

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUÍS EDUARDO DA CUNHA DUARTE

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DE UMA ANOMALIA MAGNÉTICA DE
DIREÇÃO NW COM A INTEGRAÇÃO DE DADOS DE MAGNETOMETRIA AÉREA
E TERRESTRE NO ESCUDO SUL-RIO-GRANDENSE**

**Caçapava do Sul
2023**

LUÍS EDUARDO DA CUNHA DUARTE

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DE UMA ANOMALIA MAGNÉTICA DE
DIREÇÃO NW COM A INTEGRAÇÃO DE DADOS DE MAGNETOMETRIA AÉREA
E TERRESTRE NO ESCUDO SUL-RIO-GRANDENSE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Rafael Gregory

Coorientador: Prof. Dr. Maximilian Fries

**Caçapava do Sul
2023**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo autor através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

D812c Duarte, Luís Eduardo da Cunha
Caracterização geológica de uma anomalia magnética de direção NW com a integração de dados de magnetometria aérea e terrestre no Escudo Sul-rio-grandense / Luís Eduardo da Cunha Duarte.
76 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2023.
"Orientação: Tiago Rafael Gregory".

1. levantamento geofísico. 2. susceptibilidade magnética. 3. corpos intrusivos. 4. diabásio. I. Título.

LUÍS EDUARDO DA CUNHA DUARTE

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DE UMA ANOMALIA MAGNÉTICA DE
DIREÇÃO NW COM A INTEGRAÇÃO DE DADOS DE MAGNETOMETRIA AÉREA
E TERRESTRE NO ESCUDO SUL-RIO-GRANDENSE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 24 de janeiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Tiago Rafael Gregory
Orientador
UNIPAMPA

Geólogo Msc. Marcelo Lusa
UNIPAMPA

Prof. Dr. Vinicius Matté
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **VINICIUS MATTE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/01/2023, às 13:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com

as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCELO LUSA, GEOLOGO**, em 26/01/2023, às 14:02, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **TIAGO RAFAEL GREGORY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/01/2023, às 17:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1038978** e o código CRC **23DE366D**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

Dedico este trabalho à Mãe e Pai.

AGRADECIMENTO

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus. Mãe, obrigado pelo suporte e acreditar no teu filho, Pai onde tu estiver sou muito grato a ti. Ao meu orientador, colega e amigo Tiago Rafael Gregory e ao co-orientador Maximilian Fries. Felipe Guadagnin muito obrigado pela receptividade e acolhida. Às grandes amizades que estes anos de UNIPAMPA me proporcionou: Lucas Dalla Nora (Coisa Ruim), Jean Carlo Henzel (Salaminho), Vitor Pleinz (Quase Loco), Claudio Buss (Padre), Guilherme Marques. Não posso deixar de fora minha irmã Geóloga Lauren Duarte. Ao excelentíssimo ex-presidente da República Jair Messias Bolsonaro, obrigado por ter feito um Brasil melhor nestes anos de graduação. Também agradeço a todos os professores, desde aqueles dos tempos de UFRGS até aos de tempo da UNIPAMPA que me ensinaram a paixão pela Geologia. À cidade de Caçapava do Sul e o seu povo acolhedor. E por fim à Universidade Federal do Pampa pelo ensino de qualidade, público e gratuito.

**“Um passo à frente e você não está
mais no mesmo lugar”.**

Chico Science

RESUMO

Apesar de ser alvo de inúmeras pesquisas de cunho geológico, alguns eventos que ocorreram na evolução do Escudo Sul-rio-grandense ainda são uma lacuna no entendimento do desenvolvimento desta porção territorial no estado do Rio Grande do Sul. Este é o caso dos lineamentos magnéticos com direção noroeste (NW), que até hoje foram pouco citados na literatura. Para diferentes autores, estes lineamentos têm sua origem ligada à formação do alto estrutural do Arco de Rio Grande, e teriam servido como supostos dutos alimentadores do vulcanismo que gerou a Formação Serra Geral. Este trabalho teve como finalidade, estudar uma porção de um desses lineamentos magnéticos. Foi escolhido um lineamento bem representativo, onde já haviam sido realizados outros trabalhos feitos por ex-alunos do curso de geologia da UNIPAMPA. Tais estudos focaram na petrografia do corpo fonte da anomalia magnética. O lineamento alvo deste trabalho está localizado na porção norte do município de Pinheiro Machado. Para se chegar aos resultados esperados foram utilizados dados de geofísica, que permitiram a análise da estrutura geológica, fonte causativa da anomalia magnética, tanto em superfície como em sub-superfície. Para isso foi feito um levantamento magnetométrico terrestre que constou na aquisição de dados em seis perfis realizados perpendicularmente ao comprimento da anomalia magnética. Também foram coletados dados de susceptibilidade magnética das rochas aflorantes na área de estudo. Outros dados de magnetometria usados neste trabalho foram obtidos no banco de dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), oriundos do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul. Com isso foi possível delimitar os contatos litológicos do corpo causador da anomalia magnética em relação às suas rochas encaixantes, determinar o tipo de estrutura geológica e a geometria do corpo.

Palavras-Chave: levantamento geofísico, susceptibilidade magnética, corpos intrusivos, diabásio.

ABSTRACT

Despite being the subject of numerous geological researches, some events that occurred in the evolution of the Sul-rio-grandense Shield are still a gap in the understanding of the development of this territorial portion in the state of Rio Grande do Sul. This is the case of northwest (NW) magnetic lineaments, which until today have been little mentioned in the literature. For different authors, these lineaments have their origin linked to the formation of the structural high of the Arch of Rio Grande, and even though these structures would have served as supposed feeder ducts of the volcanism that generated the Serra Geral Formation. This work aimed to study a portion of one of these magnetic lineaments. A very representative lineament was chosen, where other work had already been carried out by former students of the geology course at UNIPAMPA. Such studies focused on the petrography of the source body of the magnetic anomaly. The target lineament of this work is located in the northern portion of the municipality of Pinheiro Machado. In order to arrive at the expected results, geophysics data were used that allowed the analysis of the geological structure, the causative source of the magnetic anomaly, both on the surface and sub-surface. For this, a terrestrial magnetometric survey was carried out, which consisted in the acquisition of data in six profiles carried out perpendicularly to the length of the magnetic anomaly, magnetic susceptibility data of the outcropping rocks in the study area were also collected. Other magnetometry data used in this work were provided by the Geological Survey of Brazil (CPRM), from the Aerogeophysical Project Escudo of Rio Grande do Sul. With this, it was possible to delimit the lithological contacts of the body causing the magnetic anomaly in relation to its host rocks, to determine the type of geological structure and the geometry of the body.

Keywords: geophysical survey, magnetic susceptibility, intrusive bodies, diabase.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS E DE AFLORAMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO. A) CERRO ALINHADO (DIQUE DE DIABÁSIO). B) AFLORAMENTO COM BLOCOS E MATAÇÕES. C) AFLORAMENTO EM LAJEADO. D) AFLORAMENTO EM DRENAGEM.....	19
FIGURA 2 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO E SITUAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	20
FIGURA 3 – MAPA DE DETALHE DA ESTRADA DE ACESSO À ÁREA DE ESTUDO.....	21
FIGURA 4 – PRINCIPAIS UNIDADES GEOTECTÔNICAS DO ESRG.....	22
FIGURA 5 – MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO.....	24
FIGURA 6 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO MOSTRANDO AS PRINCIPAIS FORMAS DE OCORRÊNCIA DE ROCHAS MAGMÁTICAS.....	28
FIGURA 7 – AMOSTRA DE MÃO COLETADA NA ÁREA DE ESTUDO E PERTENCENTE AO CORPO INTRUSIVO CAUSATIVO DA ANOMALIA MAGNÉTICA.....	28
FIGURA 8 – COMPONENTES DO CAMPO MAGNÉTICO.....	30
FIGURA 9 – HISTOGRAMA MOSTRANDO OS VALORES MÉDIOS E INTERVALOS DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA DE ALGUNS TIPOS DE ROCHAS.....	34
FIGURA 10 – MAPA MAGNÉTICO REGIONAL COM LINEAMENTOS MAGNÉTICOS NW.....	37
FIGURA 11 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DO PROJETO AEROGEOFÍSICO DO ESRG.....	39
FIGURA 12 – UM DOS AVIÕES UTILIZADOS PELA LASA NO LEVANTAMENTO AEROGEOFÍSICO DO ESRG.....	39
FIGURA 13 – LINHAS DE VÔO DO LEVANTAMENTO AEROGEOFÍSICO NA ÁREA DE ESTUDO.....	40
FIGURA 14 – PERFIS DO LEVANTAMENTO GEOFÍSICO REALIZADOS EM CAMPO.....	41
FIGURA 15 – MAGNETÔMETROS UTILIZADOS NO LEVANTAMENTO GEOFÍSICO TERRESTRE. A) MAGNETÔMETRO FIXO (ESTAÇÃO BASE). B) MAGNETÔMETRO MÓVEL OPERADO PELO AUTOR.....	42
TABELA 1:ALGUMAS ESPECIFICAÇÕES DOS PERFIS LEVANTADOS.....	42
FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES UTILIZADAS NO PROCESSAMENTO, GERAÇÃO E REALCE DAS ANOMALIAS AEROMAGNÉTICAS.....	44
FIGURA 17 – MAPA TMI DA ÁREA DE ESTUDO.....	45
FIGURA 18 – (A) ÍNDICE ESTRUTURAL 0 DEMONSTRANDO OS LIMITES LITOLÓGICOS DA FONTE CAUSATIVA DA ANOMALIA MAGNÉTICA; (B) ÍNDICE ESTRUTURAL 1 DEMONSTRANDO O COMPORTAMENTO DO CORPO EM SUB-SUPERFÍCIE.....	48
FIGURA 19 – SUSCEPTIBILÍMETRO KAPPAMETER MODELO KT-10 UTILIZADO PARA A OBTENÇÃO DOS VALORES DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA EM UM AFLORAMENTO DE ROCHA METAMÓRFICA NA ÁREA DE ESTUDO.....	49
TABELA 2– AMOSTRAGENS DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA.....	49
FIGURA 20 – OCORRÊNCIA DE LINEAMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO E ANÁLISE ESTRUTURAL (CANTO DIREITO INFERIOR DA FIGURA).....	50
FIGURA 21 – MAPA DE AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO DA ÁREA DE ESTUDO, DEMONSTRANDO VALORES MÁXIMOS ANÔMALOS REFERENTES AO CORPO INTRUSIVO DE DIABÁSIO.....	52
FIGURA 22 – MAPA DA PRIMEIRA DERIVADA VERTICAL DA ÁREA DE ESTUDO, DEMONSTRANDO VALORES ANÔMALOS MÁXIMOS REFERENTES AO CORPO INTRUSIVO DE DIABÁSIO.....	52

FIGURA 23 – MAPA DAS PROFUNDIDADES DAS FONTES ANÔMALAS MAGNÉTICAS (TMI_RTP) OBTIDAS A PARTIR DA DECONVOLUÇÃO DE EULER 3D PARA LIMITES LITOLÓGICOS E ESTRUTURAS (SI = 0).....	53
FIGURA 24 – COMPARAÇÃO DE PERFIS GEOFÍSICOS E CONTATOS GEOLÓGICOS (PERFIL 1).	54
FIGURA 25 – COMPARAÇÃO DE PERFIS GEOFÍSICOS E CONTATOS GEOLÓGICOS (PERFIL 2).	54
FIGURA 26 – COMPARAÇÃO DE PERFIS GEOFÍSICOS E CONTATOS GEOLÓGICOS (PERFIL 3).	55
FIGURA 27 – COMPARAÇÃO DE PERFIS GEOFÍSICOS E CONTATOS GEOLÓGICOS (PERFIL 4).	55
FIGURA 28 – COMPARAÇÃO DE PERFIS GEOFÍSICOS E CONTATOS GEOLÓGICOS (PERFIL 5).	56
FIGURA 29 – COMPARAÇÃO DE PERFIS GEOFÍSICOS E CONTATOS GEOLÓGICOS (PERFIL 6).	56
FIGURA 30 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS E TIPOS DE AMOSTRAGEM DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA NA ÁREA DE ESTUDO.....	57
FIGURA 31: MÉDIA DE VALORES DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA DE CADA AMOSTRA E SUMÁRIO ESTATÍSTICO DO GRUPO DE AMOSTRAS DE DIABÁSIO COM MEDIDAS <i>IN SITU</i> . .	58
FIGURA 32 – MÉDIA DE VALORES DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA DE CADA AMOSTRA E SUMÁRIO ESTATÍSTICO DO GRUPO DE AMOSTRAS DE DIABÁSIO COM MEDIDAS REALIZADAS EM LABORATÓRIO.....	58
FIGURA 33 – MÉDIA DE VALORES DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA DE CADA AMOSTRA E SUMÁRIO ESTATÍSTICO DO GRUPO DE AMOSTRAS DE ROCHAS METAMÓRFICAS COM MEDIDAS REALIZADAS EM LABORATÓRIO.	59
FIGURA 34 – MÉDIA DE VALORES DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA DE CADA AMOSTRA E SUMÁRIO ESTATÍSTICO DO GRUPO DE AMOSTRAS DE ROCHAS SEDIMENTARES COM MEDIDAS REALIZADAS EM LABORATÓRIO.	59
FIGURA 35 – MAPA DA INTEGRAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS DE DIFERENTES MÉTODOS APLICADOS PARA DELIMITAR OS CONTATOS GEOLÓGICOS REFERENTES AO CORPO CAUSATIVO DA ANOMALIA MAGNÉTICA.....	60
FIGURA 36 – MAPA INTERPRETATIVO DA OCORRÊNCIA DA ROCHA FONTE DA ANOMALIA MAGNÉTICA (DIABÁSIO).....	60
FIGURA 37 – MAPA DAS PROFUNDIDADES DAS FONTES ANÔMALAS MAGNÉTICAS (TMI_RTP) OBTIDAS A PARTIR DA DECONVOLUÇÃO DE EULER 3D PARA DIQUES E CORPOS INTRUSIVOS (SI = 1).....	62
FIGURA 38 - MAPA DAS PROFUNDIDADES DAS FONTES ANÔMALAS MAGNÉTICAS (TMI_RTP) OBTIDAS A PARTIR DA DECONVOLUÇÃO DE EULER 3D PARA DIQUES E CORPOS INTRUSIVOS (SI = 1) PARA A ZONA 1 DO DIQUE.	63
FIGURA 39 – MAPA DAS PROFUNDIDADES DAS FONTES ANÔMALAS MAGNÉTICAS (TMI_RTP) OBTIDAS A PARTIR DA DECONVOLUÇÃO DE EULER 3D PARA DIQUES E CORPOS INTRUSIVOS (SI = 1) PARA A ZONA 2 DO DIQUE.	64
FIGURA 41 – MAPA DOS PERFIS TRAÇADOS AO LONGO DAS TRÊS ZONAS.....	65
FIGURA 42 – PERFIL ESQUEMÁTICO DO PERFIL A-A’ DEMONSTRANDO AS PROVÁVEIS PROFUNDIDADES E COMPORTAMENTO DO CORPO EM SUBSUPERFÍCIE NA ZONA 1.	66
FIGURA 43 – PERFIL ESQUEMÁTICO DO PERFIL B-B’ DEMONSTRANDO AS PROVÁVEIS PROFUNDIDADES E COMPORTAMENTO DO CORPO EM SUBSUPERFÍCIE NA ZONA 2.	66
FIGURA 44 – PERFIL ESQUEMÁTICO DO PERFIL C-C’ DEMONSTRANDO AS PROVÁVEIS PROFUNDIDADES E COMPORTAMENTO DO CORPO EM SUBSUPERFÍCIE NA ZONA 3.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Algumas especificações dos perfis levantados.	42
Tabela 2: Amostragens de susceptibilidade magnética.	49

LISTA DE ABREVIATURAS

ESrg – Escudo Sul-riograndense
TT – Terreno Taquarembó
TSG – Terreno São Gabriel
TTi – Terreno Tijucas
TP – Terreno Pelotas
CRP – Cráton Rio de La Plata
CDF – Cinturão Dom Feliciano
TPE – Terreno Pelotas
LI – Lineamento Ibaré
CE – Complexo Encantadas
BP – Batólito Pelotas
CMP – Complexo Metamórfico Porongos
GCM – Grupo Cerro dos Madeiros
CCA – Complexo Cerro da Árvore
TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

LISTA DE SIGLAS

NW - Noroeste

SE - Sudeste

SW - Sudoeste

NE - Nordeste

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

BR – Rodovia Federal

Ma – Milhões de anos

Ga – Bilhões de anos

UTM – Universal Transversa de Mercator

Km – Quilômetro(s)

m – Metro (s)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	17
2.1 Geral	17
2.2 Específicos	17
3. JUSTIFICATIVA	17
4. ÁREA DE ESTUDO	18
4.1 Localização	19
4.2 Contexto Geológico Regional	21
4.2.1 Escudo Sul-rio-grandense (ESrg)	21
4.3 Contexto Geológico Local	24
4.3.1 Complexo Encantadas	25
4.3.2 Complexo Metamórfico Porongos.....	25
4.3.3 Bacia do Camaquã	26
4.3.4 Formação Serra Geral	27
5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
5.1 Fundamentação Teórica	29
5.1.1 Magnetometria	29
5.1.2 Magnetometria Aérea	31
5.1.3 Magnetometria Terrestre	32
5.1.4 Correções necessárias dos dados obtidos em levantamentos magnetométricos	32
5.1.5 Susceptibilidade Magnética	33
5.2 Trabalhos Anteriores Aplicados	34
5.2.1 Trabalhos Anteriores Aplicados Sobre o Tema da Pesquisa	34
5.2.2 Trabalhos Anteriores Realizados na Área de Estudo.....	37
6 MATERIAIS E MÉTODOS	38
6.1 Magnetometria	38
6.1.1. Magnetometria Aérea– Levantamento Aerogeofísico – Projeto Aerogeofísico do Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM 2010)	38
6.1.2 Magnetometria Terrestre	40
6.2 Processamento dos Dados de Magnetometria (Aérea e Terrestre)	43
6.2.1 Correções da Variação Diurna e Remoção do Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF)	43
6.2.2 Geração de Mapas de Valores Anômalos	43
6.2.2.1 Campo Magnético Anômalo Total (TMI)	44
6.2.2.2 Redução ao Pólo (RTP).....	45
6.2.2.3 Amplitude do Sinal Analítico (ASA)	46
6.2.2.4 Primeira Derivada Vertical (1DV).....	46
6.2.2.5 Inclinação do Sinal Analítico (ISA ou TDR)	46
6.3 Análise Semiquantitativa das Fontes Causativas- Deconvolução de Euler	47

6.4 Susceptibilidade Magnética	48
7. RESULTADOS.....	49
7.1 Delimitação em superfície do Corpo Intrusivo (Contatos Litológicos)	51
7.1.1 Magnetometria Aérea	51
7.1.1.1 Filtros Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e Primeira Derivada Vertical (1VD)	51
7.1.1.2 Análise Semiquantitativa das Fontes Causativas - Índice Estrutural 0	53
7.1.2 Magnetometria Terrestre	53
7.1.3 Susceptibilidade Magnética	57
7.1.4 Integração dos dados – limites litológicos da fonte causativa da anomalia magnética	59
7.2 Tipo de estrutura geológica e Comportamento do Corpo Intrusivo em Sub-Superfície - Deconvolução de Euler com Índice Estrutural 1	61
8. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
9. REFERÊNCIAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

O Escudo Sul-rio-grandense (ESrg) há muito vem sendo pesquisado por geocientistas. Porém, alguns fenômenos e eventos que ocorreram nesta porção do estado do Rio Grande do Sul (RS) ainda carecem de estudos. É o caso dos lineamentos magnéticos com direção noroeste (NW). Existem poucas referências na bibliografia sobre este tema (GREGORY *et al.*, 2019).

Métodos geofísicos têm sido empregados na investigação geológica em subsuperfície com sucesso há muito tempo. A aquisição de dados envolvendo geofísica é uma ferramenta eficaz e relativamente mais barata do que métodos diretos de investigação das rochas e estruturas abaixo do solo. A magnetometria feita no ar, conhecida como aeromagnetometria, é muito utilizada para levantamentos regionais que englobam grandes áreas, assim como para mapeamentos mais detalhados em escala de prospecção e detecção de alvos (DENTITH; MUDGE, 2014).

O presente trabalho teve como finalidade estudar as feições com padrão estrutural de direção NW, para caracterizar sua geologia, geometria e arquitetura, tanto em superfície como em subsuperfície, por meio da interpretação de dados geofísicos obtidos a partir de magnetometria aérea e terrestre, além de dados de susceptibilidade magnética.

Para a realização deste trabalho, optou-se por fazer os estudos na porção central de um lineamento magnético bem representativo dessas feições com padrão NW, que está localizado a norte do município de Pinheiro Machado na região sul do estado do Rio Grande do Sul.

A magnetometria foi o método geofísico empregado neste estudo. Foram utilizados dados de aerogeofísica disponibilizados na forma de relatórios técnicos pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Serviço Geológico do Brasil, obtidos no Projeto Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM 2010) e levantamento geofísico de magnetometria terrestre, com um total de seis perfis, dispostos transversalmente à anomalia magnética. Foram utilizados equipamentos disponibilizados pela Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) para a aquisição de dados.

Este estudo tentou, de alguma forma, contribuir com novos dados científicos que futuramente possam auxiliar em novos trabalhos que venham tentar a melhor compreensão da ocorrência e a formação dos lineamentos magnéticos com direção NW que ocorrem no estado.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo do presente trabalho é a caracterização geológica de uma porção de um lineamento magnético com direção NW, por meio da integração de dados geofísicos de magnetometria aérea e levantamentos magnetométricos terrestres, além de dados de susceptibilidade magnética coletados em campo da rocha fonte da anomalia e de suas encaixantes.

2.2 Específicos

Especificamente, pretende-se com esse trabalho:

- Produzir resultados através da integração de dados geofísicos de magnetometria aérea e terrestre junto a dados geológicos coletados em campo;
- Identificar o tipo de estrutura geológica associada à anomalia magnética;
- Definir a geometria do corpo causador da anomalia magnética investigada.

3. JUSTIFICATIVA

Um dos motivos da escolha do tema deste trabalho é contribuir cientificamente para o entendimento geológico da região estudada e sobre o tema, visto que há poucos estudos publicados a respeito dos lineamentos magnéticos com padrão estrutural NW.

A área proposta para este trabalho está relativamente próxima ao Campus da UNIPAMPA, assim poupando grandes esforços no deslocamento e facilitando a realização do trabalho e a mesma possui rochas do embasamento (Complexos Metamórficos Encantadas e Porongos) e rochas sedimentares da Bacia do Camaquã (Formações Arroio América e Pedra Pintada) o que pode influenciar no diferente comportamento da estrutura em subsuperfície.

