

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

ALANA GABRIELLI BAIOCO

**DADOS PRELIMINARES DE PALEOMAGNETISMO NAS INTRUSÕES BÁSICAS
ASSOCIADAS AO VULCANISMO SERRA GERAL NA PORÇÃO
NORDESTE DO RIO GRANDE DO SUL**

PORTO ALEGRE

2023

ALANA GABRIELLI BAIOCO

**DADOS PRELIMINARES DE PALEOMAGNETISMO NAS INTRUSÕES BÁSICAS
ASSOCIADAS AO VULCANISMO SERRA GERAL NA PORÇÃO
NORDESTE DO RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, representado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Jairo Francisco Savian
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer

PORTO ALEGRE

2023

CIP - Catalogação na Publicação

Baioco, Alana Gabrielli

DADOS PRELIMINARES DE PALEOMAGNETISMO NAS INTRUSÕES
BÁSICAS ASSOCIADAS AO VULCANISMO SERRA GERAL NA PORÇÃO
NORDESTE DO RIO GRANDE DO SUL / Alana Gabrielli
Baioco. -- 2023.

70 f.

Orientador: Jairo Francisco Savian.

Coorientador: Carlos Augusto Sommer.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2023.

1. Geofísica. 2. Campo Magnético. 3.
Desmagnetização Por Campos Alternados. 4. Mineralogia
Magnética. 5. Paraná-Etendeka. I. Savian, Jairo
Francisco, orient. II. Sommer, Carlos Augusto,
coorient. III. Título.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Geociências
Departamento de Mineralogia e Petrologia
GEO03015 – Projeto Temático III
Ficha de avaliação



Título da Monografia: PALEOMAGNETISMO DE INTRUSÕES BÁSICAS ASSOCIADAS AO VULCANISMO SERRA GERAL NA PORÇÃO NORDESTE DO RIO GRANDE DO SUL

Autor (a): Alana Gabrielli Baioco

Orientador(es): Prof. Dr. Jairo Francisco Savian e Coorientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer

Conceito Final: A

Examinador (a): Fernando Rodrigues Rios

Data: 26/03/2023

Prezado avaliador,

A tabela abaixo o auxiliará na avaliação da monografia. A média final das notas atribuídas será convertida em conceito, que corresponde a:

- Conceito A corresponde a médias acima de 8,5
- Conceito B corresponde a médias entre 7,5 e 8,49
- Conceito C corresponde a médias entre 6,0 e 7,49
- Conceito D corresponde a médias abaixo de 6,0

	Avaliação da Monografia	Nota
1	O título é informativo e reflete o conteúdo da monografia?	10,0
2	O resumo do trabalho informa sobre os tópicos essenciais da monografia?	9,00
3	As ilustrações são úteis e adequadas?	9,00
4	O manuscrito apresenta estrutura organizada?	9,00
5	A introdução apresenta os fundamentos para o restante do texto da monografia?	9,00
6	Os materiais e métodos são descritos adequadamente?	9,00
7	Os resultados são de qualidade e mostrados concisamente?	9,00
8	As interpretações e conclusões são baseadas nos dados obtidos?	9,00
9	As referências são convenientes e usadas adequadamente?	9,00

Título da Monografia: Paleomagnetismo de intrusões básicas associadas ao Vulcanismo Serra Geral na porção nordeste do Rio Grande do Sul

Autor (a): Alana Gabrielli Baioco

Orientador(es):

Orientador: Prof. Dr. Jairo Francisco Savian

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer

Conceito Final: A (8,0 a 9,0)

Examinador (a): Andrea Sander

Data: 27/03/2023

Prezado avaliador,

A tabela abaixo o auxiliará na avaliação da monografia. A média final das notas atribuídas será convertida em conceito, que corresponde a:

- Conceito A corresponde a médias acima de 8,5
- Conceito B corresponde a médias entre 7,5 e 8,49
- Conceito C corresponde a médias entre 6,0 e 7,49
- Conceito D corresponde a médias abaixo de 6,0

	Avaliação da Monografia	Nota
1	O título é informativo e reflete o conteúdo da monografia?	
2	O resumo do trabalho informa sobre os tópicos essenciais da monografia?	
3	As ilustrações são úteis e adequadas?	
4	O manuscrito apresenta estrutura organizada?	
5	A introdução apresenta os fundamentos para o restante do texto da monografia?	
6	Os materiais e métodos são descritos adequadamente?	
7	Os resultados são de qualidade e mostrados concisamente?	
8	As interpretações e conclusões são baseadas nos dados obtidos?	
9	As referências são convenientes e usadas adequadamente?	

10	O manuscrito possui boa redação (digitação, ortografia e gramática)?	
Avaliação da apresentação		
11	A apresentação foi conduzida de maneira clara?	10
12	O estudante mostrou domínio do conteúdo?	10
13	A apresentação estava estruturada metodologicamente?	4,5

Página	Correções Obrigatórias
	Parabenizo a Alana e os orientadores pelo excelente trabalho apresentado. As correções e sugestões estão expressas na forma de comentários no volume da monografia disponibilizado, porém destaco alguns pontos:
	Retirar "Paleomagnetismo" das palavras-chave, pois já está no título
	Rever o Resumo , pois está fora de ordem (Introdução, Metodologia, Resultados/Conclusão)
24	Definir com mais clareza os objetivos da pesquisa , lembrando que os objetivos devem ser claramente delineados, se iniciando com um verbo no infinitivo, por exemplo: reconhecer a mineralogia magnética de 19 sítios em soleiras e diques do Grupo Serra Geral nos municípios de Terra de Areia, Torres, Dom Pedro de Alcantara, Três Cachoeiras e Caxias do Sul
36	Rever o capítulo 3. Metodologia que ficou um pouco confusa e repetitiva
44	No capítulo 4. Resultados manter a mesma ordem na apresentação dos resultados.
46	Colocar em algum local do texto o que é o Remasoft, pois ele aparece pela 1ª vez na legenda da Figura 16, não há referência anterior no texto
55	O capítulo 5. Discussão , ficou um pouco generalista, a amostragem foi subdivida em 19 sítios, em cinco municípios, sendo realizados pelo menos dois grupos gerais de análises, que foram abordados em conjunto. Sobre o paleomagnetismo a discussão aponta que os dados "são promissores" o que é frustrante para quem lê, já que o título "promete" paleomagnetismo de intrusões básicas, creio que é interessante rever a construção desse capítulo, adaptando-os e alinhando aos objetivos.
	De uma forma geral, há correções mínimas de ortografia e formatação, sugiro evitar o uso de adjetivos imprecisos; e não usar a 1ª pessoa na redação (eu ou nós), o trabalho deve ser impessoal.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Geociências
Departamento de Mineralogia e Petrologia
GEO03015 – Projeto Temático III
Ficha de avaliação



Título da Monografia: PALEOMAGNETISMO DE INTRUSÕES BÁSICAS ASSOCIADAS AO VULCANISMO SERRA GERAL NA PORÇÃO NORDESTE DO RIO GRANDE DO SUL
Autor (a): ALANA GABRIELLI BAIOCO
Orientador(es): Orientador: Prof. Dr. Jairo Francisco Savian Coorientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer
Conceito Final: A
Examinador (a): Profa. Dra. Cassiana Roberta Lizzoni Michelin
Data: 27 de março de 2023

Prezado avaliador,

A tabela abaixo o auxiliará na avaliação da monografia. A média final das notas atribuídas será convertida em conceito, que corresponde a:

- Conceito A corresponde a médias acima de 8,5
- Conceito B corresponde a médias entre 7,5 e 8,49
- Conceito C corresponde a médias entre 6,0 e 7,49
- Conceito D corresponde a médias abaixo de 6,0

	Avaliação da Monografia	Nota
1	O título é informativo e reflete o conteúdo da monografia?	9,5
2	O resumo do trabalho informa sobre os tópicos essenciais da monografia?	9,0
3	As ilustrações são úteis e adequadas?	9,0
4	O manuscrito apresenta estrutura organizada?	9,0
5	A introdução apresenta os fundamentos para o restante do texto da monografia?	9,5
6	Os materiais e métodos são descritos adequadamente?	9,5
7	Os resultados são de qualidade e mostrados concisamente?	9,5
8	As interpretações e conclusões são baseadas nos dados obtidos?	9,5
9	As referências são convenientes e usadas adequadamente?	9,5
10	O manuscrito possui boa redação (digitação, ortografia e gramática)?	9,5

A todas as meninas que sonham em ser cientistas.

AGRADECIMENTOS

Escrevo esses agradecimentos fazendo o trajeto que comumente mais percorri durante esses cinco anos: Porto Alegre – Ilópolis e nesse momento um filme passa pela minha cabeça. Foram tantas as dificuldades percorridas. Uma menina que sempre viveu com os pais no interior de uma cidade com quatro mil habitantes caindo de paraquedas na capital e aprendendo a se virar sozinha de todas as formas possíveis. Foi um desafio e tanto! Porém, engana-se quem acha que eu estava sem direção. Minha mãe, desde criança, ensinou-me a enfrentar meus medos, sonhar alto e ser persistente em minhas lutas. Aprendi a ter força e enfrentar as dificuldades. Obrigada, mãe, por ter me guiado e incentivado a buscar o que eu sonhei desde criança: entender como todas as coisas ao nosso redor haviam se formado. Você é minha inspiração diária e essa conquista é mérito que obtivemos juntas. Obrigada, pai, por ser carinho, amor e força, por nunca me dizer não e sempre abraçar meus sonhos como se fossem os seus. Essa conquista também é sua. À minha irmã, Anielly, obrigada por ser apoio, alegria e amor aos nossos pais em todos os momentos que não pude estar ao lado de vocês nesses últimos anos. Compartilhar minha vida e minhas vivências contigo me completa, pois percebo o quanto você abraça meus sonhos também. Obrigada por tornar tudo mais divertido e prazeroso. Seremos sempre uma pela outra.

Aos meus avós, obrigada por sempre torcerem pela minha felicidade e pelos meus sonhos, por todas as velas acesas e orações quando as provas me atormentavam. Eu amo muito vocês e sempre os levo em meu coração.

Nessa estrada chamada geologia, muitas foram as amizades e pessoas conhecidas. Todos que cruzaram suas vidas com a minha têm um lugar especial em meu coração. Aprendi muito com cada um de vocês. Obrigada por tornarem a vida de uma universitária da UFRGS mais leve, mais divertida e mais feliz. Sim, sentirei muitas saudades de fazer campo com vocês, mas sei que não estaremos distantes e que a vida geológica fará com que nos encontremos novamente.

Nessa jornada teve uma pessoa que esteve comigo do início ao fim. Sempre. Fossem momentos de alegria e comemoração ou de choro e desabafo. Ela simplesmente tornou tudo suportável e me fez ver a vida de uma maneira muito melhor. Obrigada, Júlia, por ser minha família em POA. Eu não sei o que seria de mim

sem você. Agora eu tenho mais uma irmã, que não é de sangue, mas é de amor, carinho e cumplicidade.

A Júlia e ao Ualisson, minha eterna gratidão por serem a luz no início, meio e fim do túnel. Foi um privilégio conviver a rotina do IAG com vocês.

A Camila, por toda a ajuda, os ensinamentos, os conselhos e as risadas, muito obrigada! Você foi essencial nesse trabalho.

A Carol e a Stephanie, obrigada por viverem essa experiência comigo.

Aos meus orientadores, obrigada por terem aberto às portas da geofísica a mim. A simplicidade e gentileza de vocês fizeram com que essa caminhada fosse tranquila e prazerosa. Vocês trazem segurança e confiança de que estou no caminho certo e sei que sempre poderei contar com vocês, assim como vocês comigo. A semana de entrega do TCC foi corrida e atípica, assim como todo o último semestre, mas em todos os momentos vocês estiveram aqui e, por isso, sou muito grata a vocês.

A todos os professores e professoras que tive o prazer de compartilhar vivências e adquirir conhecimentos, obrigada por vossos ensinamentos.

A Universidade Pública e de qualidade, obrigada por abrir as portas a todas as pessoas que têm sonhos e ser nossa casa nessa caminhada.

O que sabemos é uma gota,
o que ignoramos é um oceano.

- Isaac Newton

RESUMO

As intrusões pertencentes ao Grupo Serra Geral vêm sendo estudadas, pois possuem importância para o entendimento da formação das rochas vulcânicas e seu ambiente gerador. Novas técnicas, baseadas em paleomagnetismo, têm sido usadas nos últimos anos para auxiliar na compreensão dos diversos processos geológicos envolvidos na geração e desenvolvimento deste vulcanismo. A mineralogia magnética presente nas rochas possibilita o uso de métodos paleomagnéticos que visam identificar a magnetização remanente preservada, resultando em dados vetoriais de declinação, inclinação e intensidade no momento de cristalização da rocha, bem como a identificação da mineralogia, através de ciclos de histerese, e possibilitam um entendimento mais completo da unidade geológica. Através da desmagnetização por campos alternados, seis, dos nove sítios analisados, mostraram bons resultados, tendo total desmagnetização em torno de 60 mT. Os outros três sítios desmagnetizaram parcialmente, indicando que a rocha possui minerais de baixa e alta coercividade. São apresentados novos dados paleomagnéticos para os diques da porção nordeste do Grupo Serra Geral. Através de curvas de histerese e de magnetização remanente induzida, verificou-se que os principais portadores magnéticos são magnetita/titanomagnetita, de tamanho pseudo-domínio simples. Na estatística por grupo de *Fisher*, todos os sítios indicam polos com direções de polaridade normal. Para a obtenção de um polo magnético, é necessário analisar mais amostras para se obter uma boa estatística de dados, porém, é comprovado, através desse trabalho, que a análise paleomagnética tem muito a agregar no entendimento da evolução e formação do Grupo Serra Geral e na Província Magmática como um todo.

Palavras-Chave: Geofísica. Campo Magnético. Desmagnetização Por Campos Alternados. Mineralogia Magnética. Paraná-Etendeka.

ABSTRACT

The intrusions belonging to the Serra Geral Group have been studied, as they are important for understanding the formation of volcanic rocks and their generating environment. New techniques, based on paleomagnetism, have been used in recent years to help understand the different geological processes involved in the generation and development of this volcanism. The magnetic mineralogy present in the rocks allows the use of paleomagnetic methods that aim to identify the preserved remanent magnetization, resulting in vector data of declination, inclination and intensity at the time of crystallization of the rock, as well as the identification of the mineralogy, through hysteresis cycles, and enable a more complete understanding of the geological unit. Through alternating fields demagnetization, six of the nine sites analyzed showed good results, with total demagnetization around 60 mT. The other three sites partially demagnetized, indicating that the rock has low and high coercivity minerals. New paleomagnetic data for the northeastern portion of the Serra Geral Group are presented. Through hysteresis and induced remanent magnetization curves, it was verified that the main magnetic carriers are magnetite/titanomagnetite, of simple pseudo-domain size. In Fisher's group statistics, all sites indicate poles with directions of normal polarity. To obtain a magnetic pole, it is necessary to analyze more samples to obtain good data statistics, however, it is proven, through this work, that paleomagnetic analysis has much to add to the understanding of the evolution and formation of the Serra Geral Group and in the Magmatic Province as a whole.

