

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ENZO AUGUSTO SCHÜTZ MARAN

**Processamento de dados geológicos em ambiente SIG para investigação de
anomalias geofísicas magnéticas**

Caçapava do Sul

2022

ENZO AUGUSTO SCHÜTZ MARAN

**Processamento de dados geológicos em ambiente SIG para investigação de
anomalias geofísicas magnéticas**

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: Tiago Rafael Gregory

Coorientador: Lenon Melo Ilha

Caçapava do Sul

2022

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

M311p Maran, Enzo Augusto Schütz
Processamento de dados geológicos em ambiente SIG para
investigação de anomalias geofísicas magnéticas / Enzo Augusto
Schütz Maran.
99 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2022.
"Orientação: Tiago Rafael Gregory".

1. Combinação Linear Ponderada. 2. Arco de Rio Grande. 3.
Dados Aeromagnéticos. 4. Magmatismo Serra Geral. 5. Bacia do
Paraná. I. Título.

ENZO AUGUSTO SCHUTZ MARAN

Processamento de dados geológicos em ambiente SIG para investigação de anomalias geofísicas magnéticas

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 11 de agosto de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Tiago Rafael Gregory
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Maximillian Fries
UNIPAMPA

Prof. Dr. Felipe Guadagnin
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **TIAGO RAFAEL GREGORY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/08/2022, às 10:17, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAXIMILIAN FRIES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/08/2022, às 16:19, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FELIPE GUADAGNIN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/08/2022, às 10:50, 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 **0903846** eo código CRC **9D7CDA3C**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

AGRADECIMENTO

O presente trabalho não é apenas o resultado de 6 anos de graduação, mas também de todo um processo de aprendizagem e formação que foi trabalhado desde o meu nascimento.

Gostaria de agradecer todo o apoio que recebi na forma de amizade, instrução e orientação, que de forma direta ou indireta me ajudaram no desenvolvimento desse trabalho e na minha jornada dentro da faculdade.

Agradeço minha família, especialmente meus pais, Carlos Alberto Maran e Marilise Schütz Maran, pelo apoio constante e incentivo na minha graduação.

Agradeço meus professores e orientadores, especialmente o professor Tiago Rafael Gregory, que me apresentou a geologia da forma que conheço e me deu a oportunidade de participar de um projeto de pesquisa que veio a culminar na realização do presente trabalho.

Agradeço meus amigos, que me acompanharam nessa caminhada e estiveram ao meu lado em bons e maus momentos, sempre me motivando a seguir em frente, especialmente ao João Vitor Pfeifer Machado.

Ao Governo Federal do Brasil pelo ensino superior gratuito.

RESUMO

O sensoriamento remoto é uma ferramenta que facilita muito os trabalhos de mapeamento, uma vez que possibilita que áreas sejam analisadas à distância. Utilizando essa ferramenta, este trabalho aborda uma análise de anomalias geofísicas na porção sul da Bacia do Paraná, mais precisamente no limite da Bacia com o Escudo Sul-rio-grandense, na região de Santa Maria. Os dados utilizados para esse estudo foram os dados aeromagnéticos do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul (PAERGS), de 2010, disponibilizados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e a bibliografia do Projeto de Pesquisa “Investigação de Lineamentos Magnéticos no Rio Grande do Sul”, de autoria de Tiago Rafael Gregory. Os dados do PAERGS foram processados em mapas de anomalias magnéticas que foram submetidos a aplicação de filtros com o objetivo de gerar imagens mais fiéis à localização real das anomalias e realçar, em cada filtro, os corpos à profundidade desejada. Imagens do satélite Alos Palsar foram processadas em mapas de hipsometria e declividade. A análise prévia de mapas de trabalhos semelhantes levou à constatação de anomalias magnéticas no sentido NW-SE, as quais trabalhos anteriores atribuem o significado de famílias de fraturas e falhas que podem ter servido de conduto para a ascensão de magmas da Formação Serra Geral (FSG). Os mapas de magnetometria, hipsometria, declividade e solos foram compilados em apenas um mapa (Mapa de Aptidão) por meio da metodologia de Combinação Linear Ponderada. A finalidade desse mapa era indicar locais com afloramentos de basalto para assim comprovar que as anomalias magnéticas da área de estudo estão associadas a FSG. Ao final do estudo o Mapa de Aptidão mostrou-se confiável para indicar locais onde o basalto aflorava. Com os pontos visitados em campo foi possível comprovar a existência de correlação entre anomalias magnéticas e a FSG, principalmente no Lineamento Magnético Formigueiro (LMF), onde foi verificada a ocorrência de corpos basálticos.

Palavras-chave: Dados Aeromagnéticos. Bacia do Paraná. Arco do Rio Grande. Combinação Linear Ponderada. Lineamentos Magnéticos. Lineamento Magnético Formigueiro. Magmatismo Serra Geral.

ABSTRACT

The remote sensing is a tool that made works related to mapping much easier once it made possible to analyze locations without necessarily visiting it. Using this valuable tool, the following work is an analysis of geophysical anomalies in the southern portion of the Paraná Basin more precisely in the basin boundary with the Sul-rio-grandense shield in the Santa Maria region. The data used at this work is from the 2010 Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul (PAERGS), made available by the Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) and the bibliography related to the Tiago Rafael Gregory Research Project "Magnetic Lineaments Investigation on Rio Grande do Sul". The PAERGS data was processed into magnetic anomaly maps that were submitted to the application of filters in order to generate images more accurate of the actual location of anomalies and highlight in each filter the bodies at the desired depth. Images from the Alos Palsar satellite were processed into hypsometry and slope maps. The prior analysis of maps and work related studies led to the verification of magnetic anomalies only in the NW-SE direction, that could have served as a conduit for the ascent of the Formação Serra Geral (FSG) magmas. The magnetometry, hypsometry, slope and soils maps were compiled in one map (Suitability Map) using the Weighted Linear Combination. The purpose of this map is to point out spots with basalt outcrops and by so prove that the magnetic anomalies of the area are associated with the FGS. By the end of the study the Suitability Map has proven to be trustful to show basalt outcrops. With the field points was possible to prove the existence of a correlation between the magnetic anomalies and the FSG, especially in the Lineamento Magnético Formigueiro (LMF), where it was verified the occurrence of basaltic bodies.

Keywords: Aeromagnetic Data. Bacia do Paraná, Arco de Rio Grande. Weighted Linear Combination. Magnetic Lineaments. Lineamento Magnético Formigueiro. Serra Geral Magmatism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.....	18
Figura 2 – Mapa geológico da área de estudo.	20
Figura 3 - Fluxograma do estudo.	27
Figura 4 - Arvore hierárquica do estudo.	29
Figura 5 - Gráfico de valores médios e intervalos de suscetibilidade magnética dos tipos de rochas mais comuns.	35
Figura 6 - Classes de solo e suas principais características.	36
Figura 7 - Mapa de Hipsometria Reclassificado.	42
Figura 8 – Mapa de Declividade Reclassificado.	43
Figura 9 - Mapa de Magnetometria ASA Reclassificado.	44
Figura 10 - Mapa de Solos Reclassificado.	45
Figura 11 - Critérios/mapas de interesse ordenados de acordo com peso e contribuição na geração do Mapa de Aptidão.	45
Figura 12 - Mapa de Aptidão de Possíveis Locais de Ocorrência de Basalto. Esse mapa foi gerado a partir da integração dos mapas reclassificados de Declividade, Hipsometria, Magnetometria e Solos.	46
Figura 13 - Compilação de informações dos pontos visitados em campo (pontos 1 e 2).	48
Figura 14 – Compilação de informações do ponto visitado em campo (ponto 3).	50
Figura 15 - Compilação de informações do ponto visitado em campo (ponto 4).	52
Figura 16 - Compilação de informações do ponto visitado em campo (ponto 5).	54
Figura 17 - Compilação de informações do ponto visitado em campo (ponto 6).	56
Figura 18 - Compilação de informações do ponto visitado em campo (ponto 7).	58
Figura 19 - Compilado de registros de campo.	59
Figura 20 - Compilado de amostras de rochas coletadas em campo.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais litologias da Área 1 sintetizadas.....	24
Tabela 2 - Classes de probabilidade de ocorrência de basaltos aflorando utilizadas para a reclassificação dos critérios.	31
Tabela 3 - Tabela de reclassificação do Mapa Hipsométrico.	32
Tabela 4 - Tabela de reclassificação do Mapa de Declividade.....	34
Tabela 5 - Tabela de reclassificação do Mapa de Magnetometria ASA.	36
Tabela 6 - Tabela de reclassificação do Mapa de Solos.	38
Tabela 7 - Principais aspectos do satélite Alos Palsar.	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 GERAL	15
2.2 ESPECÍFICOS.....	15
3 JUSTIFICATIVA.....	15
4 ÁREA DE ESTUDO	17
4.1 GEOLOGIA REGIONAL.....	18
4.1.1 Bacia do Paraná.....	19
4.2 GEOLOGIA LOCAL (SÍNTESE).....	23
4.3 TECTÔNICA DO ARCO DE RIO GRANDE	25
5 TRABALHOS ANTERIORES APLICADOS	25
6 ETAPAS DO TRABALHO.....	26
7 MATERIAIS E MÉTODOS	28
7.1 Combinação Linear Ponderada (CLP) Aplicada.....	28
7.1.1 Identificação dos Critérios.....	28
7.1.2 Padronização dos Critérios (Reclassificação)	30
7.1.3 Elaboração da Matriz de Combinação Paritária (MCP) e Definição de Pesos.....	38
7.1.4 Integração dos Critérios.....	39
7.2 MAPEAMENTO EM CAMPO	41
8 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
8.1 Mapas Reclassificados (Etapa 2).....	41

8.2 Mapa de Aptidão (Etapa 2).....	46
8.3 Trabalho de Campo (Etapa 3)	47
8.3.1 Registros de Campo	58
9 CONCLUSÃO	60
9 REFERÊNCIAS.....	62
APÊNDICE A	68
A.1 Fundamentos Teóricos Magnetometria	68
A.1.1 Estrutura atômica.....	68
A.1.2 Campo magnético	69
A.1.3 O magnetismo em rochas e minerais.....	70
A.2 Fundamentos Teóricos Lógica Fuzzy	73
A.3 Fundamentos Teóricos Análise Hierárquica (AHP).....	73
A.3.1 Matriz de Comparações Paritárias (MCP)	74
A.3.2 Razão de Consistência (RC).....	75
A.4 Fundamentos Teóricos Combinação Linear Ponderada (CLP).....	76
APÊNDICE B	79
B.1 Dados LASA PROSPECÇÕES S.A.....	79
B.1.1 Materiais e métodos LASA PROSPECÇÕES S.A.....	79
B.1.2 Correções aplicadas pela LASA PROSPECÇÕES S.A.....	81
B.2 Geração dos Mapas Aeromagnéticos	82
B.2.1 Mapa Reduzido ao Polo	83
B.2.2 Mapa Passa Baixa (Low Pass)	83
B.2.3 Mapa Amplitude do Sinal Analítico (ASA).....	83

B.2.4 Mapa Derivada Vertical	83
B.3 Resultados	84
B.3.1 Mapa dos valores do campo magnético anômalo total reduzido do IGRF	84
B.3.2 Mapa dos valores do campo magnético anômalo total reduzidos ao polo	86
B.3.3 Mapa de amplitude do sinal analítico (ASA)	88
B.3.4 Mapa passa-baixa	90
B.3.5 Mapa da 1° Derivada Vertical + Continuidade Para Cima	92
APÊNDICE C	93
C.1 Processamento	93
C.1.1 Mosaico de imagens e recorte da área	93
C.1.2 Extração de bacias e redes de drenagem	94
C.1.3 Mapa hipsométrico	94
C.1.4 Mapa de Declividade	94
C.1.5 Mapa de Solos	95
C.1.6 Mapas Reclassificados	96
C.2 Resultados	97

1 INTRODUÇÃO

A superfície terrestre é repleta de informações que podem ser utilizadas para remontar o passado do planeta. Essas informações são estudadas por um campo da ciência ainda muito novo, chamado Geologia. O entendimento dos processos de formação e geração do próprio planeta Terra fornece informações que podem ser utilizadas para localizar onde e como ocorrem mineralizações de elementos de interesse da humanidade, no entanto, ainda é muito difícil definir com exatidão a ocorrência de mineralizações e outros corpos geológicos em subsuperfície.