Também se levou em conta que a Universidade tem os recursos necessários para viabilizar esta pesquisa, como o Laboratório de Geofísica Aplicada para o processamento dos dados geofísicos e magnetômetros de precessão de prótons (base e móvel) apropriados para realizar o levantamento de geofísica terrestre além de um corpo técnico qualificado para auxiliar nos levantamentos terrestres.

Trabalhos anteriores realizados na área de estudo sugerem que estes corpos ígneos intrusivos responsáveis por estas anomalias magnéticas podem ser diques e/ou soleiras (GREGORY *et al.*, 2019).

4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo encontra-se no Escudo Sul-rio-grandense (ESrg), no município de Pinheiro Machado, estado do Rio Grande do Sul, próxima ao paralelo 31°. Está na Zona Climática Temperada Sul e o clima da região é definido como subtropical úmido, caracterizado por ter as estações do ano bem definidas.

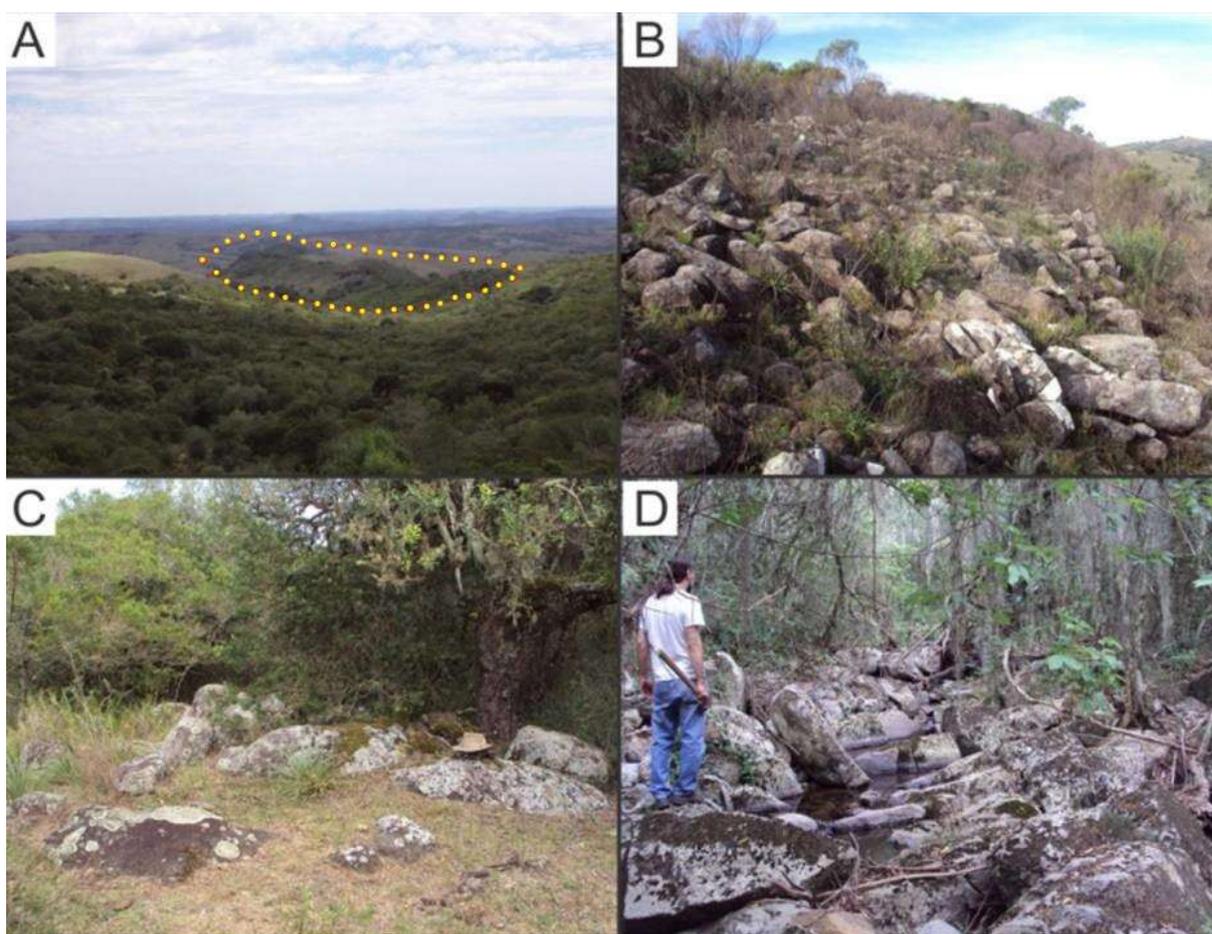
Com uma área total de 5,8 km², vale ressaltar que próximo ao lineamento magnético escolhido para este estudo há a ocorrência de outros lineamentos magnéticos com sentido NW. Porém, devido à logística e tempo, foi estudado apenas um lineamento.

Durante a realização dos trabalhos de campo foi observado que a geomorfologia da região caracteriza-se por campos moderadamente ondulados contendo áreas de relevo mais elevado, podendo ocorrer escarpas de alto ângulo. Mais especificadamente, a estrutura alvo deste estudo ocorre na forma de cerro alinhado concordante com a estrutura estudada.

Também notou-se que no local de estudo a vegetação dos campos é composta de gramíneas, já nas encostas e drenagens ocorrem arbustos e uma

vegetação mais densa composta de mata de médio porte. Também foi possível verificar em campo que os afloramentos rochosos presentes na área de estudo se apresentam na forma de blocos, matacões e lajeados no campo, nas encostas e nas drenagens (figura 2).

Figura 1 – Características geomorfológicas e de afloramentos na área de estudo. A) Cerro alinhado (dique de diabásio). B) Afloramento com blocos e matacões. C) Afloramento em lajeado. D) Afloramento em drenagem.



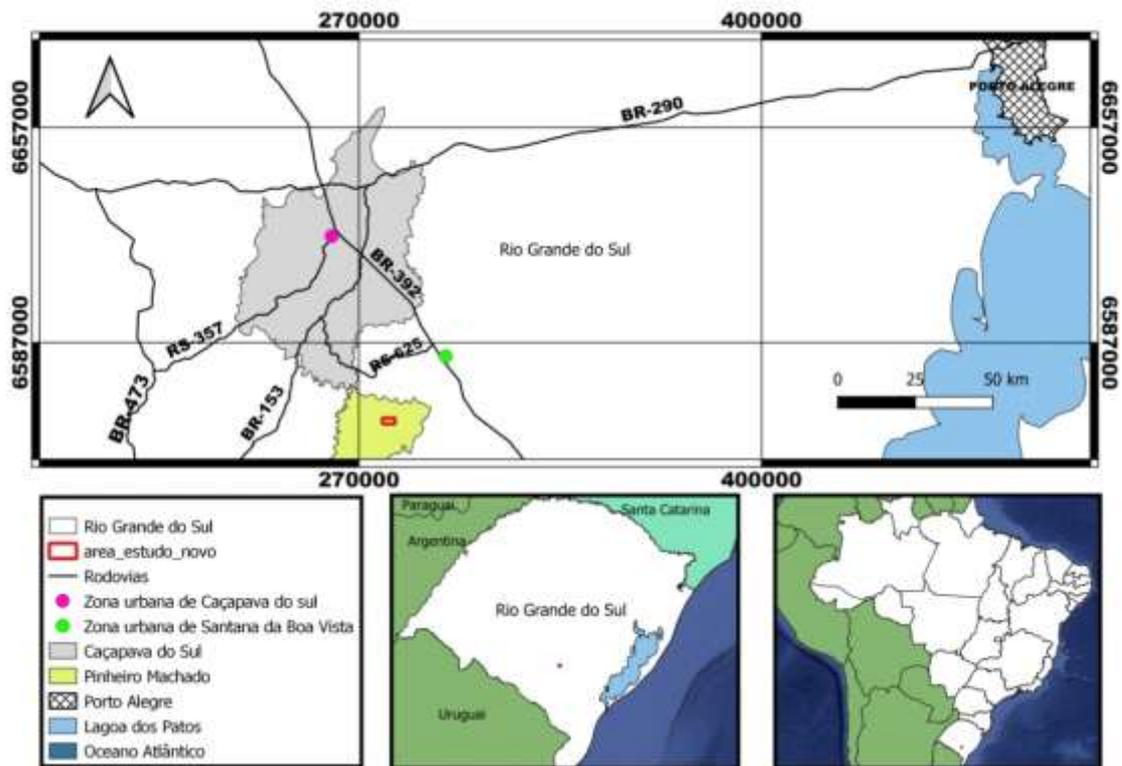
Fonte: extraído e modificado de Macedo (2018).

4.1 Localização

O município de Pinheiro Machado situa-se na região sul do estado do Rio Grande do sul. Para este trabalho foi escolhida uma localidade mais ao norte do município, onde há a ocorrência de um lineamento magnético com sentido NW. Especificamente nesta área já foram realizados estudos anteriores como, por exemplo, os trabalhos realizados por Macedo (2018), Dalla Costa (2019) e Sampaio (2019).

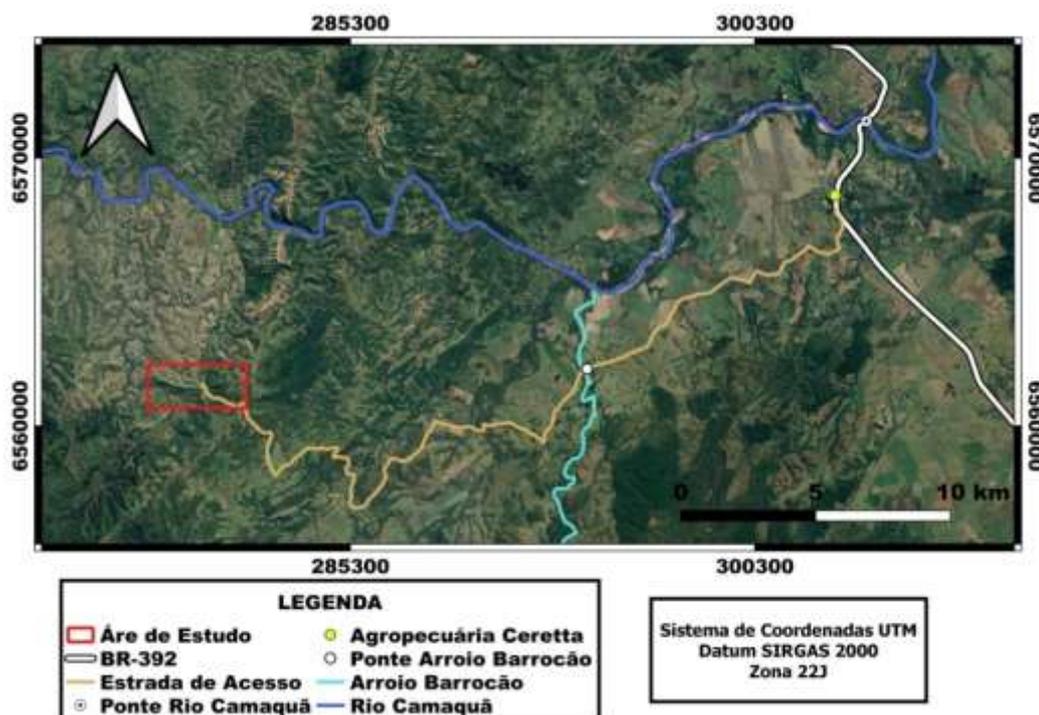
Para se chegar à região de estudo, partindo-se de Porto Alegre, deve-se tomar a BR-290 em direção oeste e andar aproximadamente 230 km até o entroncamento com a BR-392, seguindo no sentido SE (Figura 3). Após o município de Santana da Boa vista, aproximadamente 3.700m para SE da ponte sobre o Rio Camaquã (coordenada UTM 303.328 mE e 6.568.050 mS, Zona 22J) entra-se em uma estrada vicinal (de terra) sentido SW e percorre-se aproximadamente 25 km (Figura 4).

Figura 2 – Mapa de localização e situação da área de estudo.



Fonte: modificado de IBGE (2019); autor (2023).

Figura 3 – Mapa de detalhe da estrada de acesso à Área de Estudo.



Fonte: modificado de Google Earth; autor (2023).

4.2 Contexto Geológico Regional

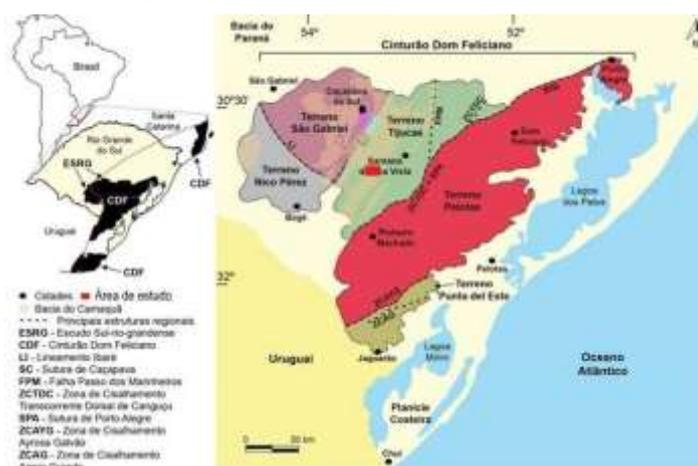
4.2.1 Escudo Sul-rio-grandense (ESrg)

O ESrg está localizado na porção centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul e abrange uma área total de 65.000 km². É delimitado a norte, oeste e sul pela Bacia do Paraná e pela Província Costeira do Rio Grande do Sul a leste. Possui em seus domínios rochas que datam desde o Paleoproterozoico ao Cambriano, que são o resultado de dois ciclos orogênicos principais: o Ciclo Transamazônico (2,26-2,0 Ga) e o Ciclo Brasileiro (900-535 Ma). Em cada um destes ciclos houve a formação de crosta oceânica, arcos de ilhas vulcânicas, cinturões orogênicos e colisões entre continentes (HARTMANN et al., 2007; CHEMALE JR., et al. 2000).

O ESrg é dividido em quatro unidades geotectônicas: Terreno Taquarembó (TT), Terreno São Gabriel (TSG), Terreno Tijucas (TTi), Terreno Pelotas (TP ou Batólito de Pelotas) (Figura 5). Essa divisão se dá em análises baseadas em geoquímica, petrografia, geologia isotópica, geofísica e estratigrafia, levando em consideração as principais unidades do embasamento cristalino do ESrg que são:

Cráton Rio de La Plata (CRP) e o Cinturão Dom Feliciano (CDF) (HARTMANN et al., 2007; CHEMALE JR., et al. 2000). Koester (2021) adiciona a estas unidades o Terreno Punta Del Este (TPE), também denominado de Terreno Jaguarão, como uma extensão do Terreno Punta Del Este do Escudo Uruguaio. Sobre os Terrenos Taquarembó, São Gabriel e Tijuca ocorrem rochas vulcano-sedimentares da Bacia do Camaquã (PAIM et al., 2014).

Figura 4 – Principais unidades geotectônicas do ESrg.



Fonte: extraído e modificado de Koester et al. (2021).

Segundo Phillip *et al.* (2016, 2018), quatro grandes eventos orogenéticos contribuíram para a formação do ESrg: Dom Feliciano (650- 540 Ma), São Gabriel (770-680Ma), Porongos (800-750Ma) e Passinho (890-860 Ma).

Para Koester *et al.* (2021), através da assinatura de isótopos, demonstram uma considerável geração de crosta durante o Neo e Paleoproterozoico, sendo mais significativa no Neoproterozoico. Em ambas, nas suas maiores partes, houve retrabalhamento crustal.

O **Terreno Taquarembó (TT)** está situado na porção sudoeste do ESrg e está recoberto a oeste pela Bacia do Paraná (BP), a nordeste tem em seu limite o Lineamento de Ibaré (LI), que tem extensão aproximada de 70 km e separa o TT do TSG. Tem como sua principal unidade o Complexo Granulítico Santa Maria Chico (2,3-2,4 Ga), que compreende: granulitos máficos a ultramáficos associados à metaproxenitos e meta-anortositos; paragnaisses, margas, rochas cálcio-siliclásticas, gnaisses quartzo feldspáticos e BIFs; trondhjemitos e tonalitos. Ocorrem também como *inliers* (septos) do embasamento em outros domínios do ESrg. As estruturas predominantes têm orientação E-W a N45°-70°E (HARTMANN *et al.*, 2007;

CHEMALE JR, 2000; PHILIPP, 2007; PHILIPP *et al.*, 2016; OYHANTÇABAL *et al.*, 2018).

O **Terreno São Gabriel** (TSG) encontra-se na parte centro-oeste do ESrg sendo limitado a leste pela Sutura de Caçapava do Sul e pelo TTi, porção onde ocorre a Bacia Vulcano-sedimentar do Camaquã (Neoproterozoico). A BP (Fanerozoico) cobre o TSG ao norte e oeste. Segundo Hartmann *et al.* (2007), o TSG foi formado a partir de um prisma acrescionário no Neoproterozoico e suas rochas são consideradas juvenis (Mesoproterozoico e Neoproterozoico). No TSG ocorrem quatro associações petrotectônicas: sequências sedimentares e vulcano-sedimentares metamorizadas do Complexo Cambaizinho, Palma, Bossoroca e Passo Feio; associações ofiolíticas; ortognaisses do Complexo Cambaí; e granitos pós-colisionais (SAALMAN *et al.*, 2005; HARTMANN *et al.*, 2007; PHILIPP *et al.*, 2016; PHILIPP *et al.*, 2018).

Para Chemale Jr. *et al.* (2000), os complexos Cambaí, Palma e Bossoroca foram originados por um arco magmático que foi desenvolvido durante a Orogênese São Gabriel. Estão presentes em todos os complexos registros sedimentares que contém sequências carbonáticas metamorizadas, onde é possível observar sua origem desde a sua cristalização e diagênese até o metamorfismo regional e hidrotermalismo (Goulart *et al.*, 2013).

O **Terreno Tijucas** (TTi) situa-se na parte central do ESrg. É nele que se encontra a Área de Estudo de trabalho. O TTi um terreno alongado segundo NE-SW, com 170 km de extensão e largura variando entre 30 a 50 km. Está a leste do Terreno Pelotas e tem como seu limite oeste a Bacia do Camaquã. Ao norte é limitado pela Bacia do Paraná. O TTi é constituído predominantemente de rochas metavulcânicas e metassedimentares (Mesoproterozoico ao Neoproterozoico) do Complexo Porongos (CP) e está cavalgado sobre o Complexo Encantadas (CE). O CE (embasamento) representa a parte paleoproterozoica do TTi e é formado principalmente por metagranitoides milonitizados de composições monzoníticas e sienograníticas. Também faz parte do CE o Gnaiss Encantadas (JOST & Bitencourt, 1980; CHEMALE JR *et al.*, 2000; Hartmann *et al.*, 2007; LUSA *et al.*, 2010).

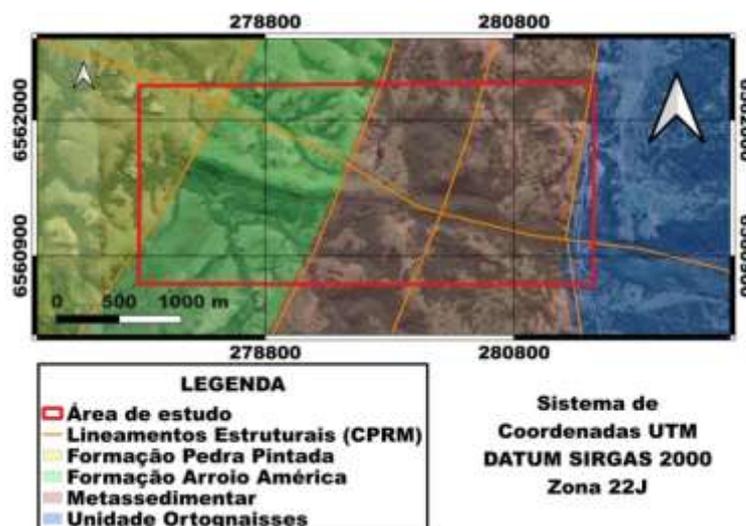
O **Terreno Pelotas** (TP), também denominado por alguns autores como Batólito de Pelotas (BP), é o terreno situado mais a leste do ESrg, possuindo uma forma alongada com direção NE, com aproximadamente 370 km de extensão e entre

80 a 120 km de largura. Ao leste encontra-se a planície costeira do Rio Grande do Sul e a oeste o Terreno Tijucas. Já ao norte, faz contato com as rochas da Bacia do Paraná. No TP predominam rochas graníticas com idade entre 650 a 550 Ma. O TP é composto de um complexo granítico-gnáissico e seis suítes intrusivas, com composição isotópica semelhante entre si, indicando fontes mistas, tanto de material mantélico juvenil e material crustal (neoproterozoicas e paleoproterozoicas). Compõe o TP a Suíte Dom Feliciano, formada no Cambriano, e as unidades do Neoproterozoico: Encruzilhada do Sul, Viamão, Piquiri, Eral, Cordilheira e o Complexo Pinheiro Machado (HARTMANN *et al.*, 2007; PHILIPP *et al.*, 2003; PHILLIP *et al.*, 2007).

4.3 Contexto Geológico Local

A área de estudo (Figura 6) está situada no contexto geológico do TTI. Nela há a ocorrência, de E para W, de rochas metamórficas do CE e do Complexo Metamórfico Porongos (CMP). Também estão presentes no local de estudo rochas sedimentares da Bacia do Camaquã, representadas pelas Formações Arroio América e Pedra Pintada. As rochas da área de estudo são cortadas por um corpo intrusivo (fonte causativa da anomalia magnética), o qual é o objeto de estudo deste trabalho. Este corpo intrusivo é aflorante no Complexo Encantadas, no Complexo Porongos e na Formação Arroio América. Já na Formação Pedra Pintada não há registro de afloramentos.

Figura 5 – Mapa geológico da área de estudo.



Fonte: extraído e modificado de CPRM (2013), Mapa Geológico do Rio Grande do Sul; autor (2023).

4.3.1 Complexo Encantadas

As rochas do Complexo Encantadas estão presentes na porção mais a leste da área de estudo. Jost e Bitencourt (1980) definiram as rochas do Complexo Encantadas, na região de Santana da Boa Vista, como Gnaiss Encantadas e propuseram que se tratavam de rochas quartzo-feldspáticas escuras, com forte bandamento composicional e granulação média a fina e que ocorrem no núcleo do Domo de Santana. Quartzitos, anfibólio gnaisses e muscovita xistos também são citados por Jost e Bitencourt (1980).

Segundo Chemale Jr. (2000), o Complexo Encantadas é constituído pelo Gnaiss Encantadas e metagranitoides miloníticos.