Keywords: Geophysics. Magnetic field. Alternating Field Demagnetization. Magnetic Mineralogy. Parana-Etendeka.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, com distribuição das unidades e principais estruturas tectônicas (modificado de Sarmento <i>et al.</i> , 2017). Enxame de diques: 1-Ponta Grossa, 2-Serra do Mar e 3-Florianópolis.	24
Figura 2 - Mapa de distribuição regional, segundo classificação de Peate <i>et al.</i> (1992) e Peate (1997), com as principais datações radiométricas das rochas. (modificado de Rossetti <i>et al.</i> , 2018).....	25
Figura 3 - Mapa geológico da área de estudo, na porção sul da PBC Paraná-Etendeka, de Rossetti <i>et al.</i> , (2018). A) Principais seções estratigráficas do estudo. B) Empilhamento estratigráfico das seções. (modificado de Rossetti <i>et al.</i> , 2018).....	26
Figura 4 - Representação do campo geomagnético terrestre e suas componentes (Butler, 1992).....	29
Figura 5 - <i>Geomagnetic polarity timescale</i> (GPTS), baseada nas anomalias magnéticas marinhas entre 0–160 Ma (retirado de Hulot <i>et al.</i> , 2010).....	29
Figura 6 – Diferentes comportamentos magnéticos, em que as setas de cor preta, fora dos diagramas, representam o campo aplicado e as setas vazias a magnetização adquirida pelo material. Dentro dos diagramas, as setas mostram a orientação dos <i>spins</i> (modificado de Tarling & Hrouda,1993).	31
Figura 7 - Diagrama ternário FeO-Fe ₂ O ₃ -TiO ₃ , contendo as soluções sólidas de titanohematita e titanomagnetita (modificado de Butler, 1992).....	32
Figura 8 - Domínios magnéticos. (a) Material ferromagnético esférico uniformemente magnetizado; (b) Material ferromagnético dividido em domínios; (c) Parede de domínios em que uma magnetização rotaciona para outra adjacente (modificado de Butler, 1992).....	33
Figura 9 - Análise de magnetização remanente característica, durante os passos de desmagnetização, em que se obtêm a melhor linha representativa. (a) Comportamento tridimensional da desmagnetização; (b) Diagrama de <i>Zijderveld</i> (modificado de Butler, 1992)	34
Figura 10 – Diagrama da metodologia demonstrando as quatro principais etapas realizadas durante a execução do projeto e seus principais sub itens.	35
Figura 11 - Mapa de localização dos pontos visitados durante o trabalho de campo.	36

Figura 12 - Vias de acesso que foram utilizadas para chegar ao primeiro ponto de amostragem.	37
Figura 13 - Realização do trabalho de campo. a) e c) amostragem com perfuratriz portátil e broca diamantada, demonstrada no círculo vermelho. Em amarelo, a bomba acoplada com água e óleo lubrificante. b) orientação dos cilindros com bússola adaptada, em verde. d) Sítio amostrado, no qual cada furo corresponde a um cilindro.	38
Figura 14 - Equipamentos utilizados para desmagnetização por campos alternados. Em a) computador com o software utilizado na tela e JR-6 realizando a medida; b) Equipamento JR-6 demonstrando o <i>holder</i> transparente, onde é colocada as amostras para leitura da magnetização; c) Equipamento LDA 5, o qual realiza a desmagnetização por campos alternados	40
Figura 15 - Ciclo completo de histerese com as posições em que se encontram os parâmetros como magnetização de saturação (J_s), em P1, magnetização remanente de saturação (J_r) e coercividade (H_c) (Tauxer <i>et al.</i> , 2018).	42
Figura 16 - Magnetômetro VSM (vibrating sample magnetometer) MicroMag3900 utilizado para aquisição das curvas de histerese. Extraído do site da fabricante do equipamento (<i>Lake Shore Cryotronics</i>).....	42
Figura 17 – Visualização dos dados de desmagnetização por campos alternados no Remasoft.....	43
Figura 18 - Resultados paleomagnéticos das amostras analisadas, pelo Remasoft, mostrando o diagrama de desmagnetização, ortogonal (Zijderveld, 1967), e o estereograma. As amostras são desmagnetizadas totalmente em torno de 60 mT, resultando que, para essas amostras, a técnica é efetiva.....	46
Figura 19 - Resultados paleomagnéticos, em AF, entre dique e a rocha encaixante, pelo Remasoft, mostrando que para o dique a técnica foi efetiva, porém, para a encaixante é necessário analisar esses sítios com outras técnicas, por exemplo, desmagnetização térmica.....	47
Figura 20 - Distribuição característica dos sítios de diques amostrados. Inclinações positivas mostram que a polaridade é normal.	47
Figura 21 – Para dique e rocha encaixante também se observa inclinações positivas, mostrando que a polaridade é normal.	48
Figura 22 - Resultado paleomagnético, em AF, pelo Remasoft. Em a) tem-se a visualização de que a técnica AF desmagnetizou em torno de 93% da amostra, mas	

que ainda é necessário a utilização de desmagnetização térmica para a total desmagnetização da rocha. Em b) é possível observar a inclinação positiva para a estatística de dados, resultando em uma polaridade normal para o sítio PDS-13. ...49

Figura 23 - Resultado paleomagnético, em AF, pelo Remasoft. Em a) tem-se a visualização de que a técnica AF desmagnetizou em torno de 90% da amostra, mas que ainda é necessário a utilização de desmagnetização térmica. Em b) é possível observar a inclinação positiva para a estatística de dados, resultando em uma polaridade normal para o sítio PDS-18.....50

Figura 24 - Ciclos de histerese dos sítios amostrados em Torres e Dom Pedro de Alcântara, com amostras demonstrando saturação em torno de 300mT, indicando mineralogia de magnetita/titanomagnetita e amostras PDS-04C2 e PDS-17G2 demonstrando saturação em torno de 800mT, indicando a presença de hematita/titanohematita.51

Figura 25 – Ciclo de histerese referente ao sítio PDS-13, mostrando que a mineralogia predominante é magnetita/titanomagnetita, pois satura em torno de 300mT.....52

Figura 26 - Ciclo de histerese referente aos sítios PDS-18 e PDS-19, mostrando que a mineralogia predominante é magnetita/titanomagnetita, pois saturam em torno de 300mT53

Figura 27 – Ciclos de histerese gerados dos sítios PDS-01 e PDS-02, mostrando que a mineralogia magnética presente nas amostras são de magnetita/titanomagnetita, pois saturam em torno de 300mT.....53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados paleomagnéticos obtidos através da desmagnetização por campos alternados.....	44
Tabela 2 – Dados de campo dos sítios e seus respectivos cilindros, com localização em coordenadas UTM, azimute magnético e solar e dip.	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo dos sítios amostrados em campo.....	38
---	----

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	22
1.1	Justificativa.....	22
1.2	Caracterização do problema.....	23
1.3	Objetivos.....	23
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	24
2.1	Contexto Geológico.....	24
2.1.1	Província Basáltica Continental Paraná-Etendeka.....	24
2.1.2	Grupo Serra Geral.....	25
2.1.3	Intrusões do Grupo Serra Geral.....	27
2.2	Geomagnetismo.....	27
2.2.1	Definições básicas.....	27
2.2.2	Propriedades magnéticas dos sólidos.....	30
2.2.3	Mineralogia magnética.....	31
2.2.4	Magnetização remanente.....	32
2.2.5	Paleomagnetismo.....	33
3.	METODOLOGIA.....	35
3.1	Etapa de pré-campo.....	35
3.2	Etapa de campo.....	36
3.3	Etapa de laboratório.....	39
3.4	Etapa pós-laboratório.....	43
4.	RESULTADOS.....	44
4.1	Desmagnetização por campos alternados.....	44
4.1.1	Amostragem em Torres/Dom Pedro de Alcântara.....	45
4.1.2	Amostragem em Três Cachoeiras.....	48
4.1.3	Amostragem em Caxias do Sul.....	49
4.2	Análise da Mineralogia Magnética.....	50
4.2.1	Amostragem em Torres/Dom Pedro de Alcântara.....	50
4.2.2	Amostragem em Três Cachoeiras.....	52
4.2.3	Amostragem em Caxias do Sul.....	52
4.2.4	Amostragem em Terra de Areia.....	53

5.	DISCUSSÃO.....	54
6.	CONCLUSÃO	56
7.	REFERÊNCIAS	57
	ANEXOS	63

1. INTRODUÇÃO

O Grupo Serra Geral, denominado estratigraficamente por Rossetti, *et al.* (2018, 2021), está inserido na porção centro-sul da América do Sul, fazendo parte de um dos maiores eventos vulcânicos continentais do planeta durante o Cretáceo: a Província Basáltica Continental Paraná-Etendeka (PBPE) (Milani *et al.*, 2007).

A investigação das intrusões básicas/intermediárias (diques e soleiras), provenientes desses eventos, tem sido amplamente estudada, devido a sua grande importância para o entendimento da gênese e evolução das Grandes Províncias Ígneas (*Large Igneous Province* – LIP).

Os eventos magmáticos, como o ocorrido com a PBPE, são associados a processos geodinâmicos de grande escala, envolvendo a ruptura de continentes e causando mudanças significativas na paleoceanografia destes durante o tempo geológico. Diferentes modelos são propostos para explicar a origem desse tipo de vulcanismo, o qual gera grandes províncias basálticas continentais. No entanto, as sequências dos processos tectônicos envolvidos, como, também, sobre a participação de diferentes componentes mantélicos na gênese das rochas básicas, ainda é motivo de debate na literatura (e.g., Dodd *et al.*, 2015).

O presente trabalho propõe abordar os aspectos geomagnéticos, envolvendo análise paleomagnética e determinação da mineralogia magnética constituintes das intrusões que cortam o Grupo Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul.

1.1 Justificativa

Em relação aos dados paleomagnéticos existentes para a Província Basáltica do Paraná, tem-se um número significativo, principalmente na porção norte da Bacia (Ernesto, *et al.*, 1999), região central (Alva-Valdivia *et al.*, 2003), no Paraguai (Ernesto *et al.*, 1999; Goguitchaichvili *et al.*, 2013) na Argentina (Mena *et al.*, 2006), além dos dados provenientes dos diques de Ponta Grossa (Raposo & Ernesto, 1995) e de Florianópolis (Raposo, 1997). Porém, a região sul da província, com suas grandes dimensões, possui informações paleomagnéticas insuficientes para comparações acuradas em relação às outras partes da província e com a porção africana (Etendeka). Portanto, esse estudo busca determinar, através do paleomagnetismo das intrusões básicas/intermediárias do Grupo Serra Geral, novos dados referentes à

polaridade magnética do vulcanismo preservado na região, resultando em informações mais detalhadas e completas sobre a história da Província.

1.2 Caracterização do problema

O modelo conhecido como “plumas mantélicas”, e.g., Richards *et al.* (1989); Campbell e Griffiths (1990); Arndt e Christensen (1992), é amplamente utilizado para explicar as características gerais das províncias basálticas, entretanto, há trabalhos que demonstram que esse modelo não pode ser generalizado (Sheth, 2005; Anderson, 2000). No caso da PBPE, ainda não há um consenso sobre os processos envolvidos na gênese dessas rochas (e.g., Ewart *et al.*, 1998; Peate *et al.*, 1999; Marques *et al.*, 1999; Marsh *et al.*, 2001).

O estudo paleomagnético das rochas busca identificar, através de minerais magnéticos, a orientação do campo magnético da Terra durante o resfriamento do magma. Através dele, é possível calcular a paleolatidade da região e reconstruir a posição geográfica dos continentes e suas respectivas idades. Esses dados são fundamentais para a reconstrução da paleoceanografia da PBPE.

1.3 Objetivos

Na área de estudo, localizada a nordeste do Rio Grande do Sul, afloram muitos diques e soleiras entre os derrames do Grupo Serra Geral. Com o objetivo de aperfeiçoar o entendimento desses corpos, esse trabalho visa reconhecer a mineralogia magnética e determinar a declinação e inclinação dessas intrusões através da desmagnetização por campos alternados. A referida monografia envolve a contextualização geológica da área de estudo, revisão dos principais conceitos geomagnéticos, a metodologia utilizada, os resultados obtidos, a discussão dos resultados e a conclusão do estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 Contexto Geológico

2.1.1 *Província Basáltica Continental Paraná-Etendeka*

A Província Basáltica Continental (PBC) Paraná-Etendeka faz parte do segundo maior evento vulcânico do planeta, formada durante a fragmentação do Supercontinente Gondwana, no Cretáceo Inferior (Valanginiano - Hauteriviano). Em termos de área de ocorrência, abrange na América do Sul o Brasil (Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul), Uruguai, Argentina e Paraguai. No sudoeste da África, ocorre na Namíbia e Angola (Cordani e Vandroos, 1967). Aproximadamente 90% do seu volume total está localizado na América do Sul, recobrendo cerca de 917.000 km² (Figura 1) da Bacia do Paraná (Frank *et al.*, 2009).

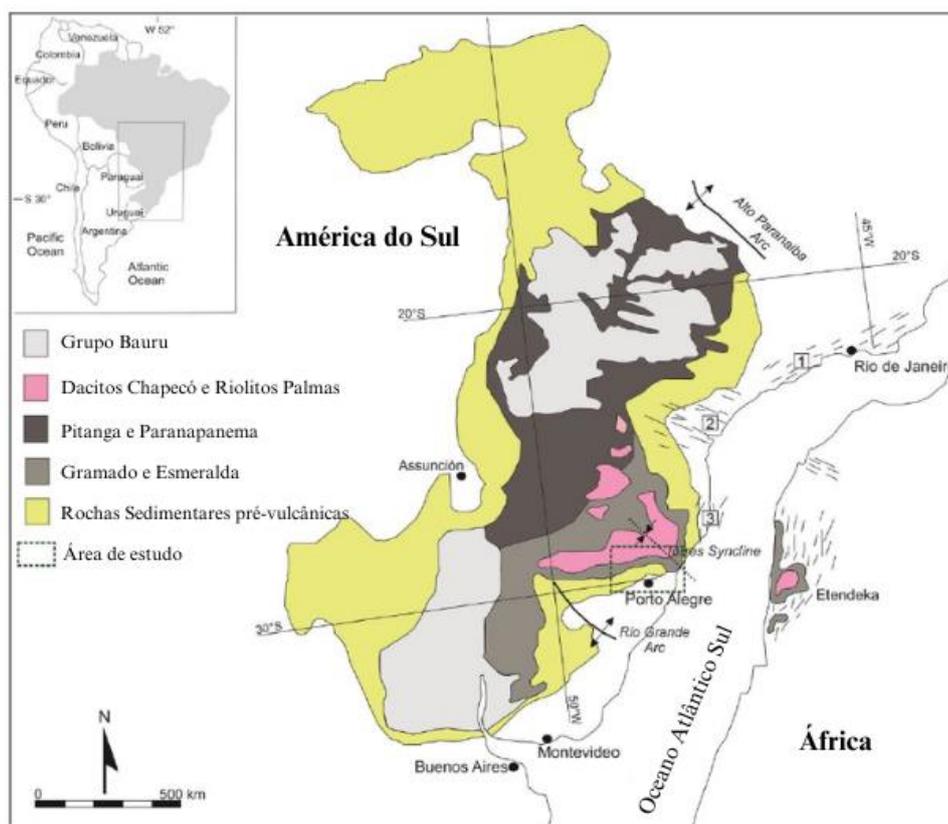


Figura 1 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, com distribuição das unidades e principais estruturas tectônicas (modificado de Sarmento *et al.*, 2017). Enxame de diques: 1-Ponta Grossa, 2-Serra do Mar e 3-Florianópolis.

No Brasil, as rochas vulcânicas estão posicionadas sobre os arenitos eólicos da Formação Botucatu, na Bacia do Paraná (Scherer, 2002; Waichel *et al.*, 2008) e formam sucessões estratigráficas, pertencentes ao Grupo Serra Geral (Rossetti, *et al.*, 2018). Em termos geoquímico-estratigráficos, as unidades do Grupo Serra Geral são agrupadas em domínios da porção norte e porção sul da bacia (Peate *et al.*, 1992) (Figura 2). Na porção norte, ocorrem os magmas básicos do tipo Ribeira, Paranapanema e Pitanga e os ácidos do tipo Chapecó (Peate, 1997). Na porção sul, predominam os magmas básicos do tipo Gramado, na base, e Esmeralda, no topo, intercalados por magma ácido do tipo Palmas. As lavas basálticas do tipo Urubici, que ocorrem em uma porção de ~100km x 350km, são contemporâneas e intercaladas com o tipo Gramado (Peate *et al.*, 1999).

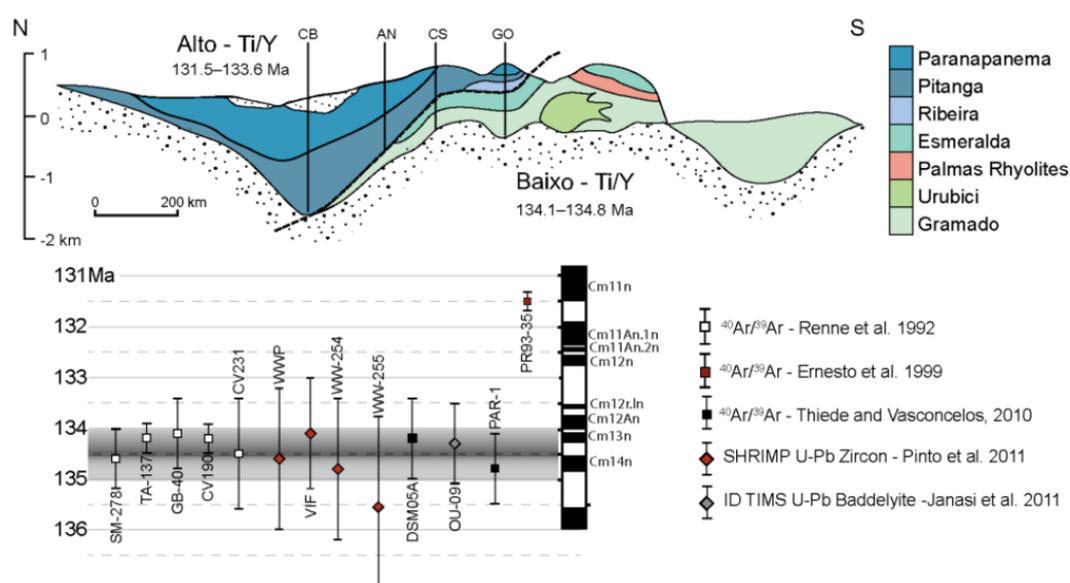


Figura 2 - Mapa de distribuição regional, segundo classificação de Peate et al. (1992) e Peate (1997), com as principais datações radiométricas das rochas. (modificado de Rossetti et al., 2018).

2.1.2 Grupo Serra Geral

Recentemente, Rossetti *et al.*, (2018) sugeriram uma nova proposta estratigráfica para as ocorrências vinculadas à calha de Torres, na porção Sul da Bacia do Paraná, com base em métodos petrofísicos e associação de fácies, agruparam as rochas da sucessão vulcânica em quatro unidades denominadas

estratigraficamente como Formação Torres, Formação Vale do Sol, Formação Palmas e Formação Esmeralda (Figura 3).