O estudo de depósitos minerais, de estruturas geológicas e de outros campos relacionados às geociências foi facilitado nos últimos anos com o desenvolvimento de tecnologias de sensoriamento remoto. Essas tecnologias permitem a análise de atributos físicos da superfície e subsuperfície terrestre de maneira remota, poupando tempo e dinheiro na delimitação e localização de alvos de estudo. Em meados da década de 40 foram desenvolvidos os primeiros trabalhos de aquisição de dados geofísicos por meio de levantamento aéreo (HILDENBRAND, 2004). O desenvolvimento tecnológico foi tal que atualmente é possível integrar dados aéreos com o auxílio de programas de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Processamento Digital de Imagem (PDI) e transformá-los em mapas.

Hoje em dia, levantamentos aeromagnetométricos são amplamente aplicados a operações de exploração de depósitos minerais devido a sua ampla cobertura quando comparados a métodos de perfuração, por exemplo. A velocidade de aquisição das informações e o acesso a locais remotos também é outro atrativo desse método de aquisição (KEAREY et al., 2009).

Em 2010 foi executado o mapeamento aeromagnetométrico e aerogamaepectométrico do Escudo Sul-rio-grandense (ESrg) e de parte sul da Bacia do Paraná. Esse levantamento foi feito pela empresa LASA PROSPECÇÕES S.A. a pedido da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2010) para a realização do “Projeto Aerogeofísico do Rio Grande do Sul” do Programa Geologia do Brasil (PGB). Entre tantas características regionais encontradas, o processamento desses dados em mapas exhibe uma série de feições lineares de direção NW sobre toda a área do levantamento, além de uma série de anomalias magnéticas positivas e negativas. Alguns desses lineamentos e parte dessas anomalias já foram analisados em trabalhos prévios, como por exemplo nos estudos de Travassos (2014), Costa (2016), Fae et al. (2017), Gregory et al. (2019) e Maran et al. (2020).

O presente trabalho foi realizado sobre uma área que compreende o limite entre a Bacia do Paraná e o ESrg, mais precisamente o limite noroeste do ESrg. Foram utilizados os dados do levantamento aerogeofísico anteriormente citado e imagens do satélite Alos Palsar na tentativa de estabelecer uma correlação entre a magnetometria, a geomorfologia e a pedologia da área, para a delimitação de áreas de ocorrência de corpos basálticos do magmatismo Serra Geral e de locais de afloramento dessa rocha.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

O presente trabalho busca correlacionar anomalias magnéticas da região sudoeste da Bacia do Paraná a rochas da Formação Serra Geral.

2.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Detectar feições associáveis a litologias e estruturas por meio das anomalias magnéticas;
- Fornecer à comunidade científica informações acerca de hidrogeologia, geomorfologia e solos da área de estudo;
- Elaborar um Mapa de Aptidão para facilitar a localização de afloramentos de basalto.
- Correlacionar as anomalias cronologicamente as rochas do seu entorno.

3 JUSTIFICATIVA

O Rio Grande do Sul (RS) possui uma rica história geológica, compreendendo em sua extensão uma vasta diversidade de rochas e estruturas. Devido a essa diversidade, existem muitos estudos sobre o arranjo estrutural entre essas rochas, suas idades de formação e evolução (CHEMALE JR et al., 2000; HARTMANN et al., 2007; FRANGOSO-CESAR, 1991). Porém, ainda existem poucos estudos relacionados as assinaturas magnéticas dessas rochas. Algumas obras a respeito do comportamento magnético das rochas do estado já foram capazes de

definir domínios estruturais (e.g. COSTA, 1997; TRAVASSOS, 2014) e delimitar corpos geológicos baseando-se apenas em informações magnéticas. Nota-se também que não só as obras anteriormente citadas, mas demais trabalhos relacionados à magnetometria do RS (PHILIPP et al., 2014; FAÉ et al., 2017; GREGORY et al., 2019), detectam lineamentos magnéticos de direção NW-SE. A esses lineamentos alguns pesquisadores atribuíram o significado de condutos vulcânicos para o magmatismo Serra Geral (GREGORY et al., 2019; SAMPAIO, 2019). A maioria desses estudos de magnetometria, inclusive os citados acima, foram feitos sobre a área de abrangência do ESrg, enquanto poucos abrangem a parte sul da Bacia do Paraná (BP), justificando um estudo mais aprofundado sobre o comportamento magnético da região.

A área de estudo do atual trabalho encontra-se sobre o limite sul da BP com o ESrg, mais precisamente sobre os domínios estruturais do Arco do Rio Grande e do Domínio Paraná. A região possui anomalias magnéticas lineares e semicirculares que podem estar relacionadas a diques anelares que delimitam antigos vulcões (TRAVASSOS, 2014), mas ainda não há comprovação disso. O presente estudo pretende fornecer informações precisas sobre a localização de áreas onde as rochas relacionadas às estruturas anteriormente citadas poderiam aflorar de modo a comprovar as hipóteses citadas acima.

Além disso, o curso de geologia da Universidade Federal do Pampa é ministrado no Campus Caçapava do Sul, que possui proximidade com a área de estudo, propiciando a possibilidade de comprovação dos afloramentos *in situ* a um baixo custo e fácil acesso. O estudo desses lineamentos e anomalias também foi profundamente facilitado devido a trabalhos prévios relacionados ao Projeto de Pesquisa intitulado “Investigação de Lineamentos Magnéticos no Rio Grande do Sul”, de autoria do Prof. Tiago Rafael Gregory, registrado no sistema de projetos da Unipampa. Outro trabalho de notável contribuição para esse estudo são os levantamentos aeromagnéticos feitos pela empresa LASA PROSPECÇÕES S.A. a pedido da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) para a realização do projeto aerogeofísico do Rio Grande do Sul do Programa Geologia do Brasil (PGB).

O trabalho também se justifica pela viabilidade em termos de logística, pois os trabalhos de campo terão apoio da frota de veículos e motoristas disponibilizados pelo Campus Caçapava do Sul e o processamento dos dados geofísicos terá apoio

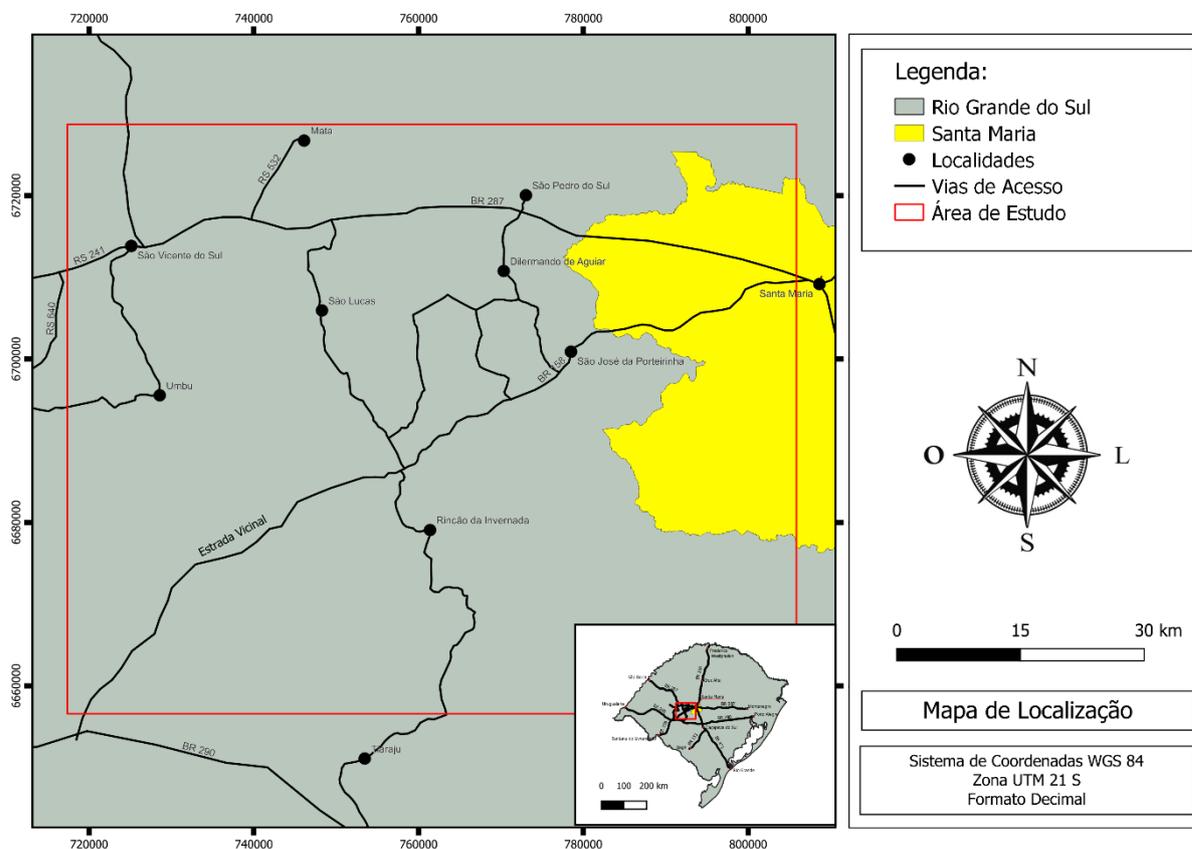
do Laboratório de Análise de Sinais Geofísicos (LASG), localizado no Campus Caçapava do Sul, o qual possui *softwares* para tais rotinas.

4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na América do Sul, no Brasil, no estado do Rio Grande do Sul (RS), nas redondezas do município de Santa Maria. O estado do RS faz fronteira com o Uruguai ao sul, com a Argentina a oeste, com o Oceano Atlântico a leste e com o estado de Santa Catarina a norte. O município de Santa Maria faz divisa com os municípios de Itaara, Júlio de Castilhos, São Martinho da Serra, São Gabriel, São Sepé, Silveira Martins, Restinga Seca, Formigueiro, São Pedro do Sul e Dilermando de Aguiar. As principais vias de acesso para a área de estudo são as vias federais BR-153, BR-158, BR-287 e BR-392, e a estrada estadual RS-149.

O processamento dos mapas foi feito sob a poligonal da Figura 1, que possui 6377 Km².

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo com principais vias de acesso.



Fonte – Modificado de IBGE (2021).