4.3.2 Complexo Metamórfico Porongos

O Complexo Metamórfico Porongos (CMP), ou Suíte Metamórfica Porongos, é uma unidade metavulcanossedimentar que está situada no Terreno Tijucas, porção central do ESrg, sobre os ortognaisses do Complexo Encantadas. Suas rochas recobrem uma faixa com orientação NE e têm cerca de 150 km de comprimento por 20 km de largura. O CMP está parcialmente recoberto por rochas sedimentares da BC e da Bacia do Paraná (norte) (JOST & BITENCOURT, 1980; CHEMALE JR *et al.*, 2000; MARQUES *et al.*, 1998).

O CMP é formado por duas sequências litológicas: o Grupo Cerro dos Madeiros (GCM) e o Complexo Cerro da Árvore (CCA). O GCM é dividido em outras duas unidades: a Formação Arroio dos Neves, ao sul do Domo de Santana, que é constituído por uma sequência de meta-arcóseos que estão em discordância com o embasamento, e a Formação Arroio Olaria, que está a oeste do Domo de Santana e é composta por um membro inferior constituído de quartzitos intercalados com xistos e um membro superior pelítico-carbonatado que está em concordância com a Formação Arroio dos Neves. O CCA é formado por uma sequência de quatro unidades litológicas menores que estão empilhadas conforme um padrão estrutural complexo, onde as rochas metavulcânicas estão intercaladas com metapelitos (JOST & BITENCOURT, 1980).

4.3.3 Bacia do Camaquã

As rochas da Bacia do Camaquã (BC) têm idades que vão do Ediacarano ao Cambriano Inferior e foi formada a partir do término do principal evento colisional no Ciclo Brasileiro, quando este evento gerou várias bacias limitadas por falhas. Nesta mesma época foram formadas outras bacias relacionadas a esses eventos no Neoproterozoico. Porém, a BC é a que tem o registro mais completo e preservado. O preenchimento da BC deu-se por rochas sedimentares e vulcânicas por inúmeros eventos de sedimentação e vulcanismo depositados sobre o embasamento do ESrg, tem uma espessura de 8 km e sua formação deu-se no intervalo de 610 a 535 Ma. (FRAGOSO-CÉSAR *et al.*, 2000; ALMEIDA *et al.*, 2010; JANIQUIAN *et al.*, 2012).

Alguns autores dividem a BC da seguinte forma: para PAIM *et al.* (1995), a BC é dividida em quatro alogrupos, sendo eles: Alogrupo Maricá, Alogrupo Bom Jardim, Alogrupo Santa Bárbara e Alogrupo Guaritas. Já para FRAGOSO-CESAR *et al.* (2003), a BC é formada, da base para o topo, pelo Grupo Maricá, Grupo Bom Jardim, Formação Acampamento Velho, Grupo Santa Bárbara, Grupo Guaritas e Suíte Intrusiva Rodeio Velho, separadas por discordâncias erosivas ou angulares.

A BC pode ser dividida em três sub-bacias: Oriental, Central e Ocidental, cada uma com um episódio de subsidência particular e com diferentes depocentros. Estas sub-bacias estão separadas pelo soerguimento dos altos do embasamento: o Alto de Caçapava do Sul a oeste e o Alto da Serra das Encantadas a leste, sendo estes limitados por falhas de alto ângulo de mergulho com direção NNE-SSW (ALMEIDA *et al.*, 2010; JANIQUIAN *et al.*, 2012).

Na área de estudo ocorrem as Formações Arroio América e Pedra Pintada. A seguir estão descritos os contextos geológicos em que cada uma ocorre.

O Grupo Maricá (GM) tem uma espessura que chega a aproximadamente 2500 m e sua idade é em torno de 610 a 601 Ma. O GM representa a unidade base da BC, seu contato com o embasamento metamórfico é dado por falhas normais e também por discordâncias angulares e litológicas. OGM é subdividido em três unidades litoestratigráficas, que registram a evolução de diferentes sistemas deposicionais. Essas unidades são: Formação Passo da Promessa, que consiste em arenitos e lentes conglomeráticas formados em um ambiente de planícies fluviais de

canais entrelaçados; Formação São Rafael que é composta por arenitos e ritmitos originados em plataforma marinha rasa dominada por ondas (tempestitos) que estão associados a turbiditos areno-pelíticos de costa afora (*off shore*); e Formação Arroio América, que está presente na área de trabalho, formada por arenitos e lentes conglomeráticas indicando um novo sistema de planícies fluviais de canais entrelaçados (PELOSI *et al.*, 2003; BORBA *et al.*, 2006).

O Grupo Guaritas, com idade de 547 a 535 Ma, possui aproximadamente 1500 m de espessura de camadas aluviais e eólicas depositados na sub-bacia Camaquã Central, chegando a 50 km de largura. Está limitado pelas Zonas de Falha das Encantadas e Angélica, em discordância angular sobre o GSB e discordância litológica sobre o embasamento metamórfico. É composto pelas seguintes formações: Formação Guarda Velha, caracterizada por arenitos conglomeráticos e conglomerados que estão associados a sistema fluvial-aluvial; Formação Varzinha, onde está inserida a área de estudo, que é formada por depósitos de planície de inundação e canais efêmeros que deram origem a ritmitos (arenito e pelito) e arenitos conglomeráticos; Formação Pedra das Torrinhas, constituída de brechas e intercalações de conglomerados, arenitos conglomeráticos e pelitos formados em um ambiente de leques aluviais; Formação Pedra Pintada, que também está presente na área de estudo, formada por arenitos eólicos e arenitos e pelitos fluviais e interdunas; e, por fim, a Formação Serra do Apertado, que é formada em ambiente fluvial que gerou arenitos conglomeráticos e conglomerados (ALMEIDA, 2005; ALMEIDA *et al.*, 2009).

4.3.4 Grupo Serra Geral

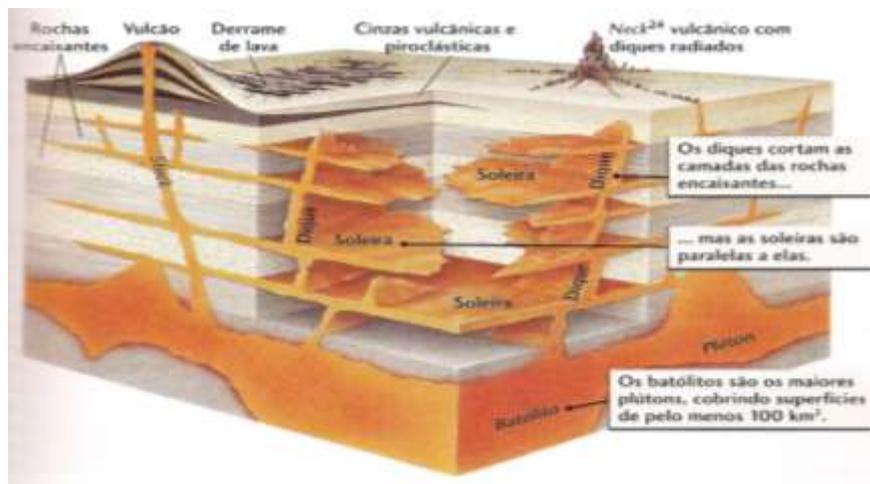
O Grupo Serra Geral (FSG) (White, 1908) ocorre no continente Sul-americano, no Brasil (Bacia do Paraná), Paraguai, Argentina, Uruguai e também na costa oeste africana (Etendeka) (MACHADO *et al.*, 2009).

Gallagher & Hawkersworth (1994) interpretam que este magmatismo foi gerado pela ruptura do Continente Gondwana (Jurássico e Cretáceo) e estimam um volume total de magma de 780.000 km³.

No estado do Rio Grande do Sul a FSG ocorre na forma de derrames vulcânicos e corpos intrusivos. Ao norte do estado ocorreram grandes derrames que chegam a ter no máximo 1.700 metros de espessura (SARMENTO 2013).

No ESrg a FSG ocorre na forma de corpos intrusivos como diques e soleiras (Figura 7). Estes corpos têm orientação preferencial NW-SE e têm sua ocorrência associada às zonas de fraqueza relacionadas ao Arco de Rio Grande (PHILIPP *et al.* 2014; GREGORY *et al.* 2019).

Figura 6 – Diagrama esquemático mostrando as principais formas de ocorrência de rochas magmáticas.



Fonte: extraído de Press *et al* (2006).

As rochas intrusivas associadas ao vulcanismo Serra Geral são caracterizadas por diabásios de afinidade toleítica (MACHADO *et al.*, 2015). Na área de estudo, dois trabalhos anteriores caracterizaram a rocha do corpo intrusivo causativo da anomalia magnética como sendo um Olivina Gabro (MACEDO, 2018) e um Olivina Dolerito (SAMPAIO, 2019) (figura 8).

Figura 7 – Amostra de mão coletada na área de estudo e pertencente ao corpo intrusivo causativo da anomalia magnética.



Fonte: autor (2023).

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta parte do trabalho tem como finalidade embasar o conhecimento científico e o emprego de métodos e técnicas de geofísica na investigação geológica, mais especificamente aplicado ao reconhecimento e identificação de estruturas geológicas. A fundamentação técnica e científica para a realização desta pesquisa deu-se através da consulta de artigos científicos acessíveis em periódicos especializados, TCCs e teses disponíveis em repositórios de universidades.

A geofísica é uma ciência que utiliza as propriedades físicas da Terra aplicadas a diversos tipos de estudos, desde investigações próximas à superfície da crosta até regiões mais profundas. Os métodos geofísicos podem ser divididos em dois tipos: os potenciais, que utilizam os campos naturais da Terra (magnetometria e gravimetria) e os que são realizados a partir da aplicação de energia artificial na superfície como, por exemplo, a susceptibilidade magnética (KEAREY; BROOKS; HILLS, 2009).

Neste trabalho deu-se ênfase na magnetometria (campo natural da Terra), método utilizado para a aquisição de dados geofísicos deste estudo. Foram utilizados e tratados dados pré-existent de aerogeofísica (CPRM, 2010) e coletados dados em campo com a utilização de magnetômetros. Também foram coletados dados de susceptibilidade magnética do corpo intrusivo alvo deste estudo e de suas rochas encaixantes.

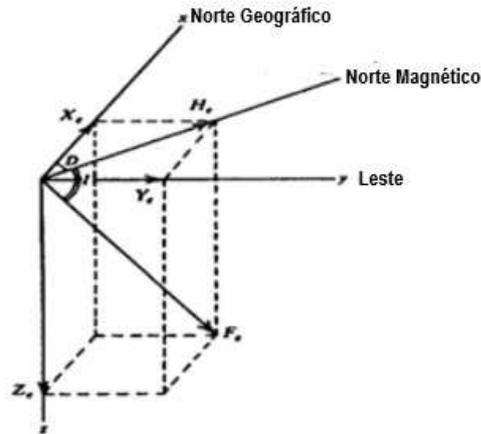
5.1 Fundamentação Teórica

5.1.1 Magnetometria

A magnetometria é um método geofísico potencial, que investiga a subsuperfície baseado nas variações locais do campo magnético terrestre e nas propriedades magnéticas das rochas. Os elementos que compõem o campo magnético terrestre são a sua intensidade, declinação e inclinação, onde: F_e é magnitude do campo magnético; a **inclinação I** representa o ângulo que o campo magnético faz com o plano $X_e Y_e$ (superfície da Terra); o campo magnético é decomposto em três vetores X_e, Y_e e Z_e (norte-sul, leste-oeste e direção radial,

respectivamente); a **intensidade** F_e é a magnitude do campo magnético. A declinação D é o ângulo entre o norte magnético H_e e o norte geográfico (Figura 9) (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990; DENDITH; MUDGE 2014; KEAREY; BROOKS; HILLS, 2009).

Figura 8 – Componentes do campo magnético.



Fonte: extraído e modificado de TELFORD; GELDART; SHERIFF (1990).

As medidas magnéticas são realizadas utilizando um instrumento chamado de magnetômetro e são utilizadas na prospecção baseando-se na concentração de minerais magnéticos presentes nas rochas que geram distorções localizadas nos elementos que compõem o campo magnético terrestre. Em um levantamento magnetométrico são necessárias a realização de correções (5.1.4). A unidade de medida utilizada na magnetometria é o nanoTesla (nT ou 10^{-9}T) (TELFORD et al. 1990; KEAREY et al. 2009; LOWRIE et al. 2007).

Alterações locais no campo magnético da Terra (anomalias magnéticas) são provocadas pela presença de minerais magnéticos nas rochas. A magnetita (Fe_3O_4) é o principal mineral com essa característica. Pirrotita, ilmenita e hematita também são alguns dos principais minerais magnéticos presentes nas rochas e estes são os causadores em parte das variações do campo geomagnético de origem crustal. A maior ou menor presença destes minerais vai determinar a amplitude das anomalias magnéticas detectadas. As medidas magnéticas podem ser utilizadas para a detecção de jazidas minerais, além de identificar contatos geológicos entre diferentes tipos de rochas e na localização e caracterização de estruturas geológicas (KEAREY; BROOKS; HILLS, 2009).

As propriedades magnéticas dos materiais são determinadas pelos seguintes fatores: concentração de íons ou átomos magnéticos, interação entre átomos, spins dos elétrons e seu movimento orbital ao redor do átomo e, por fim, a sua estrutura molecular (DENTITH; MUDGE, 2014).

A susceptibilidade magnética (5.1.5) é a capacidade que os materiais têm de orientar seus momentos magnéticos no instante que um campo magnético é aplicado sobre eles. Quanto ao comportamento magnético, os materiais podem ser classificados como: diamagnéticos que tem susceptibilidade menor que zero, paramagnéticos onde a susceptibilidade é maior que zero e ferromagnéticos cuja susceptibilidade é muito positiva. Este comportamento magnético dos materiais vai depender do momento magnético de seus átomos ou íons (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009).

As anomalias magnéticas têm uma peculiaridade: sua origem é relativamente rasa, não ultrapassando 40 km de profundidade. O fenômeno físico conhecido como ponto de Curie é responsável por essa limitação das anomalias não serem mais profundas que 40 km, pois abaixo dos 40 km de profundidade as rochas ultrapassam 550 graus Celsius, temperatura na qual os minerais perdem suas propriedades magnéticas (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990).

5.1.2 Magnetometria Aérea

Em levantamentos aeromagnéticos são realizadas medidas a partir do ar e esse tipo de aquisição de dados é muito empregado na exploração mineral em levantamentos de contexto regional que envolvem grandes áreas. Também é utilizado para mapeamento detalhado e na detecção de alvos. Para áreas onde a exposição é restrita a poucos afloramentos, esta ferramenta se torna indispensável aos programas de exploração (DENDITH; MUDGE, 2014).

Na prática, o sensor é rebocado pela aeronave em um suporte chamado pássaro (*'bird'*). Este equipamento é projetado de modo que não tenha interferência magnética do avião. Outra maneira de transportar o sensor é fixá-lo em um cabo (*'stinger'*) na cauda do avião, mas para isso deve-se instalar bobinas dentro da

aeronave de modo a compensar o campo magnético gerado por ela (KEAREY; BROOKS; HILLS, 2009).

Levantamentos aeromagnéticos são muito atrativos por serem relativamente mais rápidos que levantamentos terrestres e também custam menos do que estes, em torno de 40% de economia por quilômetro linear. Assim é possível cobrir grandes áreas sem ter a necessidade de enviar equipes em terra, além de ter a vantagem de se coletar dados em regiões inacessíveis por terra (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990; KEAREY; BROOKS; HILLS, 2009).

5.1.3 Magnetometria Terrestre

Geralmente os levantamentos de magnetometria terrestre são realizados em áreas relativamente menores que em levantamentos aéreos e em alvos previamente selecionados. Um cuidado que se deve ter é que esse tipo de levantamento deve ser realizado sem materiais metálicos na proximidade de onde estão sendo feitas as leituras. Elementos como linhas de trem, automóveis, cercas, casas, entre outros, devem ser evitados afim de que não haja interferência (ruídos) nas leituras. Da mesma forma, o operador do equipamento deve evitar carregar consigo objetos metálicos (KEAREY; BROOKS; HILLS, 2009).

5.1.4 Correções necessárias dos dados obtidos em levantamentos magnetométricos

Dos valores medidos nos levantamentos magnetométricos faz-se necessária a realização de dois tipos de correções.

A primeira correção é a eliminação da parcela relativa ao campo geomagnético, que consiste em eliminar, ou remover, o campo geomagnético dos dados. Este valor a ser removido é fornecido pelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) e a correção da variação diurna. O IGRF permite que, através de modelos matemáticos já definidos, seja possível obter-se a direção e intensidade do campo magnético em qualquer ponto da superfície terrestre. Os

valores gerados a partir do modelo IGRF podem ser consultados na página da web <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml>.

Também se faz necessária a remoção da variação diurna do campo magnético terrestre, que são variações que representam alterações magnéticas com período de 24 horas. Esta varia conforme a latitude e a estação do ano. Esta variação é controlada pela ação do vento solar e correntes na ionosfera. Para realizar a correção da variação diurna no campo magnético terrestre utilizam-se os dados de dois magnetômetros, sendo um base (fixo), que registra as medidas da variação diurna com o registro de horário das medidas, e outro móvel (*rover*), que é utilizado no levantamento geofísico na área de estudos. A correção é feita com o arranjo das leituras dos dois magnetômetros para o momento da medida (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990; DENDITH; MUDGE 2014; KEAREY; BROOKS; HILLS, 2009).

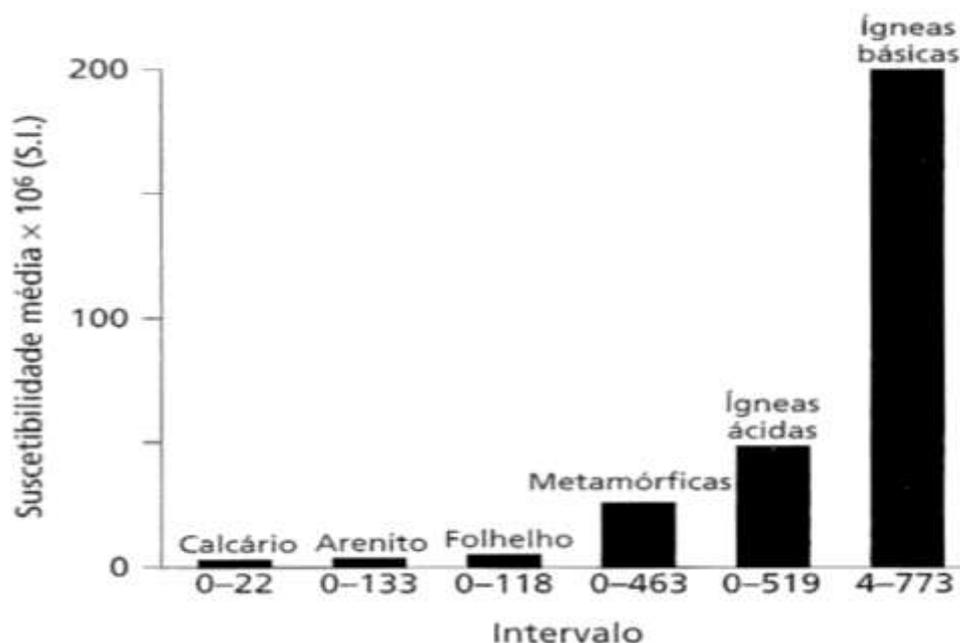
5.1.5 Susceptibilidade Magnética

A susceptibilidade magnética (k) é uma propriedade física onde, através da aplicação de um campo magnético (H) externo, com intensidade conhecida, as rochas tornam-se temporariamente magnéticas. Assim, é possível aferir se houve acréscimo ou decréscimo do valor de susceptibilidade. Sendo I a intensidade de magnetização, a susceptibilidade magnética dá-se pela seguinte equação:

$$k = \frac{I}{H}$$

A concentração e o tipo de minerais magnéticos existentes na rocha influenciarão o valor de susceptibilidade magnética medido. A susceptibilidade magnética dos materiais pode ser medida com a utilização de um equipamento chamado de susceptímetro, onde a intensidade do campo magnético aplicado é conhecida, verificando se houve acréscimo ou decréscimo. Na figura 10 são demonstrados alguns valores médios e intervalo de susceptibilidade de alguns tipos de rochas (KEAREY; BROOKS e HILL, 2009).

Figura 9 – Histograma mostrando os valores médios e intervalos de susceptibilidade magnética de alguns tipos de rochas.



Fonte: extraído de Kearey; Brooks e Hill (2009).

A susceptibilidade magnética pode ser medida no campo diretamente nos afloramentos e também em laboratório. Alguns cuidados são necessários ao medir a susceptibilidade magnética: as amostras devem ser representativas e o grau de alteração das mesmas deve ser observado (MUSSET; KHAN, 2000; DENTITH; MUDGE, 2014).

5.2 Trabalhos Anteriores Aplicados

5.2.1 Trabalhos Anteriores Aplicados Sobre o Tema da Pesquisa

Lineamentos com direção preferencial NW-SE ocorrem no estado do Rio Grande do Sul e já foram tema de algumas pesquisas ao longo dos anos. Estes trabalhos buscaram discutir sobre as suas origens e significado para a atual configuração e participação na evolução geológica do estado.

Picada (1971) caracterizou os sistemas de falhas do ESrg através da geração de um mapa (1:250000), elaborado a partir de fotografias aéreas e mapeamento. Com isso conseguiu destacar apenas as grandes feições estruturais do terreno e assim classificou as direções de falhamentos em quatro sistemas principais: Sistema

de Falhas Dorsal do Canguçu (N40°E); Sistema de Falhas Passo do Marinheiro (N-S); Sistema de Falhas Açotéia Piquiri (N30°E) e Sistema de Falhas NW (N70°W). As falhas NW tem tamanho entre 5 a 10 km de extensão, representam fraturas tensionais onde o movimento relativo é predominantemente vertical ou sub-vertical e estão preenchidos por sílica e ocasionalmente por diabásio.

Ribeiro (1980), por meio de pesquisas estruturais, definiu que os lineamentos com direção preferencial NW no ESrg são extensos, profundos e atingem o manto superior e que os mesmos são mais antigos que os granitos pré-cambrianos. Ele ainda define os lineamentos NW como sendo falhas seladas pela intrusão de magma granítico que posteriormente foram reativadas até o manto, o que ocasionou a ascensão de um magma básico que estão registrados no ESrg próximo ao Granito Caçapava do Sul.

Phillip *et al.* (2013), através da observação de perfis de levantamentos magnetotélúricos, destacam a presença de importantes falhas de direção NW-SE e ressaltam a presença de duas grandes estruturas regionais: o Arco de Rio Grande (ARG) ao sul e a Sinclinal de Torres ao norte. Aqueles autores definem que o ARG é um *horst* de proporção regional, alinhado com direção N50°W, que se estende pela região central do estado do Rio Grande do Sul. O ARG foi responsável pelo soerguimento do embasamento e o aumento da espessura das camadas de rochas da Bacia do Paraná. O arco de Rio Grande está delimitado pelo Sistema de Falhas de Jaguari Mata (norte) e pelo Sistema de Falhas Alegrete e Ibaré (sul).

