/Vitoria : geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra*. Primeira ed. Rio de Janeiro, Departamento Nacional da Produção Mineral.
- RADAMBRASIL, 1983b, *Folhas SC - 24/25 Aracaju/ Recife : geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. Primeira ed. Rio de Janeiro, Departamento Nacional da Produção Mineral.
- REID, A. B., ALLSOP, J. M., GRNSER, H., et al., 1990, “Magnetic Interpretation in three dimensions using Euler deconvolution”, *GEOPHYSICS*, v. 55, n. 1 (Jan), pp. 80–91.
- RIBEIRO, F. B., MOLINA, E. C., 2018, *Geofísica: Uma Breve Introdução*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.

- RIBEIRO, V. B., MANTOVANI, M. S. M., LOURO, V. H. A., 2013, “Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico”, *TERRÆ DIDÁTICA*, v. 10, n. 1 (Jun), pp. 29–51.
- RODRIGUES, H. B., 2005, *Aspectos Geomorfológicos e Reativação Tectônica Cenozóica na Faixa de Lineamentos Colatina*. Relatório de estágio de campo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, CCMN - Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Rio de Janeiro.
- ROEST, W. R., VERHOEF, J., PIKINGTON, M., 1992, “Magnetic interpretation using the 3-0 analytic signal”, *Geophysics*, v. 57, n. 1 (Jun), pp. 116–125.
- ROSSETI, D. F., BEZERRA, F. H. R., DOMINGUEZ, J. M. L., 2012, “Late Oligocene–Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil”, *Elsevier*, v. 123 (Abr), pp. 87–112.
- ROY, A., 1962, “Ambuity in Geophysical Interpretation”, *Geophysics*, v. 27, n. 1 (Fev), pp. 90–99.
- SANTOS, F. J. C., MOREIRA, F. R. P., 2018, *Mapeamento geológico-estrutural de uma porção da unidade independência do complexo ceará localizada no município de Santa Quitéria-CE*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Ceará - Centro de Ciências Departamento de Geologia.
- SCHIAVON, M. A., REDONDO, S. U. A., YOSHIDA, I. V. P., 2007, “Caracterização Térmica e Morfológica de Fibras Contínuas de Basalto”, *Cerâmica*, v. 53 (Ago), pp. 212–217.
- SCHOBENHAUS, C., CAMPOS, D. A., DERZE, G. R., et al., 1984, “Geologia do Brasil. Texto Explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da Área Oceânica Adjacente Incluindo Depósitos Minerais. Brasília”, *Precambrian Research*, p. 501.
- SERWAY, R. A., JEWETT JR., J. W., 2014a, *Princípios de Física - Volume I: Mecânica Clássica e Relatividade*. Quinta ed. São Paulo, Cengage Learning, Tradução: EZ2 Translate, Revisão técnica: Márcio Maia Vilela.
- SERWAY, R. A., JEWETT JR., J. W., 2014b, *Princípios de Física - Volume III: Eletromagnetismo*. Quinta ed. São Paulo, Cengage Learning, Tradução: Foco Traduções, Revisão técnica: Keli Fabiana Seidel.

- SERWAY, R. A., JEWETT JR., J. W., 2012, *Física Para Cientistas e Engenheiros, Volume 4: Luz, óptica e Física Moderna*. 8 ed. São Paulo, Cengage Learning, Tradução: All Tasks, Revisão Técnica: Carlos Roberto Grandini.
- SGARBI, G. N. C., 2007, *Petrografia Macroscópica das Rochas Ígneas, Sedimentares e Metamórficas*. Primeira ed. Belo Horizonte, Editora UFMG.
- SILVA, E. R., 2019, *Caracterização geofísica de estruturas associadas às mineralizações de cobre e ouro no arco magmático de Arenópolis – Goiás - Brasil*. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília – UnB Instituto de Geociências – IG, Programa de Pós-Graduação em Geologia.
- SILVA, J. N., FERRARI, P. G., 1976, *Projeto Espírito Santo - Relatório Final*. Primeira ed. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais Supintendência Regional - Belo Horizonte, Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral - Convênio DNPM - CPRM.
- SIMPSON, R. W., JACHENS, R. C., BLAKELY, R. J., 1986, “A New Isostatic Residual Gravity Map of the Conterminous United States With a Discussion on the Significance of Isostatic Residual Anomalies”, *Journal Geophysic Research*, v. 91, n. 8 (Jul), pp. 8348–8372.
- SOUZA, D. F., PINTO, C. L. S., FERREIRA, A. A., et al., 2016, “Análise da distribuição de elementos radioativos em perfis 1D de sedimentos quaternários no município de Cabo frio - RJ”, *Geociências*, (Ago).
- SUGUIO, K., 1998, *Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil.
- TALWANI, M., 1965, “Computation with the Help of a Digital Computer of Magnetic Anomalies Caused by Bodies of Arbitrary Shape”, *Geophysics*, v. 30, n. 5 (Out), pp. 797–817.
- TALWANI, M., WORZEL, L. J., LANDISMAN, M., 1959, “Rapid Gravity Computations for Two-Dimensional Bodies with Application to the Mendocino Submarine Fracture Zone”, *Journal of Geophysical Research*, v. 64, n. 1 (Jan).
- TARLING, D. H., HROUDA, F., 1993, *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. 1 ed. Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London, Chapman & Hall.
- TAVARES, M. V. F. S., 2011, *Mapeamento Geológico e Petrografia do Ortognaisse Maricá, Maricá, Rio de Janeiro*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da