4.1 GEOLOGIA REGIONAL

Á área de estudo está compreendida no limite entre a Bacia do Paraná e o ESrg. De acordo com o Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul (escala 1:750.000), no perímetro da área de estudo existem estruturas (falhas e fraturas) de direção NW – SE (CPRM, 2006). Dentre essas estruturas pode-se destacar uma falha normal a sudeste do centro urbano de Santa Maria, com bloco NE abatido. Na Folha SH.22-V-C-IV Santa Maria (escala 1:100.000), em uma escala de mais detalhe, já estão representadas, além das estruturas NW – SE, estruturas de sentido NE – SW (CPRM, 2016). No Relatório de Recursos Minerais da Folha Santa Maria SH.22-V-C-IV (CPRM, 2018), uma interpretação geofísica preliminar, elaborada sobre o mapa aerogeofísico da região, delimita algumas estruturas e lineamentos que vieram a

compor o mapa de estruturas final da folha SH.22-V-C-IV e, dentre essas estruturas, destaca-se o Lineamento Magnético Formigueiro, já identificado na obra de Travassos et al. (2014). De maneira geral, tanto as estruturas de sentido NW – SE como as de sentido NE – SW possuem íntima relação com o objeto de estudo do trabalho, uma vez que muitas delas podem ser identificadas pela análise dos mapas aeromagnéticos.

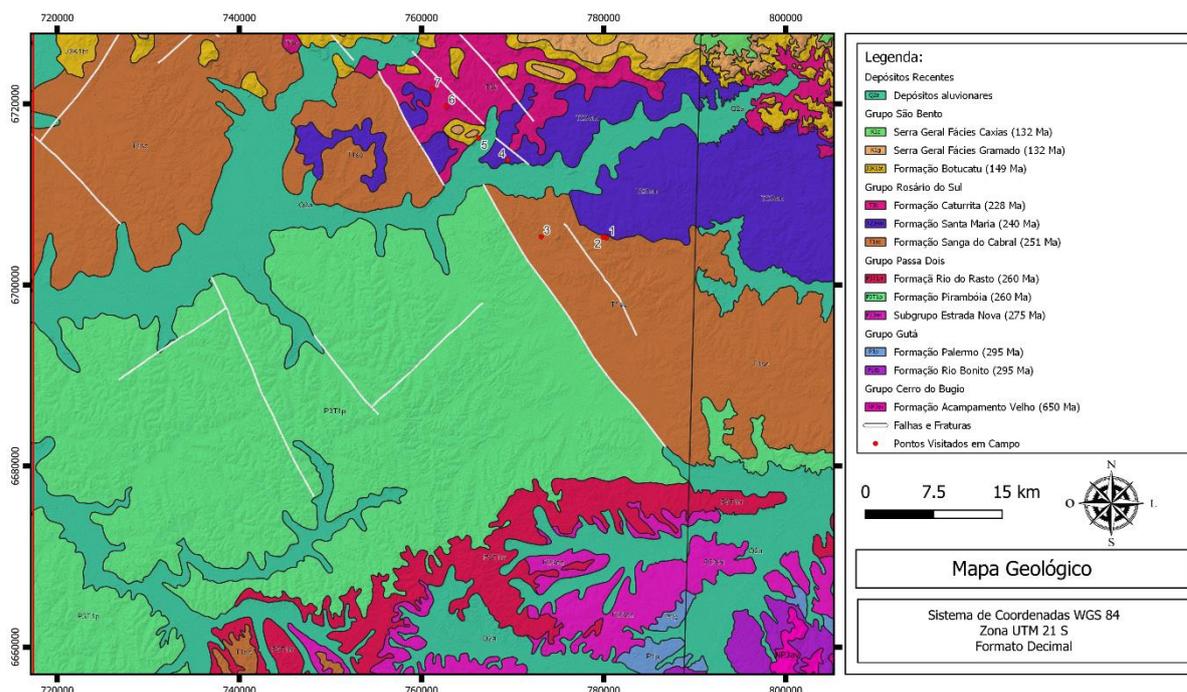
4.1.1 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é uma região sedimentar Sul-americana que se estende desde o Mato Grosso do Sul até o Rio Grande do Sul, com porções que abrangem também o norte da Argentina, o leste do Paraguai e o norte do Uruguai. O registro estratigráfico da bacia é composto de um pacote sedimentar-magmático com até 7 mil metros em seu ponto mais espesso (MILANI et al, 2007). Em mapa, a bacia possui uma orientação incipiente NW–SE e uma largura média de 900 Km. Milani (1997) reconhece seis grandes pacotes rochosos (supersequências) que compõem essa bacia: Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru. As primeiras três supersequências são compostas por sucessivos eventos de deposição sedimentar relacionados a ciclos transgressivos-regressivos durante o Paleozoico, enquanto as demais sequências são pacotes sedimentares continentais, com rochas ígneas associadas (MILANI et al., 2007).

O início da formação da Bacia do Paraná se deu no Neo-Ordoviciano, com eventos compressivos derivados da Orogenese Oclóyca (RAMOS et al., 1986). O choque do terreno pré-cordilheira com o Gondwana teve como resposta a geração da subsidência inicial da Bacia do Paraná de modo a acomodar os esforços gerados pelo choque (MILANI et al., 1998). Zonas de fraqueza do embasamento, de direção SW–NE serviram de conexão mecânica para que os esforços compressivos da margem convergente do Gondwana fossem dissipados até o interior do continente (MILANI et al., 2007). Esses esforços foram acomodados no terreno da Bacia do Paraná na forma de uma sinéclise. Essa sinéclise serviu de ambiente deposicional para a primeira supersequência da bacia, a Supersequência Rio Ivaí e as zonas de fraqueza do embasamento serviram de conduto para ascensão do basalto Três Lagoas (MILANI et al., 2007). Desse ponto em diante, a bacia passou por sucessivos ciclos transgressivos e regressivos e até mesmo ciclos de abertura de oceanos.

Na área de estudo (Figura 2), localizada nos arredores de Santa Maria, a cobertura da Bacia do Paraná é representada expressivamente pela Supersequência Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico) e II (Meso a Neo-triássico), e de maneira menos pronunciada, pela Supersequência Gondwana III (Jurássico – Eocretáceo).

Figura 2 – Mapa geológico da área de estudo com pontos visitados, ilustrando as principais litologias e estruturas.



Fonte – Modificado de CPRM 2006 e CPRM 2016.

4.1.1.1 Supersequência Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico)

A sequência Gondwana I tem sido alvo de diversos estudos ao longo dos últimos anos, principalmente devido a seu alto potencial mineiro em função da existência de vastas mineralizações de carvão na formação Rio Bonito e do seu potencial petrolífero, dada a presença tanto rochas geradoras como rochas reservatório nesse depósito (MILANI et al., 2007). Essa sequência engloba o maior volume sedimentar quando comparada com as demais, chegando em espessuras de até 2.500 m (MILANI, 1997). O ambiente deposicional da unidade é um dos mais diversificados das supersequências, abrangendo desde sedimentação glacial (Neocarbonífero) até ambientes áridos de interior continental (Mezozoico). Em termos litoestratigráficos ela se divide nas seguintes sequências:

- Grupo Itararé e Formação Aquidauana (contexto Glacial);
- Grupo Guatá (contexto marinho transgressivo/fluvial);
- Grupo Passa Dois (contexto regressivo marinho/fluvial/eólico);
- formações Pirambóia e Sanga do Cabral (conteto fluvial/eólico).

No Eocarbonífero, o Gondwana estava posicionado mais próximo do sul, de maneira que a sua porção sul-ocidental tornou-se palco de eventos de deposição glacial. Com o avançar do supercontinente para o norte, a sedimentação afastou-se progressivamente do contexto glacial que estava inserida e passou a um contexto mais árido.

4.1.1.2 Supersequência Gondwana II (Meso a Neotriássico)

A sequência Gondwana II é composta por intercalações pelíticas (formações Sanga do Cabral e Santa Maria) e areníticas (formação Caturrita), relacionadas ao desenvolvimento de grábens distensivos assimétricos. A deposição desses estratos fluviais sobre a rampa flexural do sistema preservou o mergulho do substrato para norte na porção gaúcha e para sul na porção uruguaia (MILANI et al., 2007). As rochas depositadas nesse período são de suma importância para a delimitação de uma das maiores estruturas do Rio Grande do Sul, o Arco de Rio Grande (ARG). Os pacotes sedimentares fluviais dessa supersequência foram utilizados para delimitar os flancos norte e sul do ARG (ASMUS & BAISCH, 1983; GALLAGHER & AHAWKESWORTH, 1994; BRUCKMANN & PHILIPP, 2016). Uma vez que evidências estruturais e de traços de fissão indicam que o ARG teve o soerguimento iniciado no limite Permo-Triássico e sua instalação definitiva no Triássico Superior, essas rochas formadas de maneira concomitante ao soerguimento do arco tiveram seus mergulhos utilizados para identificar o mergulho dos próprios flancos norte e sul do arco (ASMUS & BAISCH, 1983; GALLAGHER & AHAWKESWORTH, 1994; BRUCKMANN & PHILIPP, 2016). Em termos litoestratigráficos ela se divide nas seguintes sequências:

- Formações Sanga do Cabral e Santa Maria (contexto lacustre/fluvial);
- Formações Caturrita (contexto eólico/fluvial).

4.1.1.3 Supersequência Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo)

Na área de estudo (Figura 2), de maneira menos pronunciada, ocorrem litologias relacionadas a supersequência Gondwana III (Jurássica – Eocretácia). Essa sequência é composta pelos sedimentos eólicos do deserto do Botucatu e derrames basálticos do magmatismo Serra Geral (MILANI et al, 1994). A composição dos sedimentos da bacia é quase que exclusivamente por arenitos médios a finos de elevada esfericidade e aspecto fosco, que exibem estratificação cruzada tangencial, de médio a grande porte. Em pontos mais ao norte da bacia, que não é o caso da área de estudo desse trabalho, ocorrem pontualmente locais de ocorrência de arenitos formados em contextos alúvio – fluvial (ALMEIDA & MELO, 1981). Em termos litoestratigráficos ela se divide nas seguintes sequências:

- Formação Botucatu (contexto eólico/fluvial).
- Grupo São Bento (Formação Serra Geral)

4.1.1.4 Magmatismo Serra Geral

O magmatismo Serra Geral é considerado a maior manifestação ígnea não oceânica que ocorreu no Fanerozoico (MILANI et al., 2007). Na Bacia do Paraná, esse evento magmático se manifesta como uma grande rede de diques, com múltiplos níveis de soleiras e espessas coberturas de lavas, que se estendem por praticamente toda a extensão da bacia com espessuras de até 2000 m. Essa rede de diques e soleiras se formou aproveitando planos de estratificação dos sedimentos paleozoicos das sequências da Bacia do Paraná. A formação Serra Geral é composta principalmente por basaltos toleíticos e andesitos basálticos, com ocorrências pontuais de riolitos e riodacitos (PEATE et al., 1992). Atualmente, em termos geoquímicos (TiO_2 e P_2O_5), o derrame é dividido em 3 porções:

- 1 Bacia Paraná Sul: a sul do lineamento Rio Uruguai;
- 2 Bacia Paraná Norte: a norte do lineamento Rio Piquiri;
- 3 Bacia Paraná Central: entre os lineamentos Rio Uruguai e Rio Piquiri.

Belieni et al. (1984) & Mantovani et al. (1985) definiram que na porção norte da bacia as rochas eram predominantemente enriquecidas em TiO_2 , ao passo que mais ao sul as rochas progressivamente se empobreciam nesse constituinte. Sobre essa

informação conclui-se que houve uma evolução magmática do norte para o sul, de modo que o magma gerador foi progressivamente empobrecido nesse constituinte.

Em termos geocronológicos a formação está posicionada em um intervalo entre 127 Ma e 137 Ma (MILANI et al., 2007). Diques de direção NW-SE, associados ao Arco de Ponta Grossa têm datações resultantes em $134,1 \pm 1,3$ Ma e $130,5 \pm 2,8$ Ma.