Travassos (2014), através da interpretação de um levantamento aeromagnético, definiu cinco domínios magnéticos limitados por lineamentos magnéticos regionais: Domínio Taquarembó, Domínio Tijucas, Domínio São Gabriel, Domínio Pelotas e Domínio Paraná. Neste estudo foi possível observar lineamentos magnéticos maiores com direção NW. Com a análise destas estruturas pode-se sugerir que estas estão ligadas à formação do Arco de Rio Grande por apresentarem processos de formação similar.

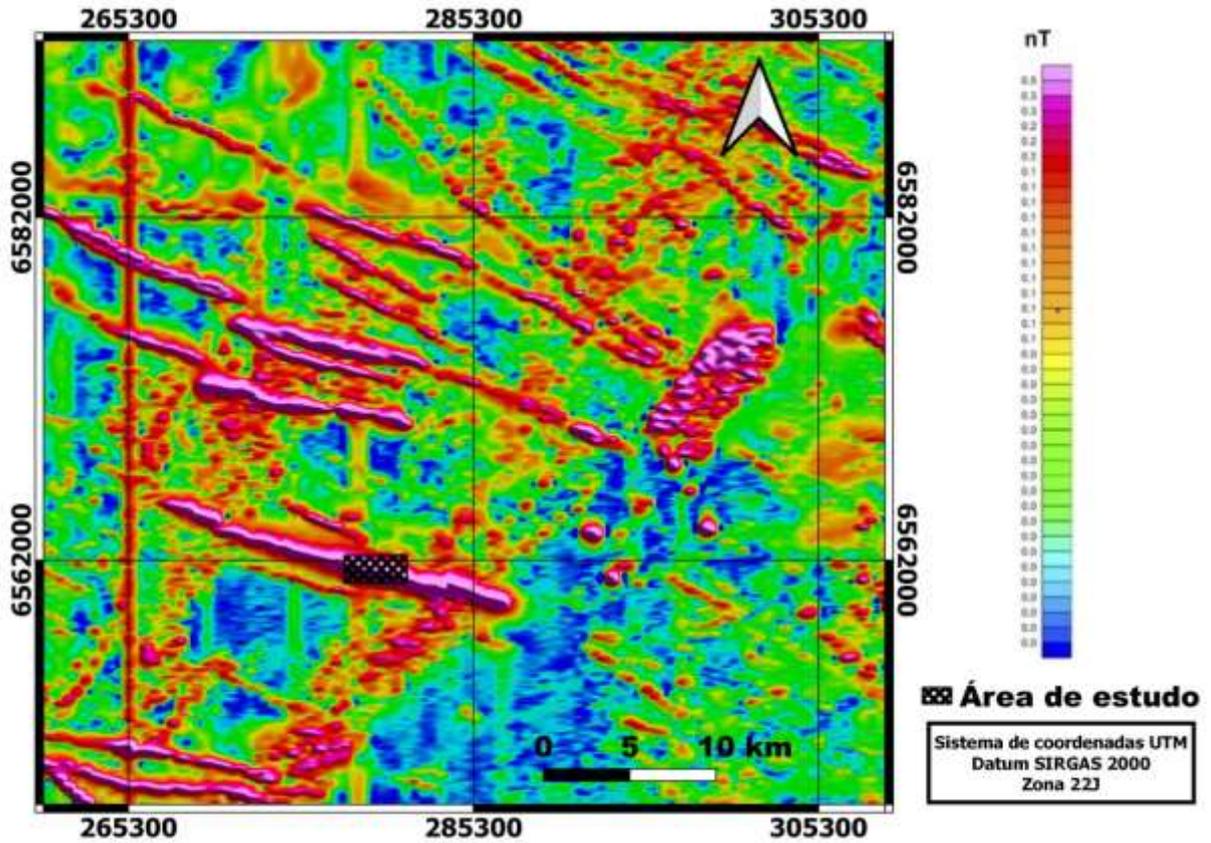
Ussami *et al.* (1991) realizaram um estudo para detectar diques mesozoicos não aflorantes no Arco de Ponta Grossa, na região de Maringá, no estado do Paraná, combinando magnetometria aérea e terrestre. Também foram usadas medidas de susceptibilidade magnética das rochas para estabelecer um critério quantitativo de detectabilidade magnética dos diques. Com o levantamento de um

perfil em uma área onde há diques aflorantes e usando geofísica terrestre, foi aplicada a técnica de continuação para cima, com a finalidade de simular um levantamento aeromagnético com altura de até 450 metros. Foi concluído que a maioria dos diques são detectados apenas com magnetometria terrestre, devido à baixa magnetização das rochas e pequena largura das estruturas.

Seixas *et al.*(2014) realizaram a caracterização do *Sill* de Limeira, no estado de São Paulo, utilizando o método magnetométrico como ferramenta de investigação da estrutura em sub-superfície, com a finalidade de delimitar e entender o comportamento do corpo intrusivo e estabelecer sua profundidade, forma e extensão lateral. Para isso, foram realizados levantamentos magnetométricos terrestres na área de estudo e os dados obtidos foram processados utilizando a rotina MAGMAP da plataforma *Oasis Montaj* e aplicados os filtros passa banda, redução ao pólo magnético, sinal analítico e separação regional/residual. Com isso, foi possível delimitar os corpos intrusivos (soleiras), identificar a existência de várias soleiras de diabásio independentes e que estas estruturas não exibem continuidade lateral, caracterizando assim soleiras distintas. O autor também chegou à conclusão de que as soleiras de diabásio estão em uma profundidade maior do que 100m.

Lineamentos magnéticos de direção NW no ESrg foram estudados por Gregory *et al.* (2019) (figura 10) em termos de seu significado geológico de campo, sendo relacionados a um enxame de diques denominado “Enxame de diques do Arco de Rio Grande” por Gregory et al. (2019), relativos ao magmatismo Serra Geral da Bacia do Paraná. O presente trabalho situa-se num desses corpos alinhados na direção NW, região na qual se observa uma anomalia magnética associada, que pode ser verificada em dados aerogeofísicos.

Figura 10 – Mapa magnético regional com lineamentos magnéticos NW.



Fonte: extraído e modificado de Gregory & Guadagnin (2017).

5.2.2 Trabalhos Anteriores Realizados na Área de Estudo

Macedo (2018) realizou seu TCC na mesma área de estudo deste trabalho, na região do Complexo Metamórfico Porongos. Foram realizados trabalhos de campo e coleta de amostras para a caracterização petrográfica das rochas que estão sobre o mesmo lineamento magnético de interesse. Nesta ocasião foi constatado em campo que se trata de uma rocha ígnea plutônica gabróica e que a mesma está estruturada na forma de um dique. Já por meio de análise petrográfica em lâmina delgada foi identificado que a rocha é um olivina-gabro. Segundo aquela autora, existe a possibilidade de que o lineamento esteja relacionado com os processos formadores do ARG, já que possui a mesma direção NW-SE e que a composição das rochas do dique são semelhante aos equivalentes vulcânicos dos basaltos da Formação Serra Geral.

Sampaio (2019) em seu TCC caracterizou geoquimicamente as rochas hipabissais básicas relacionadas a lineamentos magnéticos de direção NW no ESrg. A partir de dados obtidos em campo e análises petrográficas, sugeriu que as rochas intrusivas básicas que estão associadas às anomalias magnéticas de direção NW possuem semelhanças com as rochas da Formação Serra Geral. Também chegou à conclusão de que as anomalias magnéticas dos diques estão relacionadas à composição mineralógica das rochas analisadas, sendo elas compostas por minerais opacos e ferromagnesianos e, por fim, classificou petrograficamente as rochas como olivina-doleritos.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Magnetometria

Neste trabalho foram utilizados dados de magnetometria aérea e terrestre, além de dados de susceptibilidade magnética, com o intuito de integrar estes dados para se compreender a estrutura geológica alvo deste estudo.

Nos itens a seguir estão descritos como os dados foram obtidos e processados.

6.1.1. Magnetometria Aérea– Levantamento Aerogeofísico – Projeto Aerogeofísico do Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM 2010)

Neste trabalho foram utilizados os dados do Projeto Aerogeofísico do Escudo do Rio Grande do Sul do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2010). Este projeto foi executado pela empresa LASA Prospecções S.A. e faz parte do Programa Geologia do Brasil. Em tal ocasião, foram realizados em conjunto os levantamentos aeromagnético e aerogamaespectrométrico do Escudo Sul-rio-grandense (figura 11).

Figura 11 – Localização da área do Projeto Aerogeofísico do ESrg.



Fonte: extraído de CPRM (2010).

Este aerolevante foi feito com três aviões (figura 12) que realizaram linhas de vôo de orientação N-S, espaçadas a cada 500m, e seccionadas ortogonalmente com linhas de vôo de controle com direção E-W, espaçadas entre si com distâncias de 10 km. Os vôos tiveram altura média de 100m. Para recobrir a área foram feitas 668 horas de vôo e os perfis totalizaram uma distância percorrida de 159.781,21 km.

Figura 12 – Um dos aviões utilizados pela LASA no levantamento aerogeofísico do ESrg.



Fonte: extraído de CPRM (2010).

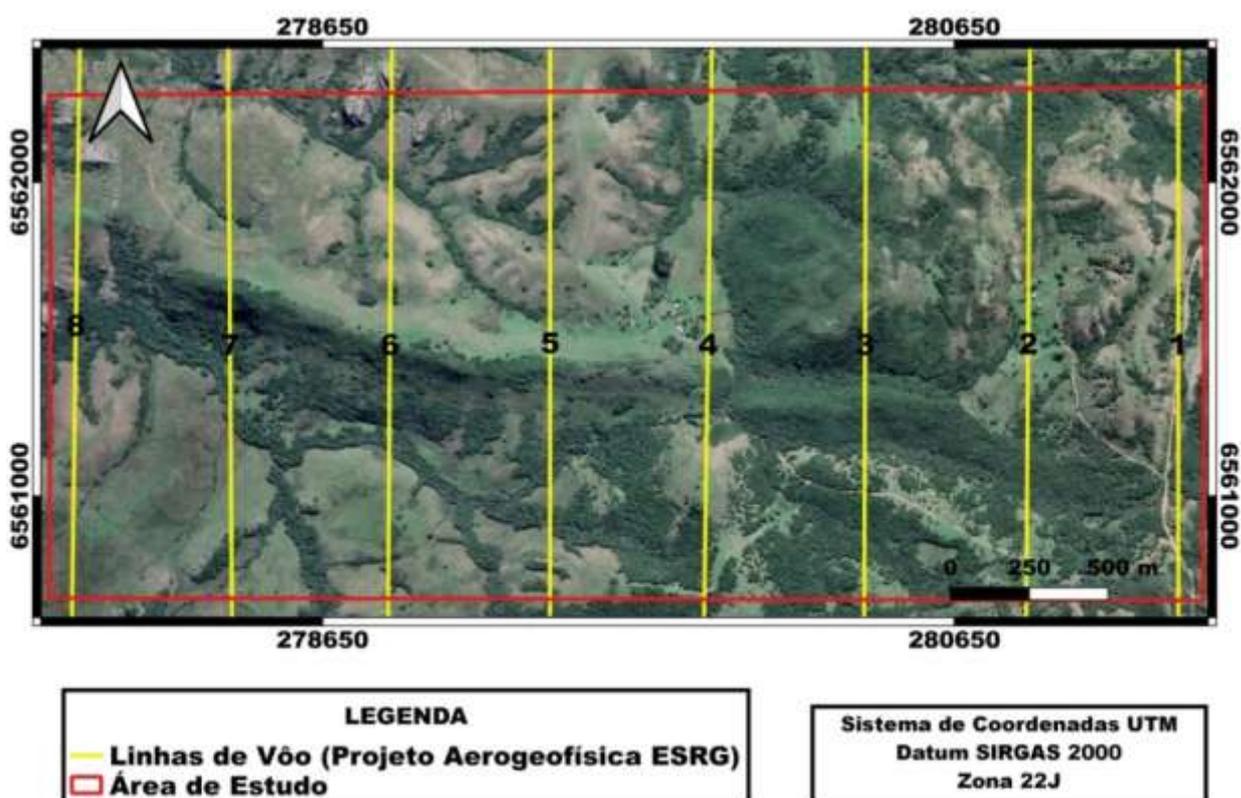
As medições magnetométricas foram feitas a cada 0,1s, com um magnetômetro de bombeamento ótico de vapor de césio (*Scintrex CS-2*), acoplado na cauda do avião (tipo *stinger*), com resolução de 0,001nT e faixa de 20.000 a 95.000nT (CPRM,2010).

O processamento dos dados, realizados pela LASA, foi feito com a utilização do *software* OASIS MONTAJ, onde foram aplicadas as rotinas deste sistema para a

compilação dos dados obtidos. A apresentação dos resultados foram apresentados sob a forma de mapas com escalas variando entre 1:100.000 a 1:500.000, arquivos de bancos de dados e *grids* (CPRM, 2010).

Na área de estudo passam oito linhas de vôo do Levantamento Aerogeofísico do ESrg, todas com sentido N-S (figura 13).

Figura 13 – Linhas de vôo do Levantamento Aerogeofísico na área de estudo.

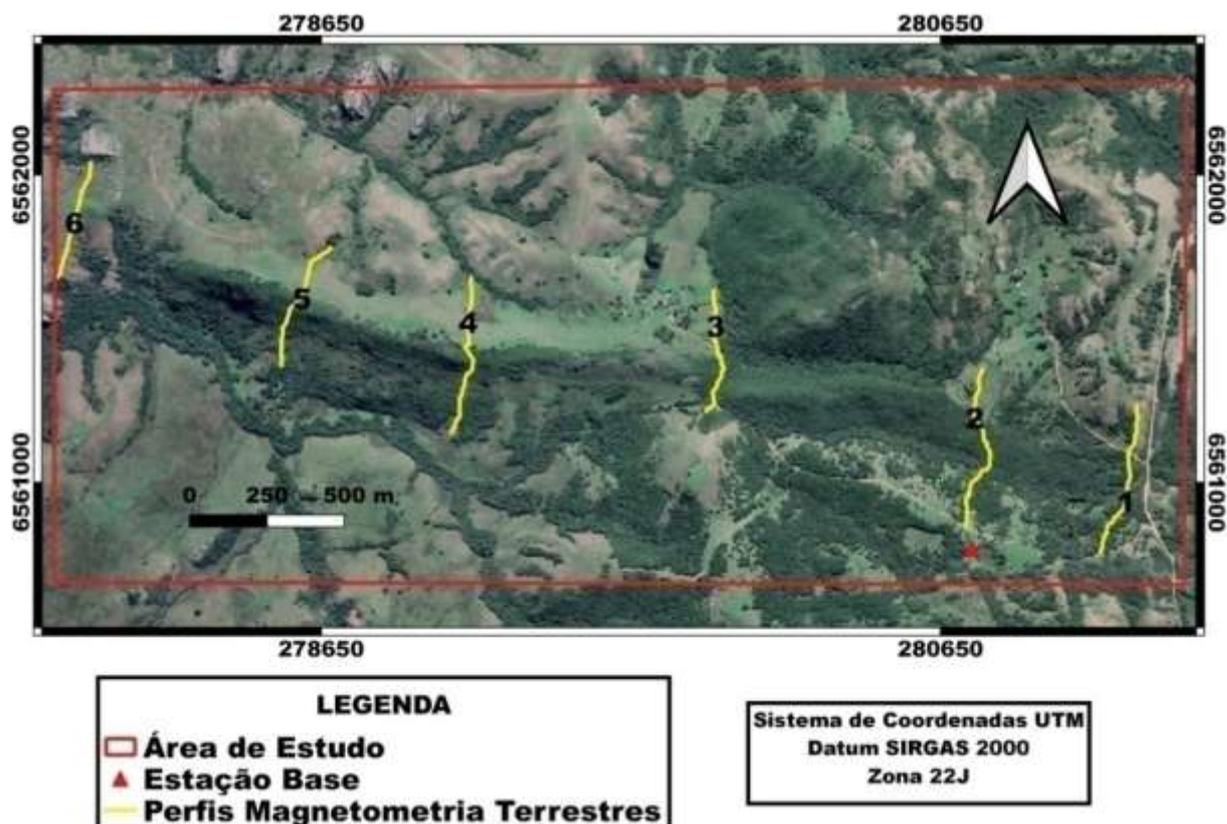


Fonte: CPRM (2010); Complemento QuickMapServices do software QGIS; autor (2023).

6.1.2 Magnetometria Terrestre

A coleta de dados geofísicos terrestre em campo na área de estudo foi realizada em 2 dias no mês de junho de 2022. Ao total foram feitos seis perfis transversais ao comprimento da anomalia magnética (figura 14).

Figura 14 – Perfis do levantamento geofísico realizados em campo.



Fonte: complemento QuickMapServices do software QGIS; autor (2023).

Para a realização do levantamento terrestre foram utilizados dois magnetômetros de precessão de prótons (figura 15) pertencentes à UNIPAMPA, sendo um móvel e outro fixo (estação base), ambos do modelo GSM-19 da marca GEM System. Foram realizadas leituras (estações) a cada 5 metros em todos os perfis (Tabela 1).

Figura 15 – Magnetômetros utilizados no levantamento geofísico terrestre. A) magnetômetro fixo (estação base). B) magnetômetro móvel operado pelo autor.



Fonte: autor (2023).

Tabela 1: Algumas especificações dos perfis levantados.

PERFIL	COMPRIMENTO	Nº DE ESTAÇÕES
1	540	85
2	557	94
3	432	73
4	545	100
5	450	79
6	398	65

Fonte: autor (2023).

Estes perfis foram planejados com o intuito de levantar dados magnetométricos sobre diferentes litologias, onde o corpo intrusivo fonte anomalia magnética alvo deste estudo intrude as rochas encaixantes. As litologias que sofreram a intrusão deste corpo compreendem rochas metamórficas dos Complexos Encantadas e Porongos, e rochas sedimentares das Formações Arroio América e Pedra Pintada.

O georreferenciamento da aquisição de dados deu-se com a utilização de um GPS de mão da marca Garmim modelo Etrex 20 de propriedade do autor.

6.2 Processamento dos Dados de Magnetometria (Aérea e Terrestre)

6.2.1 Correções da Variação Diurna e Remoção do Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF)

As correções da variação diurna foram realizadas utilizando os dados coletados dos magnetômetros móvel e base, usados no levantamento terrestre. Já no levantamento aéreo os dados usados neste trabalho já estavam com a correção da variação magnética diurna corrigida. A correção se dá por:

$$MAG_{corr} = MÓVEL - BASE$$

A remoção do IGRF foi realizada na plataforma do *software* Oasis Montaj utilizando o *menu* IGRF que calcula a seguinte equação:

$$MAG_{IGRF} = MAG_{edit} - IGRF$$

Onde: MAG_{IGRF} é o valor da correção do IGRF, MAG_{edit} é o valor da filtragem da variação magnética diurna e IGRF é o valor previamente conhecido para a área de estudo.

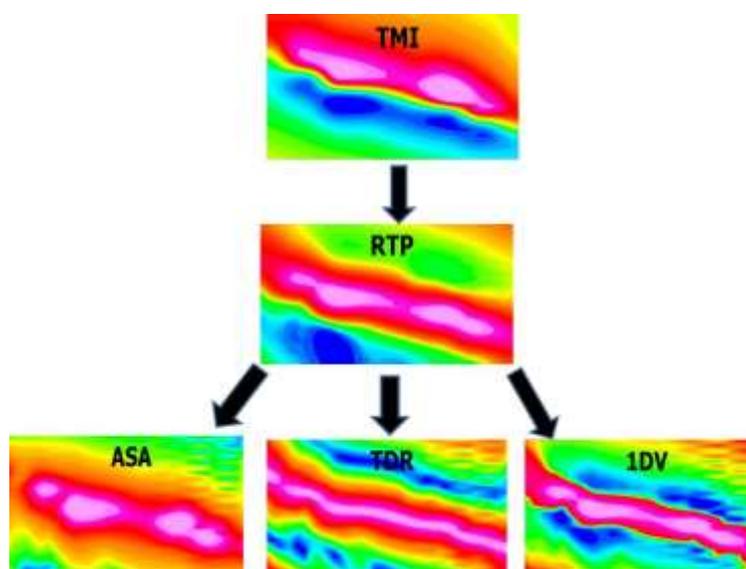
6.2.2 Geração de Mapas de Valores Anômalos

Para se compreender melhor a estrutura geológica estudada neste trabalho através dos dados geofísicos disponíveis de magnetometria aérea (CPRM 2010), foram utilizados filtros no processamento destes dados. A finalidade deste processamento foi gerar mapas de valores anômalos que melhoram a qualidade e representação dos dados e proporcionam uma melhor visualização da fonte causativa (estrutura), proporcionando uma melhor visualização e interpretação da

fonte causativa tornando possível traçar seus limites em relação às rochas encaixantes, tipo de estrutura, forma e geometria.

Para o processamento dos dados utilizou-se os seguintes filtros: Campo Magnético Anômalo Total (TMI), Redução ao Pólo (RTP), Amplitude do Sinal Analítico (ASA), Primeira Derivada (1DV) e Inclinação do Sinal Analítico (*Tilt Derivative*, TDR), a geração dos mapas de anomalias aerogeofísicas deu-se seguindo a rotina conforme ilustrada na figura 16. O *software* utilizado para gerar os mapas e realçar as anomalias neste trabalho foi o OASIS MONTAJ da GEOSOFT.

Figura 16 – Fluxograma das atividades utilizadas no processamento, geração e realce das anomalias aeromagnéticas.



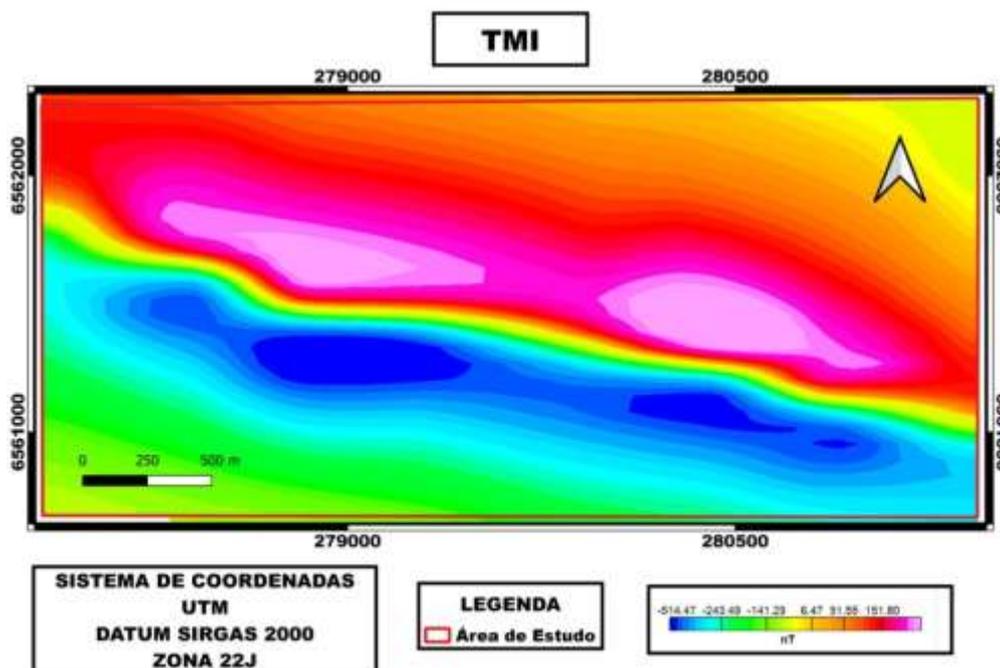
Fonte: extraído e modificado de CPRM (2010).