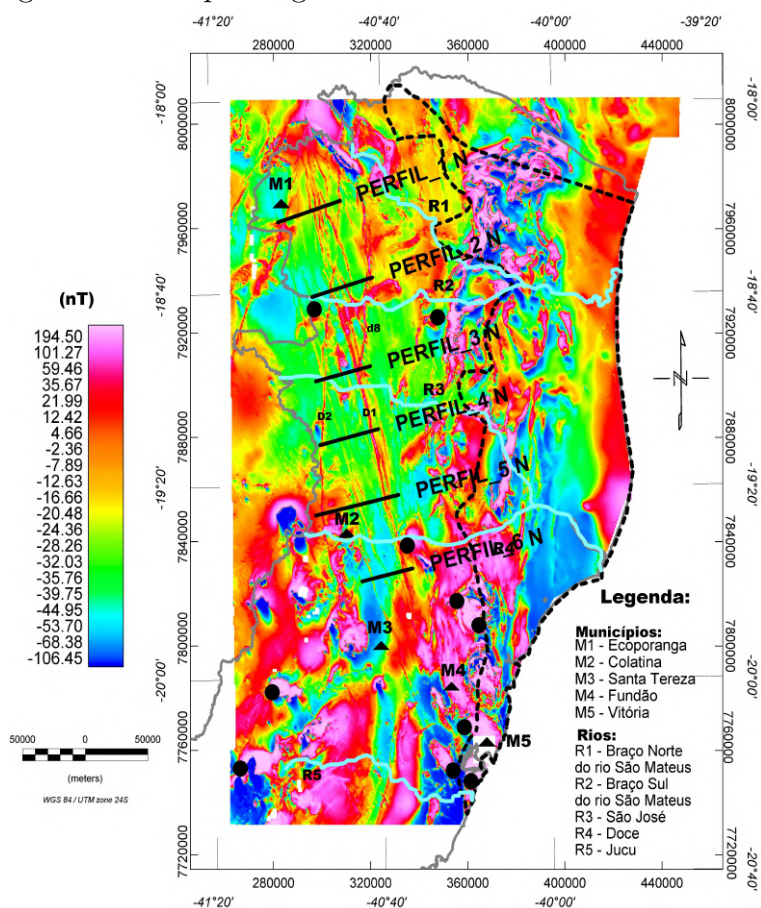
Natureza - Instituto de Geociências, Departamento de Geologia - Setor de Geologia Regional e Econômica.

- TEIXEIRA, W., FAIRCHILD, T. R. A., 2009, *Decifrando a Terra*. Segunda ed. , Companhia Editora Nacional.
- TELFORD, W. M., GELDART, L. P., E., S. R., 1990, *Applied Geophysics*. Segunda ed. Cidade do Texas, Cambridge University Press.
- THOMPSON, D. T., 1982, “EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data”, *GEOPHYSICS*, v. 47, n. 1 (Jan), pp. 31–37.
- THORTON, S. T., MARION, J. B., 2011, *Dinâmica Clássica de Partículas e Sistemas*. 5 ed. São Paulo, Cengage Learning, Tradução: All Tasks, Revisão Técnica: Fábio Raia.
- VALENTE, S. C., DUTRA, T., HEILBRON, M., et al., 2009, “Litogeoquímica de Diques de Diabásio da Faixa Colatina, ES”, *Geochimica Brasiliensis*, v. 23, n. 2 (Set), pp. 177–192.
- VERDUZCO, B., FAIRHEAD, J. D., GREEN, C. M., et al., 2004, “New insights into magnetic derivatives for structural mapping”, *The Leading Edge*, (Fev), pp. 116–1119.
- VIEIRA, V., SILVA, M. A. D., CORRÊA, T., R., et al., 2014, “Mapa Geológico do Estado do Espírito Santo, escala 1:400.000.” In: *Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral - Simexmin*, Ouro Preto - MG, Mai.
- VIEIRA, V. S., MENEZES, R. G., 2015, *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Espírito Santo*. Belo Horizonte, CPRM.
- WON, I. J., BEVIS, M., 1987, “Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines”, *Geophysics*, v. 52, n. 2 (Fev), pp. 232–238.

Apêndice A

Mapa das Pedreiras

Figura A.1: Mapa Magnético Anômalo: Reduzido ao Polo



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontra dentro da área de estudo são marcados com triângulo. Pontos pretos são algumas das pedreiras do estado

Como dito anteriormente a região é conhecida como grande exportadora de rochas ornamentais, existindo um número significativo de pedreiras, a Figura A.1 mostra a localização de algumas das pedreiras da região, VIEIRA e MENEZES (2015).