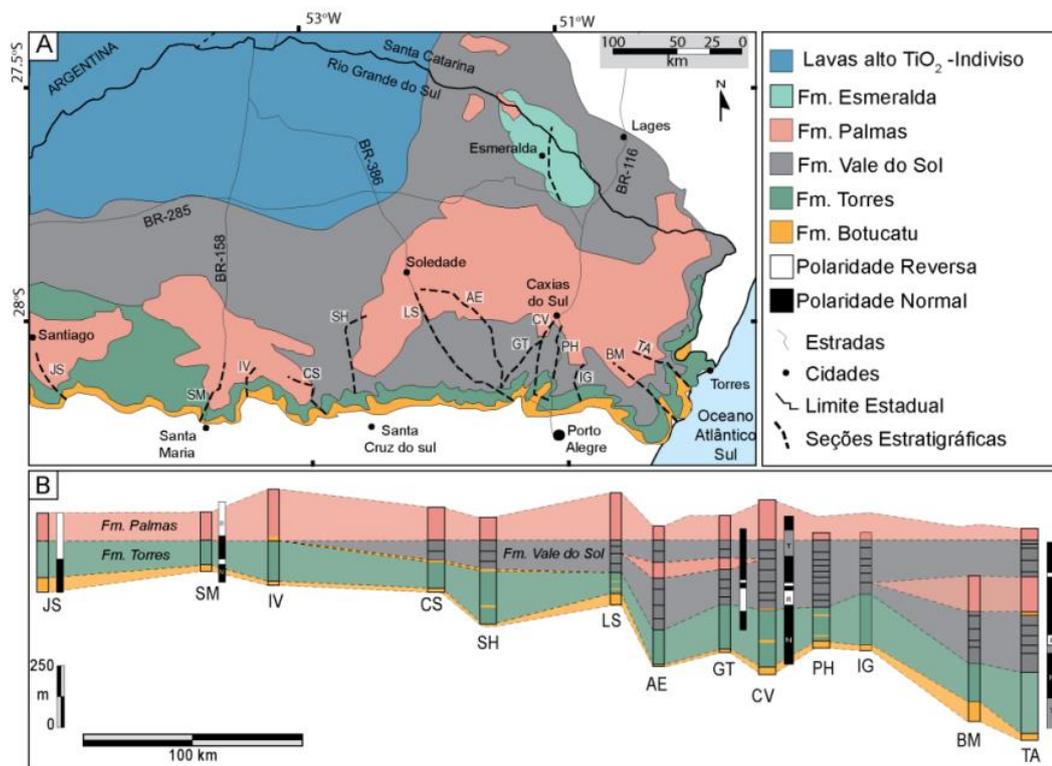


Figura 3 - Mapa geológico da área de estudo, na porção sul da PBC Paraná-Etendeka, de Rossetti et al., (2018). A) Principais seções estratigráficas do estudo. B) Empilhamento estratigráfico das seções. (modificado de Rossetti et al., 2018).

A Formação Torres tem composição basáltica e basáltica andesítica, na forma de derrames *pahoehoe* com arquitetura anastomosada. A Formação Vale do Sol possui andesitos basálticos em forma de derrames tabulares (*sheet like*) e morfologia do tipo *rubbly pahoehoe*. É comum, no contato entre essas formações, encontrar camadas, geralmente pouco espessas, de arenitos, as quais representam uma mudança da atividade vulcânica, que resultou em tempo suficiente para a deposição sedimentar. Seguindo, tem-se a Formação Palmas, com magmas ácidos do tipo dacito e riolito, de formato tabular. A Formação Esmeralda finaliza os derrames com basaltos da forma *pahoehoe*, semelhantes à Formação Torres.

2.1.3 Intrusões do Grupo Serra Geral

Associados aos derrames do Grupo Serra Geral (GSG), ocorrem intrusões de rochas básicas toleíticas que vêm sendo estudadas, pois podem representar o sistema de condutos magmáticos que alimentaram as lavas em superfície (Acosta, 2021; Florisbal *et al.* 2018; Rossetti *et al.* 2018, 2021; Sarmiento *et al.*, 2017, 2020). O volume referente a esses corpos intrusivos é de aproximadamente 112.000 km³, estando, em sua maioria, encaixadas nos sedimentos paleozoicos da Bacia do Paraná (Frank *et al.*, 2009). São relativamente abundantes em toda sua extensão, embora ocorram com maior concentração no limite leste (Almeida, 1986; Zalán *et al.*, 1985). Os corpos do tipo dique não possuem uma estimativa de dimensão.

Muitas vezes, estas intrusões estão agrupadas na forma de enxames de diques, cujas ocorrências têm maior concentração nos estados de Paraná (enxame de diques de Ponta Grossa), Santa Catarina (enxame de diques de Florianópolis), São Paulo e Rio de Janeiro (enxame de diques da Serra do Mar) e Mato Grosso do Sul.

Os diques associados à Calha de Torres, no Rio Grande do Sul, não apresentam características de um enxame. São intrusivos nos sedimentos da Bacia do Paraná e nos derrames basais do GSG. Possuem uma direção preferencial NE-SW, coincidindo com os lineamentos tectono-magmáticos desenvolvidos durante a abertura do Oceano Atlântico, sugerindo então, que esses corpos estão diretamente relacionados aos condutos que alimentaram os derrames do GSG (Sarmiento *et al.*, 2017). Os diques que intrudem apenas os derrames, possuem direção preferencial NW-SE, semelhante às direções dos diques do Arco de Ponta Grossa, tendo, possivelmente, servindo como canais alimentadores dos derrames superiores (Sarmiento *et al.*, 2017).

2.2 Geomagnetismo

2.2.1 Definições básicas

Para uma melhor compreensão dos dados que serão discutidos nesta monografia, é importante revisar os conceitos básicos de momento dipolar magnético,

magnetização e campo magnético, pois eles estão diretamente relacionados aos estudos de magnetismo aplicados às geociências.

O momento dipolar magnético M é definido como sendo um par de cargas magnéticas, em que a magnitude da carga e a distância infinitesimal separam a carga positiva da negativa (Butler, 1992).

A magnetização J é a soma de todos os momentos dipolares magnéticos do material em um determinado volume, podendo ser induzida, quando exposta a um campo magnético posterior, ou remanente, que será explicada mais adiante (Butler, 1992).

O campo magnético da Terra H é produzido a partir de um geodínamo presente no núcleo externo do planeta, que funciona a partir de células convectivas rápidas, devido a energia gerada pela sua composição de ferro, níquel e outros elementos mais leves não conhecidos (Biggin *et al.*, 2012). Atualmente, o eixo do campo magnético encontra-se inclinado cerca de $\sim 12^\circ$ em relação ao eixo de rotação da Terra (Figura 4), mas nem sempre foi assim (Butler, 1992). Essa inclinação se deve principalmente à componente não dipolar do campo geomagnético (Hartmann e Pacca, 2009). Através das anomalias magnéticas do assoalho oceânico descobertas após a Segunda Guerra Mundial, foi possível estudar e comprovar que o campo magnético da Terra sofre um processo de reversão de orientação dos polos em até 180° . Convencionalmente, de 0° a $+90^\circ$ o campo é normal, igual o atual, e de 0° a -90° o campo é inverso.

Para o entendimento do paleomagnetismo, são fundamentais os conceitos que descrevem a direção do campo geomagnético da Terra, sendo eles a declinação, que é o ângulo azimutal entre o norte geográfico e a componente horizontal do campo (norte magnético) e a inclinação, que é o ângulo vertical entre a componente horizontal do campo e o vetor geomagnético (positivo para baixo) (Butler, 1992)

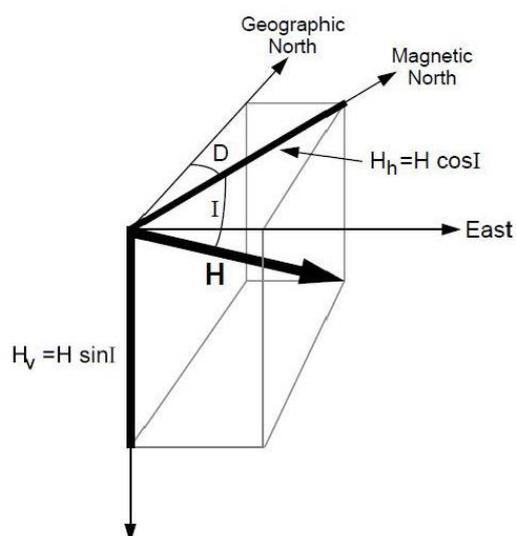


Figura 4 - Representação do campo geomagnético terrestre e suas componentes (Butler, 1992).

O campo magnético terrestre apresenta variações ao longo do tempo geológico, modificando-se em questão de segundos ou até milhões de anos. As variações rápidas do campo geomagnético estão associadas ao campo externo da Terra principalmente influenciado pela interação do campo magnético do sol e a magnetosfera da Terra. Já as variações de longo período (secular, excursões geomagnéticas e reversões) são associadas ao campo interno, gerado pelo núcleo externo da Terra, cobrindo intervalos de tempo da ordem de décadas a milhões de anos, sendo essas bem conhecidas para os últimos 160 Ma (Figura 5) (Butler, 1992).

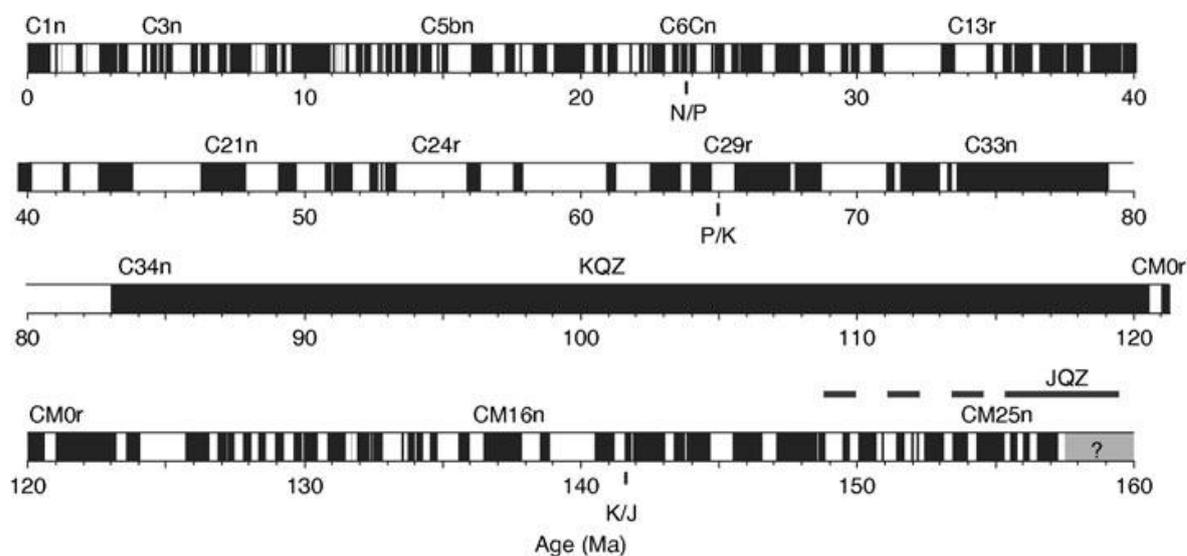


Figura 5 - *Geomagnetic polarity timescale* (GPTS), baseada nas anomalias magnéticas marinhas entre 0–160 Ma (retirado de Hulot *et al.*, 2010).

A partir de uma direção de magnetização detectada nas rochas (direção paleomagnética média (I_m , D_m), situada num sítio de coordenadas (λ_s , φ_s), é possível calcular a posição do polo geomagnético virtual (PGV) (Butler, 1992).

2.2.2 Propriedades magnéticas dos sólidos

Os materiais sólidos apresentam três tipos de comportamentos quando são aplicados a um campo magnético H : diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos (Figura 6) (Butler, 1992). Os diamagnéticos apresentam uma fraca magnetização induzida, no sentido oposto ao campo aplicado, e quando este é retirado, a magnetização volta a zero. Alguns exemplos de minerais diamagnéticos são o quartzo, a calcita e a apatita. Os paramagnéticos adquirem magnetização induzida paralela ao campo aplicado e seus momentos magnéticos não possuem interação entre si, mas se apresentam alinhados devido ao torque imposto pelo campo aplicado nas camadas eletrônicas incompletas, porém, se o campo for retirado, a magnetização volta a zero. Um exemplo de material paramagnético é a olivina, o anfibólio e a biotita. Já os ferromagnéticos são materiais com susceptibilidade magnética muito forte, em que os *spins* dos elétrons se mantêm alinhados com igual direção e sentido, mesmo se o campo for retirado. São eles o ferro, o níquel e o cobalto. Quando um cristal, com propriedades ferromagnéticas, é exposto a uma determinada temperatura, perde a sua magnetização e adquire características paramagnéticas. Esse processo é o que chamamos de Temperatura de Curie. Quando um mineral apresenta seus *spins* com direção e intensidade iguais, mas em sentido oposto, chamamo-lo de antiferromagnético. Nesse caso, a susceptibilidade é fraca e positiva e quando o cristal atinge sua temperatura de Néel, perde as características antiferromagnéticas e se comporta como um material paramagnético. Um exemplo é a ilmenita e o óxido de manganês. Há, ainda, os ferrimagnéticos, que possuem direção e sentido opostos e intensidades diferentes, que resultam em um momento magnético paralelo ao campo magnético atual. São exemplos: a magnetita, a titanomagnetita e o óxido de ferro III (Tauxer, *et al.*, 2018)

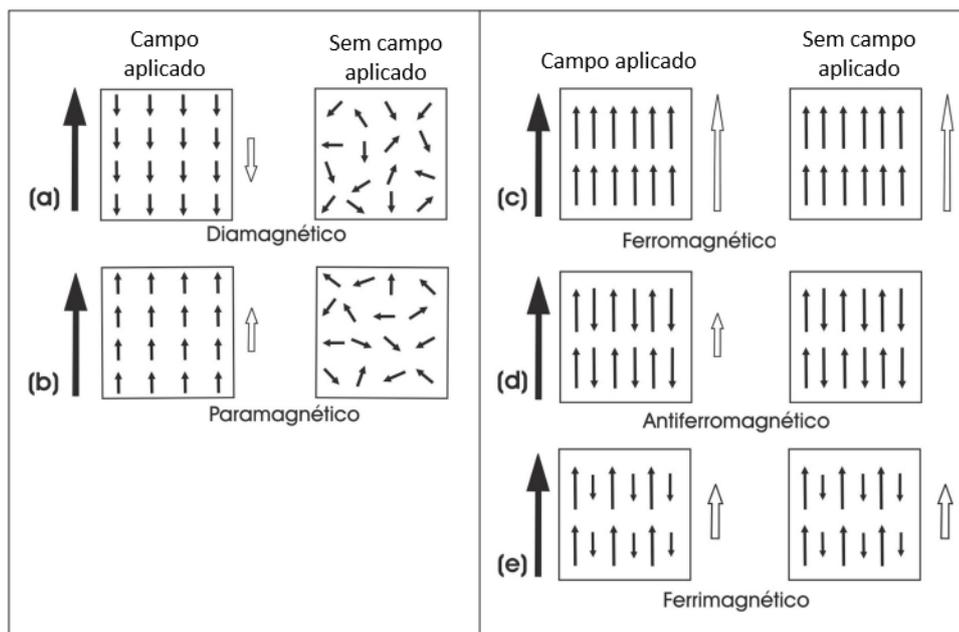


Figura 6 – Diferentes comportamentos magnéticos, em que as setas de cor preta, fora dos diagramas, representam o campo aplicado e as setas vazias a magnetização adquirida pelo material. Dentro dos diagramas, as setas mostram a orientação dos *spins* (modificado de Tarling & Hrouda, 1993).

2.2.3 Mineralogia magnética

A maioria dos estudos paleomagnéticos leva em consideração a quantidade de ferro que os minerais apresentam, visto que esse é o elemento magnético mais abundante no Sistema Solar.

Os óxidos de ferro são minerais, principalmente, formados por soluções sólidas, o que implica em uma estrutura cristalina homogênea, na qual pode haver substituição dos átomos e moléculas, sem alteração da estrutura. Um exemplo é o titânio que substitui o ferro e, por ter um tamanho diferente e não possuir spins desemparelhados, resulta em propriedades magnéticas diferentes quando comparada a titanomagnetita com a magnetita, por exemplo. Esses minerais são estudados em diagramas ternários (Figura 7), em que duas séries de soluções sólidas são destacadas: titanomagnetita e titanohematita (Dunlop e Özdemir, 1997).