6.2.2.1 Campo Magnético Anômalo Total (TMI)

O Mapa do Campo Magnético Anômalo Total (figura 17) é o primeiro a ser gerado. É o processo inicial para se obter os demais mapas. Ele é feito após a remoção do IGRF e da variação diurna do campo magnético.

Para o propósito de interpretação geológica da fonte causativa da anomalia magnética, este mapa não tem muita utilidade, pois seu caráter dipolar limita possíveis interpretações.

Figura 27 – Mapa TMI da Área de Estudo.



Fonte: autor (2023).

6.2.2.2 Redução ao Pólo (RTP)

O Mapa de Redução ao Pólo é gerado a partir do Mapa TMI, com o método de redução ao pólo (Baranov, 1957). Este mapa pode auxiliar na interpretação das estruturas geológicas, pois com a aplicação deste filtro a anomalia magnética, que tinha caráter dipolar, passa a ter caráter monopolar, fazendo com que os valores anômalos máximos incidam exatamente sobre a fonte causativa da anomalia magnética.

Para a redução das anomalias ao pólo magnético aplica-se o filtro RTP, onde a equação utilizada pelo *software* é a seguinte:

$$RTP = \frac{[\sin(I) - \cos(I) \cos(D - \theta)]^2}{[\sin^2(Ia) + \cos^2(Ia) \cos^2(D - \theta)]. [\sin^2(I) + \cos^2(I) \cos^2(D - \theta)]}$$

Onde: **I** é a Inclinação geomagnética; **Ia** inclinação para a correção de amplitude; **D** é a declinação do campo geomagnético local na época da aquisição; e **θ** é a latitude polar.

6.2.2.3 Amplitude do Sinal Analítico (ASA)

O Mapa ASA é gerado a partir da aplicação do filtro de Amplitude do Sinal Analítico (NABIGHIAN, 1972; ROEST; VERHOEF; PILKINGTON, 1992), onde faz com que as anomalias incidam diretamente sobre a fonte causativa. Este é um filtro de delimitação das bordas do corpo, servindo muito bem para demarcar contatos geológicos. Os resultados são satisfatórios onde a fonte é rasa e a latitude magnética é baixa (Li, 2006).

A Amplitude do Sinal Analítico é feita a partir da equação abaixo, onde **A** são os valores do campo magnético anômalo:

$$ASA = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial z}\right)^2}$$

6.2.2.4 Primeira Derivada Vertical (1DV)

A aplicação do filtro 1DV (DENTITH; MUDGE, 2014) serve para realçar as anomalias magnéticas de alta frequência referentes às fontes causativas rasas. Neste caso, o campo magnético anômalo é transformado linearmente por meio de derivada. Os mapas de 1DV podem fornecer dados sobre lineamentos, contatos e descontinuidades.

6.2.2.5 Inclinação do Sinal Analítico (ISA ou TDR)

Também conhecido como *Tilt Derivative*, este filtro foi primeiramente utilizado por Miller & Singh (1994) e, com sua aplicação, faz com que a anomalia se posicione sobre o centro da fonte causativa, com valores nulos próximos à borda do corpo e valores máximos e negativos fora dos limites da fonte causativa. É dado pela equação abaixo, que é a razão entre as derivadas vertical (VDR) e horizontal (THDR), fazendo com que a primeira em relação à segunda seja normalizada:

$$TDR = \tan^{-1}\left(\frac{VDR}{THDR}\right)$$

6.3 Análise Semiquantitativa das Fontes Causativas- Deconvolução de Euler

A aplicação da técnica de Deconvolução de Euler (REIDE *tal.*,1990; Thompson, 1982) é utilizada como uma técnica de realce para interpretação qualitativa, da qual utiliza-se como principal função o cálculo da profundidade aproximada das anomalias magnéticas utilizando o software *Oasis Montaj*.

Os resultados obtidos nesta análise foram trabalhados a partir de dados de magnetometria aérea (TMI_RTP) e a profundidade da anomalia fornecida pelo software se dá a partir da linha de vôo. Fez-se uma correção na qual foi subtraída a altura de vôo dos valores mínimos e máximos. O software forneceu profundidades da anomalia magnética com valores mínimo de 83 m e máxima de 733 m, indicando uma altura de vôo de 83 m, com a correção as profundidades da anomalia magnética ficaram variando de 0 m (superfície) até 650 m de profundidade.

Para esta análise foram adotados os seguintes parâmetros de cálculo:

Índice Estrutural (*structural index*) = 0 (para fontes causativas associadas a limites litológicos e estruturas);

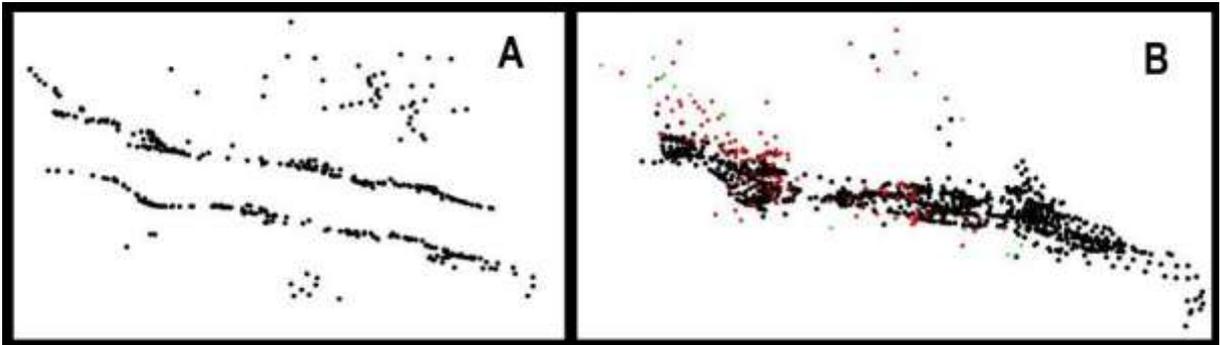
Índice Estrutural (*structural index*) = 1 (para fontes causativas associadas a diques e corpos intrusivos)

Tamanho da janela (*window size*) = 10

Erro máximo de profundidade (*depth tolerance*) = 15%

A partir destes parâmetros foram gerados dois mapas, um com índice estrutural “zero” e outro para índice estrutural “um” conforme apresentado na figura 18.

Figura 18 – (A) índice estrutural 0 demonstrando os limites litológicos da fonte causativa da anomalia magnética; (B) índice estrutural 1 demonstrando o comportamento do corpo em sub-superfície.



Fonte: Autor (2023).

6.4 Susceptibilidade Magnética

Neste trabalho utilizou-se este recurso como mais uma ferramenta para se obter informações para demarcar os locais onde há ocorrência geológica em superfície do corpo causativo da anomalia magnética, visto que as características magnéticas da rocha fonte da anomalia magnética se distinguem das rochas encaixantes, com valores de susceptibilidade magnética superiores às demais litologias. Assim, foi possível demarcar possíveis contatos e embasar interpretações do levantamento magnetométrico terrestre.

Para a coleta de dados foram realizadas amostragens em campo diretamente em afloramentos, solo e amostras de mão. Também foram coletadas amostras de mão para a realização de aferimento em laboratório.

Para a obtenção dos valores de susceptibilidade magnética foi utilizado um susceptibilímetro Kappameter de modelo KT-10, pertencente à UNIPAMPA (figura 19).

Figura 19 – Susceptibilímetro Kappameter modelo KT-10 utilizado para a obtenção dos valores de susceptibilidade magnética em um afloramento de rocha metamórfica na área de estudo.



Fonte: Maximilian Fries.

Em campo foram realizadas 6 (seis) medidas em cada ponto de amostragem (afloramentos, amostra de mão e solo) e em laboratório 10 (dez) medidas em cada amostra.

A Tabela 2 demonstra o tipo de amostra e o número de amostragem de cada uma.

Tabela 2– Amostragens de susceptibilidade magnética.

Tipo de amostra	Número de pontos de amostragem	Local de coleta de dados
Rocha metamórfica	6	Campo
Rocha metamórfica	1	Laboratório
Diabásio	20	Campo
Diabásio	14	Laboratório
Rocha sedimentar	3	Campo
Solo (ponto de controle)	15	Campo

Fonte: autor (2023).

7. RESULTADOS

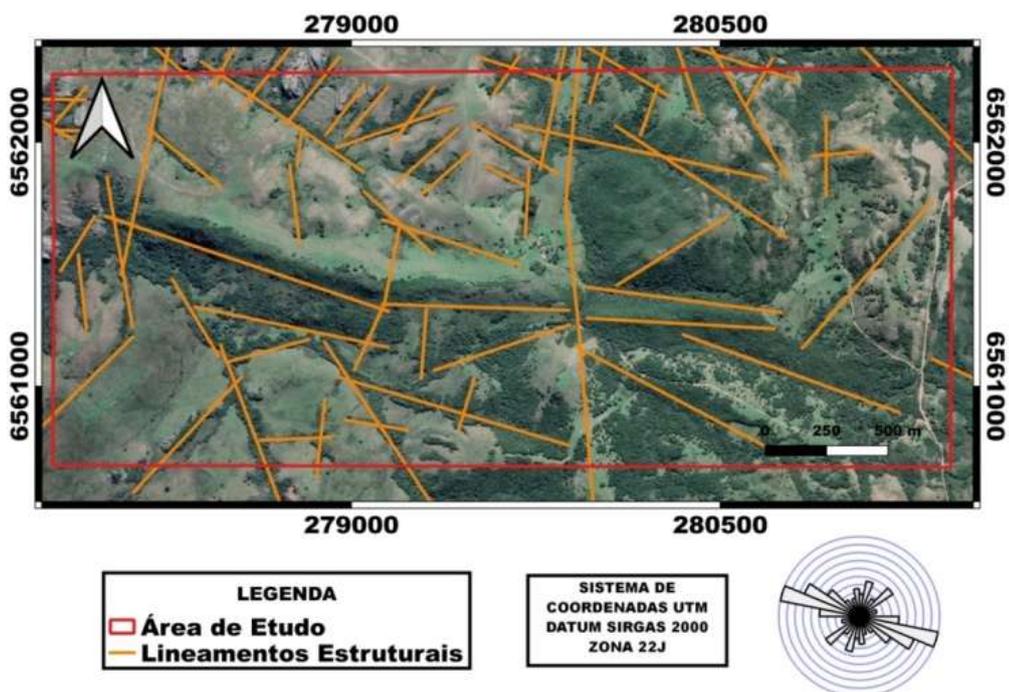
Por ter natureza hipabissal e por não terem sido realizados estudos petrográficos mais detalhados que permitissem uma caracterização petrográfica mais minuciosa, e por não ser o objetivo deste trabalho, a realização de estudos

petrográficos mais apurados, a rocha causativa da anomalia magnética foi classificada através de análise macroscópica em amostras de mão e afloramentos como sendo um Diabásio. Conforme trabalhos anteriores (e.g. MACEDO, 2018; Gregory *et al.*, 2019), a fonte causativa é interpretada como um dique, sendo o foco deste trabalho a confirmação deste tipo de estrutura e a investigação da sua geometria em subsuperfície.

Através da análise macroscópica, foram observadas apenas a textura e a mineralogia das amostras. Foi possível verificar que o diabásio possui uma textura fina (variando aproximadamente de 1 a 3 mm). Entre a população das amostras coletadas em diferentes pontos ao longo do corpo não há variação textural nem mineralógica significativa. A mineralogia compreende minerais como plagioclásio, piroxênio, olivina e também minerais opacos (magnetita).

Com a finalidade de acrescentar informação a respeito da área de estudo, foi feita uma análise estrutural, a partir de imagens de satélite (Alos Palsar e Google Earth) em ambiente SIG, utilizando uma ferramenta que permite ver o relevo de forma sombreada. Foi possível traçar lineamentos decorrentes de feições morfológicas e drenagens (figura 20).

Figura 20 – Ocorrência de lineamentos na área de estudo e análise estrutural (canto direito inferior da figura).



Fonte: QuickMapServices;autor (2023).

Estes lineamentos ocorrem em duas direções principais, NW e NE, também há estruturas menores com outras direções. O corpo fonte da anomalia magnética (NW) é cortado por três falhas. A primeira, com sentido N-S, atravessa transversalmente a área de estudo com direção NE, e outra falha menor que a primeira, corta o corpo sobre uma inflexão mais a NW. Já a segunda falha ocorre mais à W, onde o corpo para de aflorar. Também é possível notar muitos outros lineamentos, de menor expressão, com direção NW e outros com direção NE, que são perceptíveis nas drenagens menores.

7.1 Delimitação em superfície do Corpo Intrusivo (Contatos Litológicos)

Para delimitar os contatos geológicos do corpo em relação às suas encaixantes, foram utilizados dados diretos de campo, obtidos em afloramentos, onde foram coletadas amostras e dados de susceptibilidade magnética. Também foram utilizados dados de magnetometria terrestre e magnetometria aérea com a aplicação dos filtros ASA e 1VD. Os contatos litológicos foram inferidos primeiramente de forma individual a cada uma dessas ferramentas.

Depois de obtidos os resultados individuais, os dados foram integrados em ambiente GIS para se chegar ao resultado final, referente aos contatos do corpo em relação a suas encaixantes.

7.1.1 Magnetometria Aérea

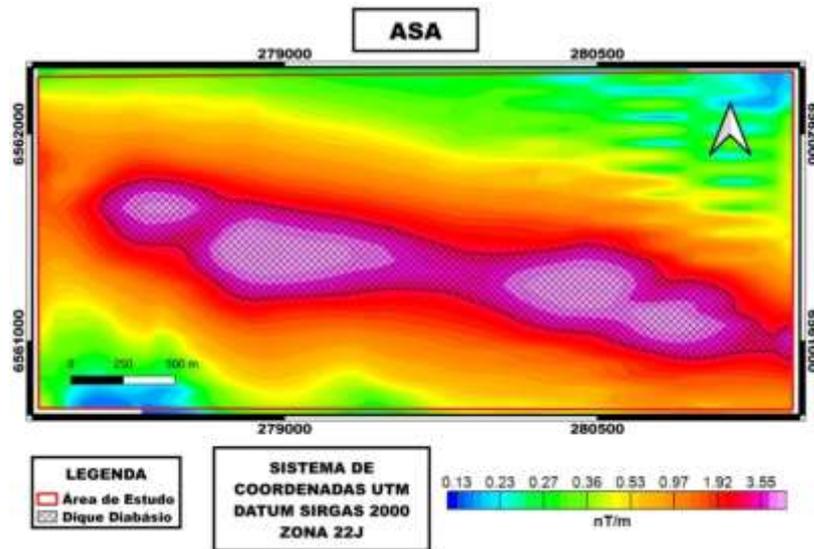
7.1.1.1 Filtros Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e Primeira Derivada Vertical (1VD)

Nos mapas de anomalia magnética dos filtros ASA e 1VD os contatos do diabásio (dique) com suas encaixantes foram traçados a partir de linhas de isovalores anômalos.

No mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) da área de estudo é possível observar a anomalia magnética bem definida sobre o corpo de diabásio, com valores iguais ou maiores de 3.55 nT/m. Valores abaixo disso, até 0,13 nT/m, são referentes

às rochas encaixantes (sedimentares e metamórficas). A partir disso, os contatos foram traçados sobre a linha de isovalores anômalos igual a 3,55 nT/m (figura 21).

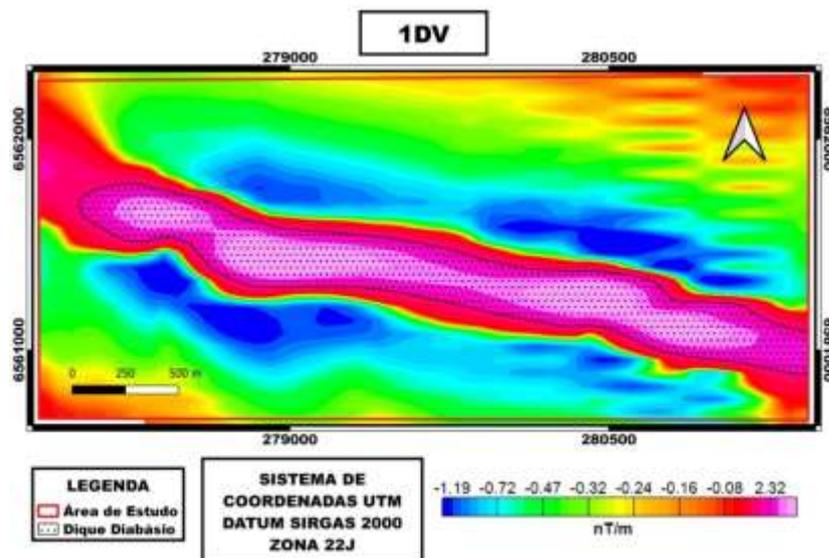
Figura 21 – Mapa de amplitude do sinal analítico da área de estudo, demonstrando valores máximos anômalos referentes ao corpo intrusivo de diabásio.



Fonte: CPRM (2010); autor (2023).

Já no mapa da **Primeira Derivada Vertical (1VD)** os valores anômalos referentes às rochas encaixantes compreendem valores que vão de -1,19 nT/m até 2,32 nT/m. O contato do corpo de diabásio com suas encaixantes foi traçado a partir da linha de isovalores superior a 2,32 nT/m (figura 22).

Figura 22 – Mapa da primeira derivada vertical da área de estudo, demonstrando valores anômalos máximos referentes ao corpo intrusivo de diabásio.



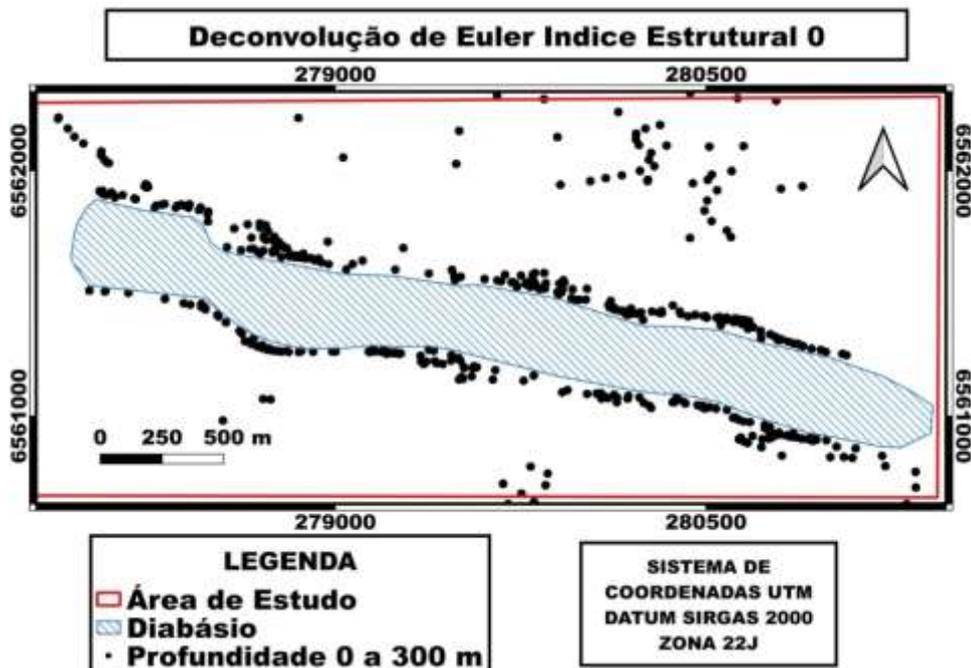
Fonte: CPRM (2010); autor (2023).

7.1.1.2 Análise Semiquantitativa das Fontes Causativas (Deconvolução de Euler) - Índice Estrutural 0

Através da análise Semiquantitativa das fontes causativas (Deconvolução de Euler com índice estrutural igual a zero) foi possível delimitar o contato do corpo fonte da anomalia em relação a suas encaixantes a partir da superfície.

Na figura 23 é possível observar claramente a densidade de pontos pretos que indicam o limite da estrutura em ambos os flancos (norte e sul) da estrutura. Nas bordas sudeste e noroeste, devido à ausência de dados, os contatos foram inferidos. A partir disso também foi estimada a dimensão do corpo (diabásio).

Figura 23 – Mapa das profundidades das fontes anômalas magnéticas (TMI_RTP) obtidas a partir da Deconvolução de Euler 3D para limites litológicos e estruturas (SI = 0).



Fonte: CPRM (2010); autor (2023).

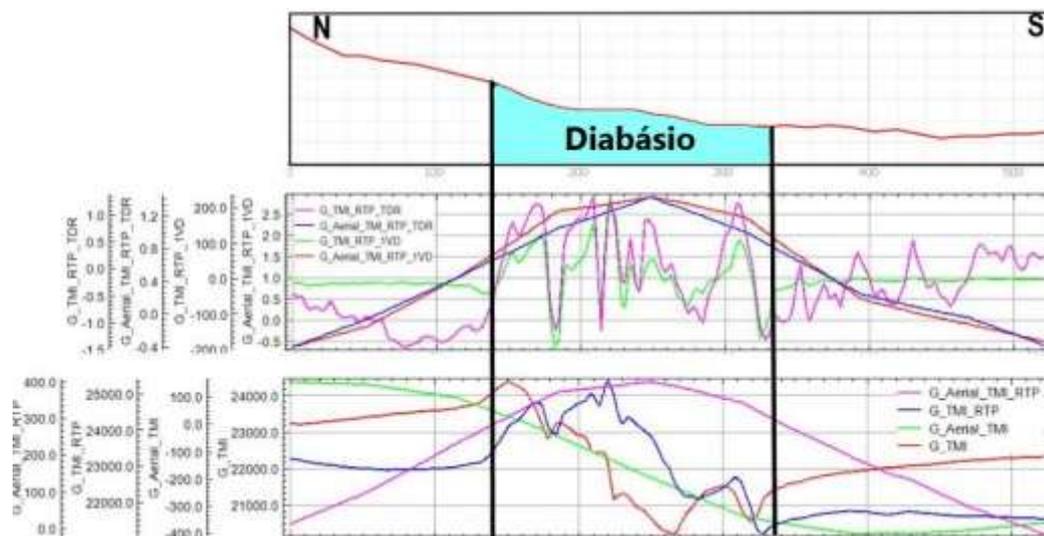
7.1.2 Magnetometria Terrestre

Para a delimitação dos contatos litológicos do corpo causativo da anomalia magnética em relação a suas encaixantes na superfície, foram elaborados perfis de frequência do sinal magnético com os filtros Campo Magnético Anômalo Total (TMI), Redução ao Pólo (RTP), Inclinação do Sinal Analítico (TDR) e Primeira Derivada Vertical (1VD), tanto de dados aéreos como terrestres. Para fins práticos da

delimitação do corpo, foi utilizado apenas a análise do comportamento da frequência dos dados dos perfis TDR e 1VD de magnetometria terrestre. Os demais serviram nesta análise apenas para efeito de comparação.