Apêndice B

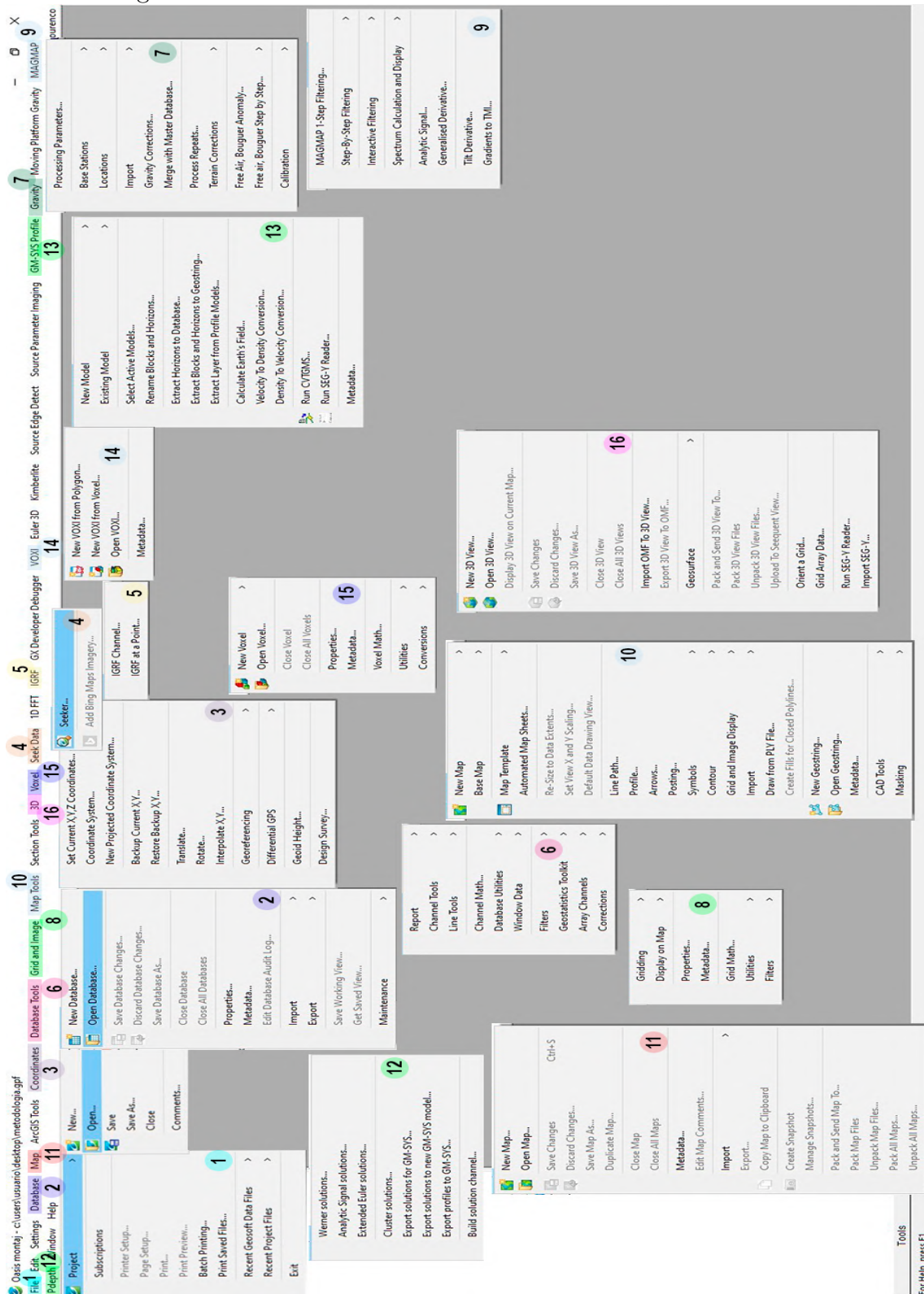
Menus

A Figura B.1 mostra a barra de tarefas utilizadas para as processamento dos dados, sendo que abaixo ocorre uma breve explanação sobre as principais rotinas.

Identificação dos Menus:

- 1 - Cria, Abrir ou Salvar o Projeto
- 2 - Abrir ou Cria Database
- 3 - Definir as coordenadas caso os dados não sejam referenciados
- 4 - Baixar Informações Topográficas
- 5 - Obter Informações de Declinação, Inclinação e IGRF do dia que ocorreu o Levantamento
- 6 - Editar database
- 7 - Obter as Correções Gravitacionais, podendo realizar essas correções utilizando Database Tools
- 8 - Criação dos Grids
- 9 - Aplicação dos filtros sobre os grids
- 10 - Criação do Template do Mapa
- 11 - Abrir Mapa e expstar informações para ele
- 12 - Calcular as soluções de profundidade das anomalias
- 13 - Construção dos perfis 2D
- 14 - Criação da Anomalia 3D e Inversão
- 15 - Abrir modelo obtido na Inversão
- 16 - Criação, Edição dos modelos 3D