4.2 GEOLOGIA LOCAL (SÍNTESE)

De acordo com o Projeto Geologia do Brasil ao Milionésimo - Programa Geologia do Brasil (CPRM, 2006), a litologia da Área 1 é composta por conglomerados, brechas e siltitos triássicos da Formação Sanga do Cabral, na porção sudeste e centro-norte da área; uma pequena porção composta por arenitos, arenitos conglomeráticos e pelitos triássicos, da Formação Santa Maria, a leste; arenitos médios e finos triássicos, da Formação Pirambóia, a sul (englobando quase toda parte inferior do mapa da área); arenitos finos a grossos bem selecionados e com alto arredondamento e esfericidade triássicos, da Formação Botucatu, de ocorrências pontuais a norte e noroeste do mapa; basaltos e diabásios do Cretáceo com horizontes vesiculados, algumas amígdalas de zeólitas, estruturas de fluxo pahoehoe e comum intercalação com arenitos do Botucatu, da Formação Serra Geral, Fácies Gramado que ocorrem pontualmente na porção centro norte; riolitos e riodacitos microgranulares a vitrofíricos com pontuais esferulitos da formação Serra Geral, Fácies Caxias, aflorantes a noroeste; depósitos holocênicos, que “cortam” a área de leste a oeste em sua porção central. Abaixo segue a tabela com as informações sintetizadas.

Tabela 1 – Principais litologias da Área 1 sintetizadas.

Unidade	Tipo	Ambiente	Litologia	Geometrias	Período	Idade Aproximada (Ma)
Serra Geral Fácies Caxias	Ígnea	Dorsal/intraplaca	Riodacito; Riolito; Autobrecha	Disjunção tabular no topo dos derrames; Maciça na porção central; Dobras de fluxo	Cretáceo	132
Serra Geral Fácies Gramado	Ígnea	Dorsal/Intraplaca	Basalto; Arenito; Peperito	Estruturas de fluxo e comuns intercalações com os arenitos Botucatu.	Cretáceo	132
Formação Botucatu	Sedimentar	Continental desértico	Arenito	Geometrias cruzadas de grande porte; Ripples Subaéreas	Jurássico	149
Formação Caturrita	Sedimentar	Continental fluvial/lacustre	Arenito; Conglomerado; Siltito; Folhelho	Geometrias tabulares; Lenticulares	Triássico Superior	228
Formação Santa Maria	Sedimentar	Continental fluvial/lacustre	Arenito; Pelito; Siltito	Geometrias cruzadas; Lenticulares; Maciço	Triássico Médio	240
Formação Sanga do Cabral	Sedimentar	Continental fluvial	Brecha; Conglomerado; Siltito e Argilito	Geometrias tabulares; Lenticulares	Triássico Inferior	251
Formação Pirambóia	Sedimentar	Continental Eólico/fluvial	Arenito Médio a Fino.	Geometrias lenticulares associadas a ambiente eólico.	Permiano	260
Formação Rio do Rastro	Sedimentar	Continental lacustre/deltaico/fluvial/eólico	Pelito; Arenito; Siltito	Geometrias tabulares; Lenticulares	Permiano	260
Subgrupo Estrada Nova	Sedimentar	Marinho off-shore	Folhelho; Siltito e Argilito; Calcário; Marga e Folhelho Betuminoso	Geometrias tabulares, cruzadas, tempestíticas e outras associadas a deposição off-shore	Permiano	275
Formação Palermo	Sedimentar	Marinho off-shore	Siltito; Arenito fino; Folhelho; Conglomerado	Geometrias tabulares, cruzadas, tempestíticas e outras associadas a deposição off-shore	Permiano	295
Formação Rio Bonito	Sedimentar	Marinho deltaico	Arcoseo; Arenito; Siltito; Carbonáticas; Folhelho; Carvão.	Geometrias tabulares, cruzadas e outras associadas ao ambiente deposicional.	Permiano	295
Formação Acampamento Velho	Ígnea/sedimentar	Continental Aluvial	Sienitos; Traquitos; Monzodioritos; Tufas; Brechas; Ignimbritos Basaltos; Piroclásticas; Conglomerados; Pelitos; Arenitos	Depósitos de fluxo piroclástico; geometrias associadas a deposição deltaica	Ediacarano	650

Fonte - Modificado de Projeto Geologia do Brasil ao Milionésimo - Programa Geologia do Brasil (CPRM, 2006).

4.3 TECTÔNICA DO ARCO DE RIO GRANDE

O Arco de Rio Grande (ARG) é uma estrutura de larga escala que ocorre no sul do Brasil, soerguendo rochas do escudo cristalino e da Bacia do Paraná (ASMUS & BAISCH, 1983; GALLAGHER & AHAWKESWORTH, 1994; BRUCKMANN & PHILIPP, 2016). Essa estrutura se estende do norte ao sul do estado de Rio Grande do Sul com um alinhamento N50°W e é delimitada ao norte pelo sistema de falhas Jaguari – Mata e ao sul pelas Falhas Jaguari e Ibaré. A caracterização do ARG ocorreu, inicialmente, a partir da análise dos principais lineamentos visíveis em imagens de satélite e mapas geológicos da Bacia do Paraná (ASMUS & BAISCH, 1983; GALLAGHER & AHAWKESWORTH, 1994; BRUCKMANN & PHILIPP, 2016). Essa estrutura de escala regional é interpretada como um horst que soergue o embasamento da Bacia do Paraná e do ESrg, de modo que é possível visualizar, na Bacia do Paraná, um aumento progressivo da espessura das camadas a norte e a sul dessa estrutura, onde estão seus flancos (PHILIPP et al., 2014). Dados estratigráficos relacionados à arquitetura de fácies e geocronológicos, associados a traços de fissão, sugerem que essa estrutura teve sua formação iniciada no limite Permo – Triássico e consolidou-se no Triássico inferior (PHILIPP et al., 2014; BRUKMANN & PHILIPP, 2016). Sendo assim, a consolidação do arco é dita concomitante à deposição dos sedimentos do Grupo Rosário do Sul (FACCINI, 2000) e os dados estruturais de paleocorrentes desse grupo foram utilizados para determinar o mergulho e a direção de mergulho dos flancos sul e norte do ARG.

O ARG ainda carece de estudos mais detalhados sobre a caracterização de seus lineamentos, sua natureza, mineralizações associadas e demais características. Mas recentemente, trabalhos relacionados à investigação dos lineamentos magnéticos do Rio Grande do Sul estão ajudando na caracterização dessas estruturas e na melhor compreensão do ARG (COSTA, 2016; FAÉ et al., 2017; SAMPAIO, 2019; GREGORY et al., 2019; MARAN et al., 2020).

5 TRABALHOS ANTERIORES APLICADOS

Diversos autores já constataram a presença de lineamentos de direção NW e NE espalhados por parte do Escudo Sul-rio-grandense (ESrg) e parte da Bacia do Paraná (COSTA, 1997; PHILIPP, 2016; GREGORY et al., 2019). Gregory et al. (2019) e Sampaio (2019) atribuíram aos lineamentos de direção NW um importante

significado na evolução do magmatismo Serra Geral, postulando que eles possivelmente serviram de condutos vulcânicos para a passagem do magma. Costa (1997), Philipp (2016) e Gregory et al. (2019) afirmam que os lineamentos de direção NE espalhados pelo escudo são importantes estruturas geradas a partir da aglutinação do supercontinente Gondwana.

Travassos (2014), Costa (2016), Fae et al. (2017), Gregory et al. (2019) e Maran et al. (2020) são exemplos de autores que utilizaram o comportamento geofísico da superfície e subsuperfície para delimitar com maior precisão esses lineamentos e entender melhor o seu significado geológico. Travassos (2014) delimitou lineamentos magnéticos no ESrg e em parte da Bacia do Paraná e os compartimentou em 5 domínios magnéticos: Domínio Taquarembó, Domínio São Gabriel, Domínio Tijucas, Domínio Pelotas e Domínio Paraná. Costa (2016) foi capaz de encontrar estruturas de direção NW-SE em subsuperfície, no Terreno São Gabriel e sugere que os dados sejam utilizados para aprofundar ainda mais o conhecimento sobre esses lineamentos.

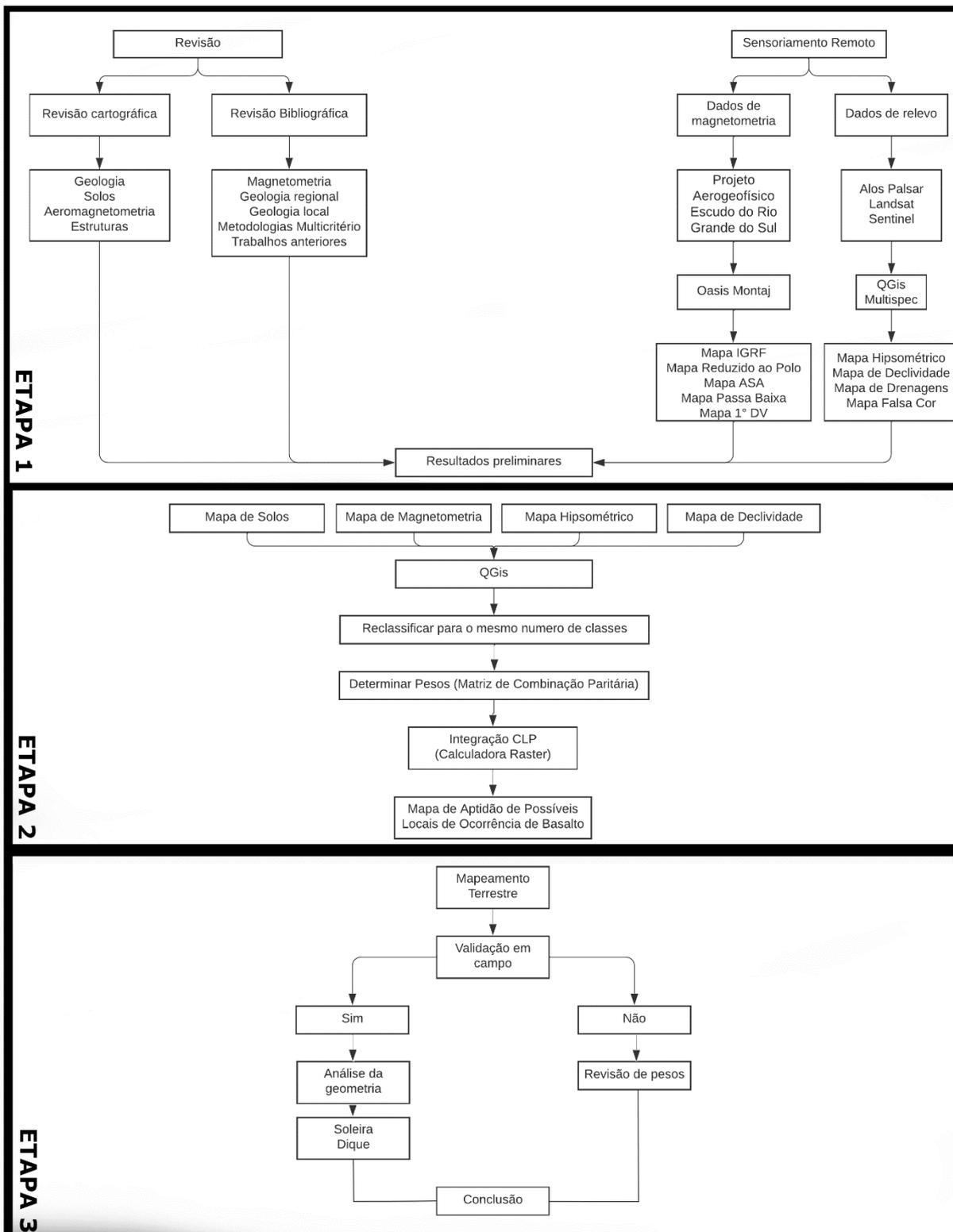
Gregory et al. (2019) salientam a relação destas estruturas no ESrg com o Arco de Rio Grande (ASMUS & BAISH, 1983; GALLAGHER & HAWKESWORTH, 1994), de maneira análoga ao exposto por Philipp (2014) e Brukmann & Philipp (2016) para a Bacia do Paraná, salientando que: “o Arco de Rio Grande construiu-se a partir de sistemas de falhas normais e inversos com escala de poucos centímetros de rejeito, em unidades permianas e triássicas que, somadas, representam escalas de metros”.