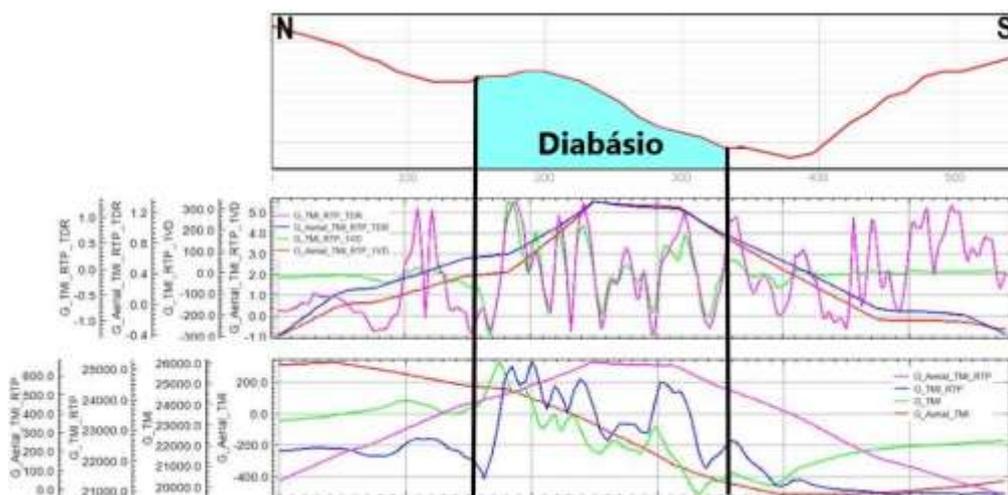
Nos perfis 1 ao 5 (figuras 24, 25, 26, 27 e 28) foi possível estimar os limites litológicos do corpo fonte da anomalia (diabásio). Através da análise do comportamento da frequência do sinal magnético do diabásio TDR e 1VD para dados de magnetometria terrestre nota-se um comportamento linear que é referente às rochas encaixantes e um comportamento com picos positivos e negativos referentes à ocorrência do diabásio.

Figura 24 – Comparação de perfis geofísicos e contatos geológicos (perfil 1).



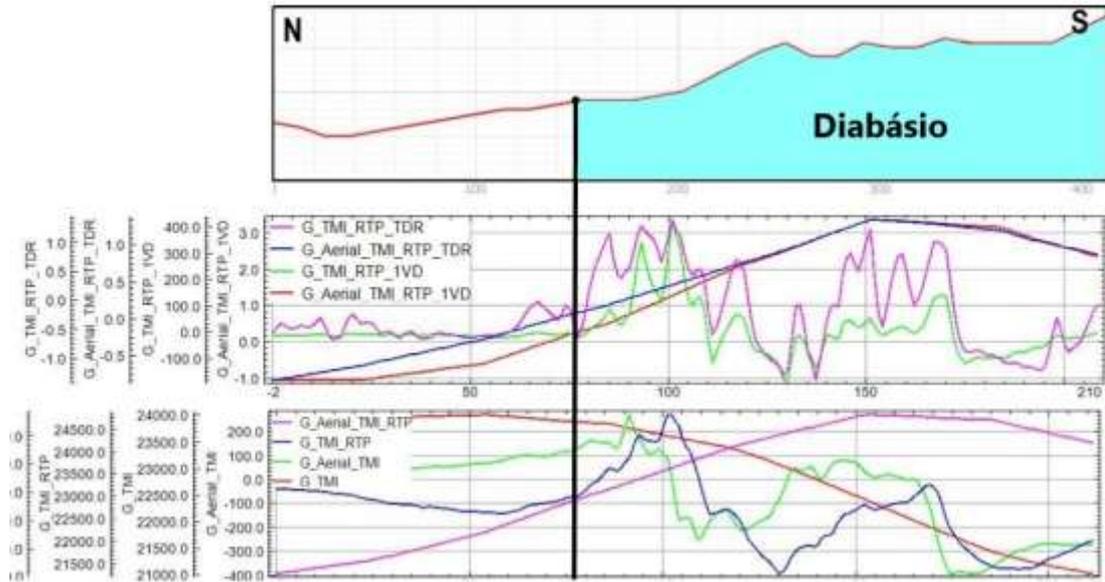
Fonte: autor (2023).

Figura 25 – Comparação de perfis geofísicos e contatos geológicos (perfil 2).



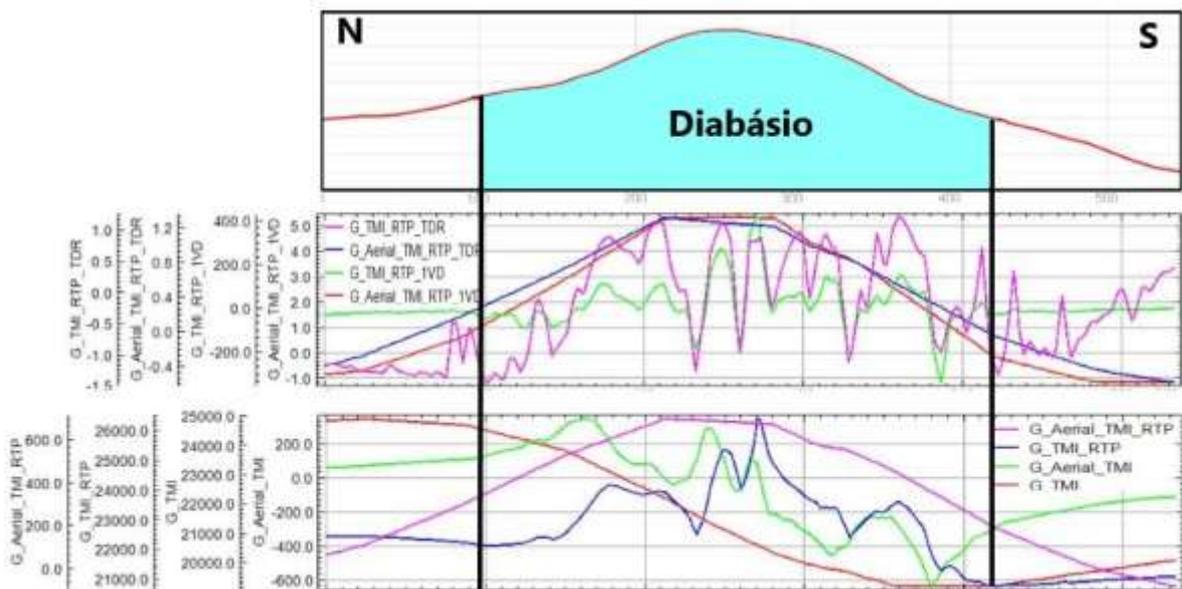
Fonte: autor (2023).

Figura 26 – Comparação de perfis geofísicos e contatos geológicos (perfil 3).



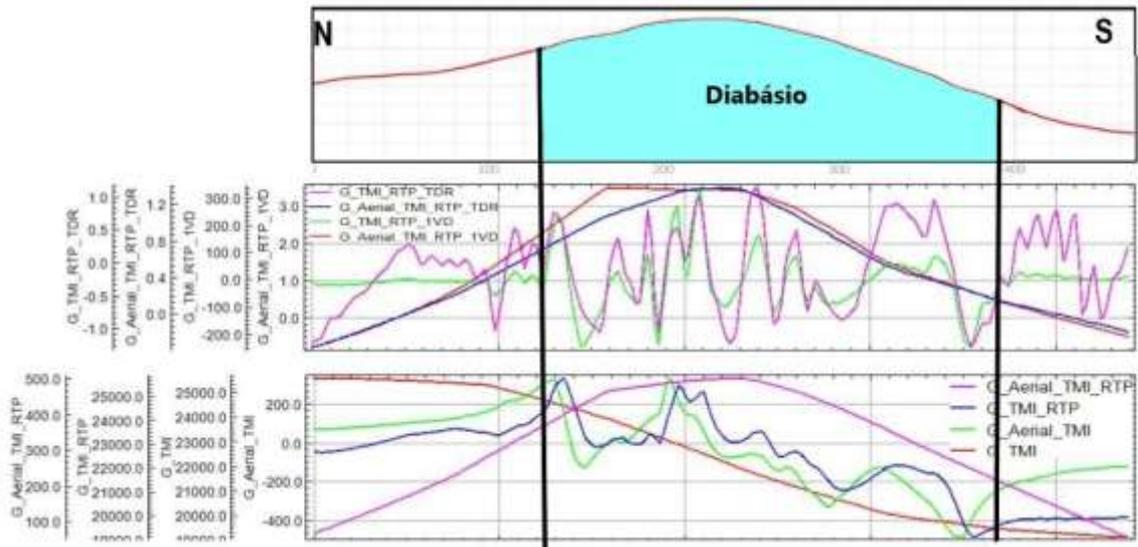
Fonte: autor (2023).

Figura 27 – Comparação de perfis geofísicos e contatos geológicos (perfil 4).



Fonte: autor (2023).

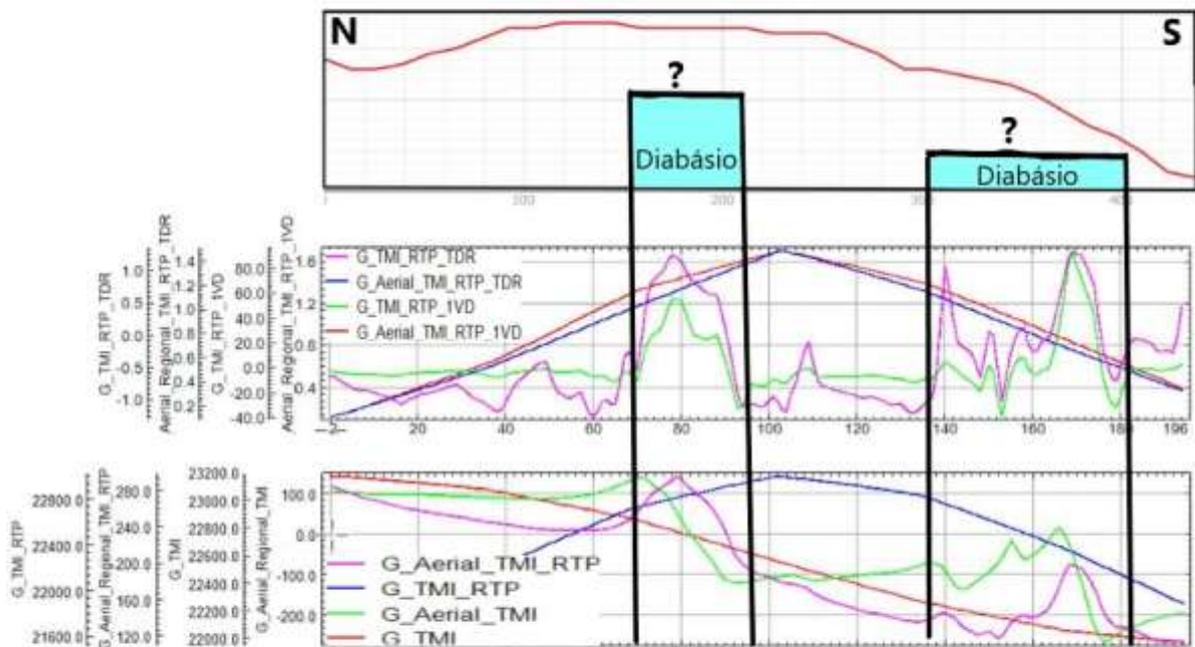
Figura 28 – Comparação de perfis geofísicos e contatos geológicos (perfil 5).



Fonte: Autor (2023).

No perfil 6, que foi feito sobre a formação Pedra Pintada, na extremidade leste da área de estudo (figura 29), não foram encontrados afloramentos durante o levantamento de campo.

Figura 29 – Comparação de perfis geofísicos e contatos geológicos (perfil 6).



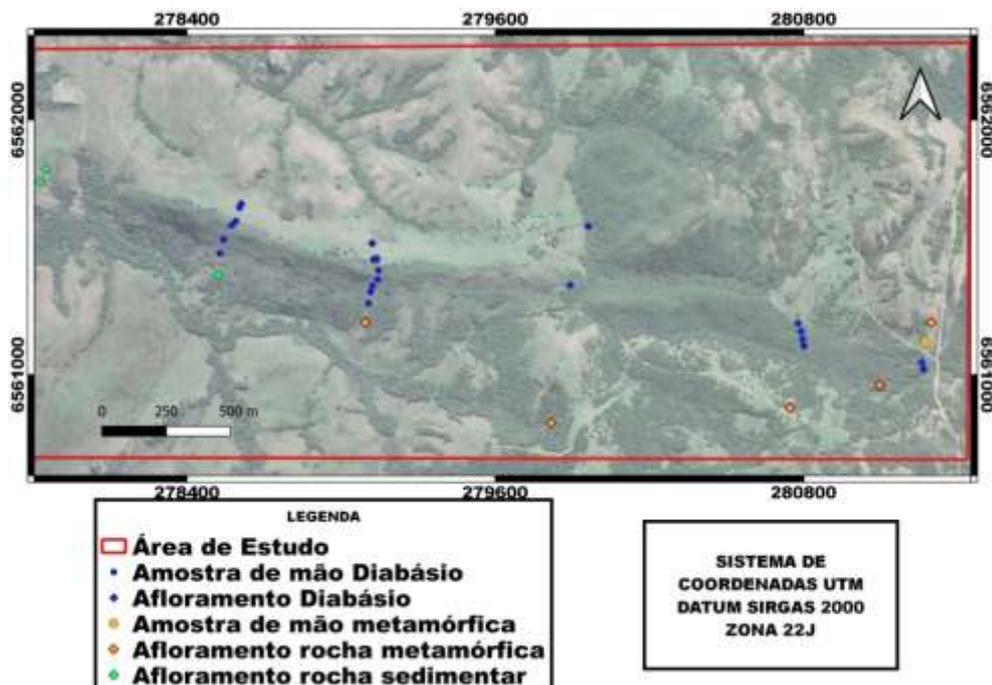
Fonte: Autor (2023).

7.1.3 Susceptibilidade Magnética

Para a obtenção de dados de susceptibilidade optou-se coletar informações principalmente no corpo fonte causativo da anomalia magnética. Porém, também foram coletados dados nas rochas encaixantes, onde a população amostral foi bem menor.

As medidas de susceptibilidade magnética realizadas *in situ* (figura 30) nos afloramentos e em amostras de mão no laboratório são relacionadas aos seguintes grupos: i) diabásio com medidas em afloramentos; ii) diabásio com medidas em laboratório; iii) metamórficas e iv) sedimentares com medidas em afloramentos.

Figura 30 – Mapa de localização dos pontos e tipos de amostragem de susceptibilidade magnética na área de estudo.



Fonte: QuickMapServices, autor (2023).

A população amostral de diabásio, com medidas realizadas *in situ* de susceptibilidade magnética, totalizou 20 pontos amostrais. A média dos valores de susceptibilidade de todas as amostras foi de $27,02 \cdot 10^{-3}$ SI, sendo $39 \cdot 10^{-3}$ SI o valor máximo e $18,60 \cdot 10^{-3}$ SI o valor mínimo (figura 31).

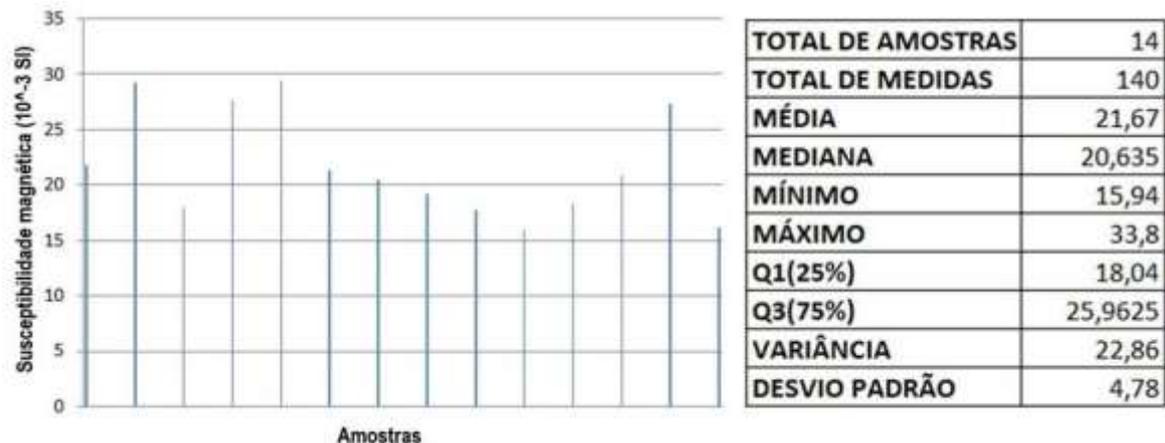
Figura 31: Média de valores de susceptibilidade magnética de cada amostra e sumário estatístico do grupo de amostras de diabásio com medidas *in situ*.



Fonte: o autor (2023).

Já a população amostral de diabásio com medidas realizadas em laboratório totalizou 14 amostras. A média dos valores de susceptibilidade de todas as amostras foi de $21,67 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, sendo $15,94 \cdot 10^{-3} \text{SI}$ o valor máximo e $18,60 \cdot 10^{-3} \text{SI}$ o valor mínimo (figura 32).

Figura 32 – Média de valores de susceptibilidade magnética de cada amostra e sumário estatístico do grupo de amostras de diabásio com medidas realizadas em laboratório.

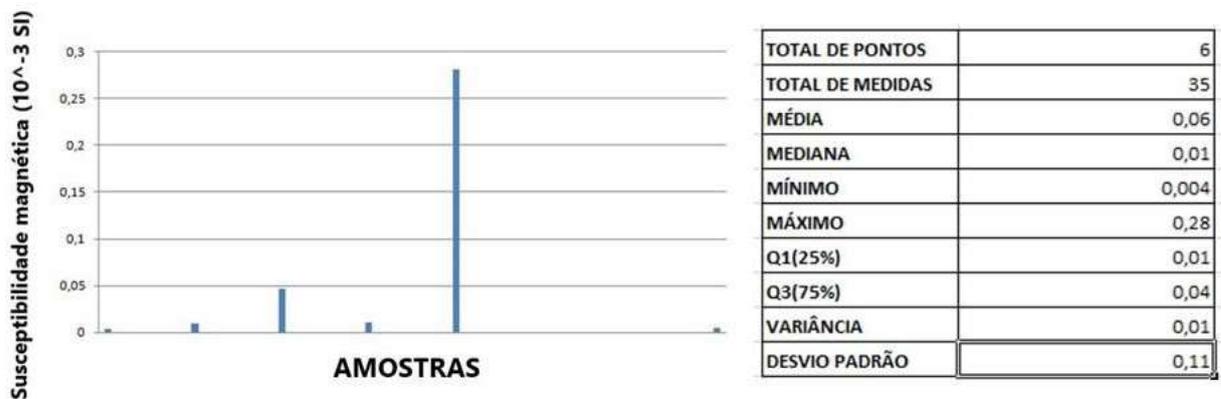


Fonte: autor (2023).

Para as amostras de rochas metamórficas e sedimentares os valores médios de susceptibilidade magnética medidas em campo e laboratório ficaram em torno de $0,06 \cdot 10^{-3} \text{SI}$ e $0,16 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, respectivamente, para cada tipo litológico (figuras 33 e 34).

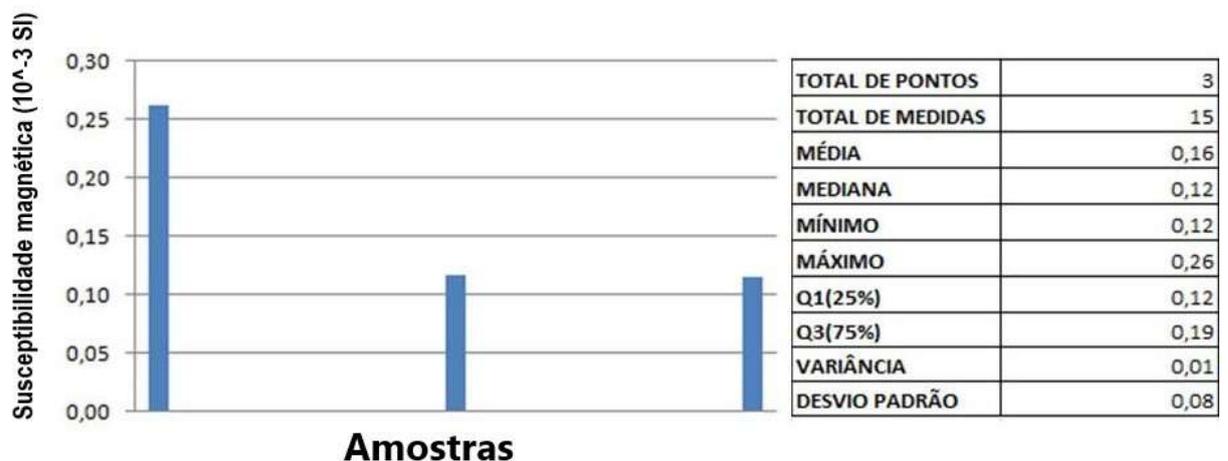
As médias de valores de susceptibilidade magnética ficaram dentro do esperado e similares ao que se encontra na literatura para cada litotipo aqui referido (figura 8).

Figura 33 – Média de valores de susceptibilidade magnética de cada amostra e sumário estatístico do grupo de amostras de rochas metamórficas com medidas realizadas em laboratório.



Fonte: autor (2023).

Figura 34 – Média de valores de susceptibilidade magnética de cada amostra e sumário estatístico do grupo de amostras de rochas sedimentares com medidas realizadas em laboratório.



Fonte: autor (2023).