Figura B.1: Interface do Geosoft mostrando os Menus Utilizado

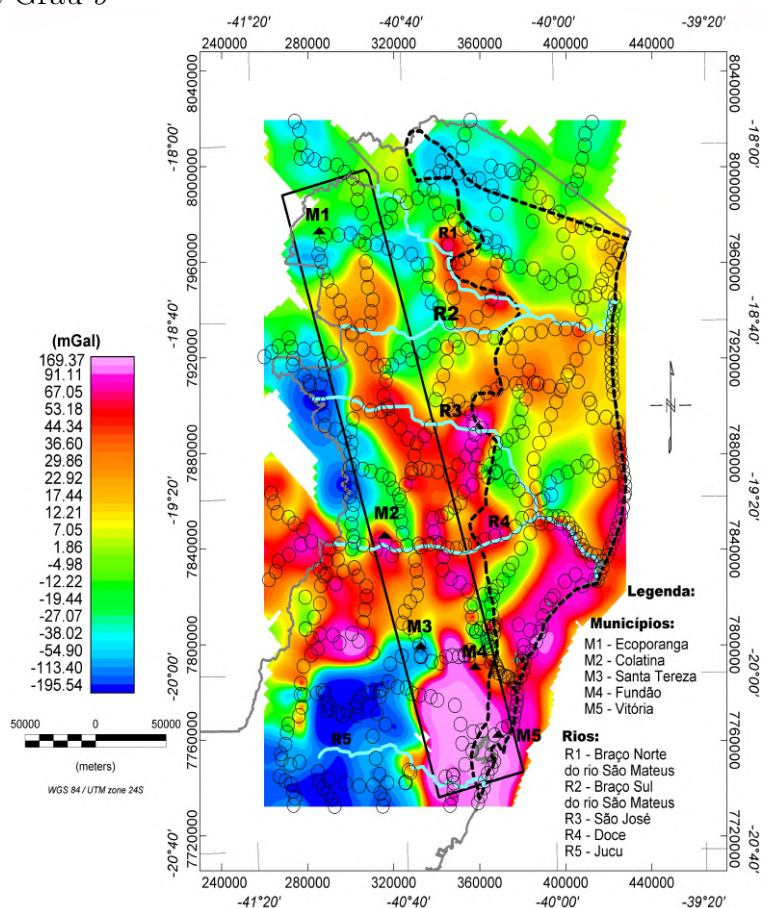


Fonte: Produzido pelo Autor

Apêndice C

Mapas Gravimétricos

Figura C.1: Mapa Gravimétrico Anômalo: Bouguer Completa Aplicada Correção Polinomial de Grau 9



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina, os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontra dentro da área de estudo são marcados com triângulo. Esferas pretas são as 642 estações.

Fonte: Produzido pelo Autor

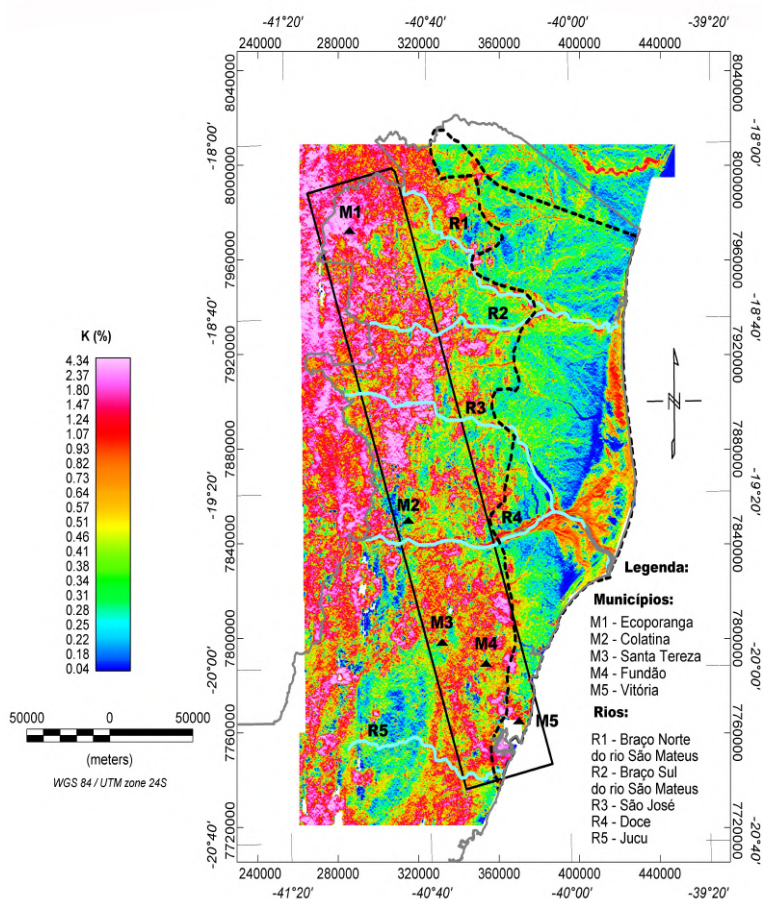
A Figura C.1 apresenta as estações associadas aos dados gravimétricos.

Apêndice D

Mapas Radiométricos

Como dito na seção 6.3 foram construídos diferentes produtos associados aos dados Mapa radiométricos, mas nenhum apresentou resultado relevante na definição do lineamento, mas que foram importantes na concepção do mapa térmico.