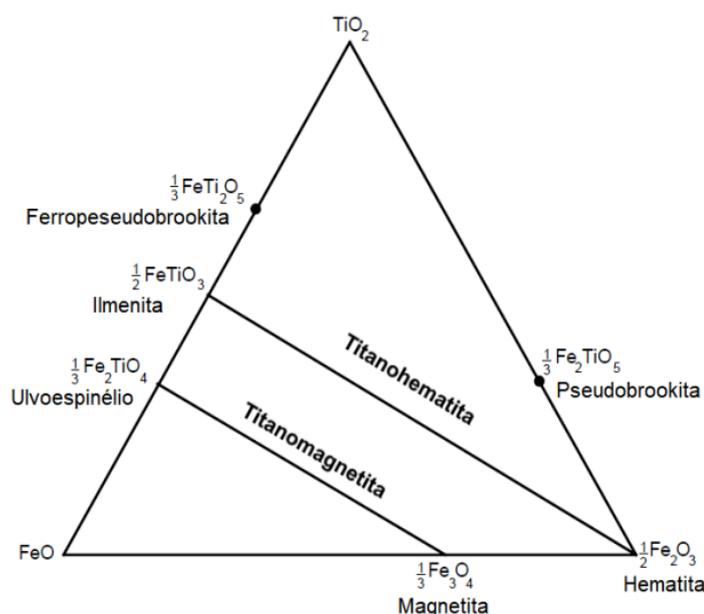


Figura 7 - Diagrama ternário FeO-Fe₂O₃-TiO₃, contendo as soluções sólidas de titanohematita e titanomagnetita (modificado de Butler, 1992).

2.2.4 Magnetização remanente

Os materiais ferromagnéticos possuem capacidade de reter a magnetização adquirida por um campo mesmo quando este for retirado. Essa magnetização é conhecida como remanente. Através do ciclo de histerese, é possível determinar a coercividade (capacidade de reter magnetização) dos minerais ferromagnéticos. Esta é controlada pelo tamanho dos grãos e seu aumento é responsável pela criação dos domínios magnéticos no interior do grão (Figura 8). Grãos de magnetita com diâmetro $d > 10 \mu\text{m}$ se dividem em domínios, formando grãos conhecidos como multidomínios (MD), enquanto grãos com aproximadamente $d < 10 \mu\text{m}$ terão apenas um domínio, sendo chamados de domínio simples (SD). Existem ainda grãos conhecidos como pseudo domínio simples (PSD), que são grãos multidomínio que foram subdivididos, por exemplo, por lamelas de ilmenita na magnetita durante oxidação deutérica de alta temperatura. Os grãos do tipo SD são os que têm maior coercividade e retêm a magnetização de forma mais estável, sendo desejado para os estudos paleomagnéticos. Já os grãos do tipo MD têm baixa coercividade e estão mais sujeitos a adquirir componentes secundárias de magnetização (Tauxer *et al.*, 2018).

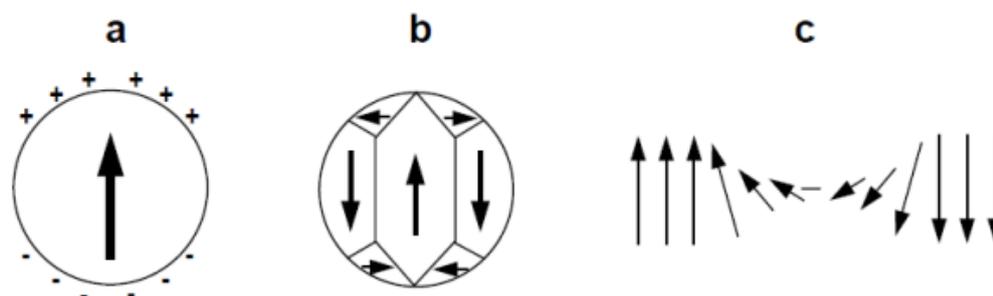


Figura 8 - Domínios magnéticos. (a) Material ferromagnético esférico uniformemente magnetizado; (b) Material ferromagnético dividido em domínios; (c) Parede de domínios em que uma magnetização rotaciona para outra adjacente (modificado de Butler, 1992)

Quando se mede a magnetização diretamente na rocha, tem-se o que chamamos de magnetização remanente natural (MRN), na qual soma-se as componentes primárias e secundárias (adquiridas posteriormente).

2.2.5 Paleomagnetismo

Com o objetivo de adquirir a magnetização primária da rocha (quando essa se cristalizou) é necessário remover as componentes secundárias que foram impostas posteriormente (Tauxer *et al.*, 2018). Para isso, é necessário a utilização de técnicas de desmagnetização que auxiliam na separação da magnetização remanente característica (ChRM) das amostras, podendo ser por campos alternados (AF) e térmica.

A técnica AF consiste em submeter a amostra em um campo magnético alternado, de intensidade H , que possui forma de onda senoidal e decresce com o tempo (Butler, 1992). Esse processo é repetido diversas vezes com o aumento do valor e a sucessiva medida da magnetização a cada passo. Com isso, os minerais que possuírem coercividade menor que essa intensidade serão desmagnetizados e os que possuírem maior, preservam a magnetização remanente, que é medida. Essa magnetização pode ter variação na direção a cada mudança de valor induzido, porém, se permanecer estável acima do valor de pico, significa que já está sendo lida a magnetização primária da rocha.

Para análise dos dados, utiliza-se projeções estereográficas e diagramas de componentes vetoriais de *Zijderveld* (1967), o qual mostra informações direcionais e escalares através da projeção dos vetores de magnetização em dois planos ortogonais (Figura 9). Após, escolhe-se as medidas que melhor desenvolvem uma linha para analisar a componente principal da rocha, utilizando o método de *Kishirvink* (1980).

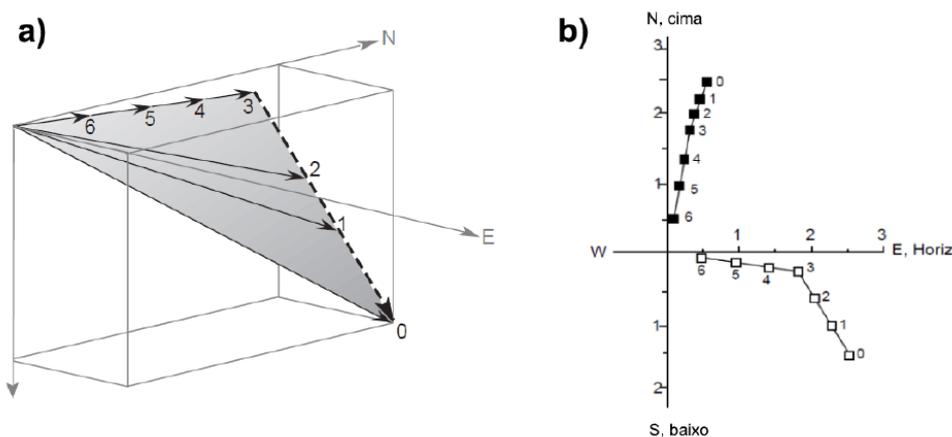


Figura 9 - Análise de magnetização remanente característica, durante os passos de desmagnetização, em que se obtêm a melhor linha representativa. (a) Comportamento tridimensional da desmagnetização; (b) Diagrama de *Zijderveld* (modificado de Butler, 1992)

Os dados de direção e inclinação obtidos por espécime são tratados através do método estatístico. O mais usual no paleomagnetismo é a estatística por grupo de *Fisher* (1953), que utiliza a probabilidade por unidade de área para se obter uma direção dentro de uma área angular, através da média. Sendo assim, faz-se uma estatística dos dados obtidos para cada sítio. Esse valor médio obtido nos permite calcular o polo do campo magnético na cristalização da rocha. Esse cálculo utiliza a trigonometria esférica para determinar a distância entre a localidade de observação e o polo. Por convenção, as latitudes negativas são para o sul e as positivas para norte, enquanto para as longitudes, são positivas para leste e negativas para oeste.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados durante a execução do projeto, o qual foi dividido em quatro principais etapas, com base no diagrama abaixo (Figura 10).

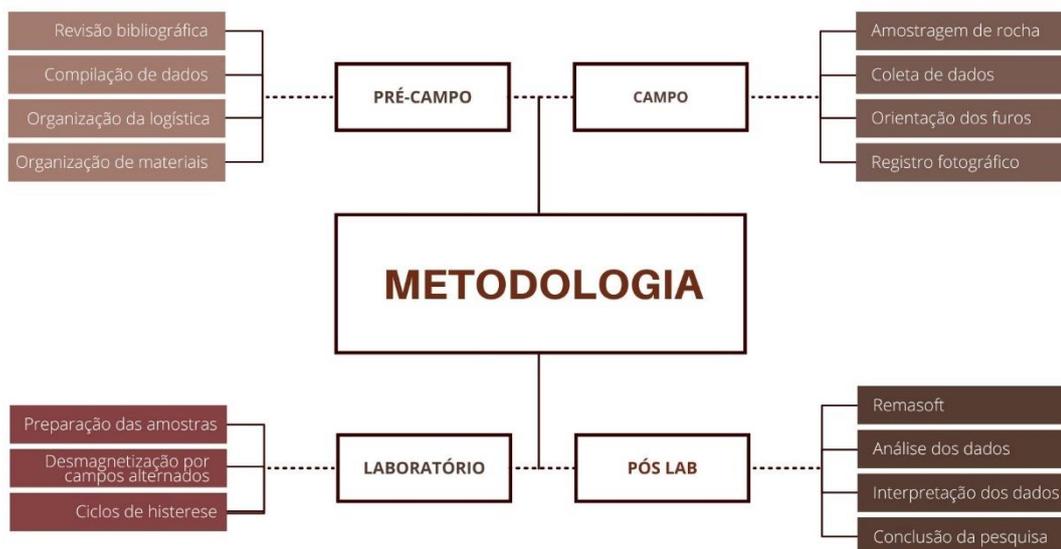


Figura 10 – Diagrama da metodologia demonstrando as quatro principais etapas realizadas durante a execução do projeto e seus principais sub itens.

3.1 Etapa de pré-campo

Nessa etapa, desenvolveu-se a revisão bibliográfica da área de estudo, envolvendo múltiplas informações geológicas, bem como outras pesquisas já realizadas na área, as quais foram correlacionadas à região do estudo.

Os corpos de diques e soleiras amostrados e analisados nesse projeto foram anteriormente mapeados e estudados geoquimicamente por Sarmento *et al.*, (2020).

A organização anterior ao trabalho de campo deu-se por traçar a rota dos dias, construção dos mapas de localização e preparação dos materiais necessários.

Os materiais necessários para o campo consistiram em equipamentos de EPI, GPS para localização e câmera fotográfica. Para amostragem, foi utilizada uma perfuratriz adaptada, brocas cilíndricas com ponteira diamantada, bomba de água,

chaves de fenda e boca regulável e óleo solúvel biodegradável. Para medição da orientação da amostra, utilizou-se bússola magnética adaptada. A marcação dos cilindros deve ser identificada em campo, portanto, levou-se também canetas azuis e pretas, tubo adaptado para marcação e cola bonder para quando os cilindros saíam fraturados. O abastecimento de água para a bomba foi feito diariamente, pois os pontos eram localizados sempre próximos à postos de combustíveis.

3.2 Etapa de campo

O campo foi realizado nos dias 28 a 31 de julho de 2022 e abrangeu os municípios de Terra de Areia, Três Cachoeiras, Dom Pedro de Alcântara, Torres e Caxias do Sul, todos situados no estado do Rio Grande do Sul (Figura 11).

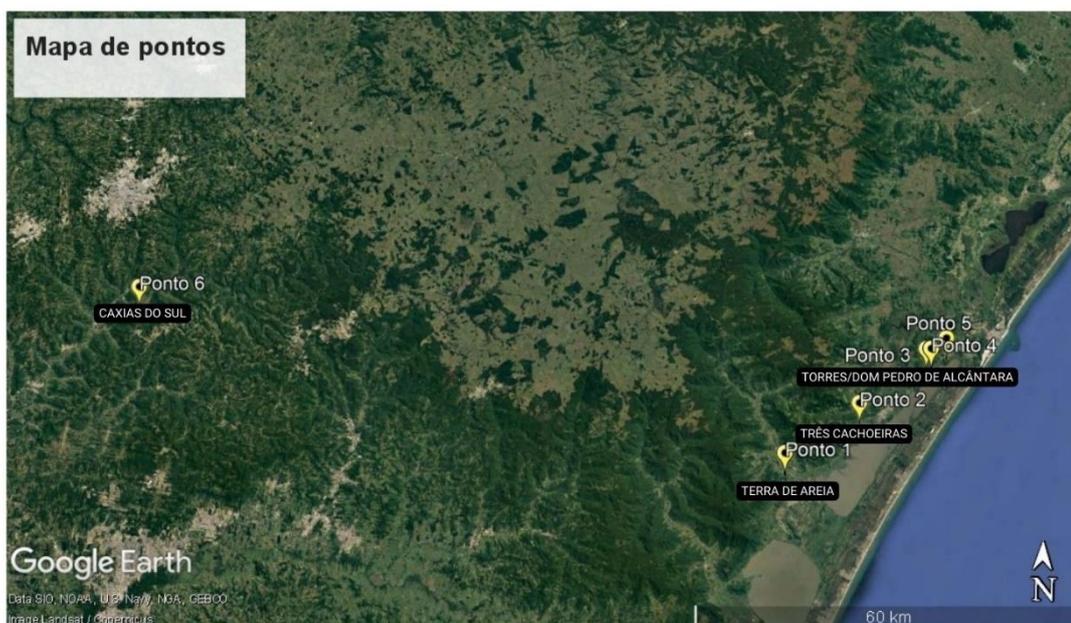


Figura 11 - Mapa de localização dos pontos visitados durante o trabalho de campo.

A logística de campo ocorreu com saída do Instituto de Geociências da UFRGS, localizado no Campus do Vale, Avenida Bento Gonçalves, bairro Agronomia, Porto Alegre/RS, seguindo-se em direção a ERS 118, onde percorreu-se cerca de 14km até a BR-290, em que se seguiu por mais 73km e acessou-se a BR-101 por mais 41km até a cidade de Terra de Areia, onde localizava-se o primeiro ponto, denominado de PDS-01 (Figura 12).

muitos minerais magnéticos. Esses cilindros, os quais são nomeados de sítios (Figura 13d), possuem 2,5cm de diâmetro.

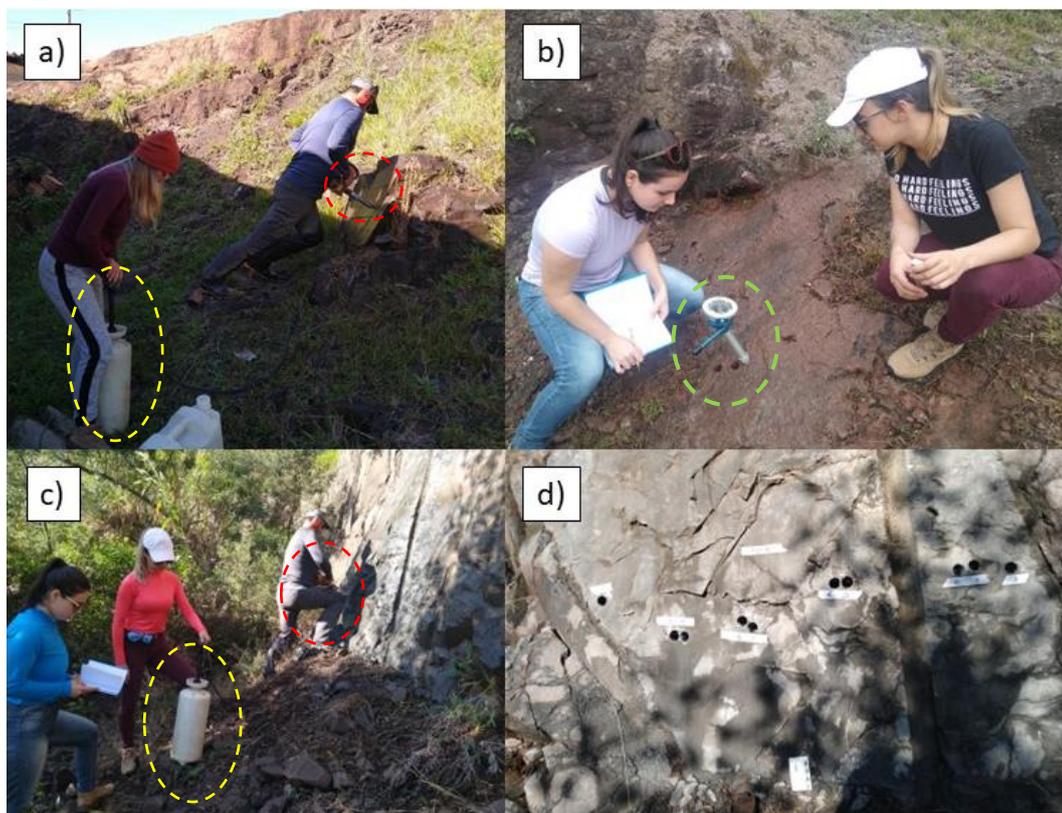


Figura 13 - Realização do trabalho de campo. **a)** e **c)** amostragem com perfuratriz portátil e broca diamantada, demonstrada no círculo vermelho. Em amarelo, a bomba acoplada com água e óleo lubrificante. **b)** orientação dos cilindros com bússola adaptada, em verde. **d)** Sítio amostrado, no qual cada furo corresponde a um cilindro.

Foram amostrados 19 sítios, resultando em 149 cilindros. As informações completas podem ser consultadas em ANEXOS. O Quadro 1 apresenta um resumo da amostragem, a qual foi separada em quatro grupos, conforme as localizações dos furos, a fim de facilitar a compreensão e análise dos dados posteriormente.