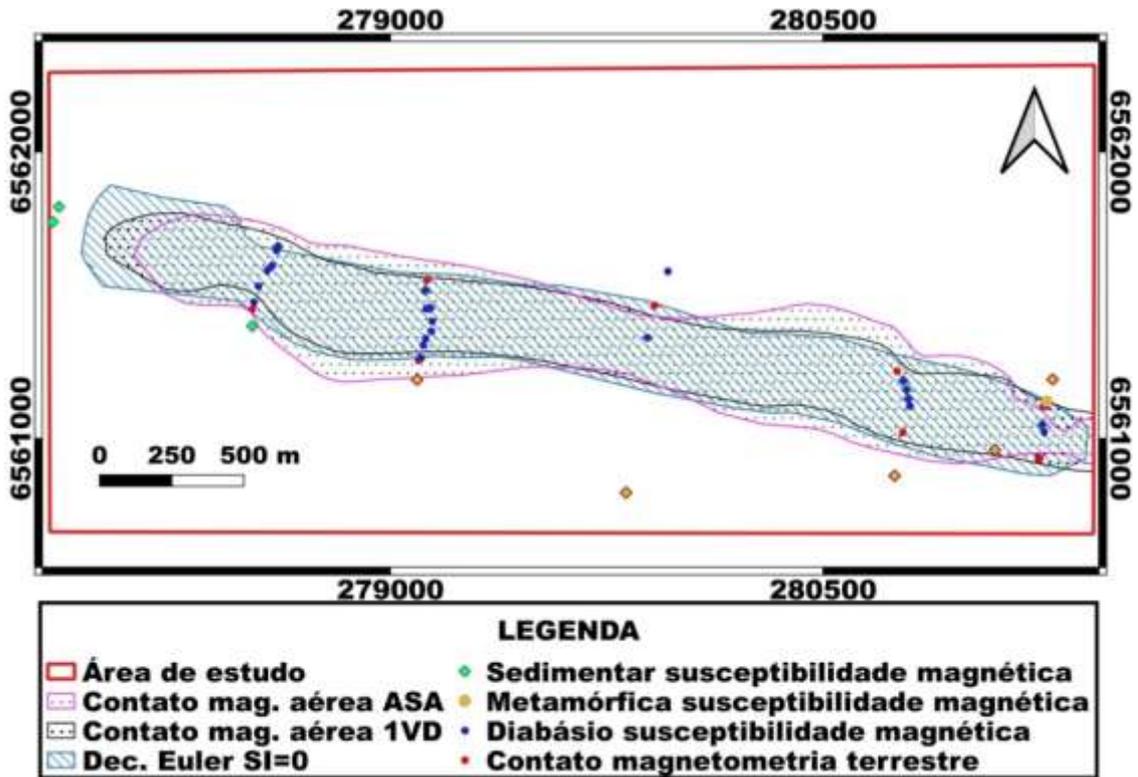
Estas medidas serviram como uma informação precisa para validar a localização das ocorrências de cada tipo de litologia, o que ajudou na delimitação dos contatos litológicos.

7.1.4 Integração dos dados – limites litológicos da fonte causativa da anomalia magnética

Após traçados os prováveis limites do corpo causativo da anomalia magnética de forma individual utilizando dados de magnetometria aérea (ASA e 1VD), magnetometria terrestre (TDR, 1VD e deconvolução de Euler $Sl=0$) e

susceptibilidade magnética foi feita, em ambiente GIS, a integração dos dados (figura 35).

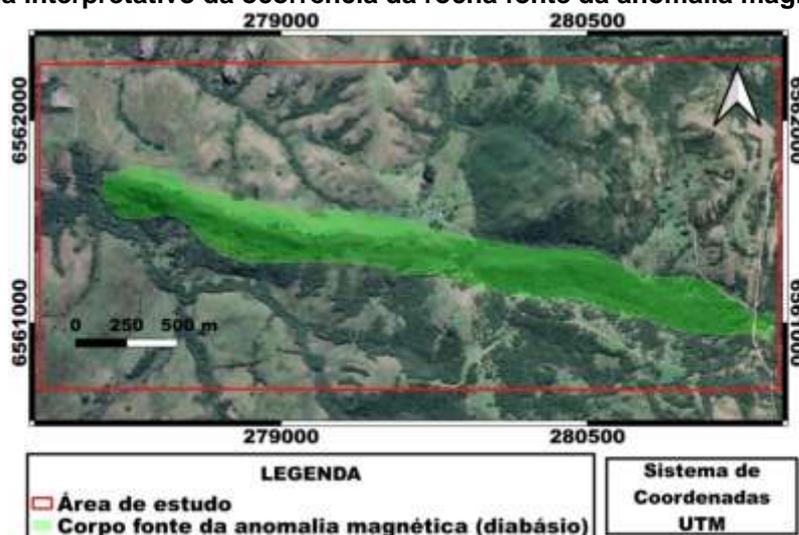
Figura 35 – Mapa da integração dos dados obtidos de diferentes métodos aplicados para delimitar os contatos geológicos referentes ao corpo causativo da anomalia magnética.



Fonte: autor (2023).

A partir da integração e sobreposição dos limites litológicos foram delimitados os prováveis contatos litológicos do corpo fonte da anomalia magnética (figura 36).

Figura 36 – Mapa interpretativo da ocorrência da rocha fonte da anomalia magnética (diabásio).



Fonte: autor (2023).

7.2 Tipo de estrutura geológica e Comportamento do Corpo Intrusivo em Sub-Superfície - Deconvolução de Euler com Índice Estrutural 1

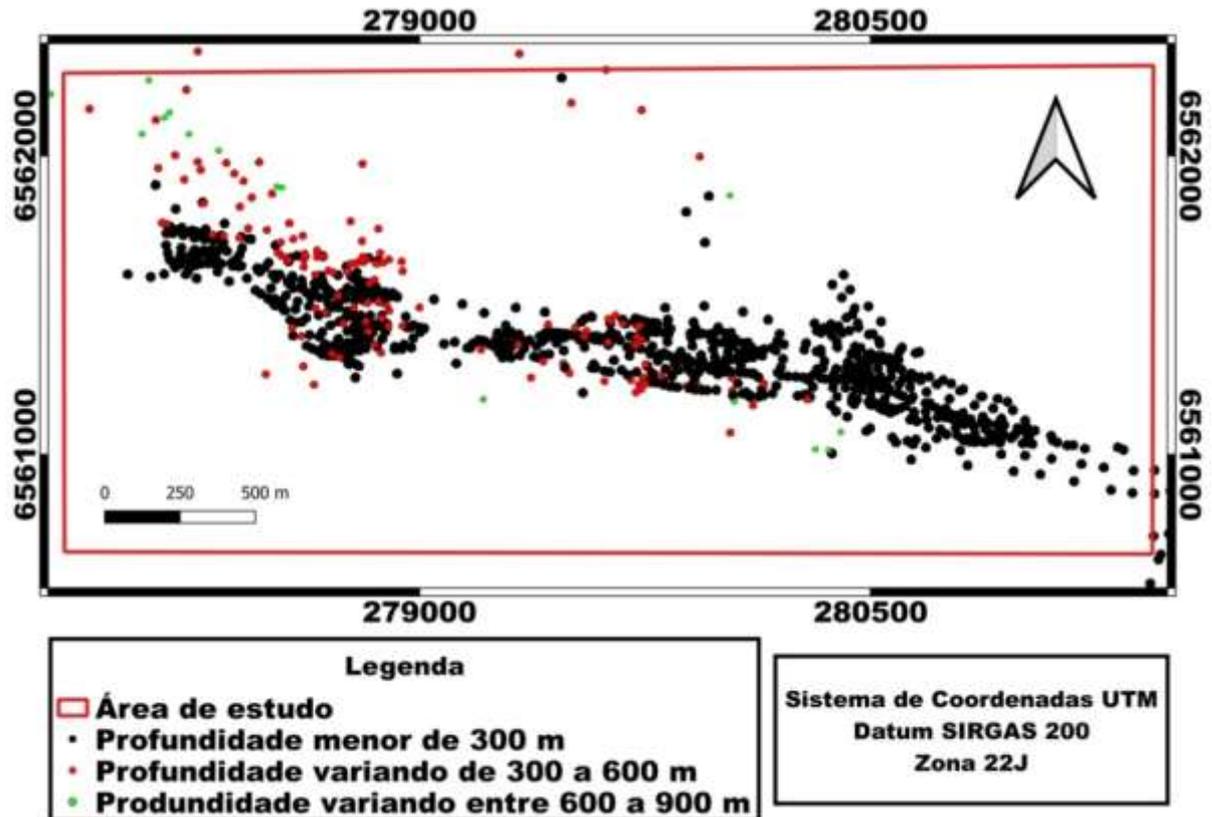
As anomalias observadas e respectivas fontes de profundidade definidas pela Deconvolução de Euler permitiram a detecção de feições lineares correlacionáveis aos limites litológicos (dique/rochas encaixantes) e, de forma mais concentrada, ao corpo intrusivo (dique).

A partir da aplicação da Deconvolução de Euler 3D nos dados de Campo Magnético Anômalo Total submetidos à Redução ao Pólo (TMI_RTP) (figura 19), foi possível observar como o corpo causador da anomalia magnética se comporta em sub-superfície. Também foi possível estimar a profundidade do corpo anômalo estudado.

A análise de profundidade da anomalia através do *software* Oasis Montaj indicou valores com profundidades variando de 83 a 733 m. Estes valores são referentes à altura de vôo do avião, visto que a estrutura é aflorante. Para esta análise tomou-se como 0 a superfície do terreno, sendo que com valores corrigidos (subtraindo a altura do vôo) os valores de profundidade da anomalia ficaram variando de 0 m (superfície do terreno) até 650 m de profundidade.

Ao aplicar a técnica de Deconvolução de Euler no *software* Oasis Montaj, a partir dos dados TMI_RTP, o produto gerado é um mapa de pontos onde esses pontos correspondem à profundidades correlacionadas à fonte causativa da anomalia magnética. São gerados pontos em três cores diferentes que correspondem a três intervalos de profundidade diferentes. Os pontos na cor preta compreendem um intervalo de profundidades de 0 até 300 m. Já o intervalo intermediário, com pontos na cor vermelha, corresponde à profundidades maiores que 300 m indo até 600 m. E, por fim, pontos na cor verde correspondem a intervalo que varia de mais de 600 m até profundidades de 900 m (figura 37).

Figura 37 – Mapa das profundidades das fontes anômalas magnéticas (TMI_RTP) obtidas a partir da Deconvolução de Euler 3D para diques e corpos intrusivos (SI = 1).

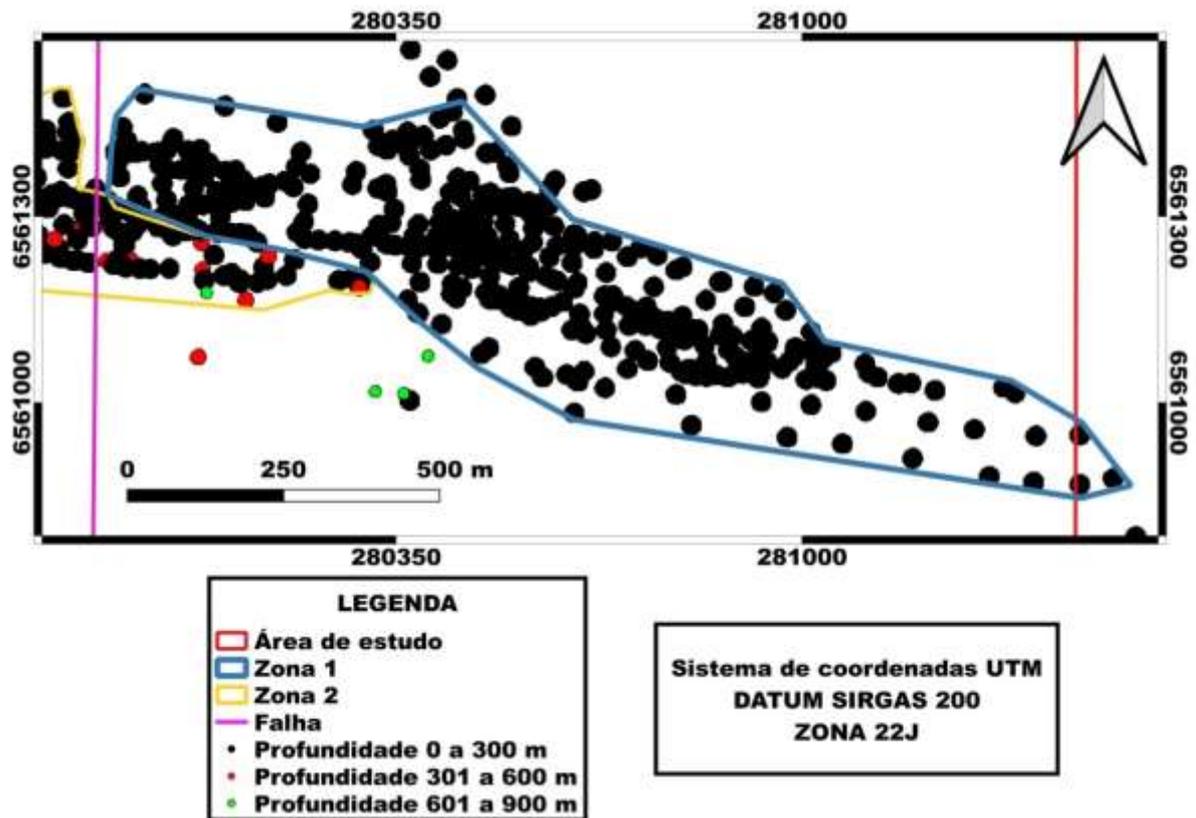


Fonte: autor (2023).

Através de análise deste mapa, foram distinguidos três padrões diferentes de interação entre os pontos e que foram denominados de zonas.

Zona 1: está localizada na porção mais a leste da estrutura geológica (figura 38). Primeiramente foi observado que só ocorrem pontos na cor preta, que variam de 0 a 300 m, o que indica que esta é a região mais rasa de toda a anomalia. É importante notar que aqui ocorre uma densificação dos pontos e, por consequência, uma sobreposição dos mesmos.

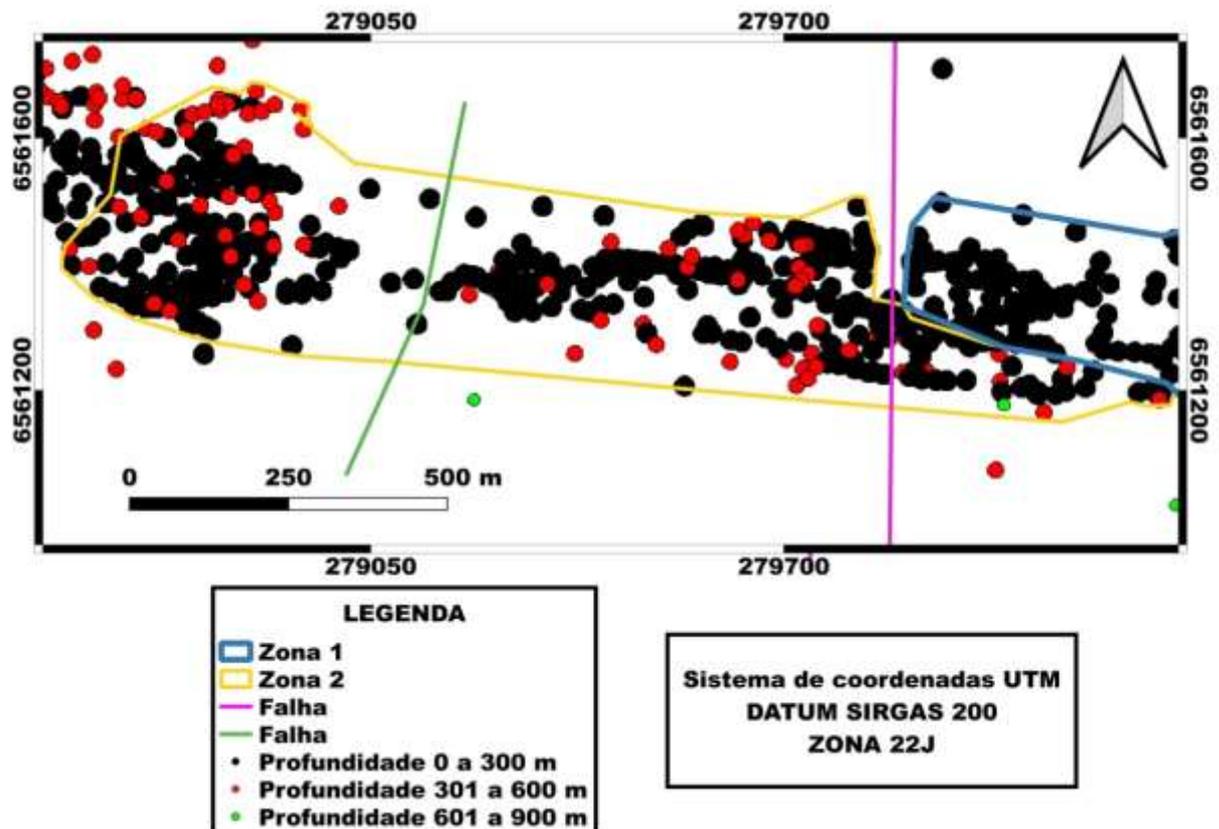
Figura 38 - Mapa das profundidades das fontes anômalas magnéticas (TMI_RTP) obtidas a partir da Deconvolução de Euler 3D para diques e corpos intrusivos (SI = 1) para a Zona 1 do dique.



Fonte: autor (2023).

Zona 2: é a porção central do dique. Nela já começam a aparecer pontos na cor vermelha que indicam profundidades superiores a 300 m e que variam até 600 metros de profundidade (figura 39). Nela é possível notar a sobreposição dos pontos pretos sobre os pontos vermelhos, evidenciando assim que não há espalhamento lateral da estrutura e levando a interpretação que o corpo está disposto em um ângulo aproximado de 90°, corroborando assim com a hipótese de que se trata de um dique.

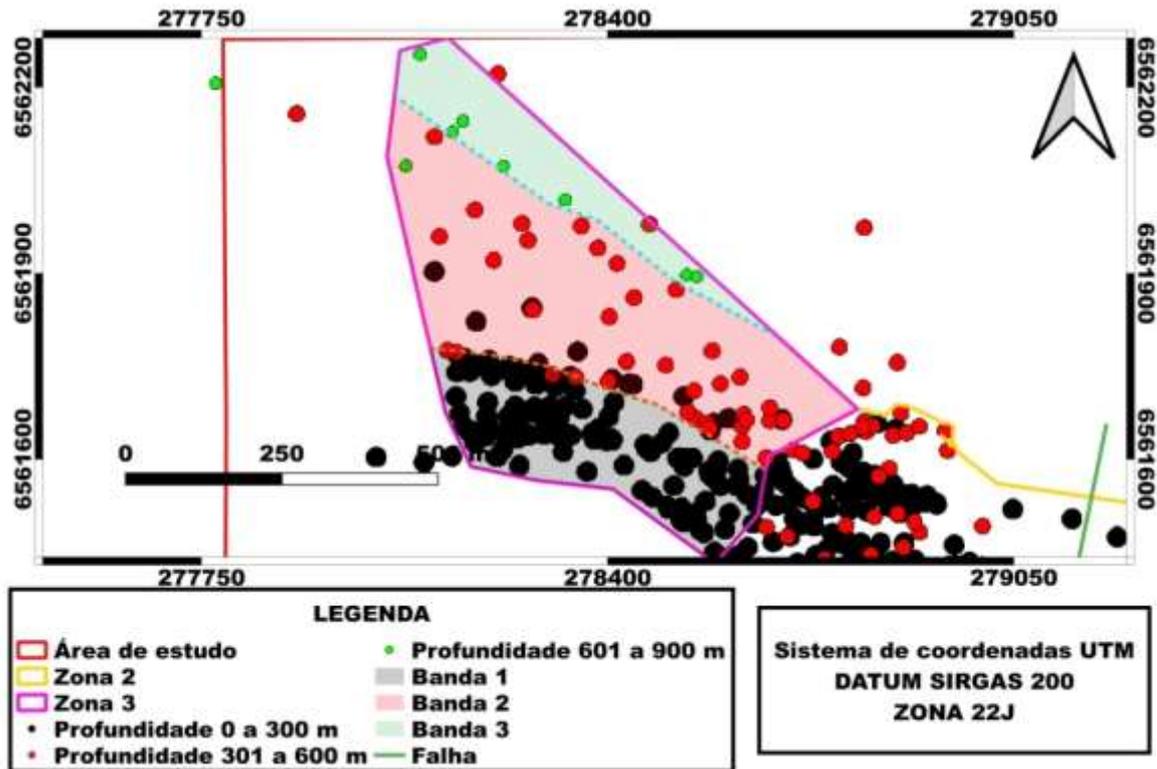
Figura 39 – Mapa das profundidades das fontes anômalas magnéticas (TMI_RTP) obtidas a partir da Deconvolução de Euler 3D para diques e corpos intrusivos (SI = 1) para a Zona 2 do dique.



Fonte: autor (2023).

Zona 3: é a zona mais a oeste do corpo e está separada da Zona 2 por uma falha geológica. Esta zona foi dividida em três bandas, conforme suas profundidades, por não haver sobreposição dos pontos de diferentes cores. Aqui é possível notar a presença de pontos verdes que corresponde a profundidades superiores a 600 m. A Banda “A” compreende os pontos da cor preta, correspondentes à parte mais rasa de até 300 metros, e está situada na porção mais a sul da Zona 3. Na banda B, de profundidades intermediárias (300 a 600 m), nota-se um espaçamento maior entre os pontos e é visivelmente distinta lateralmente da Banda A. Na Banda C, que contém pontos na cor verde que indicam profundidades maiores do que 600 m, é possível identificar uma faixa mais curta do que nas bandas A e B (figura 40).

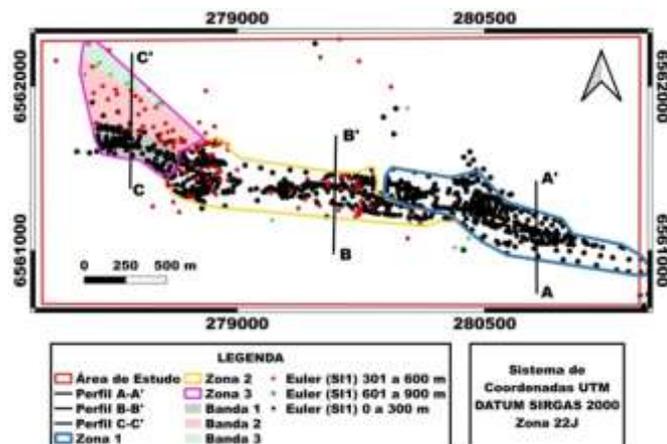
Figura 40 – Mapa das profundidades das fontes anômalas magnéticas (TMI_RTP) obtidas a partir da Deconvolução de Euler 3D para diques e corpos intrusivos (SI = 1) para a Zona 3 do dique.