Figura D.1: Mapa Radiométrico: Contagem de Potássio em %



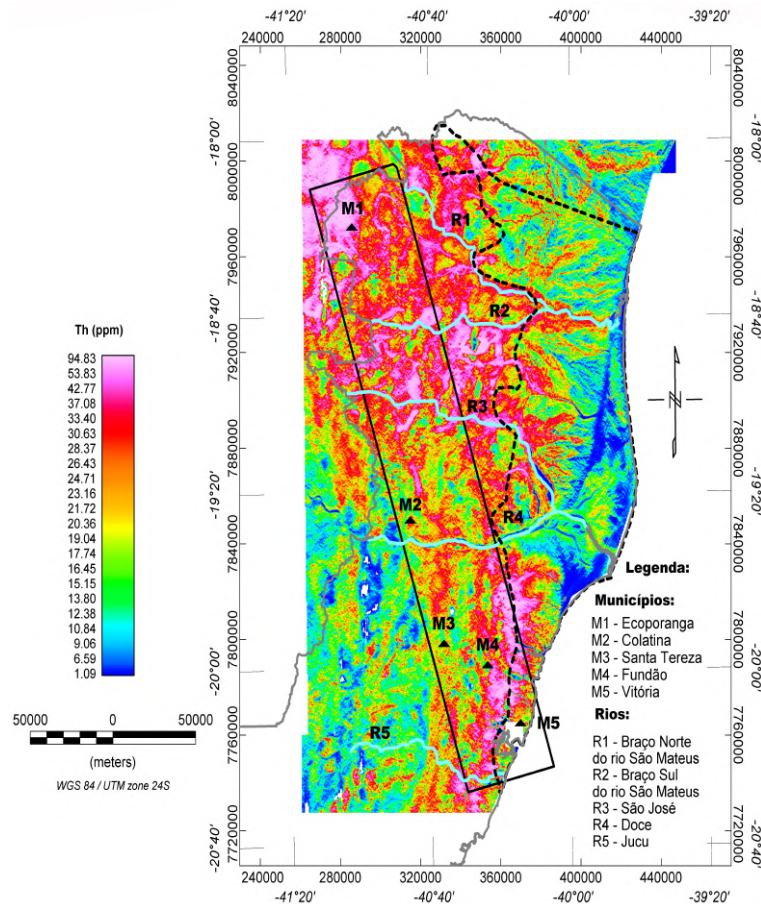
Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina, os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontra dentro da área de estudo são marcados com triângulo

Fonte: Produzido pelo Autor

A Figura D.1 mostra a concentração de potássio no estado, OLIVEIRA (2014a) percebeu em seu trabalho altas concentrações de potássio dentro de regiões de meta-sedimentos ¹.

A Figura D.2 mostra a concentração de tório na região de estudo, como já citado OLIVEIRA (2014a), em uma rocha máfica espera-se um valor de anomalia negativa de sinais radiométricos, pela baixa concentração desses elementos, o não aparecimento de um sinal no mapa pode ocorrer graças a extensão do dique ser muito menor do que a região do estudo.

Figura D.2: Mapa Radiométrico: Contagem de Tório em ppm

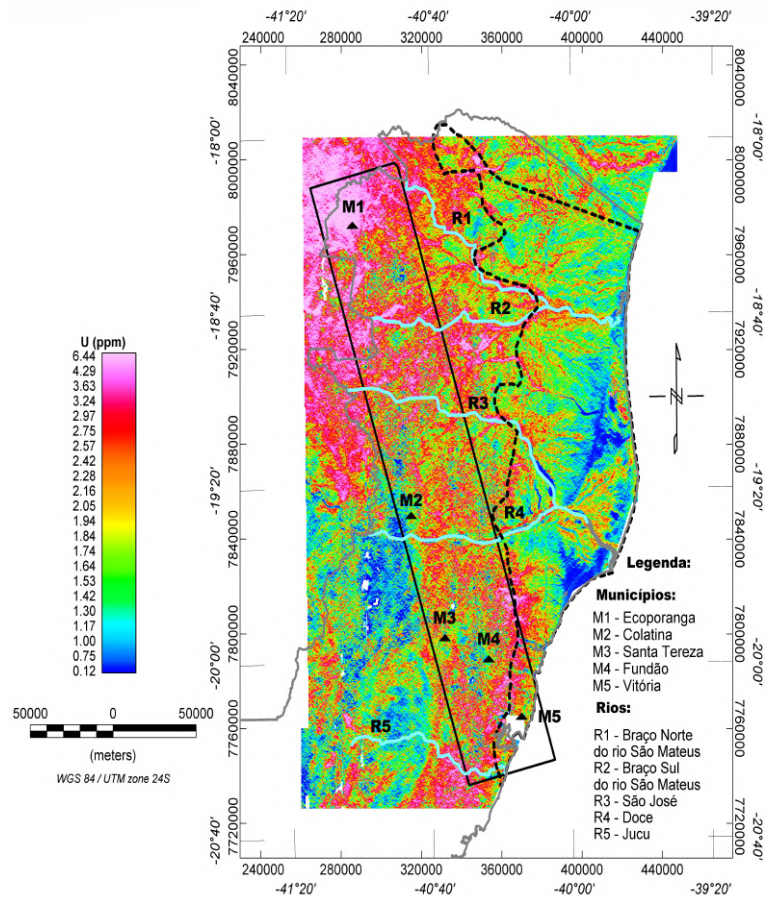


Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina, os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontra dentro da área de estudo são marcados com triângulo

A Figura D.3 mostra a concentração de urânio na região de estudo.

¹Um metassedimento é um sedimento ou rocha sedimentar que mostra evidências de ter sofrido metamorfismo

Figura D.3: Mapa Mapa Radiométrico: Contagem de Urânio em ppm



Legenda: Linha cinza representa o contorno estadual, o retângulo com linha preta é a região onde se encontra o Lineamento Colatina, os principais rios do estado são apresentados com cor azul claro e alguns municípios que se encontra dentro da área de estudo são marcados com triângulo