6 ETAPAS DO TRABALHO

O fluxograma apresentado a seguir (Figura 3) demonstra as etapas adotadas no desenvolvimento do presente trabalho. A subdivisão em etapas facilita a compreensão dos procedimentos a serem adotados para obter o produto final do estudo, o Mapa de Aptidão.

- Etapa 1: Engloba revisão bibliográfica, revisão de metodologias e o início do processamento SIG;
- Etapa 2: Consiste no sensoriamento remoto da área, processamento dos mapas de interesse e planejamento de campo;
- Etapa 3: Consiste na validação em campo dos resultados obtidos na Etapa 2.

Figura 3 - Fluxograma do estudo.



Fonte – Autor (2022).

7 MATERIAIS E MÉTODOS

O principal alvo de investigação nesse trabalho é o comportamento de anomalias geofísicas magnéticas da superfície e subsuperfície da área de estudo. Por isso, é de suma importância que seja elucidado a teoria que existe por trás desse comportamento: a teoria da magnetometria. Além da magnetometria, é importante o entendimento dos procedimentos de Análise Multicritérios (AMC) aplicados no processamento dos mapas que integram o resultado final do trabalho.

A AMC é um método de resolução de problemas que emprega diversos critérios relacionados ao objeto de estudo a fim de estabelecer, baseado nesses critérios, a melhor alternativa para a resolução de problemas como, por exemplo no caso desse estudo, o problema de delimitar áreas propícias a ocorrência de afloramentos de basalto. Um dos métodos mais utilizados de AMC é a Combinação Linear Ponderada (CLP) (VOOGD, 1983). A aplicação da CLP em ambientes de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) geralmente ocorre atrelada à Análise Hierárquica ou, em inglês, Analytic Hierarchy Process (AHP). Todas as metodologias citadas anteriormente tem parte de sua fundamentação teórica derivada da Lógica Fuzzy (SOUZA, 2019). Nesse estudo a metodologia AMC aplicada foi a CLP em conjunto com a AHP. A fundamentação teórica de cada um desses métodos encontra-se no **Apêndice A**. A seguir é descrita a aplicação dessas metodologias na prática.

7.1 Combinação Linear Ponderada (CLP) Aplicada

Nessa etapa são seguidos os quatro passos descritos por Eastman (2003) na aplicação da CLP:

- Identificação dos critérios;
- Padronização dos critérios;
- Definição do peso dos critérios;
- Integração dos critérios.

7.1.1 Identificação dos Critérios

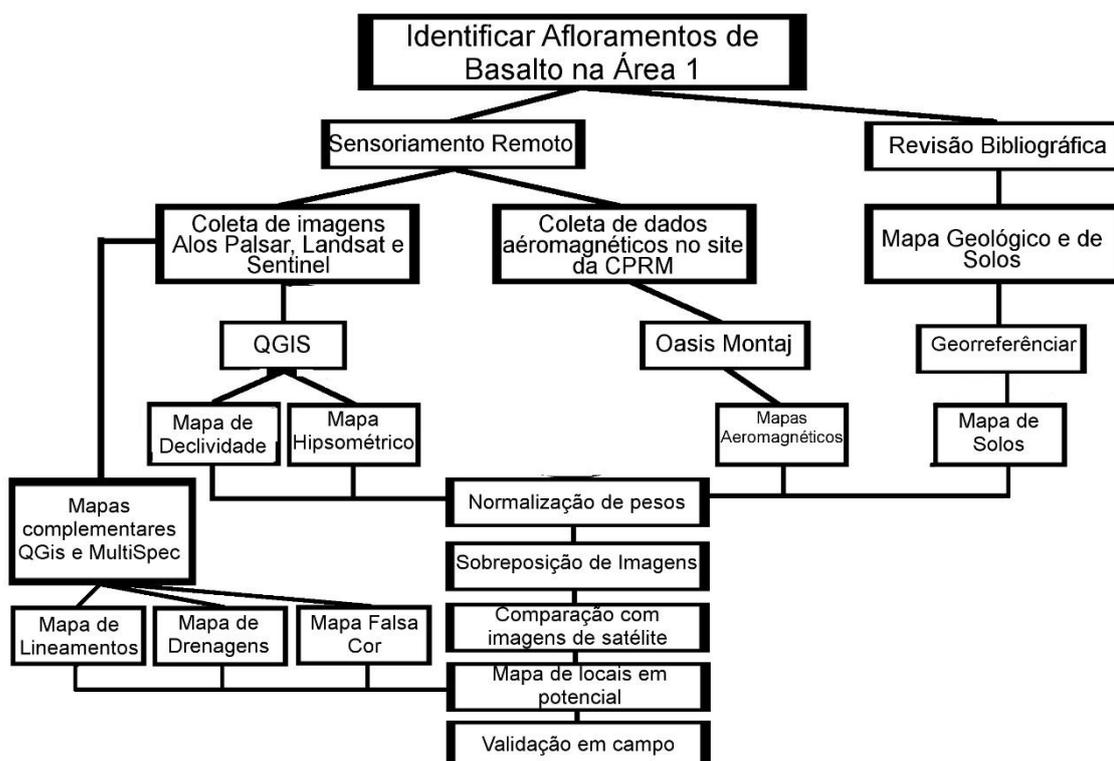
Para identificar os mapas (critérios) que vieram a ser utilizados no desenvolvimento do trabalho foram utilizadas a metodologia de Análise Hierárquica “AHP”. A elaboração da árvore hierárquica (Figura 4) contém critérios de interesse

para o desenvolvimento do produto final do estudo (um mapa capaz de apontar locais de provável ocorrência de afloramentos de basalto). Além dos critérios de interesse, a árvore hierárquica auxilia na organização dos passos necessários para chegar ao objetivo final do estudo.

Os mapas (critérios) de interesse para o estudo estão ilustrados na figura abaixo. São eles:

- Mapa de Declividade;
- Mapa Hipsométrico;
- Mapas Aeromagnéticos;
- Mapa de Solos.

Figura 4 - Arvore hierárquica do estudo em questão.



Fonte – Autor (2022).

Com os critérios acima definidos, o primeiro passo da CLP está feito (definição dos critérios). De acordo com Eastman (2003), os três próximos passos são respectivamente: executar a padronização desses critérios, atribuir pesos individuais a cada um deles e por fim integra-los em um único mapa.

Para a geração dos mapas aeromagnéticos foram utilizados dados aeromagnetométricos (CPRM, 2010). Esses dados foram processados utilizando o pacote Grav-Mag Suite (CASTRO et al., 2018) do programa MATLAB, disponível no Laboratório de Informática da UNIPAMPA (2022). Eles foram usados para gerar distintos mapas aéromagnéticos que pudessem realçar os alvos desse estudo (basaltos). Os materiais e métodos aplicados na geração de cada mapa de magnetometria e descrição individual de cada mapa aeromagnético gerado nesse relatório podem ser encontradas no **Apêndice B**.

Para a geração dos modelos digitais de elevação e das redes de drenagens foram imagens do sensor Palsar do satélite Alos (resolução de 12,5 m X 12,5m por pixel; ASF, 2022). Para gerar o mapa de solos, o Mapa Exploratório de Solos do Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2002) foi georreferenciado permitindo seu processamento em ambientes de SIG. Os mapas citados anteriormente foram gerados com o software QGIS 3.24.3, no Laboratório de Modelagem Geológica (LABMODEL). Uma descrição detalhada dos métodos empregados na geração de cada mapa no *software* QGIS pode ser encontrada no **Apêndice C**.

7.1.2 Padronização dos Critérios (Reclassificação)

Com os mapas (critérios) de interesse definidos por meio da árvore hierárquica, é necessário reclassifica-los para um mesmo número de classes, para que eles sejam comparáveis entre si. Para isso é necessário definir quantas classes o operador pretende obter em seu mapa final. Existem dois tipos de padronização que podem ser aplicadas: a Binária, que vai apresentar apenas áreas aptas e inaptas ao propósito do estudo; e a Composta, que apresentara diferentes valores de aptidão/veracidade para a ocorrência do objeto de estudo. Para o presente estudo foi utilizada uma composição de 5 classes (Tabela 2), ou seja, existem 5 valores de probabilidade de ocorrência do basalto na área de estudo:

- 1 – 0 a 20 %
- 2 – 20 a 40 %
- 3 – 40 a 60 %
- 4 – 60 a 80%
- 5 – 80 a 100%

Vale ressaltar que todas as classes são classes de probabilidade, ou seja, mesmo um valor próximo a 100 % pode não ser assertivo na localização do objeto de estudo.

O procedimento de reclassificação consiste na análise dos valores de classes pré-existentes em cada mapa (critério) e no julgamento de qual o valor correspondente para essas classes quando observada a Tabela 2. Desse modo, após a reclassificação, todos os mapas apresentarão o mesmo número de classes, que varia de 1 a 5.

Tabela 2 - Classes de probabilidade de ocorrência de basaltos aflorando utilizadas para a reclassificação dos critérios.

Tabela de Reclassificação		
Classe	Significado	Representação Gráfica (em mapa e em tabelas)
1	Baixa probabilidade de encontrar basaltos aflorando	
2	Baixa/média probabilidade de encontrar basaltos aflorando	
3	Média probabilidade de encontrar basaltos aflorando	
4	Média/alta probabilidade de encontrar basaltos aflorando	
5	Alta probabilidade de encontrar basaltos aflorando	

Fonte – Autor (2022).

Para a adaptação de cada mapa ao novo sistema de classificação foram elaboradas tabelas que continham o valor da classificação antiga e nova. O peso de cada classe foi definido levando em conta critérios geológicos e geomorfológicos que pudessem condicionar a ocorrência de afloramentos de basalto na área de estudo. A reclassificação foi feita utilizando a ferramenta do QGIS “Reclassificar por Tabela”. Informações detalhadas de como a ferramenta foi empregada podem ser encontradas no **Apêndice C**.

7.1.2.1 Reclassificação de Hipsometria

O critério geológico utilizado na reclassificação do mapa hipsométrico foi baseado na hipótese de que o basalto poderia ocorrer com a geometria de soleiras em meio ao substrato sedimentar. Isso é importante na hora de definir as novas

classes, pois pensando-se do ponto de vista puramente geomorfológico é mais improvável achar rochas aflorando *in situ* em áreas de baixa altitude, uma vez que processos erosivos atuantes em baixas altitudes são mais sutis que os atuantes em altas altitudes, que dispõem de maior energia. Em outras palavras, em uma situação convencional as classes referentes as maiores cotas seriam reclassificadas como as mais aptas a ocorrência de afloramentos. Contudo, levando em conta o critério geológico citado no início do parágrafo e os relevos suaves da área de estudo, é provável encontrar o basalto em baixas altitudes, porque ele ocorre, provavelmente, em soleiras. Considerando essa hipótese, o basalto teoricamente soergue as rochas sedimentares, fazendo com que estas fiquem em cotas mais altas do terreno, enquanto o basalto “toma” seus lugares nas menores cotas. Levando em consideração as colocações anteriores, chegou-se à reclassificação que consta na Tabela 3.