Quadro 1 - Resumo dos sítios amostrados em campo

Sítio	Grupos	Tipologia
PDS-01	Terra de Areia	Dique
PDS-02	Terra de Areia	Rocha encaixante do sítio PDS-01
PDS-03	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Dique
PDS-04	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Rocha encaixante dos sítios PDS-03; PDS-05; PDS-06; PDS-12
PDS-05	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Dique

PDS-06	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Dique
PDS-07	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Soleira
PDS-08	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Dique sub vertical
PDS-09	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Provável soleira
PDS-10	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Rocha encaixante do sítio PDS-09
PDS-11	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Dique
PDS-12	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Dique
PDS-13	Três Cachoeiras	Dique
PDS-14	Três Cachoeiras	Rocha encaixante (arenito) do sítio PDS-13
PDS-15	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Sistema de diques
PDS-16	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Dique
PDS-17	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Rocha encaixante do sítio PDS-16
PDS-18	Caxias do Sul	Soleira
PDS-19	Caxias do Sul	Dique

3.3 Etapa de laboratório

A preparação das amostras, visando a obtenção dos dados paleomagnéticos realizada no Núcleo de Preparação de Amostras (CPGq) do Instituto de Geociências (IGEO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), no qual os sítios foram serrados em espécimes de 3cm. Após, foi necessário polir a base e o topo de algumas amostras que ficaram com alguns desníveis e cantos cortantes. Cada espécime foi identificado e orientado com marcador permanente azul ou preto (canetas vermelhas podem conter pigmentos de hematita) e embalados em papel filme, a fim de evitar possíveis contaminações na amostra. Ao todo, os 149 cilindros foram cortados em 418 espécimes

Após utilizou-se o Laboratório de Paleomagnetismo, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP) para a desmagnetização por campos alternados e análise da mineralogia magnética. Os trabalhos foram desenvolvidos entre os dias 30/10/2022 a 15/11/2022. Nesse laboratório, há uma sala magneticamente isolada, que abriga equipamentos sensíveis à presença do campo magnético da Terra. A sala proporciona aos pesquisadores caracterizar a remanência das rochas sem interferência do campo magnético ambiente. Os equipamentos utilizados foram: desmagnetizador por campos alternados (LDA 5), da AGICO (Figura 14c); que atinge campos magnéticos com até

150 militesla(mT) e que é programado por *software* e o magnetômetro giratório de velocidade dupla (JR-6A) da AGICO (Figura 14b), que possibilita fazer as medições do campo magnético nas amostras, o qual é programado também por *software* (Figura 14a).

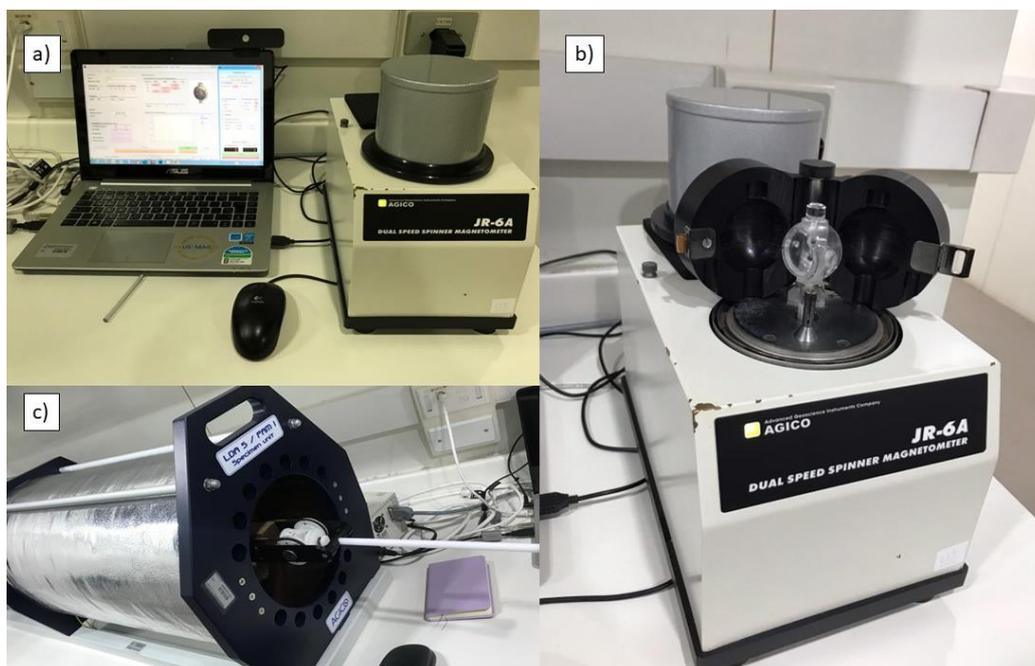


Figura 14 - Equipamentos utilizados para desmagnetização por campos alternados. Em a) computador com o software utilizado na tela e JR-6 realizando a medida; b) Equipamento JR-6 demonstrando o *holder* transparente, onde é colocada as amostras para leitura da magnetização; c) Equipamento LDA 5, o qual realiza a desmagnetização por campos alternados

A determinação da declinação e inclinação do campo geomagnético nas amostras estudadas são determinadas através das análises de componentes principais (Kirshvink, 1980). A qualidade de cada medida é avaliada através do erro associado (dispersão angular – MAD) utilizando a estatística por grupo de *Fisher* (1953). Esta estatística baseia-se em uma distribuição gaussiana de direções (Butler, 1992).

A média R das direções é calculada através de uma soma vetorial e a relação entre vetor resultante e os N vetores é avaliada pela dispersão da população de direções, dados pela seguinte equação:

$$k = \frac{N-1}{N-R} \quad (1)$$

onde o agrupamento se dá pelo maior valor de κ (Butler, 1992).

Com a estimativa de κ , pode-se obter a estimativa do elipsóide de confiança de 95% (α_{95}), conforma a equação 2:

$$\alpha_{95} \cong \frac{140}{\sqrt{kN}} \quad (2)$$

Quando a distribuição de direções (que apresenta simetria circular) é convertida em distribuição dos polos geomagnéticos virtuais (PGVs), essa nova distribuição passa a apresentar simetria elíptica. O limite de confiança $\alpha_{95}\%$ passa a ser considerado como uma elipse de confiança.

Os resultados do processo de desmagnetização são visualizados em projeção triortogonal (Zijderveld, 1967). Os diagramas de *Zijderveld* identificam as componentes de magnetização, separando as diferentes componentes direcionais (Butler, 1992).

Os sítios analisados foram PDS-05, PDS-09, PDS-11, PDS-12, PDS-13, PDS-15, PDS-16, PDS-17 e PDS-18. Os demais sítios tiveram um problema de diâmetro durante a amostragem. Tal problema foi identificado somente quando as amostras já estavam no laboratório, em São Paulo. Por estarem maiores que o equipamento de análise, tiveram que ser deixadas de lado nesse estudo.

A análise da mineralogia magnética é realizada através de ciclos de histerese. O método consiste na indução de um campo magnético em um material ferromagnético, o qual parte com uma magnetização inicial J_i (e.g., Dunlop & Özdemir, 1997). Conforme o campo é aplicado, os domínios magnéticos vão se alinhando paralelos a ele (Dunlop & Özdemir, 1997; Tauxe, 2008) até chegarem em um ponto P_1 (Figura 15) que, mesmo induzindo mais campo, a magnetização não se altera (magnetização de saturação J_s). A partir daí, o campo retorna a zero, porém, parte da magnetização fica retida (magnetização remanente J_r). Ao induzir o campo no sentido contrário ao inicial, o material vai perdendo a magnetização até zero em um ponto H_c , o qual é conhecido como coercividade, que identifica a dureza magnética, ou seja, a capacidade do material em reter magnetização (Roberts *et al.*, 1995; Tauxe *et al.*, 1996). Para chegar ao ponto de saturação P_2 , basta continuar induzindo o campo naquele sentido. O ciclo é completado quando a corrente é diminuída a zero, no ponto P_3 , e, em seguida, é aumentada até o ponto P_1 .

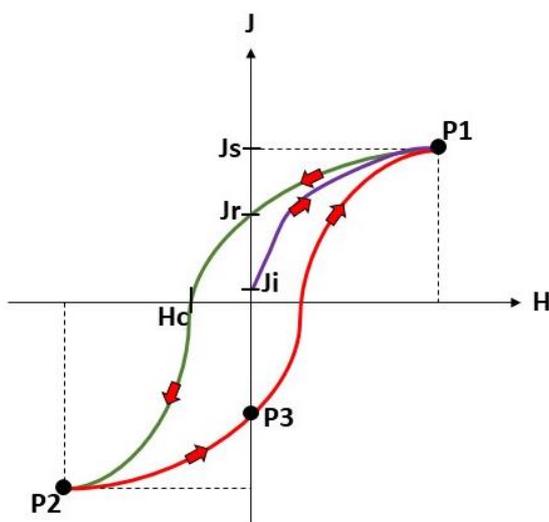


Figura 15 - Ciclo completo de histerese com as posições em que se encontram os parâmetros como magnetização de saturação (J_s), em P1, magnetização remanente de saturação (J_r) e coercividade (H_c) (Tauxer *et al.*, 2018).

Para a obtenção das curvas de histerese, utilizou-se o Magnetômetro VSM (*vibrating sample magnetometer*) MicroMag 3900, da marca *Lake Shore Cryotronics* (Figura 16), no Laboratório de Paleomagnetismo, da USP, com campos de até 1 Tesla ou até o ponto de saturação magnética da amostra. Os minerais com baixa coercividade (e.g. magnetita) saturam a campos induzidos baixos (<300 mT) e minerais com alta coercividade (e.g. hematita) saturam a campos que podem ultrapassar o limite do equipamento. Foram realizadas medidas de histerese em 15 sítios amostrados.



Figura 16 - Magnetômetro VSM (*vibrating sample magnetometer*) MicroMag3900 utilizado para aquisição das curvas de histerese. Extraído do site da fabricante do equipamento (*Lake Shore Cryotronics*).

3.4 Etapa pós-laboratório

Os dados de paleomagnetismo são analisados no *software Remasoft*, o qual apresenta as etapas de desmagnetização, diagramas vetoriais de *Zijderveld* (1967) e a projeção estereográfica de cada amostra. É no Remasoft também que se realiza a estatística por grupos de Fisher.

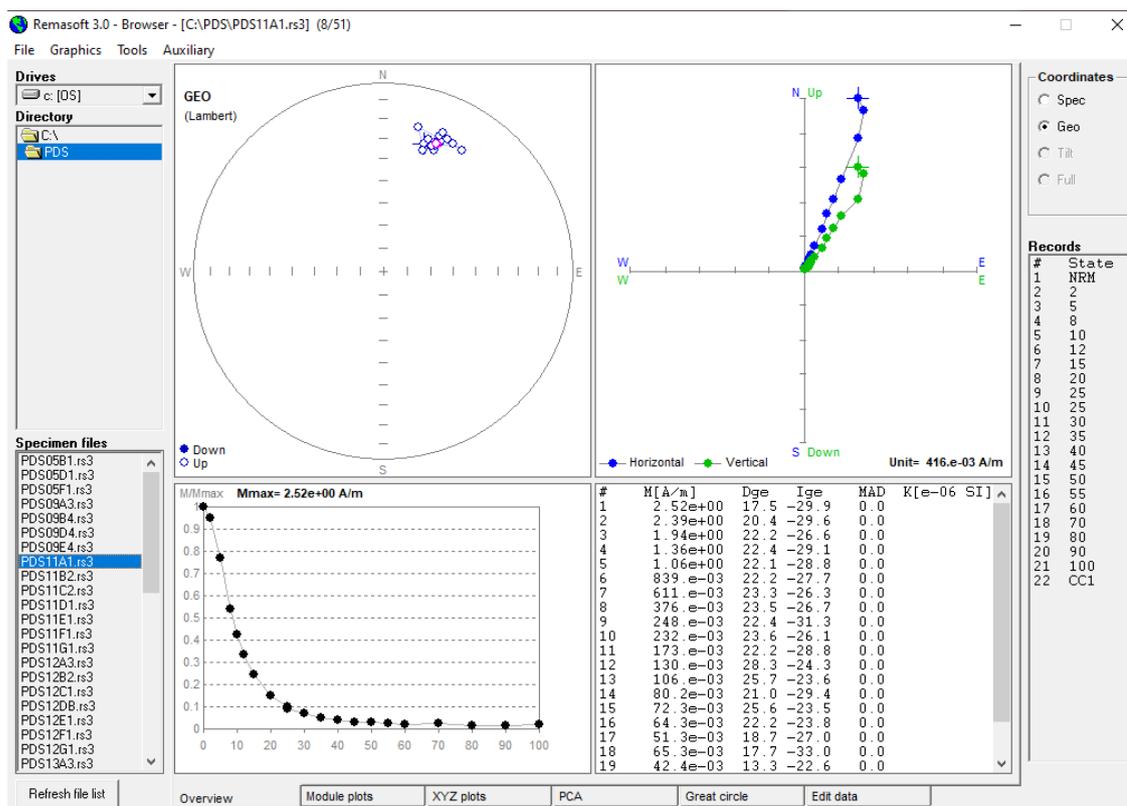


Figura 17 – Visualização dos dados de desmagnetização por campos alternados no Remasoft.

Para a obtenção das curvas de histerese, é necessário separar os dados obtidos no magnetômetro e gerar gráficos em curvas S utilizando, por exemplo, o *Excel*.

4. RESULTADOS

4.1 Desmagnetização por campos alternados

As componentes de magnetização que compõem a MRN foram determinadas através de processos de desmagnetização por etapas sucessivas, em campos magnéticos alternados (AF). A desmagnetização AF se mostrou bastante eficiente para a desmagnetização completa das amostras estudadas, visto que a magnetização é bastante estável e apresenta excelentes resultados para o cálculo das direções paleomagnéticas.

Foram feitas 20 etapas de desmagnetização, com os seguintes campos aplicados, em mT: 2, 5, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90 e 100. Os resultados das análises paleomagnéticas podem ser observadas na Tabela 1. Foram desmagnetizados ao menos três espécimes por sítio, totalizando cerca de 54 espécimes desmagnetizadas.

Tabela 1 - Dados paleomagnéticos obtidos através da desmagnetização por campos alternados

Site	N/m	Geographical coordinates		Site mean direction				VGP	
		Lat. (S)	Long. (W)	Dec (°)	Inc (°)	α_{95}	K	P long.(° E)	P lat.(° N)
PDS05	3/3	-29,39	-49,84	12,8	-62,8	11,7	112,75	99,2	72,0
PDS09	4/4	-29,37	-49,81	25,1	-36,4	5,4	292,97	65,5	24,1
PDS11	7/7	-29,37	-49,81	10,5	-45,6	9,9	38,41	80,5	28,6
PDS12	7/7	-29,37	-49,81	19,2	-67,6	5,2	136,02	101,4	68,3
PDS13	3/4	-29,47	-49,95	34,1	-73,2	17,5	50,92	69,1	70,0
PDS15	8/8	-29,39	-49,84	16,8	-39,6	3,8	213,11	19,5	73,4
PDS16	7/7	-29,39	-49,84	6,8	-54,7	8	57,44	87,4	81,8
PDS17	4/4	-29,39	-49,84	10	-42,4	9,7	90,43	14,1	79,8
PDS18	3/3	-29,33	-51,14	8,1	-54,3	5,9	443,07	79,3	81,2

4.1.1 Amostragem em Torres/Dom Pedro de Alcântara

Os sítios analisados nesse grupo foram o PDS-05, PDS-09, PDS-11, PDS-12, PDS-15, PDS-16 e PDS-17, sendo os dois últimos dique e encaixante, respectivamente.

A desmagnetização por campos alternados se mostrou efetiva em todos os diques analisados nesse grupo, chegando na desmagnetização total em campos de 60 mT (Figura 18). A rocha encaixante (PDS-17) do dique PDS-16 indicou uma retenção maior para desmagnetização (Figura 19), o que nos indica que essa rocha possui mineralogia com alta coercividade, e que precisa ser analisada por outro método, como, por exemplo, desmagnetização térmica, para chegar em sua total desmagnetização. A estatística por grupo de todos os sítios analisados nesse local deu inclinações positivas, mostrando que a polaridade das rochas é normal (Figura 20 e Figura 21).