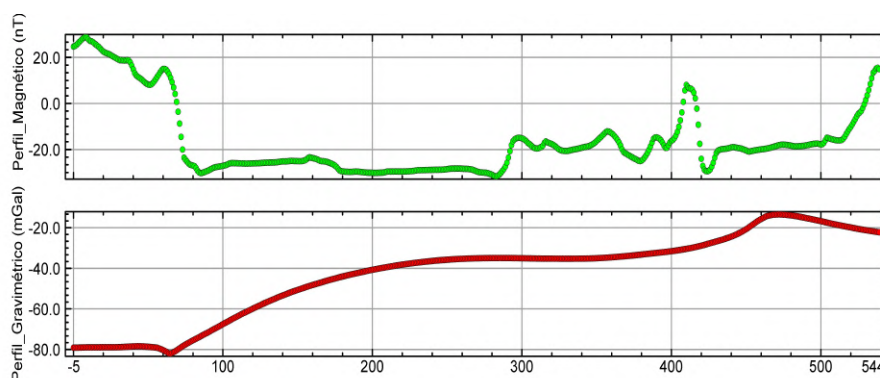
Em todos os mapas radiométricos apresentados nota-se grandes concentrações desses elementos em duas regiões em particular a noroeste do estado, região com grande concentração de rochas plutônicas e a sudeste do estado, região que se encontra parte da bacia sedimentar, concentração que pode ocorrer através de processos metamórficos ou migração de fluidos, ocorridos em rochas ricas nesses materiais que são transpostados e posteriormente sendo depositados em regiões mais baixas, SOUZA *et al.* (2016).

Apêndice E

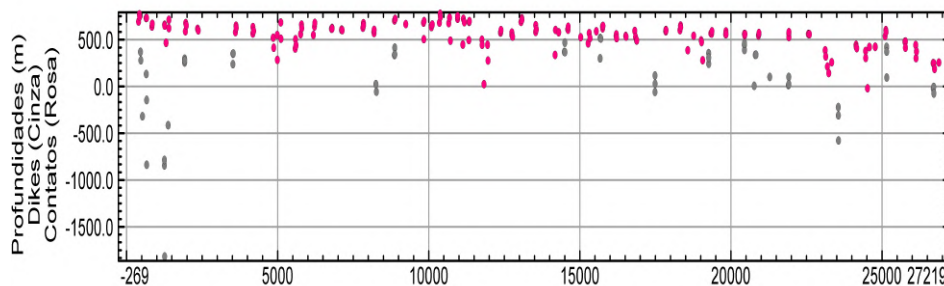
Soluções

Com a utilização da rotina pdepth foram obtidas soluções que foram utilizadas para criação dos modelos GM-SYS/Oasis Montaj, importante assim as soluções obtidas para os modelos criados no GM-SYS Profile. soluções essas que podem ser vistas nas Figuras E.1, E.2, E.3, E.4, E.5 e E.6.

Figura E.1: Perfil 1, mostrando perfis magnéticos e gravimétricos além de mostrar as soluções obtidas pelo sinal analítico



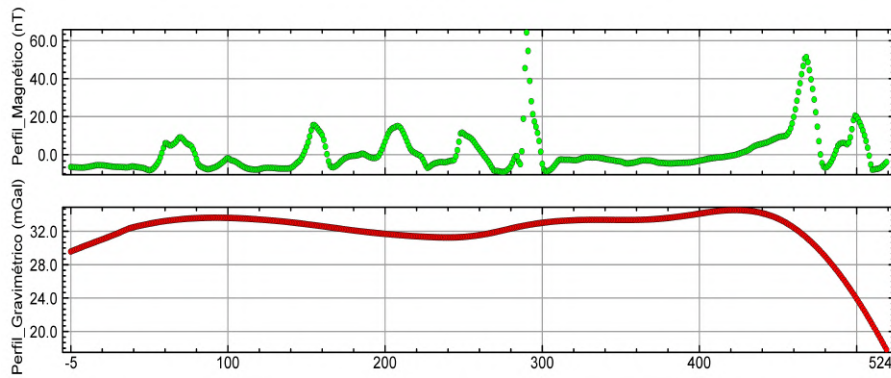
Legenda: Pontos Verdes representam a anomalia magnética e os pontos vermelhos a anomalia gravimétrica



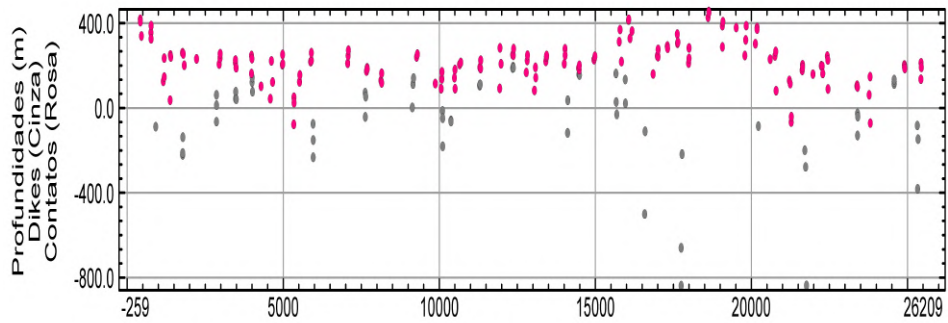
Legenda: Pontos cinza e rosa mostram as soluções, diques e contatos respectivamente, obtidas pelo sinal analítico

Fonte: Produzido pelo Autor

Figura E.2: Perfil 2, mostrando perfis magnéticos, gravimétricos e soluções obtidas pelo sinal analítico