Tabela 3 - Tabela de reclassificação do Mapa Hipsométrico.

Tabela de Reclassificação de Hipsometria			
Classe	Rótulo	Valor de Reclassificação	Significado
1	37 - 81 m	4	Média/alta associação com afloramentos de basalto
2	81 - 125 m	3	Média associação com afloramentos de basalto
3	125 - 169 m	1	Baixa associação com afloramentos de basalto
4	169 - 213 m	2	Baixa/média associação com afloramentos de basalto
5	213 - 257 m	2	Baixa/média associação com afloramentos de basalto
6	257 - 301 m	3	Média associação com afloramentos de basalto
7	301 - 345 m	4	Média/alta associação com afloramentos de basalto
8	345 - 389 m	5	Alta associação com afloramentos de basalto
9	389 - 433 m	5	Alta associação com afloramentos de basalto
10	> 433 m	5	Alta associação com afloramentos de basalto

Fonte – Autor (2022).

7.1.2.2 Reclassificação de Declividade

Como o trabalho objetiva encontrar basaltos aflorando, é mais provável encontrar estes em encostas/vertentes íngremes. Quando a declividade do terreno é acentuada, os processos erosivos atuam com maior intensidade, já que dispõem de maior energia. Uma alta taxa de erosão é importante, pois pode retirar a cobertura de solo do terreno (lavar os horizontes A, B e C), expondo a rocha matriz (horizonte D).

Esse solo não é retirado apenas pelo escoamento da água constante sobre áreas íngremes, mas também por instabilidade do terreno.

Ângulo de repouso é a inclinação máxima que determinado terreno pode ter sem colapsar. De acordo com o que diz Press (2006, p. 293), “O ângulo de repouso varia significativamente devido a diversos fatores, entre eles o tamanho e a forma das partículas”. É válido ressaltar que quando o solo se encontra saturado, pode haver uma força de coesão entre as partículas (principalmente nas granulometrias finas) que faz com que elas possam se sustentar com maiores ângulos de repouso.

De acordo com o Manual Técnico de Geomorfologia (IBGE, 2005), é característica de terrenos com declividade acima de 45% a presença horizontes de solo superficiais pouco espessos e a presença de pedregosidade e afloramentos rochosos. Considerando isso, seria racional conceder o peso 5 apenas para as declividades acima de 45%, porém isso não é aplicável na área de estudo uma vez que no local onde se pretende encontrar basalto a geomorfologia é suave, principalmente “ondulada”.

Um fator a ser considerado é que rochas básicas, quando alteradas, tendem a dar origem a argilominerais 2:1 do grupo das esmectitas ($Al_2Si_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$). Isso ocorre porque elas geralmente contém minerais máficos e do grupo dos plagioclásios (feldspatos cálcicos), que se alteram deixando íons de cálcio, sílica e magnésio livres para serem utilizados na formação de cristais de esmectitas. As esmectitas possuem granulometria fina, são pouco permeáveis, muito porosas e, de uma maneira geral, resistentes à erosão devido a suas propriedades coesivas. Na área de estudo o que se espera encontrar sobre as rochas basálticas são solos com horizontes B repletos de esmectitas. Sendo assim, o solo poderia continuar coeso e resistente a erosão mesmo com altos ângulos de declividade.

Levando em consideração as colocações anteriores, chegou-se à reclassificação que consta na Tabela 4.

Tabela 4 - Tabela de reclassificação do Mapa de Declividade.

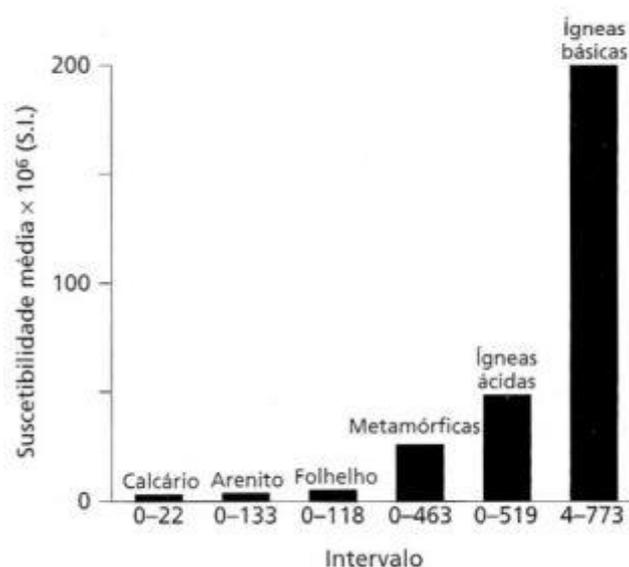
Tabela de Reclassificação de Declividade			
Classe	Rótulo	Valor de Reclassificação	Significado
1	Plano (0 - 3 %)	1	Baixa associação com afloramentos
2	Suave Ondulado (3 - 8 %)	2	Baixa/média associação com afloramentos
3	Ondulado (8 - 20 %)	3	Média associação com afloramentos
4	Forte Ondulado (20 - 45 %)	4	Média/alta associação com afloramentos
5	Montanhoso (45 - 75 %)	5	Alta associação com afloramentos
6	Escarpado (> 75 %)	5	Alta associação com afloramentos

Fonte – Autor (2022).

7.1.2.3 Reclassificação de Magnetometria

De acordo com Kearey (2009, p. 279) “As rochas ígneas básicas são, em geral, altamente magnéticas em razão de seu conteúdo relativamente alto em magnetita” (Figura 5). Sendo assim as rochas básicas tendem a ter maior susceptibilidade magnética que as demais rochas da crosta, ou seja, em teoria elas devem apresentar maiores valores de densidade de fluxo magnético (nT). Considerando que a área de estudo é localizada quase que inteiramente sob unidades sedimentares da Bacia do Paraná (discussão nos tópicos 4.1 e 4.2), que são rochas tipicamente paramagnéticas, as anomalias magnéticas positivas do mapa são atribuídas às rochas ígneas da Formação Serra Geral. Essa hipótese é reforçada pelo fato de que a maior parte das anomalias magnéticas positiva coincide com o local onde ocorrem declaradamente as rochas basálticas do Serra Geral, na porção nordeste do mapa (Serra Geral Fácies Caxias e Gramado).

Figura 5 - Gráfico de valores médios e intervalos de suscetibilidade magnética dos tipos de rochas mais comuns.



Fonte – Kearey (2009).

Esse é o critério (mapa) principal do estudo, pois é ele quem tem o maior potencial de indicar os pontos correlacionáveis a ocorrência de basalto. Visto sua relevância, foi feita a aplicação de filtros sobre este, com a intenção de realçar de maneira satisfatória os basaltos que ocorrem próximos à superfície. A discussão individual de cada mapa aeromagnético gerado pode ser encontrada no **Apêndice B**. Aqui será discutido apenas a reclassificação do mapa aeromagnético utilizado nesse estudo, o mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA). Optou-se por utilizar este mapa pois ele é capaz de realçar fontes rasas e demonstrou-se fiel a delimitação de corpos basálticos na porção nordeste do mapa.

A reclassificação do mapa ASA se deu de tal forma que as classes de maior valores magnéticos (nT) foram atribuídas ao basalto e por consequência receberam maiores valores de classes, enquanto as classes de menor valores magnéticos foram atribuídas as demais rochas da área de estudo, de comportamento supostamente paramagnético. Levando em consideração as colocações anteriores, chegou-se à reclassificação que consta na Tabela 5.

Tabela 5 - Tabela de reclassificação do Mapa de Magnetometria ASA.

Tabela de Reclassificação de Magnetometria			
Classe	Rótulo	Valor de Reclassificação	Significado
1	(-) 210 - (-) 55 nT	1	Baixa associação com basalto
2	(-)55 - 20 nT	2	Baixa associação com basalto
3	20 - 75 nT	3	Média associação com basalto
4	75 - 145 nT	4	Média/alta associação com basalto
5	> 145 nT	5	Alta associação com basalto

Fonte – Autor (2022).

7.1.2.4 Reclassificação de Solos

De acordo com o Mapa Exploratório de Solos do Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2002), sob a área de estudo ocorrem 4 classes de solo (1° ordem); são eles:

- Argissolos;
- Chernossolos;
- Planossolos;
- Neossolos.

Figura 6 - Classes de solo e suas principais características.

Classes	Elementos formativos	Termos de conotação e de memorização
ARGISSOLO	ARGI	Do latim <i>argilla</i> , "argila"; conotativo de solos com processo de acumulação de argila
CAMBISSOLO	CAMBI	Do latim <i>cambiare</i> , "trocar", "mudar"; conotativo de solos em formação (transformação). Horizonte B incipiente
CHERNOSSOLO	CHERNO	Do russo <i>cherniy</i> , "preto"; conotativo de solos ricos em matéria orgânica, com coloração escura
ESPODOSSOLO	ESPODO	Do grego <i>spodos</i> , "cinza vegetal"; conotativo de solos com horizonte de acumulação iluvial de matéria orgânica associada à presença de alumínio. Horizonte B espódico
GLEISSOLO	GLEI	Do russo <i>gley</i> , "massa do solo pastosa"; conotativo de excesso de água. Horizonte glei
LATOSSOLO	LATO	Do latim <i>lat</i> , "tijolo"; conotativo de solos muito intemperizados. Horizonte B latossólico
LUVISSOLO	LUVI	Do latim <i>luere</i> , "lavar"; conotativo de translocação de argila. Horizonte B textural com alta saturação por bases e Ta
NEOSSOLO	NEO	Do grego <i>neo</i> , "novo"; conotativo de solos com pouco desenvolvimento pedogenético
NITOSSOLO	NITO	Do latim <i>nitidus</i> , "brilhante"; conotativo de superfícies brilhantes nas unidades estruturais. Horizonte B nítico
ORGANOSSOLO	ORGANO	Do latim <i>organicus</i> , "pertinente ou próprio dos compostos de carbono"; conotativo de solos com maior expressão da constituição orgânica. Horizonte H ou O
PLANOSSOLO	PLANO	Do latim <i>planus</i> , "plano"; conotativo de solos desenvolvidos em planícies ou depressões com encharcamento estacional. Horizonte B plânico
PLINTOSSOLO	PLINTO	Do grego <i>plinthos</i> , "ladrilho"; conotativo de materiais argilosos coloridos que endurecem quando expostos ao ar. Horizonte plíntico
VERTISSOLO	VERTI	Do latim <i>vertere</i> , "virar", "inverter"; conotativo de movimento de material de solo na superfície e que atinge a subsuperfície (expansão/contração). Horizonte vértico

Fonte - Mapa Exploratório de Solos do Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2002).

De acordo com o que se pode observar na figura acima, dentre os solos da área de estudo, o Neossolo Litólico pode ser entendido como o solo com maior probabilidade de ocorrência de afloramentos, uma vez que é classificado como um solo jovem, pouco desenvolvido e com ocorrência da rocha matriz no máximo a 50 cm abaixo da superfície. Esse solo tem íntima relação com o comportamento de declividade do terreno, uma vez que altas declividades geralmente implicam em horizontes de solo pouco desenvolvidos. Sendo assim, essa classe de solo foi reclassificada com o valor 4, por representar íntima relação com a ocorrência de afloramentos, mas não necessariamente relação com a ocorrência de basaltos.