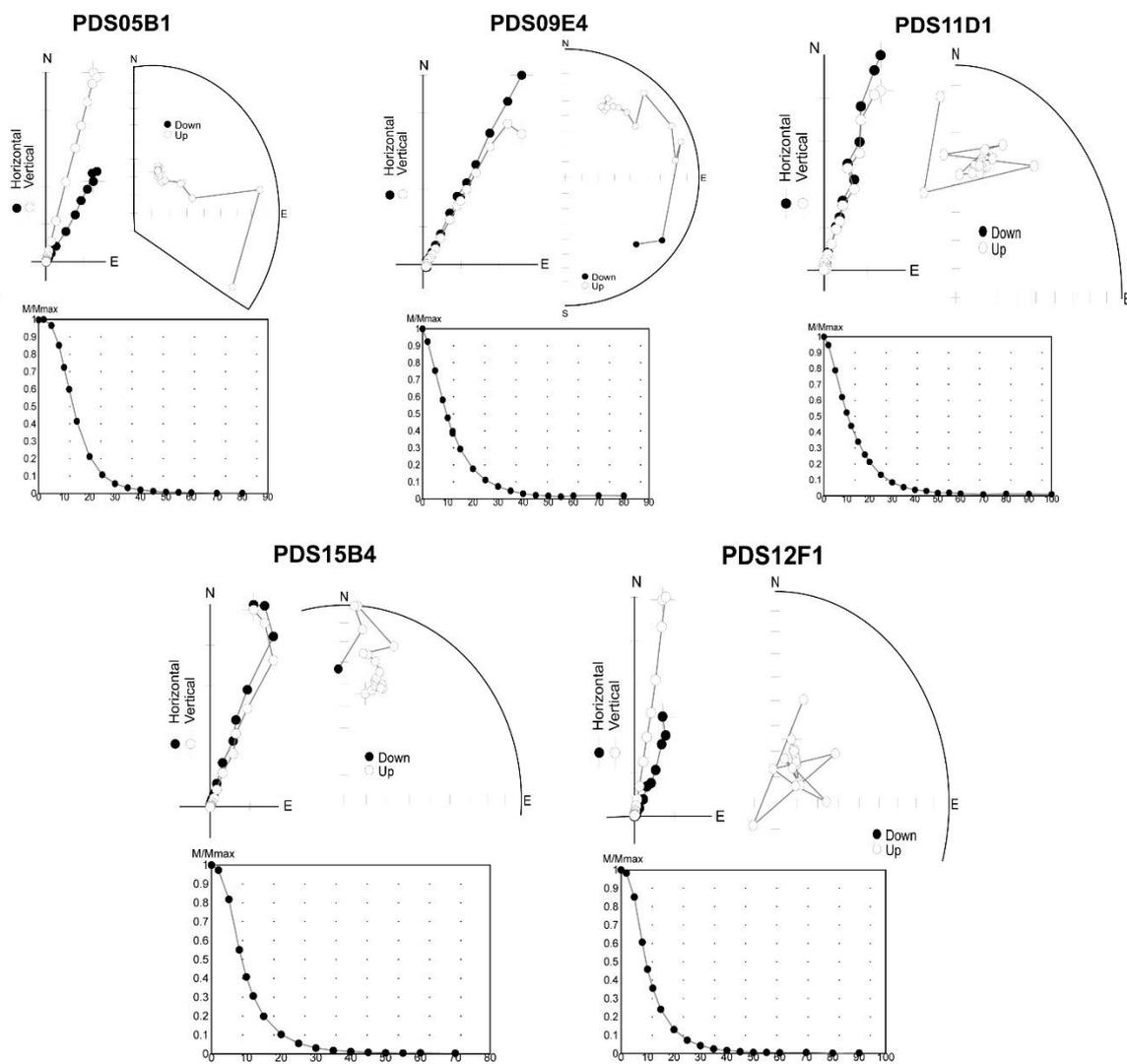


Figura 18 - Resultados paleomagnéticos das amostras analisadas, pelo Remasoft, mostrando o diagrama de desmagnetização, ortogonal (Zijderveld, 1967), e o estereograma. As amostras são desmagnetizadas totalmente em torno de 60 mT, resultando que, para essas amostras, a técnica é efetiva.

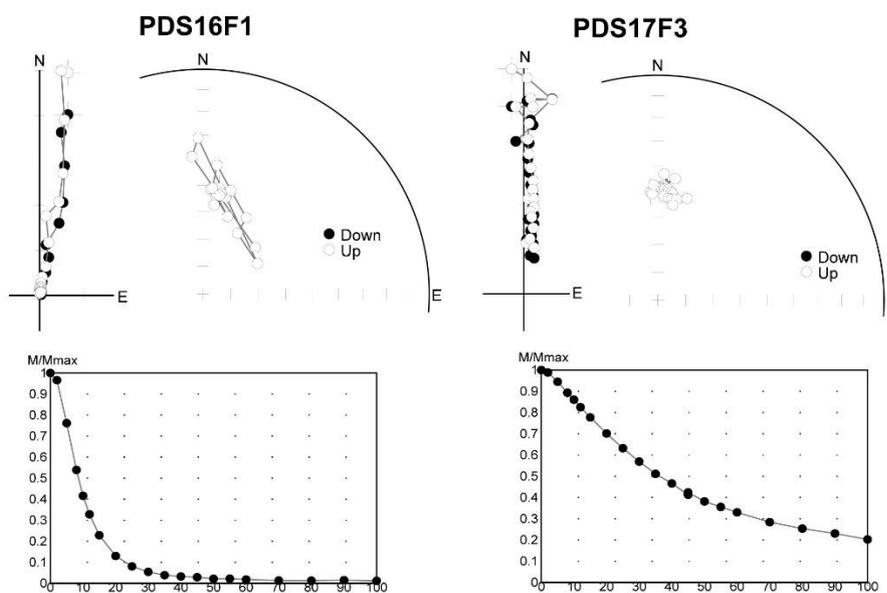


Figura 19 - Resultados paleomagnéticos, em AF, entre dique e a rocha encaixante, pelo Remasoft, mostrando que para o dique a técnica foi efetiva, porém, para a encaixante é necessário analisar esses sítios com outras técnicas, por exemplo, desmagnetização térmica.

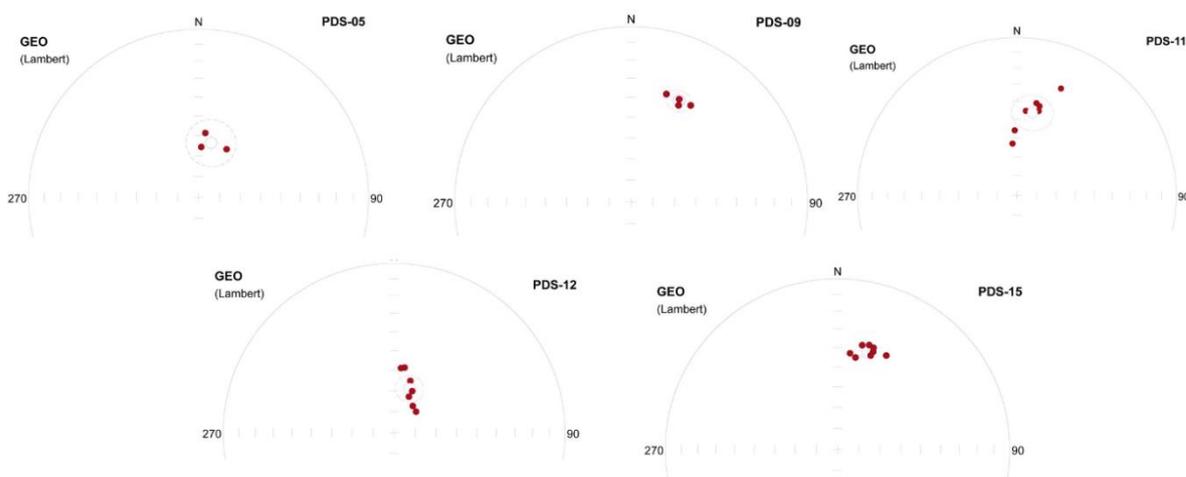


Figura 20 - Distribuição característica dos sítios de diques amostrados. Inclinações positivas mostram que a polaridade é normal.

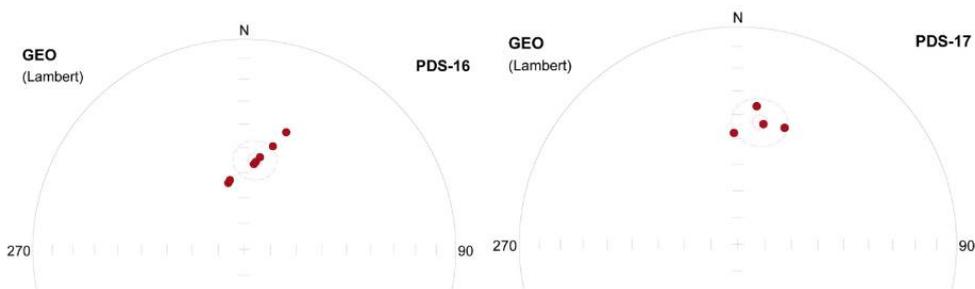


Figura 21 – Para dique e rocha encaixante também se observa inclinações positivas, mostrando que a polaridade é normal.

4.1.2 Amostragem em Três Cachoeiras

Nesse grupo, apenas o sítio PDS-13 foi analisado, pois a amostra do sítio PDS-14, por ser uma rocha sedimentar, precisa ser analisada com outros equipamentos, os quais estavam sendo utilizados por outros estudantes do laboratório.

A desmagnetização por campos alternados se mostrou parcialmente efetiva no PDS-13, desmagnetizando cerca de 93% da amostra em 50 mT (Figura 22a). Os outros 7% apresentam resistividade ao campo aplicado, indicando mineralogia de alta coercividade. Esse dique, portanto, apresenta mineralogia de baixa e alta coercividade. Para uma total desmagnetização, é necessário analisar esse sítio com desmagnetização térmica. A estatística por grupo desse sítio também apresentou inclinações positivas, resultando em polaridade normal (Figura 22b).

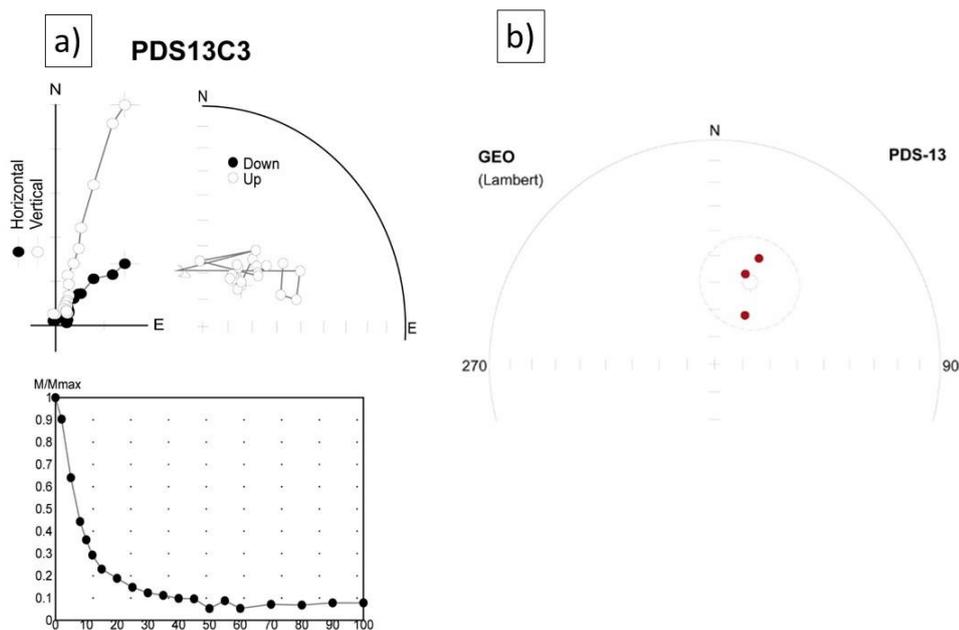


Figura 22 - Resultado paleomagnético, em AF, pelo Remasoft. Em a) tem-se a visualização de que a técnica AF desmagnetizou em torno de 93% da amostra, mas que ainda é necessário a utilização de desmagnetização térmica para a total desmagnetização da rocha. Em b) é possível observar a inclinação positiva para a estatística de dados, resultando em uma polaridade normal para o sítio PDS-13.

4.1.3 Amostragem em Caxias do Sul

Nesse grupo, apenas o sítio PDS-18 foi analisado. A desmagnetização por campos alternados nesse sítio se mostrou parcialmente efetiva, desmagnetizando cerca de 90% da amostra em 85 mT (Figura 23a). Os outros 10% da amostra demonstrou retenção ao campo aplicado, indicando mineralogia de alta coercividade. Esse dique, assim como o PDS-13, apresenta mineralogia de baixa e alta coercividade, sendo necessário também a análise por desmagnetização térmica. A estatística por grupo, assim como todos os sítios anteriores, apresentou inclinações positivas, resultando em polaridade normal (Figura 23b).

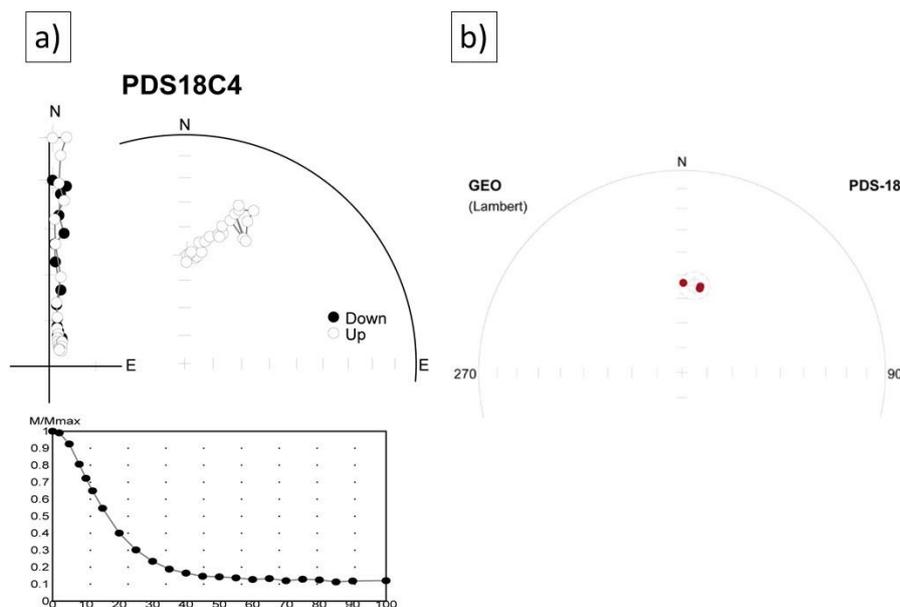


Figura 23 - Resultado paleomagnético, em AF, pelo Remasoft. Em a) tem-se a visualização de que a técnica AF desmagnetizou em torno de 90% da amostra, mas que ainda é necessário a utilização de desmagnetização térmica. Em b) é possível observar a inclinação positiva para a estatística de dados, resultando em uma polaridade normal para o sítio PDS-18.

4.2 Análise da Mineralogia Magnética

Ao todo, foram analisadas 17 amostras de 15 sítios, as quais serão descritas abaixo.

4.2.1 Amostragem em Torres/Dom Pedro de Alcântara

As análises das amostras coletadas mostraram que as curvas dos sítios PSD-03, PDS-06, PDS-07, PDS-08, PDS-09, PDS-11, PDS-15 e PDS-16 apresentam formatos e propriedades similares (Figura 24), com saturação abaixo de 300mT, indicando uma mineralogia composta por magnetita/titanomagnetita. No entanto, os sítios PDS-04 e PDS-17 apresentam curvas com maior resistência à saturação, em torno de 800mT, indicando uma mineralogia próxima à titanohematita/hematita. Além disso, o formato da curva é “cintura de vespa”, mostrando uma mistura de minerais de baixa e alta coercividade (Roberts *et al.*, 1995; Tauxe *et al.*, 1996).

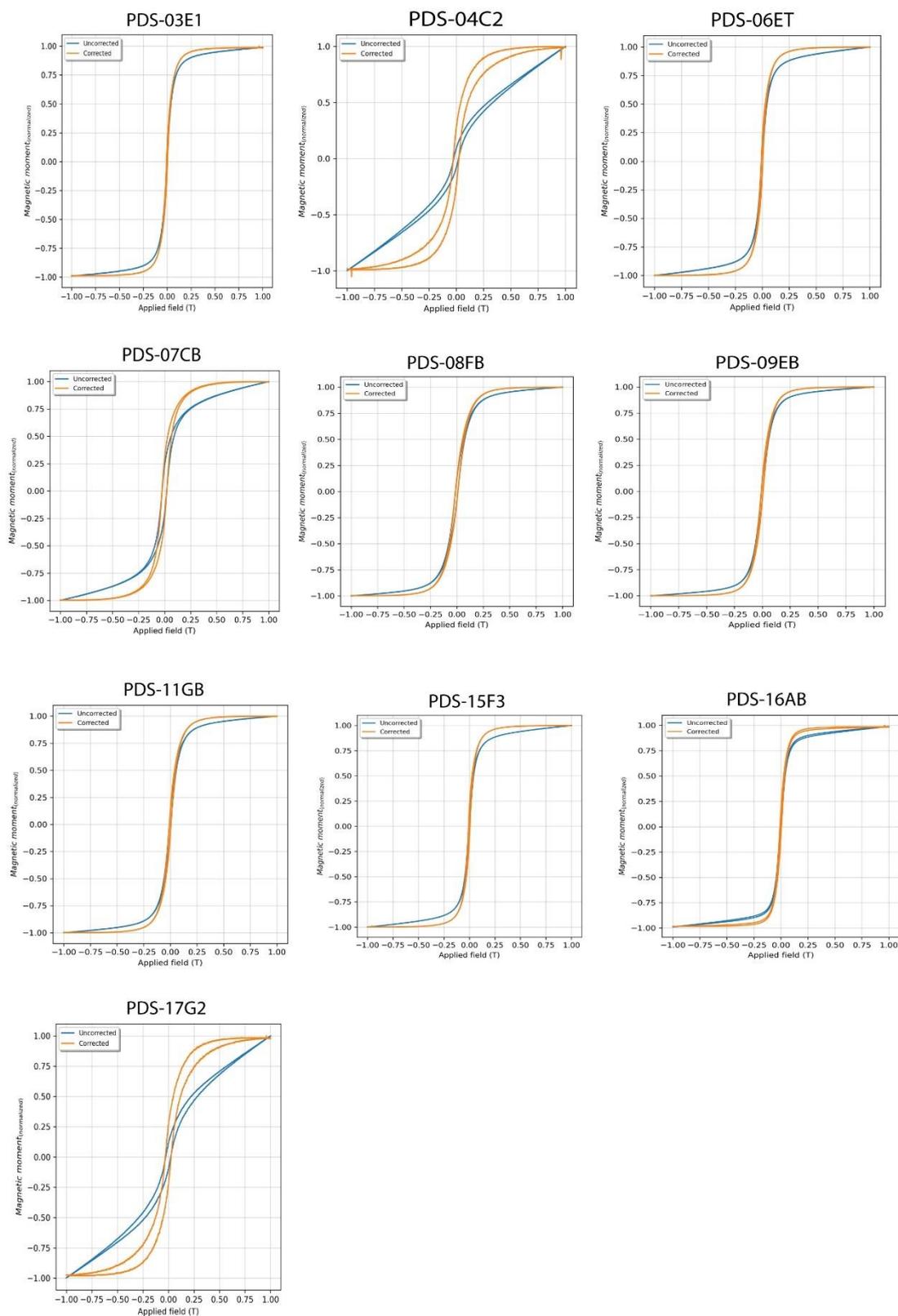


Figura 24 - Ciclos de histerese dos sítios amostrados em Torres e Dom Pedro de Alcântara, com amostras demonstrando saturação em torno de 300mT, indicando mineralogia de magnetita/titanomagnetita e amostras PDS-04C2 e PDS-17G2 demonstrando saturação em torno de 800mT, indicando a presença de hematita/titanohematita.