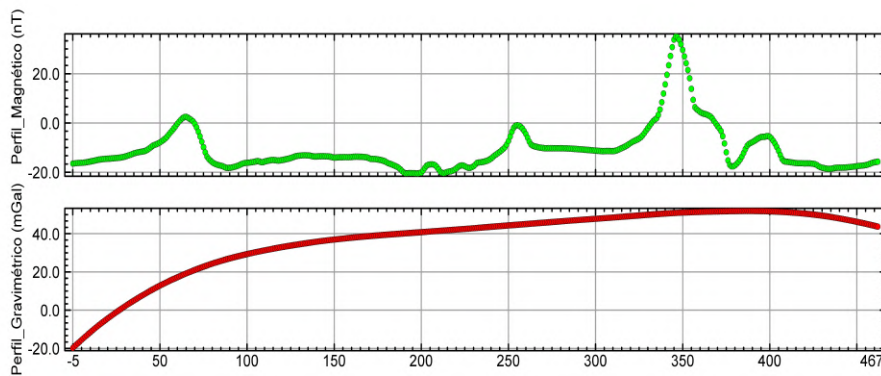
Legenda: Pontos Verdes representam a anomalia magnética e os pontos vermelhos a anomalia gravimétrica



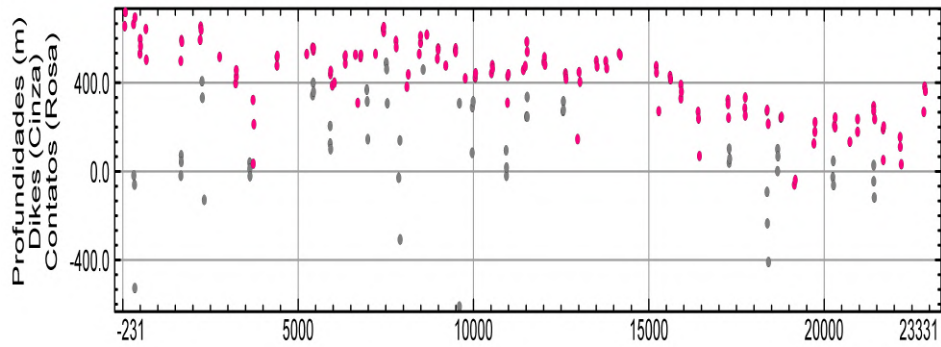
Legenda: Pontos cinza e rosa mostram as soluções, diques e contatos respectivamente, obtidas pelo sinal analítico

Fonte: Produzido pelo Autor

Figura E.3: Perfil 3, mostrando perfis magnéticos, gravimétricos e soluções obtidas pelo sinal analítico



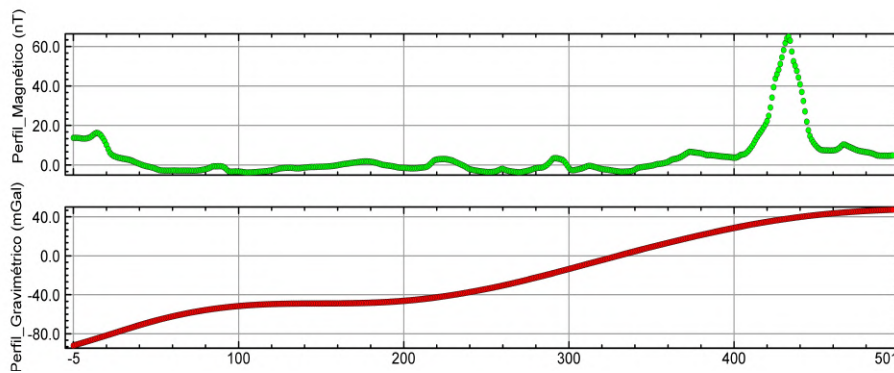
Legenda: Pontos Verdes representam a anomalia magnética e os pontos vermelhos a anomalia gravimétrica



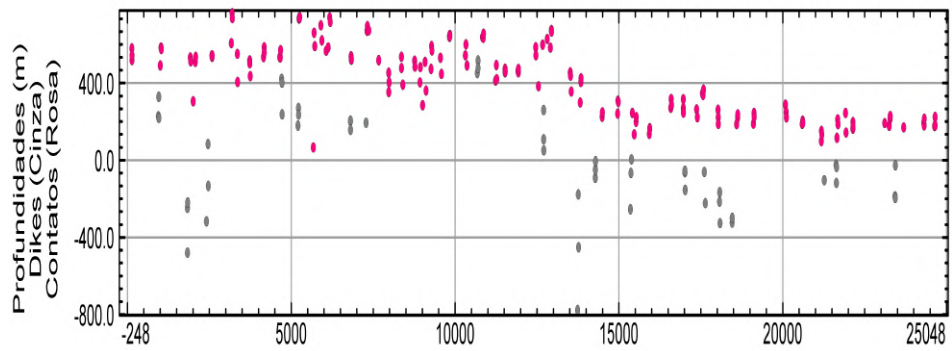
Legenda: Pontos cinza e rosa mostram as soluções, diques e contatos respectivamente, obtidas pelo sinal analítico

Fonte: Produzido pelo Autor

Figura E.4: Perfil 4, mostrando perfis magnéticos, gravimétricos e soluções obtidas pelo sinal analítico