Outra classe de solo que também recebeu um alto valor de reclassificação foi o Chernossolo, que tem como característica a ocorrência de altos valores de Cálcio, Magnésio e a presença de argilominerais do grupo das esmectitas em sua composição. Como já discutido anteriormente, as rochas básicas quando alteradas tendem a originar esmectitas. Também é de se esperar altos valores de Ca e Mg em solos derivados de rochas basálticas, justificando assim a reclassificação do valor de classe do Chernossolo para 5 (Tabela 6).

O Argissolo é a classe de maior ocorrência na área de estudo. Com a finalidade de melhor caracterizar essa área, a ordem de Argissolo foi a única subdividida em subordens, sendo elas Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho-Amarelo e Alissolo Crômico. Como descrito na Figura 6, os Argissolos têm como característica o acúmulo de argilas. No entanto, geralmente os argilominerais de ocorrência são caulinitas, que são minerais de alteração típicos de rochas de comportamento mais ácido do que básico. Sendo assim, essa ordem de solos foi reclassificada da seguinte forma; Argissolos Vermelhos receberam o valor 3 devido à presença de óxidos de ferro em seu horizonte B, que podem estar associados a uma rocha matriz de natureza básica; Argissolos Vermelho-Amarelos e Alissolos Crômicos receberam o valor 2 já que têm menor presença de óxidos de ferro quando comparados com os Argissolos Vermelhos.

Os Planossolos da área de estudo ocorrem no entorno dos cursos hídricos da área de estudo, coincidindo quase que de maneira assertiva com locais onde há a presença de depósitos aluvionares recentes. Sendo assim, foram reclassificados recebendo o valor 1.

Tabela 6 - Tabela de reclassificação do Mapa de Solos.

Tabela de Reclassificação de Solos			
Classe	Rótulo	Valor de Reclassificação	Significado
1	Neossolo Litólico	4	Média/alta associação com basalto
2	Planossolos Háplicos (Hidromórficos)	1	Baixa associação com basalto
3	Argissolo Vermelho	3	Média associação com basalto
4	Argissolo Vermelho-Amarelo	2	Baixa/média associação com basalto
5	Alissolos Crômicos	2	Baixa/média associação com basalto
6	Chernossolos Ebânicos	5	Alta associação com basalto

Fonte – Autor (2022).

7.1.3 Elaboração da Matriz de Combinação Paritária (MCP) e Definição de Pesos

A MCP é uma matriz que quadrada com número de colunas e linhas igual ao número de critérios. Ela permite a análise paritária de todos os critérios entre si (SAATY, 1977). Com ela é possível obter os pesos que serão atribuídos a cada mapa, que em outras palavras é a contribuição que cada mapa terá na geração do produto final, o mapa de aptidão. O número de linhas e colunas foi definido com base nos critérios (mapas) de interesse obtidos na Árvore Hierárquica. Sendo assim, nesse estudo foi utilizada uma matriz 4x4 (Matriz 1). Informações detalhadas sobre como elaborar a MCP e sua finalidade podem ser encontradas no **Apêndice A**.

Matriz 1 – Matriz de Comparação Paritária dos critérios/mapas utilizados nesse estudo.

	Mapa de Declividade	Mapa Hipsométrico	Mapa ASA	Mapa de Solos	Média Aritmética	Peso
Mapa de Declividade	1	2	1/3	4	1,8333	0,2545
Mapa Hipsométrico	1/2	1	1/3	4	1,4583	0,2025
Mapa ASA	3	3	1	7	3,5000	0,4860
Mapa de Solos	1/4	1/4	1/7	1	0,4107	0,0570
Soma					7,2024	1,0000

Fonte – Autor (2022).

Para que os pesos atribuídos a cada célula da matriz (linha vs coluna) tivessem bom grau de veracidade, o preenchimento dos valores foi feito com o auxílio do orientador do presente trabalho. Além do acompanhamento do orientador, a matriz também foi submetida ao teste de Razão de Consistência, onde o valor obtido foi de

“0,0135”, o que, de acordo com Saaty (2012), configura uma matriz consistente (Razão de Consistência menor que 0,1).

A relevância que cada mapa individual terá no mapa final pode ser entendida como o seu peso em porcentagem (Matriz 1).

7.1.4 Integração dos Critérios

Antes de citar a metodologia utilizada para a integração dos quatro critérios desse estudo (Declividade, Hipsometria, Magnetometria e Solos) em um único mapa, será aqui descrito de maneira breve como foram obtidos cada um dos critérios no formato de mapa. O processamento detalhado dos mapas de Declividade, Hipsometria e Solos pode ser encontrado no Apêndice C e o dos mapas Aeromagnéticos pode ser encontrado no Apêndice B.

7.1.4.1 Softwares Utilizados

O pacote Grav-Mag Suite, do *software* MATLAB permite que grandes volumes de dados numéricos sejam processados em imagens ou mapas. Além de permitir o processamento de dados de naturezas diversas ele ainda é capaz de georreferenciar esses dados para que os mapas gerados possam ser abertos em outros *softwares* de Sistema de Informações Geográficas (SIG). O pacote Grav-Mag Suite é de livre acesso e está atualmente em desenvolvimento como parte do programa de mestrado da Universidade Federal do Paraná (CASTRO et al, 2018). O *software* MATLAB (versão 2012) é disponibilizado pela UNIPAMPA no Laboratório de Informática.

Para o processamento dos demais critérios foi adotado o *software* QGIS 3.24.3 que é um *software* de SIG de livre acesso.

7.1.4.2 Dados Utilizados

Para a geração dos mapas Hisométricos e de Declividade foram utilizadas imagens de resolução 12,5 m X 12,5 m do sensor Palsar do satélite Alos (Tabela 7), obtidas pelo sistema de pesquisa de dados Vertex do *Alaska Satellite Facility* (ASF, 2022).

Tabela 7 - Principais aspectos do satélite Alos Palsar.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)	Resolução Radiométrica	Área Imageada
ANIVIR - 2	1	0,42 - 0,50	12,5	8 bits	70 Km (nadir)
	2	0,52 - 0,60			
	3	0,61 - 0,69			
	4	0,76 - 0,89			

Fonte – Modificado de Embrapa (2022).

Para a geração dos mapas aeromagnéticos foram utilizados dados aerogeofísicos (CPRM, 2010). Os dados são disponibilizados em forma de relatório e no formato XYZ. Esses dados contêm os seguintes itens (LASA PROSPECÇÕES S.A, 2010):

- Dados magnetométricos brutos e reduzidos da variação diurna;
- Dados magnetométricos nivelados, reduzidos do IGRF e micronivelados;
- Dados radiométricos brutos e corrigidos e respectivas razões;
- Altura e Altitude do Vôo;
- Posicionamento GPS: Coordenadas UTM, Latitude, Longitude e elevação GPS.

7.1.4.3 Integração dos Critérios no QGIS

Após todos os critérios/mapas terem sido reclassificados de acordo com os procedimentos descritos no **Apêndice C**, estes são importados para a área de trabalho do QGIS. Com os mapas foi efetuada a integração de cada um deles em um único mapa final, aqui denominado Mapa de Aptidão. Esse mapa é capaz de indicar locais mais aptos, prováveis e favoráveis à ocorrência de basalto na área de estudo.

A integração ocorreu por meio da aplicação da fórmula abaixo, dentro da ferramenta QGIS “Raster - Calculadora Raster”:

- Mapa de Aptidão = (critério(1) x peso do critério(1)) + (critério(2) x peso do critério(2)) + (critério(3) x peso do critério(3)) + ... (critério(n) x peso do critério(n))

A equação utilizada nesse relatório está descrita a seguir:

- Mapa de Aptidão = (mapa de declividade x 0,255) + (mapa de hipsometria x 0,202) + (mapa aeromagnético x 0,486) + (mapa de solos x 0,057)

Por meio da aplicação da fórmula acima o *software* integra todos os mapas/critérios em apenas um, gerando assim o Mapa de Aptidão, que nesse estudo é o mapa capaz de indicar locais de possível ocorrência de afloramentos de basalto.

7.2 MAPEAMENTO EM CAMPO

O mapeamento em campo foi feito com o intuito de comprovar a veracidade das informações fornecidas pelo Mapa de Aptidão. Esse mapa tem a finalidade de apontar os locais de provável ocorrência de afloramentos de basalto. A saída de campo foi feita no dia 20 de julho onde foram visitados 7 pontos. Os pontos foram definidos em locais onde o mapa de aptidão determinava alta probabilidade de ocorrência de basaltos aflorando, mas onde não haviam basaltos mapeados no mapa geológico regional (CPRM, 2006; Figura 2). Esses pontos estão representados em todos os mapas que são apresentados no tópico a seguir (resultados e discussão).

Os trabalhos de campo foram desenvolvidos com o auxílio da Frota de Veículos da UNIPAMPA uma vez que a área de estudo é localizada próxima do Campus UNIPAMPA Caçapava do Sul, onde é ministrado o curso de Geologia.

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os mapas gerados na Etapa 2 e posteriormente os resultados obtidos na Etapa 3. A Etapa 2, como apresentada anteriormente (verificar fluxograma, Figura 3), consiste na elaboração dos mapas/critérios de interesse, na reclassificação desses para o mesmo número de classes e, por fim, na integração desses critérios em um único mapa de aptidão, capaz de indicar possíveis locais de ocorrência de basalto. A Etapa 3 consiste na validação em campo da assertividade do mapa de aptidão elaborado.

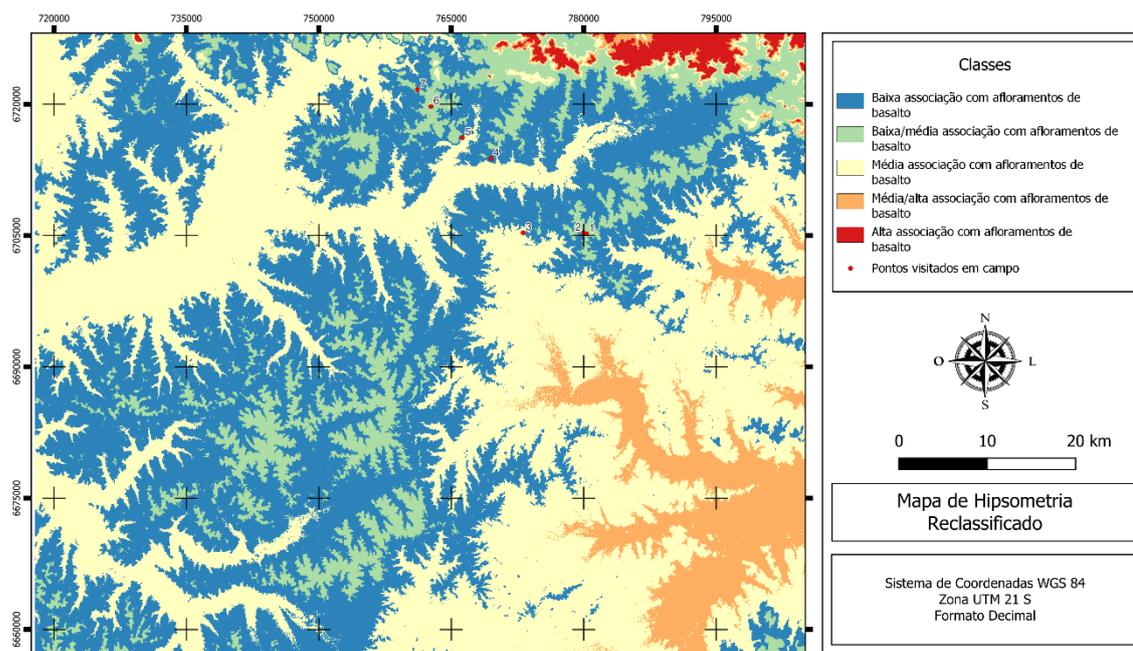
8.1 Mapas Reclassificados (Etapa 2)

A partir da ferramenta do QGIS “Reclassificar por tabela”, os mapas de Hipsometria, Declividade, Solos e Magnetometria foram todos reclassificados para o mesmo número de classes, respeitando os critérios de reclassificação apresentados no tópico 7.1.2 desse relatório (Padronização dos Critérios).