4.2.2 Amostragem em Três Cachoeiras

A curva referente ao sítio PDS-13 nos mostra um formato muito similar aos sítios amostrados em Torres/Dom Pedro de Alcântara, com magnetização de saturação em 300mT (Figura 25), indicando também uma mineralogia composta por magnetita/titanomagnetita.

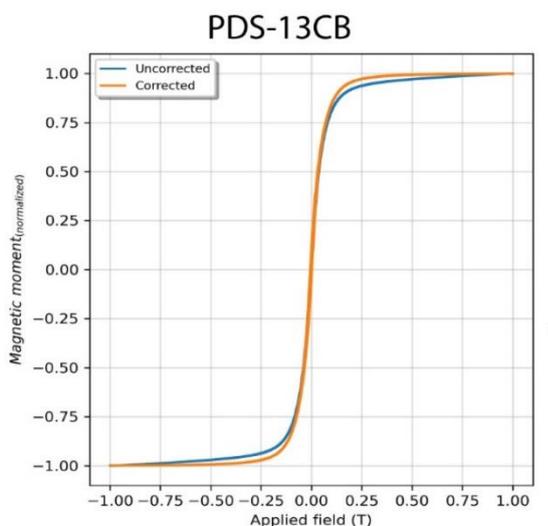


Figura 25 – Ciclo de histerese referente ao sítio PDS-13, mostrando que a mineralogia predominante é magnetita/titanomagnetita, pois satura em torno de 300mT.

4.2.3 Amostragem em Caxias do Sul

Os resultados mostram que as curvas apresentam formatos e propriedades similares (Figura 26), com saturação abaixo de 300mT, indicando uma mineralogia composta por magnetita/titanomagnetita.

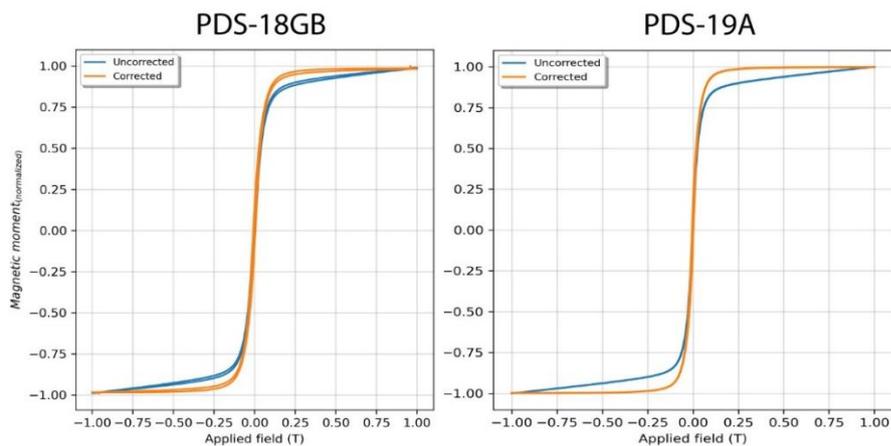


Figura 26 - Ciclo de histerese referente aos sítios PDS-18 e PDS-19, mostrando que a mineralogia predominante é magnetita/titanomagnetita, pois saturam em torno de 300mT

4.2.4 Amostragem em Terra de Areia

As análises das amostras coletadas mostraram que as curvas dos sítios PSD-01 e PDS-02 apresentam formatos e propriedades similares (Figura 27), com saturação abaixo de 300mT, indicando uma mineralogia composta por magnetita/titanomagnetita.

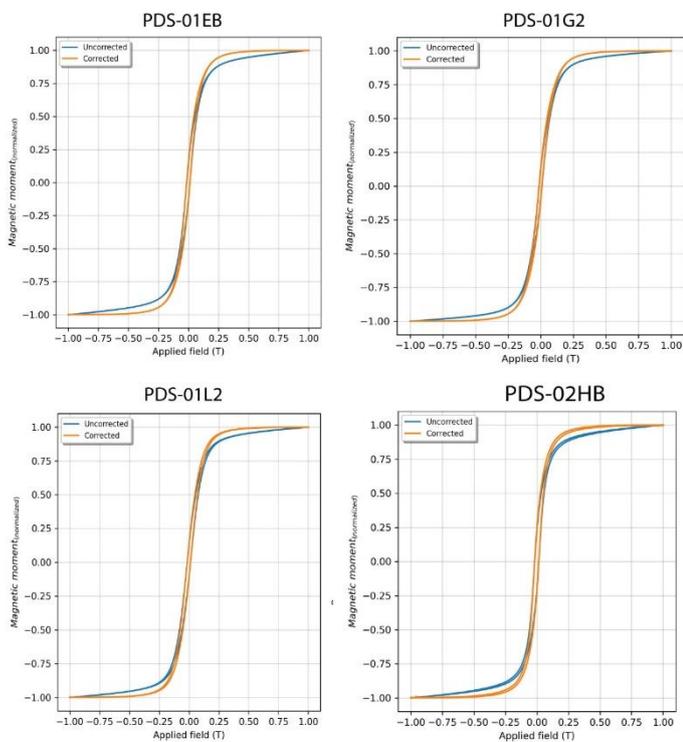


Figura 27 – Ciclos de histerese gerados dos sítios PDS-01 e PDS-02, mostrando que a mineralogia magnética presente nas amostras são de magnetita/titanomagnetita, pois saturam em torno de 300mT.

5. DISCUSSÃO

As análises paleomagnéticas realizadas nessa pesquisa, através da desmagnetização por campos alternados e da mineralogia magnética, dos diques e soleiras amostrados, contribuiu com a base de dados e as discussões a respeito da estratigrafia do Grupo Serra Geral.

A desmagnetização por campos alternados foi eficiente em seis dos nove sítios analisados, tendo a desmagnetização total ocorrida em campos de até 60 mT, indicando uma mineralogia de baixa coercividade. A estatística por grupo (Fisher, 1953) resultou na similaridade de todos os sítios, com inclinações positivas, indicando que a polaridade do campo geomagnético, durante a cristalização das intrusões, era normal, com polaridade semelhante ao campo atual.

A mineralogia magnética, analisada através dos ciclos de histerese, mostrou que a mineralogia principal presente nas rochas é a magnetita/titanomagnetita, pois o campo de magnetização de saturação das amostras ocorreu em torno de 300mT. Esta mineralogia é similar ao encontrado em outros estudos realizados na Província (Alva-Valdivia *et al.*, 2003; Ernesto *et al.*, 1990, 1996, 1999, 2021; Tamrat & Ernesto, 1999; Goguitchaichvili *et al.*, 2013; Mena *et al.*, 2006;). Houve casos em que a magnetização apresentou uma retenção e saturou em torno de 800mT, indicando a ocorrência de minerais de hematita/titanohematita.

O paleomagnetismo da PBPE vem sendo discutido há anos (e.g., Alva-Valdivia *et al.*, 2003; Dodd *et al.*, 2015; Ernesto *et al.*, 1990, 1999, 2021; Owen-Smith *et al.*, 2019). Ernesto *et al.* (2021), sendo sugerido um polo paleomagnético localizado em 84.5°E e 82.7°S ($N = 128$; $A_{95} = 1.8^\circ$; $K = 48$), usando dados com $\alpha_{95} \geq 15^\circ$. Esse polo paleomagnético coincide com os polos calculados para o Etendeka (Owen-Smith *et al.*, 2019). Os resultados obtidos neste trabalho (Tabela 1) são promissores, com valores semelhantes aos obtidos pelos trabalhos anteriores. No entanto, para calcular um novo polo para a região estudada se faz necessário a aquisição de mais dados, a fim de gerar um polo com precisão.

Sarmiento *et al.* 2017, ao analisar esses mesmos corpos de diques e soleiras estudados neste trabalho, sugeriu que, uma vez que os corpos intrusivos possuem direções NW-SE, semelhante às direções dos diques do Arco de Ponta Grossa, Rio Grande e da Calha de Torres, a origem dos diques está relacionada a um ou mais

eventos tectônicos, para que tais estruturas possam ter se formado. Além disso, através de dados geoquímicos, inferiu que esses diques serviram de condutos alimentadores para os derrames superiores. Dessa forma, esses corpos são bons alvos para o cálculo de novos polos paleomagnéticos e para o entendimento da magnetoestratigrafia do Grupo Serra Geral. Entretanto, para a obtenção de polos com boa qualidade, é necessário um bom controle geocronológico da duração do vulcanismo da PBPE, porém, esse ainda é motivo de forte debate na literatura (e.g., Dodd *et al.*, 2015; Rocha *et al.*, 2020; Bacha *et al.*, 2022). Assim, sugere-se que nos corpos estudados sejam objetos de datações geocronológicas.

Pescarini (2019), em seu estudo paleomagnético, no perfil Relvado-Arvorezinha, obteve dados de polaridade normal para as rochas da Formação Torres e Palmas e polaridade reversa na Formação Vale do Sol, indicando um hiato de tempo entre as Formações Torres e Vale do Sol, marcando a mudança na dinâmica do magmatismo durante esse período. Concomitantemente, Ernesto *et al.* (1990, 1999) registraram em seus estudos, reversões paleomagnéticas entre os derrames do GSG. Os resultados da presente pesquisa não mostram dados com polaridade reversa, o que não significa que os corpos estudados foram formados ao mesmo tempo ou sob a mesma polaridade.

A questão em aberto é se esses diques realmente serviram de condutos alimentadores para os derrames superiores. Para isso, faz-se necessário analisar e realizar pesquisas futuras com enfoque nos derrames finais do GSG (Formação Esmeralda) para se obter um entendimento completo sobre a origem do seu ambiente de formação. Além disso, novas amostras e novos dados serão gerados em trabalhos futuros para melhor entendimento das variações do campo geomagnético nesta região e para o cálculo de um polo paleomagnético novo com alta qualidade, com os critérios mínimos estabelecidos por Van der Voo (1990) e atualizados por Meert *et al.* (2020).

6. CONCLUSÃO

1. A mineralogia dominante nos corpos intrusivos analisados é de magnetita/titanomagnetita, ocorrendo, por vezes, em alguns sítios, a presença também de hematita/titanohematita;
2. A desmagnetização por campos alternados se mostrou eficaz na maioria dos sítios analisados, com total desmagnetização da amostra em torno de 60mT. Sendo assim, faz-se necessário sempre a análise preliminar dos sítios pela técnica AF e, se a magnetização persistir, busca-se a utilização de outros métodos, como a desmagnetização por campos alternados;
3. A estatística por grupo de *Fisher* das amostras indicou inclinação positiva para todos os sítios analisados, resultando em polaridade normal;
4. Faz-se necessário e importante a continuação dos estudos paleomagnéticos, a fim de obter mais dados sobre o GSG, uma vez que, para determinação do polo geomagnético da região e a reconstrução paleoceanográfica da PBPE, é preciso uma boa estatística de dados (e.g., Van der Voo et al., 1990; Meert et al., 2020).

7. REFERÊNCIAS

Acosta, A.C.M., 2021. Mecanismos de colocação e orientação de fluxo magmático de sills intrudidos em derrames vulcânicos: um exemplo do Grupo Serra Geral no Morro Da Igreja, SC

Almeida, F.F.M. (1986). Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(4): 325-349.

Alva-Valdivia, L., Goguitchaichvili, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Riisager, P., Riisager, P., & Lopes, O. (2003). Paleomagnetic poles and paleosecular variation of basalts from Paraná Magmatic Province, Brazil: geomagnetic and geodynamic implications. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, pp. 183-196.

Anderson, D.L., 2000, The thermal state of the upper mantle: No role for mantle plumes: *Geophysical Research Letter*, v. 27, pp. 3623–3626.

Arndt, N.T. & Christensen, U. (1992). The role of lithospheric mantle in continental flood volcanism: thermal and geochemical constraints. *Journal of Geophysical Research*, 97(B7): 10967-10981.

Biggin, A., B. Steinberger, J. Aubert, N. Suttie, R. Holme, T. Torsvik, D. Van Der Meer, and D. Van Hinsbergen (2012), Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes, *Nat. Geosci.*, 5(8), 526–533.

Butler R.F., 1992. *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*.

Campbell, I.H. & Griffiths, R.W. (1990). Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts. *Earth and Planetary Science. Letters*, 99:79-93.

Cordani, U.G., Vandomos, P., 1967. Basaltic rocks of the Parani basin. In: Bigarella, J.J., Becker, R.D., Pinto, J.D. (Eds.), *Problems in Brazilian Gondwana Geology*, pp. 207–231.

Dodd, S.C., Niocaill, C.M., Muxworthy, A.R., 2015. Long duration (> 4Ma) and steady state volcanic activity in the early Cretaceous Paraná–Etendeka large igneous province: new palaeomagnetic data from Namibia. *Earth Planet Sci. Lett.* 414, 16–29.

Dunlop, D., Özdemir, O., 1997. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge University Press, Cambridge.

Ernesto, M., Pacca, I.G., Hiedo, F.Y., Nardy, a. J.R., 1990. Palaeomagnetism of the Mesozoic Serra Geral Formation, southern Brazil. *Phys. Earth Planet. Inter.* 64, 153–175. doi:10.1016/0031-9201(90)90035-V

Ernesto, M.; Raposo, M.I.B; Marques, L.S.; Renne, P.R.; Diogo, L.A. & De Min, A. (1999). Paleomagnetism, geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the North-eastern Paraná Magmatic Province: tectonic implications. *Journal of Geodynamics*, 28:321-340.

Ernesto, M., Zaffani L.A., Caminha-Maciél, G. (2021). New paleomagnetic data from the Parana Magmatic Province: Brief emplacement time and tectonism. *Journal of South American Earth Sciences* <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102869>.

Ewart, A., Milner, S., Armstrong, R., Dungan, A., 1998. Etendeka volcanism of the Goboboseb Mountains and Messum Igneous Complex, Namibia. Part I: geochemical evidence of early Cretaceous Tristan Plume melts and the role of crustal contamination in the Paraná–Etendeka CFB. *J. Petrol.* 39, 191–225.

Fisher, R.A. 1953. Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society*, A217: 295-305.

Florisbal, L., Janasi, V., Bitencourt, M., Nardi, L., & Marteleto, N. (2018). Geological, geochemical and isotope diversity of ~134Ma dykes from the Florianopolis Dyke Swarm, Parana Magmatic Province: geodynamic controls on petrogenesis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, pp. 181-203.

Frank, H., Gomes, M., & Formoso, M. (2009). Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Parana Basin, South America. *Pesquisas em Geociências*, pp. 49-57.

Goguitchaichvili, A., Cervantes, M.S., Camps, P., Sánchez, L.B., Mena, M., Trindade, R., Aguilar, B.R., Morales, J., Lopez H.L. (2013). The Earth's magnetic field prior to the Cretaceous Normal Superchron: new palaeomagnetic results from the Alto Paraguay Formation. *International Geology Review*, 55, 692-704.

Hartmann, G.A., Pacca, I.G., 2009. Time evolution of the South Atlantic magnetic anomaly. *An. Acad. Bras. Cienc.* 81, 243–255. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652009000200010>

Hulot, G., Finlay, C.C., Constable, C.G., Olsen, N., Manda, M., 2010. The Magnetic Field of Planet Earth. Research Gate. DOI: 10.1007/s11214-010-9644-0

Kirshvink, J.L. 1980. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophysical Journal International*, 62(3): 699-718.

Marques, L.S.; Dupré, B. & Piccirillo, E.M. (1999). Mantle source compositions of the Paraná Magmatic Province: evidence from trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry. *Journal of Geodynamics*, 28: 439-459.