Fonte: autor (2023).

Para melhor demonstrar o provável comportamento do corpo em subsuperfície nas diferentes zonas identificadas, foram traçados três perfis perpendiculares à anomalia magnética, sendo um perfil em cada zona (figura 41).

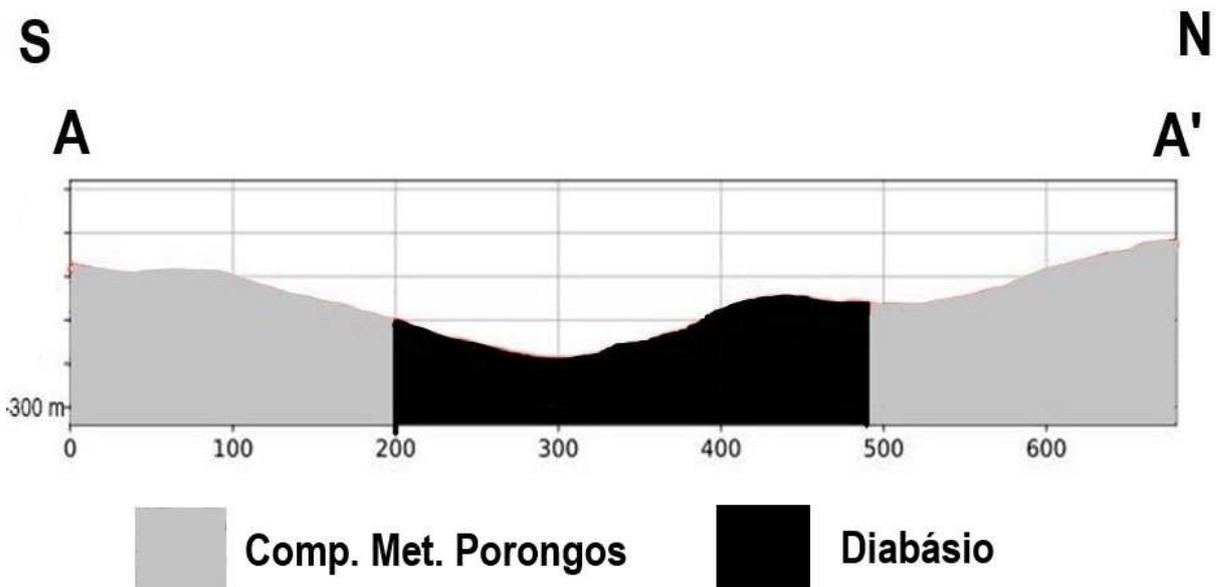
Figura 41 – Mapa dos perfis traçados ao longo das três zonas.



Fonte: autor (2023).

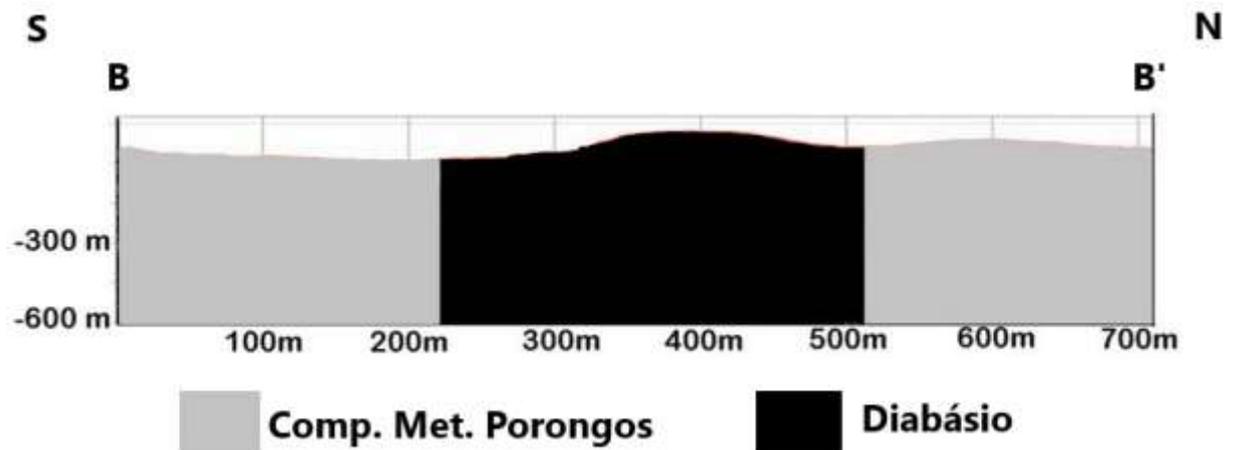
Nos perfis A-A' (figura 42) e B-B' (figura 43) o corpo de diabásio intrude as rochas metamórficas do Complexo Metamórfico Porongos e, segundo a interpretação do mapa das profundidades das fontes anômalas magnéticas (TMI_RTP) obtidas a partir da Deconvolução de Euler 3D para diques e corpos intrusivos (SI = 1), a estrutura tem um comportamento vertical com ângulo de 90° ou próximo a esse valor. As profundidades da anomalia vão até 300 metros de profundidade no perfil A-A' e a até 600 metros no perfil B-B'.

Figura 42 – Perfil esquemático do perfil A-A' demonstrando as prováveis profundidades e comportamento do corpo em subsuperfície na Zona 1.



Fonte: autor (2023).

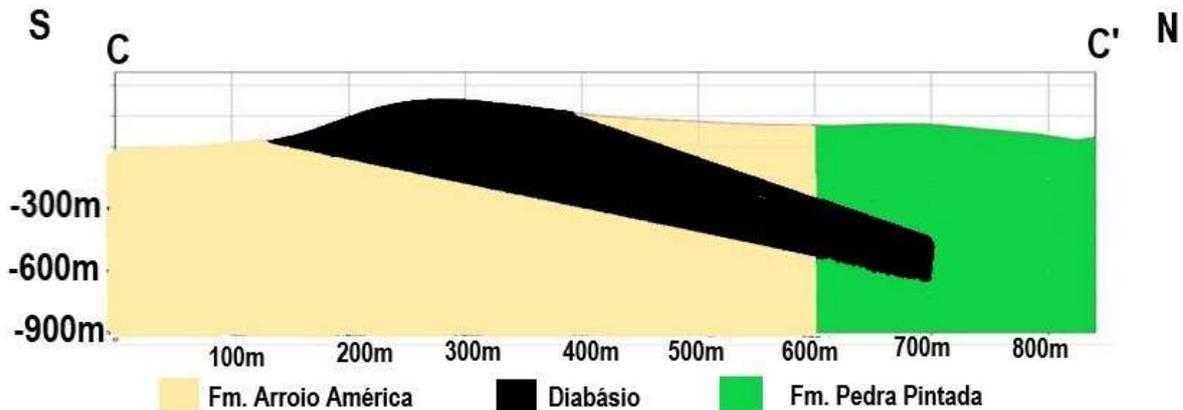
Figura 43 – Perfil esquemático do perfil B-B' demonstrando as prováveis profundidades e comportamento do corpo em subsuperfície na Zona 2.



Fonte: autor (2023).

O perfil C-C' (figura 44) demonstra o provável comportamento do corpo, com mergulho para norte em subsuperfície na zona 3, e profundidades estimadas de até 650m.

Figura 44 – Perfil esquemático do perfil C-C' demonstrando as prováveis profundidades e comportamento do corpo em subsuperfície na Zona 3.



Fonte: autor (2023).

8. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação à geologia da área de estudo, associado aos dados de magnetometria aérea, ficou bem evidente a orientação NW do lineamento magnético (figuras 17, 21, 22 e 23). Por meio dos dados de geologia de campo (afloramentos) (figuras 2 e 6) e de geofísica (susceptibilidade magnética, item 7.1.3), a anomalia magnética está associada à ocorrência de um corpo intrusivo de rocha vulcânica de origem hipoabissal que, por meio da análise macroscópica (mineralogia e textura) e também de estudos anteriores (MACEDO, 2018), esta rocha intrusiva foi classificada como sendo um diabásio.

Para a análise e definição dos contatos litológicos por meio de aerogeofísica, magnetometria terrestre e susceptibilidade magnética, os resultados obtidos demonstraram coerência em relação à similaridade, não havendo discrepâncias em relação aos limites litológicos do corpo fonte da anomalia magnética nos diferentes métodos utilizados.

No total dos seis perfis realizados no levantamento terrestre, o corpo não era aflorante apenas no perfil de número 6. A análise dos dados de magnetometria terrestre obtidos neste perfil sugeriram a possibilidade de existirem dois diques nesta região da área de estudo, o que é evidenciado pelo padrão de frequência magnética

relativa ao filtro de Primeira Derivada Vertical, que indica duas sequências distintas, onde os picos maiores (diabásio) estão separados por uma região com padrão retilíneo (rocha encaixante) (figura 29).

Na análise semiquantitativa das fontes causativas da anomalia magnética (deconvolução de Euler $SI=1$) (item 7.2), foi possível estimar profundidades para a anomalia, que variaram desde a superfície até 650 m. Foram identificados três padrões comportamentais do corpo em subsuperfície. O primeiro demonstrou um comportamento aparentemente tabular e com profundidades de até 300m (Zona 1, figura 38). O segundo padrão, definido como Zona 2, também apresentou um comportamento tabular, o que leva a acreditar que este corpo intrusivo possivelmente tratar-se de um dique. A terceira Zona, mais a leste, demonstrou um comportamento diferente das Zonas 1 e 2, além de ter profundidade maiores (até 650 m) que as outras zonas. Nesta parte do corpo geológico surgiram evidências que o mesmo tem um mergulho e que este mergulha aproximadamente para a direção norte/nordeste. Não foi possível, com a metodologia aplicada, definir com clareza a direção precisa do mergulho.

Por meio de dados de magnetometria (figura39) e imagens de sensoriamento remoto (Alos Palsar) com relevo sombreado, ficou evidenciada a ocorrência de dois lineamentos que atravessam transversalmente o corpo causativo da anomalia magnética. Acredita-se que tais lineamentos sejam falhas geológicas. O primeiro, mais a oeste do corpo, situa-se bem na divisa das Zonas 1 e 2 e atravessa toda a área de estudo, com sentido N-S. O segundo lineamento ocorre quase no centro da Zona dois e é bem nesta região que o corpo sofre uma inflexão, onde a estrutura fica mais a NW.

9. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. P.; Tectônica e sedimentação do Ediacarano ao Ordoviciano: exemplos do Supergrupo Camaquã (RS) e do Grupo Caacupé (Paraguai oriental). 2005. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo.

ALMEIDA, R. P.; JANIKIAN, L.; FRAGOSO-CESAR, A.R. S.; MARCONATO, A. Evolution of a rift basin dominated by subaerial deposits: The Guaritas Rift, Early Cambrian, Southern Brazil. **Sedimentary Geology**. vol.217, pág.30-51, 2009.

ALMEIDA, R.P.; JANIKIAN, L; FRAGOSO-CÉSAR, A.R.S.; FAMBRINI, G.L. The Ediacaran to Cambrian Rift System of Southeastern South America: Tectonic Implication. **Journal of Geology**, vol. 118, pág.145-161. 2010.

BARANOV, V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies. **Geophysics**, 22, 359-383.

BLAKELY, Richard J. Potential theory in gravity and magnetic applications. **Cambridge University Press**, 1996.

BORBA, A.W.; MISUZAKI, A.M.P.; SILVA, D.R.A.; KOESTER, E; NORONHA, F.L; CASAGRANDE, J. Provenance of the Neoproterozoic Maricá Formation (Sul-riograndense Shield, Southern Brazil): Petrographic and Sm-Nd isotopic constraints. **Gondwana Research**, vol. 9, pág. 464 – 474. 2006.

CHEMALE JR. F. Evolução Geológica do Escudo Sul-riograndense. In: Holz, M. & De Ros, L.F. (Ed.): **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CIGO/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 13-52. 2000.

COSTA, G.D. Investigação Hidrogeológica e Geofísica para a Caracterização de Aquíferos Fraturados Associados a Lineamentos Magnéticos. **Trabalho de conclusão de curso**. Universidade Federal do Pampa, 2019.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul: Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Volume I **Texto técnico**. Lasa Prospecções S.A.

DA ROSA SEIXAS, Adriano et al. Caracterização magnetométrica do Sill de Limeira–SP. **Geociências**, v. 34, n. 2, p. 169-184, 2015.

DENTITH, M; MUDGE, S.T. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Editora Cambridge University, pág.85-186, 2014.

FRAGOSO-CESAR, A.R.S; FAMBRINI, G.L.; ALMEIDA, R.P.; PELOSI, A. P.M.R.; JANIKIAN, L; RICCOMINI, C; MACHADO, R; NOGUEIRA, C.R.; SAES, G.S. The Camaquã Extensional Basin: Neoproterozoic to Early Cambrian Sequences in Southern Brazil, **Revista Brasileira de Geociências**, vol. 30 (3), pág, 442- 445, 2000.

GOULART, R. V.; REMUS, M. V.D.; REIS, R.S. Composição isotópica de Sr, C, e O e geoquímica de ETRs das rochas carbonáticas do Bloco São Gabriel, Rio Grande do Sul. **Pesquisas em Geociências**. Porto Alegre, 40 (1). P. 75-97. 2013.

GALLAGHER, K.; HAWKESWORTH. C. J.; MANTOVANI, M.S.M. The denudation history of the on shore continental margin of SE Brazilian derived from apatite fission track data. **Journal of Geophysical Research**, v99, p.18117-18145, 1994.

Gregory, T.R., Guadagnin, F., Fae, Y.A. & Macedo, R.A.M. 2019a. Significado de lineamentos magnéticos no Escudo Sul Rio-Grandense: Resultados preliminares. In: XVII SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, XI INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECTONIS, **XI SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 2019, Bento Gonçalves. Anais... Bento Gonçalves, UFRGS, v. 1, p. 88.

Gregory, T.R., Guadagnin, F. & Tico, H.N. 2019b. Determinação automática de Lineamentos Magnéticos no Escudo SulRiograndense: Comparação com dados manuais e de campo. In: **XVII SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, XI INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECTONIS, XI SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 2019, Bento Gonçalves. Anais... Bento Gonçalves, UFRGS, v. 1, p. 347.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE Jr., F.; PHILIPP, R. P. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: Iannuzzi, R. & Frantz, J.C. (Ed.): 50 ANOS de Geologia: Instituto de Geociências. **Contribuições**, p. 97-123. 2007.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019.

JANIKIAN, L.; ALMEIDA, R. P.; FRAGOS-CESAR, A. R. S.; MARTINS V.T.S., DANTAS, E. L.; TOHVER, E.; MCREATH, I; D'AGRELLA FILHO, M. S. Ages (U–Pb SHRIMP and LA ICPMS) and stratigraphic evolution of the Neoproterozoic volcanic sedimentary successions from the extensional Camaquã Basin, Southern Brazil. **Gondwana Research**, 21(2-3), 466-482. 2012.

JOST H.; BITENCOURT M. F. Estratigrafia e tectônica de uma fração da Faixa de Dobramentos Tijucas no Rio Grande do Sul. **Acta Geológica Leopoldensia**, 27-60, São Leopoldo, 1980.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de Exploração**. Editora Oficina de Textos, pág. 273-305, 2009.

KOESTER, E.; BERTOTTI, A.L.; PORCHER, C.C.; LENZ, C.; VIEIRA, D.T.; OLMOBARBOSA, L.D.; RAMOS, R.C.; BASTOS, V.A.; PINTO, V.M. A evolução crustal do Escudo Sul-Rio-Grandense sob a perspectiva dos Sistemas Sr- Nd. In: JELINEK, A.R.; SOMMER, C.A. Contribuição à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. **Sociedade Brasileira de Geologia**, pág 13-27, 2021.

LI, X., 2006. Understanding 3D analytics signal amplitude. **Geophysics**, vol. 71, no. 2, B13–B16.

LIMA, E.F.; SOMMER, C.A.; NARDI, L.V.S. O vulcanismo Neoproterozóico-Ordoviciano no Escudo Sul-rio-grandense: Os Ciclos Vulcânicos da Bacia do Camaquã. In: IANNUZZI, R.; FRANTZ, J. C. (Eds.), **50 anos de Geologia: Instituto de Geociências**. Porto Alegre: Comunicação e Identidade, p.79 - 95, 2007.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. Second edition. Editora Cambridge University Press, pág.381, 2007.

LUSA, M.; PHILLIP, R. P.; NARDI, V. S. Geoquímica e petrologia dos metagranitos do Complexo Encantadas, Santana da Boa Vista, (RS): a evolução de uma margem continental ativa no Paleoproterozóico. **Revista Brasileira de Geociências**, p. 151-166, 2010.

MACEDO, Roberta Adelina Machado de et al. Significado geológico de uma anomalia geofísica aeromagnética no escudo sul-rio-grandense. 2018. **Trabalho de conclusão de curso** da Universidade Federal do Pampa.

MACHADO, Fábio Braz et al. Geologia e litogeoquímica da Formação Serra Geral nos estados de Mato grosso e Mato Grosso do Sul. **Geociências**, p. 523-540, 2009.

MACHADO, Fabio Braz et al. As rochas intrusivas da formação Serra Geral na porção leste da bacia do Paraná no estado de São Paulo: aspectos petrográficos e geoquímicos—resultados preliminares. *Geosciences = Geociências*, v. 24, n. 1, p. 5-17, 2005.

MARQUES, Juliana Charão et al. Rochas metassedimentares, geologia estrutural e metamorfismo da Suíte Metamórfica Porongos na área da Antiforme Capané, Cachoeira do Sul - RS. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 4, p. 467-472, 1998.

MILLER, H.G.; SINGH, V., 1994. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. **Journal of Applied Geophysics**. 32(2-3): 213–217

MILLIGAN, P. R.; GUNN, P. J. *Enhancement and presentation of airborne geophysical data*. AGSO **Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 63-75, 1997.

MUSSET, A.E.; KHAN, A.F. **Looking into the Earth – Na introduction to geological geophysics**. Editora Cambridge University, pág, 162-172, 2000.

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** 37, 507–517.

OYHANTÇABAL, P.; ORIOLO, S.; PHILIPP, R.P.; WEMMER, K; SIEGESMUND, S. The Nico Pérez Terrane of Uruguay and Southern Brazil. In: SIEGESMUND, S, BASEI, M.A.S.; OYHANTÇABAL, P.; ORIOLO, S (Eds). **Geology of Southwest Gondwana**. Editora Springer, 2018.

PAIM, P.S.G.; LOPES, R.C.; CHEMALE JR, F. Aloestratigrafia, Sistemas Depositionais e Evolução Paleogeográfica da Bacia do Camaquã – Vendiano Superior/ Ordoviciano Inferior do RS. **6º Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia/ 1º Encontro de Geologia do Cone Sul**. In: Anais [...], pág.39 – 50, 1995.

PELOSI, A.P.M.R.; FRAGOSO-CÉSAR, A.R.S. Proposta Litoestratigráfica e Considerações Paleoambientais sobre o Grupo Maricá (Neoproterozóico III), Bacia do Camaquã, Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, vol. 33 (2), pág.137-148. 2003.

PHILIPP. R.P.; MACHADO, R.; CHEMALE JR, F. A Geração dos Granitóides Neoproterozóicos do Batólito de Pelotas: Evidências dos Isótopos de Sr e Nd e Implicações para o Crescimento Continental da Porção Sul do Brasil. In: IANNUZZI, R.; FRANTZ, J. C. (Eds.), **50 anos de Geologia: Instituto de Geociências**. Porto Alegre: Comunicação e Identidade, p. 60-76, 2007.

PHILIPP, R. P. et al. Estruturação do Arco de Rio Grande e da Sinclinal de Torres, Bacia do Paraná, RS: evidências por levantamentos magnetotelúricos. **Simpósio Brasileiro de Geofísica**, v. 6, p. 2014, 2014.

PHILIPP, R.P.; PIMENTEL, M.M.; CHEMALE JR, F. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology. **Brazilian Journal of Geology**, vol. 46, pág. 83-104. 2016.

PHILIPP, R.P.; PIMENTEL, M.M.; BASEI.M.A.S. The Tectonic of the São Gabriel Terrane, Dom Feliciano Belt, Southern Brazil: Closure of the Charrua Ocean. In: SIEGISMUND, S.; BASEI, M.A.S, OYHANTÇABAL. **Geology of Southwest Gondwana**, Editora Springer, pág. 243- 262. 2018.

PICADA, R. S. Ensaio sobre a tectônica do Escudo Sul-rio-grandense: caracterização dos sistemas de falhas. **Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia**, p.167-191, 1971.

PRESS, F.; GROTZINGER, J.; SIEVER, R.; JORDAN, T. H. **Para Entender a Terra**. Tradução: MENEGAT, R. (coord.). 4a edição. Porto Alegre: Bookman, 2006.

RIBEIRO, M. Geossuturas do Escudo do Rio Grande do Sul. **XXXI Congresso Brasileiro de Geologia**, Anais, p. 2709-2717, 1980.

ROEST, W.R.; VERHOEF, J.; PILKINGTON, M. Magnetic Interpretation using 3-D analytic signal. **Geophysics**, vol. 57, pág. 116-125. 1992

SAALMANN, K.; REMUS, M.V.D.; HARTMANN, L.A. Geochemistry and Crustal Evolution of Volcano-sedimentary Successions and Orthogneisses in the São Gabriel Block, Southernmost Brazil – Relics of Neoproterozoic Magmatic Arcs. **Gondwana Research**, vol. 8 (2), pág. 143- 161, 2005.

SAMPAIO, Ravi Gabriel dos Santos Pinheiro et al. **Petrologia de rochas hipabissais básicas relacionadas a lineamentos magnéticos no Escudo Sul-riograndense**. 2019.

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

TRAVASSOS, R. P. Interpretação estrutural regional do escudo Sul-Rio-Grandense – Rio Grande do Sul – Brasil, com base em aeromagnetometria. **Dissertação de Mestrado**, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

REID, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millett, A.J. & Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution, **Geophysics**, v 55, 80-91.

SARMENTO, C.C.T., Sommer, C. A., Lima, E. F., Oliveira, D. S. (2014). Corpos hipabissais correlacionados à Formação Serra Geral na região do Cerro do Coronel, RS: geologia e petrologia. **Geologia USP, Série Científica**, 14(2), 23-44.

USSAMI, Naomi et al. Detectabilidade magnética de diques do Arco de Ponta Grossa: um estudo integrado de magnetometria terrestre/aérea e magnetismo de rocha. **Brazilian Journal of Geology**, v. 21, n. 4, p. 317-327, 1991.

White, I.C. 1908. Relatório **final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil**. DNPM, Rio de Janeiro, Parte I, p.1-300; Parte II, p. 301-617. (ed. Fac-similar de 1988)