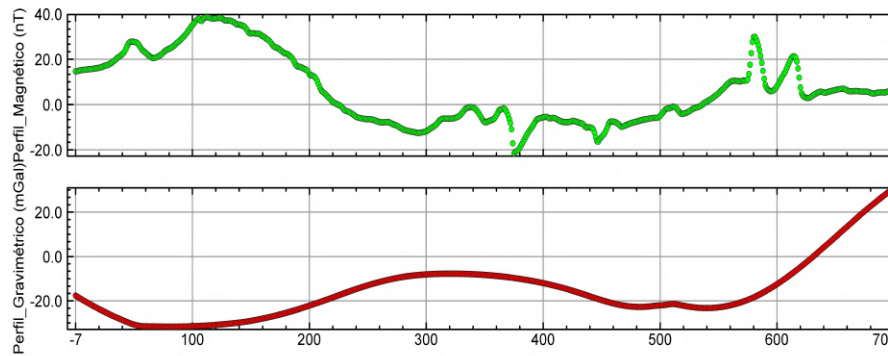
Legenda: Pontos Verdes representam a anomalia magnética e os pontos vermelhos a anomalia gravimétrica



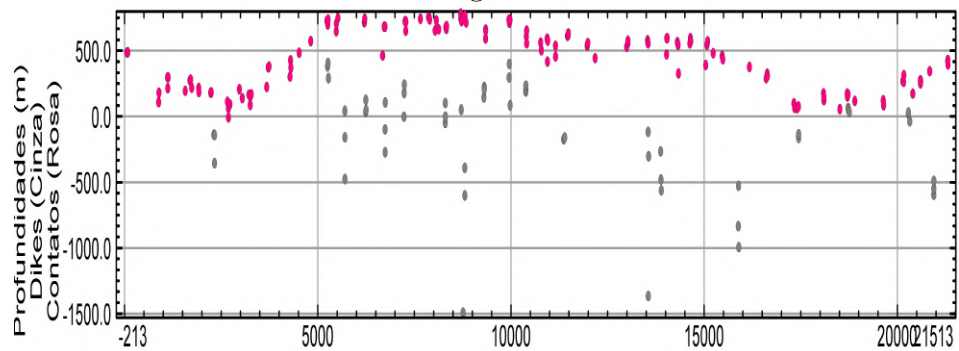
Legenda: Pontos cinza e rosa mostram as soluções, diques e contatos respectivamente, obtidas pelo sinal analítico

Fonte: Produzido pelo Autor

Figura E.5: Perfil 5, mostrando perfis magnéticos, gravimétricos e soluções obtidas pelo sinal analítico



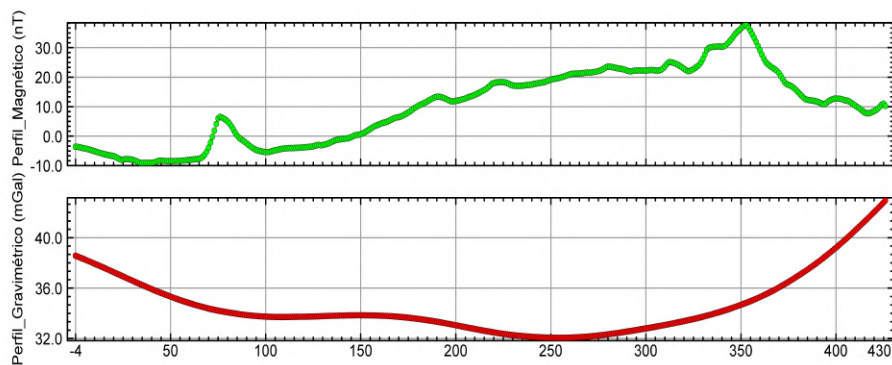
Legenda: Pontos Verdes representam a anomalia magnética e os pontos vermelhos a anomalia gravimétrica



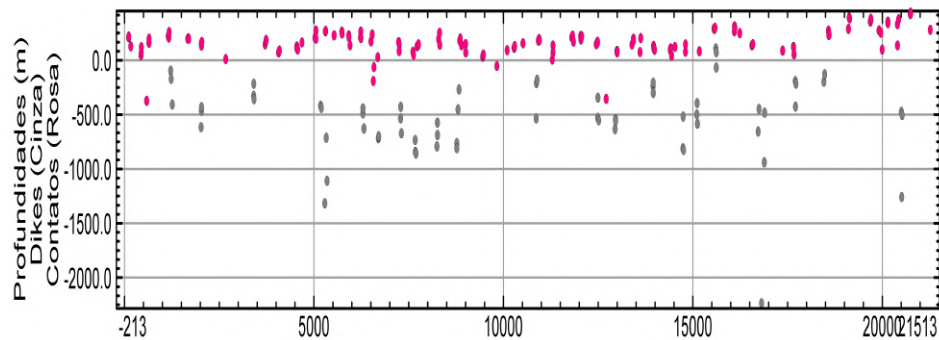
Legenda: Pontos cinza e rosa mostram as soluções, diques e contatos respectivamente, obtidas pelo sinal analítico

Fonte: Produzido pelo Autor

Figura E.6: Perfil 6, mostrando perfis magnéticos, gravimétricos e soluções obtidas pelo sinal analítico



Legenda: Pontos Verdes representam a anomalia magnética e os pontos vermelhos a anomalia gravimétrica



Legenda: Pontos cinza e rosa mostram as soluções, diques e contatos respectivamente, obtidas pelo sinal analítico

Fonte: Produzido pelo Autor

As Figuras E.1, E.2, E.3, E.4, E.5 e E.6, mostram algumas das soluções obtidas, que apresentam as anomalias e algumas das soluções obtidas, já também foram utilizadas as soluções obtidas pela deconvolução de Euler e também Werner.