Marsh, J.S., Ewart, A., Milner, S.C., Duncan, A.R., Miller, R.M., 2001. The Etendeka Igneous Province: magma types and their stratigraphic distribution with implications for the evolution of the Paraná–Etendeka flood basalt province. *Bull. Volcanol.* 62, 464–486.

Meert, J. G., Pivarunas, A. F., Evans, D. A. D., Pisarevsky, S. A., Pesonen, L. J., Li, Z., Elming, S., Miller, S. R., Zhang, S., & Salminen, J. M., 2020. The magnificent seven: A proposal for modest revision of the Van der Voo (1990) quality index. *Tectonophysics*, 790(June), 228549 <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228549>.

Mena, M., Orgeira, M.J., Lagorio, S. (2006). Paleomagnetism, rock-magnetism and geochemical aspects of early Cretaceous basalts of the Paraná Magmatic Province, Misiones, Argentina. *Earth Planets Space*, 58, 1283–1293.

Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A., França, A.B., 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências de Petrobras*, vol. 15, n. 2, p. 265-287.

Owen-Smith, T.M., Ganerød, M., van Hinsbergen, D.J.J., Gaina, C., Ashwal, L.D., Torsvik, T.H., 2019. Testing early Cretaceous Africa–south America fits with new palaeomagnetic data from the Etendeka magmatic province (Namibia). *Tectonophysics* 760, 23–36.

Peate, D.W, Hawkesworth, C.J, Mantovani, M., 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bull. Volcanol.* 55, 119–139.

Peate, D., 1997. The Paraná-Etendeka Province. *Large igneous Prov. Cont. Ocean. Planet. flood Volcanism* 100, 217–245.

Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M., Rogers, N.W., Turner, S.P., 1999. Petrogenesis and Stratigraphy of the High- Ti / Y Urubici Magma Type in the Parana Flood Basalt Province and Implications for the Nature of ‘ Dupal ’ -Type Mantle in the South Atlantic Region. *J. Petrol.* 40, 451–473.

Piper, J. (1998). DUNLOP, DJ & ÖZDEMİR, Ö. 1997. Magnetismo de rocha. *Fundamentos e Fronteiras. Cambridge Studies in Magnetism.* Cambridge, Nova York, 287-300. doi:10.1017/S0016756898218437

Raposo, M. I. (1997). Magnetic fabric and its significance in the Florianópolis dike swarm, Southern Brazil. *Geophysical Journal International*, pp. 159-170.

Raposo, M. I., & Ernesto, M. (1995). Anisotropy of magnetic susceptibility in the Ponta Grossa dyke swarm (Brazil) and its relationship with magma flow directions. *Physics of the Earth Planetary Interior*, pp. 183-196.

Richards, M.A.; Duncan, R.A. & Courtillot, V.E. (1989). Flood basalts and hot spot tracks: plume heads and tails. *Science*, 246: 103-107.

Roberts, A.P., Cui, Y.L., Verosub, K.L., 1995. Wasp-waisted hysteresis loops: mineral magnetic characteristics and discrimination of components in mixed magnetic system. *J. Geophys. Res.* 100, 17909–17924.

Rossetti, L., Lima, E., Waichel, B., Hole, M., Simoes, M., & Scherer, C. M. (2018, Abril 15). Litoestratigrafia e vulcanologia do Grupo Serra Geral, Província Ígnea Paraná-Etendeka no Sul do Brasil: Rumo a um arcabouço estratigráfico formal. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, pp. 98-114.

Rossetti, L., Simões, M. S., Lima, E. F., Waichel, B. L., & Sommer, C. A. (2021). *Estratigrafia do Grupo Serra Geral na Calha de Torres, Sul do Brasil*. Porto Alegre: Editora Compasso Lugar Cultura.

Sarmiento, C. (2017). *Geologia e Petrologia das rochas hipabissais associadas à Província Magmática Paraná-Etendeka e a sua correlação petrogenética com o vulcanismo da Calha de Torres no sul do Brasil*. Tese pós-graduação, UFRGS, p. 186.

Sarmiento, C., Sommer, C., & Lima, E. (2017). Mafic subvolcanic intrusions and their petrologic relation with the volcanism in the south hinge Torres Syncline, Parana-Etendeka Igneous Province, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, pp. 70-91.

Sarmeto, C., Sommer, C., Lima, E., Barreto, C., Rosseti, L., & Lafon, J. (2020). Mafic subvolcanic intrusions from the southern Parana-Etendeka Large Igneous Province: insights from geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes. *Geological Journal*, pp. 1-24.

Scherer, C.M.S., 2002. Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Paran Basin, southern Brazil. *Sedimentology* 49, 97–116. doi:10.1046/j.1365-3091.2002.00434.x

Sheth, H.C., 1999. Flood basalts and large igneous provinces from deep mantle plumes: fact, fiction and fallacy. *Tectonophysics*: 311, 1-29.

Simões, M.S., Besser, M. L., Lima, E.F., Rossetti, L. M. M., Sommer, C.A., Janasi, V.A., Savian, J. F. 2022. Um Complexo de Soleiras pós-Triássico na Depressão Central do Rio Grande do Sul. In: XIII Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados, Cuiabá.

Tamrat, E., Ernesto, M., 1999. Magnetic fabric and rock-magnetic character of the Mesozoic flood basalts of the Parana Basin. *Brazil. J. Geodyn.* 28, 419–437.

Tauxe, L., Gee, J.S., Staudigel, H., 1998. Flow direction in the dikes from anisotropy of magnetic susceptibility data: the bootstrap way. *J. Geophys. Res.* 103, 17775–17790.

Tauxe, L., 2005. Lectures in Paleomagnetism. <http://earthref.org/MAGIC/book/Tauxe/2005>.

Van Der Voo, R., 1990. The reliability of paleomagnetic data, *Tectonophysics*, 184(1), 1–9.

Waichel, B.L., Scherer, C.M.S., Frank, H.T., 2008. Basaltic lava flows covering active aeolian dunes in the Paraná Basin in southern Brazil: Features and emplacement aspects. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 171, 59–72. doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.11.004

Zalán, P.V., Conceição, J.C., Wolff, S., Astolfi, M.A., Vieira, I.S., Appi, V.T., Neto, E.V.S., Cerqueira, J.R., Zanotto, O.A., Paumer, M.L., Marques, A., 1986. Análise da Bacia do Paraná .Relatório Interno Gt-Os-009/85, Petrobrás, Rio de Janeiro.

Zijderveld, J.D.A. (1967). A.C. demagnetization of rocks. In: *Methods in Palaeomagnetism*, Collison, D.W., Creer, K.M., Runcorn, S.K., (Eds.), 256-286, Elsevier, New York.

ANEXOS

Tabela 2 – Dados de campo dos sítios e seus respectivos cilindros, com localização em coordenadas UTM, azimute magnético e solar e dip.

PONTOS	DATA	UTM (22J)		AFLORAMENTO	ESTRUTURA	AMOSTRAS	AZIMUTE MAGNÉTICO	DIP (°)	AZIMUTE SOLAR	HORA	OBSERVAÇÕES						
		X	Y														
PDS-01	28/07/22	589159	6731084	Corte estrada - Rota do Sol, em frente a mecânica Boleck Car	Dique	PDS-01A	276°	47°	087°	12h22	Borda						
						PDS-01B	274°	46°	084°	12h27							
						PDS-01C	249°	48°	-	-							
						PDS-01D	272°	43°	087°	12h38							
						PDS-01E	274°	44°	-	-							
						PDS-01F	218°	55°	-	-							
						PDS-01G	216°	62°	030°	12h48							
						PDS-01H	235°	53°	052°	12h53							
						PDS-01I	288°	23°	-	-	Centro						
						PDS-01J	278°	26°	-	-							
						PDS-01K	281°	28°	-	-							
						PDS-01L	280°	26°	-	-							
						PDS-02	28/07/22	589112	6731088	Corte estrada - Rota do Sol, em frente a mecânica Boleck Car	Encaixante PDS-01	PDS-02A	272°	32°	123°	14h29	-
												PDS-02B	275°	30°	-	-	
PDS-02C	268°	32°	-	-													
PDS-02D	263°	30°	-	-													
PDS-02E	266°	32°	-	-													
PDS-02F	251°	34°	-	-													
PDS-02G	267°	33°	-	-													
PDS-02H	262°	31°	-	-													

PDS-03	29/07/22	611668	6748077	Pedreira Irmãos Simão, ao lado Paradoiro 86 BR-101 Torres	Dique	PDS-03A	234°	65°	347°	9h34	Furos perfilando o dique perpendicular as bordas
						PDS-03B	232°	61°	348°	9h46	
						PDS-03C	229°	62°	344°	9h50	
						PDS-03D	240°	68°	354°	9h52	
						PDS-03E	233°	68°	347°	9h55	
						PDS-03F	247°	75°	001°	9h57	
						PDS-03G	242°	78°	356°	9h58	
						PDS-03H	250°	72°	004°	10h	
						PDS-03I	244°	71°	356°	10h03	
						PDS-03J	240°	71°	352°	10h06	
PDS-04	29/07/22	611664	6748080	Pedreira Irmãos Simão, ao lado Paradoiro 86 BR-101 Torres	Encaixante PDS-03; PDS-05; PDS-06; PDS-12	PDS-04A	234°	79°	350°	10h19	-
						PDS-04B	228°	76°	344°	10h21	
						PDS-04C	242°	48°	000°	10h22	
						PDS-04D	266°	73°	027°	10h24	
						PDS-04E	266°	74°	028°	10h26	
						PDS-04F	249°	77°	009°	10h28	
						PDS-04G	245°	73°	006°	10h29	
PDS-05	29/07/22	611671	6748101	Pedreira Irmãos Simão, ao lado Paradoiro 86 BR-101 Torres	Dique	PDS-05A	270°	62°	048°	10h58	-
						PDS-05B	268°	74°	045°	11h	
						PDS-05C	257°	69°	034°	11h02	
						PDS-05D	247°	70°	023°	11h07	
						PDS-05E	257°	65°	036°	11h10	
						PDS-05F	260°	52°	039°	11h12	
						PDS-05G	252°	40°	030°	11h15	
						PDS-05H	270°	49°	054°	11h16	

PDS-06	29/07/22	611793	6748094	Pedreira Irmãos Simão, ao lado Paradoiro 86 BR-101 Torres	Dique	PDS-06A	048°	55°	-	-	Topo
						PDS-06B	067°	44°	-	-	
						PDS-06C	071°	63°	-	-	
						PDS-06D	061°	67°	-	-	
						Base	PDS-06E	110°	46°	-	-
							PDS-06F	112°	46°	-	-
							PDS-06G	105°	58°	-	-
							PDS-06H	108°	51°	-	-
PDS-07	29/07/22	614949	6750058	Pedreira Pompeu (abandonada)	Sill	PDS-07A	043°	73°	-	14h47	Topo
						PDS-07B	047°	66°	-	-	
						PDS-07C	044°	70°	-	-	
						PDS-07D	051°	73°	-	-	
						Meio	PDS-07E	027°	59°	-	-
							PDS-07F	063°	74°	-	-
							PDS-07G	066°	65°	-	-
							PDS-07H	051°	66°	-	-
PDS-08	29/07/22	614956	6750044	Pedreira Pompeu (abandonada)	Dique subvertical	PDS-08A	070°	80°	289°	15h23	Furos orientados na direção do dique
						PDS-08B	064°	56°	284°	15h25	
						PDS-08C	093°	41°	310°	15h27	
						PDS-08D	053°	72°	276°	15h28	
						PDS-08E	049°	73°	273°	15h30	
						PDS-08F	070°	53°	292°	15h31	
						PDS-08G	047°	74°	273°	15h32	
PDS-09	29/07/22	614976	6749965		Provável sill	PDS-09A	142°	62°	350°	16h06	Centro
						PDS-09B	153°	70°	355°	16h09	

				Pedreira Pompeu (abandonada)		PDS-09C	164°	56°	011°	16h11	
				Pedreira Pompeu (abandonada)		PDS-09D	132°	36°	343°	16h15	
				Pedreira Pompeu (abandonada)		PDS-09E	164°	37°	014°	16h17	
				Pedreira Pompeu (abandonada)		PDS-09F	165°	39°	016°	16h19	
				Pedreira Pompeu (abandonada)		PDS-09G	198°	50°	048°	16h22	
PDS-10	29/07/22	614911	6749949	Pedreira Pompeu (abandonada)	Rocha encaixante inferior ao sill (PDS-09)	PDS-10A	305°	23°	-	16h35	-
						PDS-10B	304°	22°	-	-	
						PDS-10C	308°	20°	-	-	
						PDS-10D	301°	17°	-	-	
						PDS-10E	308°	21°	-	-	
						PDS-10F	303°	19°	-	-	
						PDS-10G	311°	20°	-	-	
PDS-11	29/07/22	614868	6749967	Pedreira Pompeu (abandonada)	Dique	PDS-11A	313°	64°	-	17h08	Borda
						PDS-11B	325°	72°	-	-	
						PDS-11C	309°	35°	-	-	
						PDS-11D	312°	35°	-	-	
						PDS-11E	304°	74°	-	-	
						PDS-11F	305°	78	-	-	
						PDS-11G	328°	26°	-	-	
PDS-12	30/07/22	611791	6748108	Pedreira Irmãos Simão, ao lado Paradoiro 86 BR-101 Torres	Dique	PDS-12A	085°	59°	-	9h05	
						PDS-12B	083°	57°	-	-	
						PDS-12C	082°	55°	-	-	
						PDS-12D	106°	53°	-	-	
						PDS-12E	079°	53°	-	-	
						PDS-12F	093°	50°	-	-	

						PDS-12G	074°	50°	-	-	
PDS-13	30/07/22	600899	6739242	Fruteira Paraíso, BR-101, atrás da casa	Dique	PDS-13A	070°	33°	-	-	Centro
						PDS-13B	267°	26°	-	-	
						PDS-13C	263°	59°	038°	11h04	
						PDS-13D	261°	60°	036°	11h07	
						PDS-13E	261°	62°	036°	11h08	
						PDS-13F	261°	62°	037°	11h10	
						PDS-13G	218°	53°	350°	11h11	
						PDS-13H	249°	56°	023°	11h13	
PDS-14	30/07/22	600901	6739237	Fruteira Paraíso, BR-101, atrás da casa	Encaixante PDS-13	PDS-14A	272°	20°	052°	11h24	-
						PDS-14B	273°	20°	053°	11h25	
						PDS-14C	274°	20°	054°	11h27	
						PDS-14D	271°	20°	051°	11h28	
						PDS-14E	269°	20°	051°	11h29	
						PDS-14F	269°	25°	051°	11h30	
						PDS-14G	268°	21°	049°	11h32	
						PDS-14H	274°	24°	058°	11h33	
						PDS-14I	269°	24°	051°	11h34	
PDS-15	30/07/22	612459	6748222	Corte de estrada, BR-101 sentido sul, 1km norte do Paradouro 86	Sistema de dique	PDS-15A	003°	70°	-	-	-
						PDS-15B	001°	73°	-	-	
						PDS-15C	359°	72°	-	-	
						PDS-15D	358°	70°	-	-	
						PDS-15E	357°	74°	-	-	
						PDS-15F	354°	72°	-	-	

						PDS-15G	358°	73°	-	-	
						PDS-15H	357°	74°	-	-	
PDS-16	30/07/22	612408	6748190	Corte de estrada, via secundária BR-101 sentido sul, 70m a S do PDS-15	Dique	PDS-16A	314°	69°	-	-	Perpendicular ao dique
						PDS-16B	322°	63°	-	-	
						PDS-16C	315°	65°	-	-	
						PDS-16D	313°	67°	-	-	
						PDS-16E	312°	69°	-	-	
						PDS-16F	313°	66°	-	14h35	
						PDS-16G	328°	68°	-	-	
PDS-17	30/07/22	612408	6748190	Corte de estrada, via secundária BR-101 sentido sul, 5m a N do PDS-16	Encaixante PDS-16	PDS-17A	350°	65°	-	14h50	-
						PDS-17B	324°	76°	-	-	
						PDS-17C	325°	70°	-	-	
						PDS-17D	337°	69°	-	-	
						PDS-17E	318°	72°	-	-	
						PDS-17F	321°	65°	-	-	
						PDS-17G	317°	75°	-	-	
						PDS-17H	331°	72°	-	15h09	
PDS-18	31/07/22	485954	6754575	Corte de estrada. Estrada municipal beirando a margem N do Rio Caí, perto da ponte Vila Cristina	Sill	PDS-18A	053°	88°	-	-	Furos perpendiculares às bordas do dique
						PDS-18B	044°	83°	-	-	
						PDS-18C	043°	82°	-	-	
						PDS-18D	040°	81°	-	-	
						PDS-18E	047°	79°	-	-	
						PDS-18F	052°	76°	-	-	
						PDS-18G	045°	75°	-	-	

PDS-19	31/07/22	485940	6754593	Corte de estrada, a 50m do PDS- 18	Dique	PDS-19A	043°	82°	-	-	-
						PDS-19B	037°	84°	-	-	
						PDS-19C	034°	81°	-	-	
						PDS-19D	034°	83°	-	-	
						PDS-19E	35°	84°	-	-	
						PDS-19F	037°	85°	-	-	