O mapa de hipsometria foi reclassificado de um total de 10 classes de altimetria para 5 classes de probabilidade de ocorrência de basalto (Figura 7).

É válido pontuar que para a classe de mais alta associação com afloramentos de basalto, localizada na porção nordeste do mapa, o Mapa de Hipsometria Reclassificado (Figura 7) coincidiu com os locais onde já é reconhecida a ocorrência de unidades de basalto do Grupo São Bento (Serra Geral Fácies Caxias e Gramado), mostrando, inicialmente, boa acuracidade na reclassificação elaborada.

Figura 7 - Mapa de Hipsometria Reclassificado.



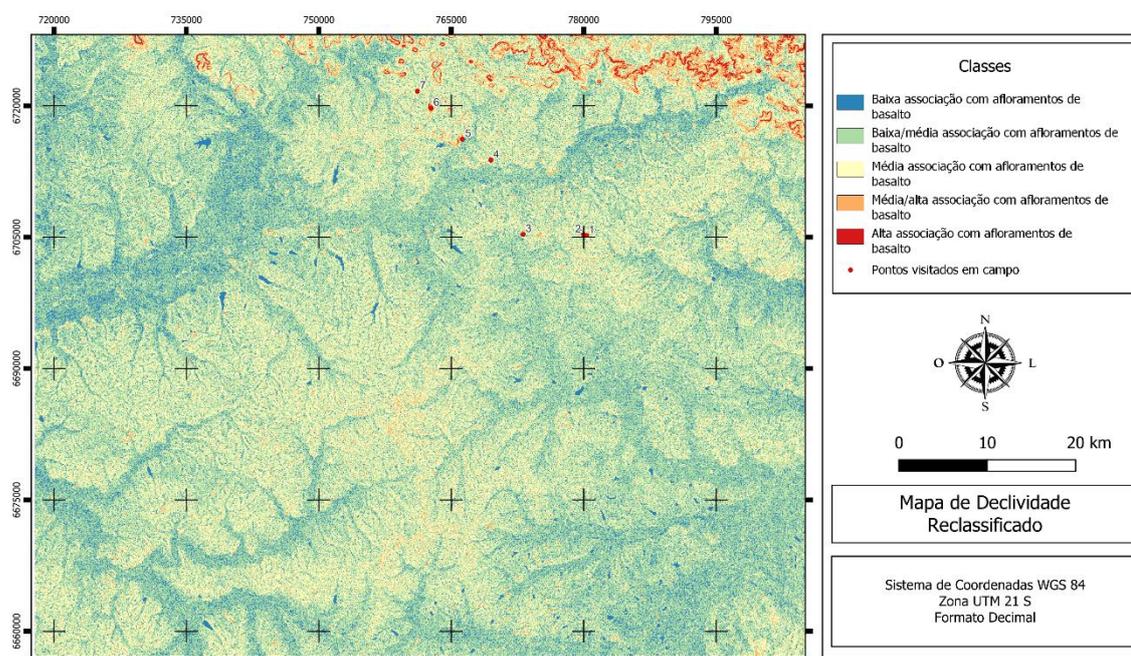
Fonte – Modificado de Alaska Satellite Facility; autor (2022).

Na etapa de validação de campo, foram verificados afloramentos de basalto em locais onde o mapa indica baixa/média associação com afloramentos de basalto (Pontos 1, 2, 4 e 5). Isso demonstra que apesar do basalto apresentar boa correlação com cotas mais altas, ele não necessariamente ocorre apenas nelas. É importante notar que nos pontos visitados, os basaltos parecem ocorrer entre as cotas 170 e 260 metros (Baixa/média associação com afloramentos de basalto). Visto isso é proposto uma nova reclassificação, atribuindo maior valor a essa classe.

O que pode se observar em campo é que os basaltos têm uma maior propensão a ocorrer em locais com a geomorfologia ondulada e ocorrência de corpos dômicos. Essas feições podem ser melhores identificadas no mapa de declividade (Figura 8).

O mapa de declividade apresenta boa acuracidade em indicar os locais mais propícios à ocorrência de afloramentos em geral, mas não necessariamente de basalto. De uma maneira geral, feições anelares com declividades acima de 20%, quando isoladas, representam corpos dômicos que, por diferenciar-se da geomorfologia do entorno, composta de relevos suaves (característicos de terrenos sedimentares), podem representar a ocorrência de soleiras de basalto.

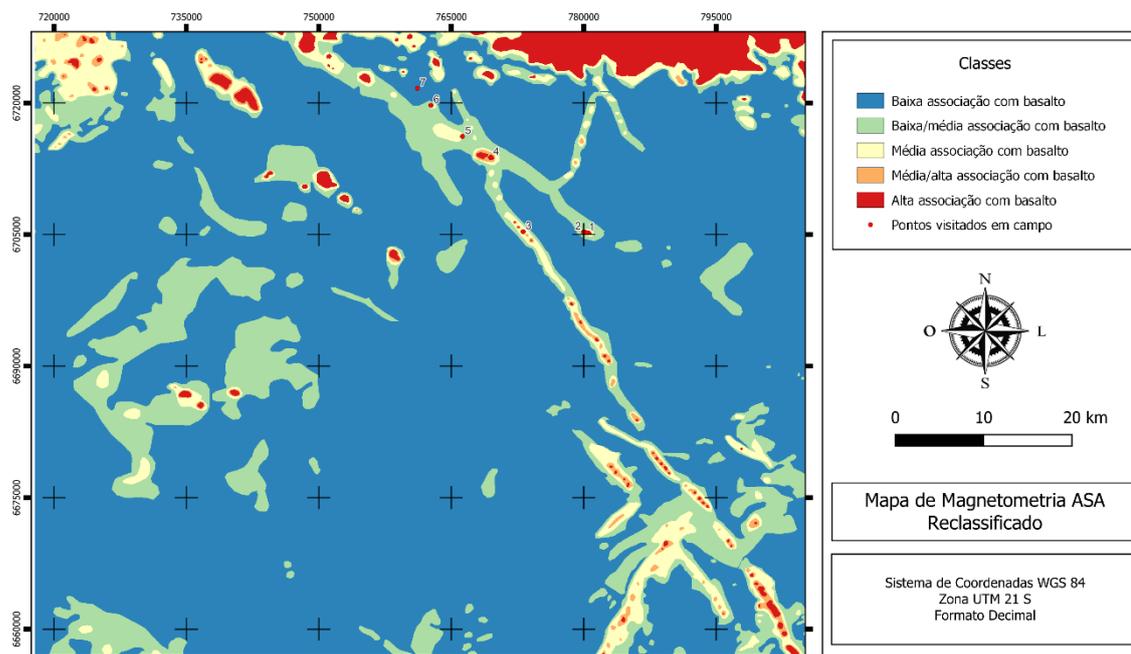
Figura 8 – Mapa de Declividade Reclassificado.



Fonte – Modificado de Alaska Satellite Facility ; autor (2022).

Locais com alta declividade tem alta chance de ocorrência de rochas expostas, no entanto, não necessariamente essas rochas serão basaltos. A fim de reduzir ao máximo que o mapa de aptidão final indicasse locais onde afloram rochas não basálticas, foi empregado como critério de maior peso o Mapa de Magnetometria com o filtro Amplitude do Sinal Analítico (ASA) Reclassificado (Figura 9). Dessa forma, passaram a existir duas principais condicionantes da ocorrência de afloramentos de basalto: a declividade e a magnetometria. Isso fez com que o mapa de aptidão se tornasse mais assertivo em indicar locais de ocorrência de afloramentos de basalto.

Figura 9 - Mapa de Magnetometria ASA Reclassificado.

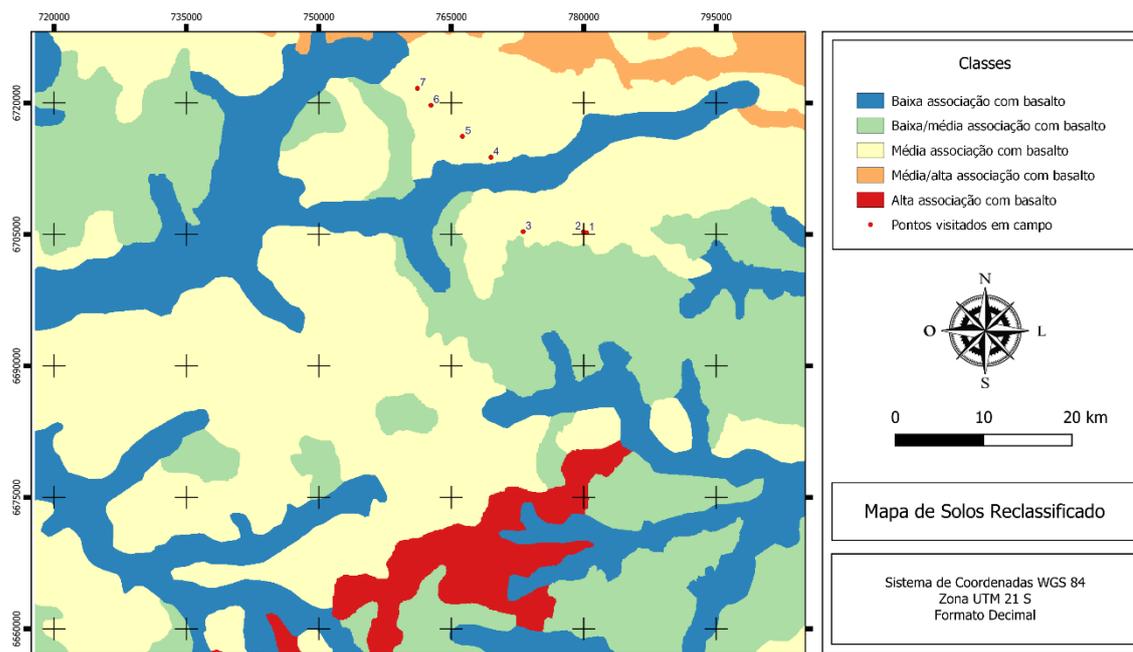


Fonte – Modificado de CPRM; Autor (2022).

O último critério considerado foi o Mapa de Solos Reclassificado (Figura 10). Nos locais onde foi verificada a ocorrência de basalto em campo, o solo era um solo jovem, sem horizontes B ou C. Em ambas as pedreiras visitadas em campo, onde foi possível verificar em corte o perfil de solo, ele era composto dos horizontes A e logo em seguida R, com contato abrupto. Sendo assim, os solos da área onde foram verificados os afloramentos de basalto eram todos solos jovens e pouco desenvolvidos (Neossolos Litólicos). Nos entornos de onde ocorriam os corpos basálticos foi identificada a ocorrência de solos com horizontes B bem desenvolvidos e coloração avermelhada (Argissolos Vermelhos).

O mapa de solos adotado nesse estudo não apresentou detalhamento suficiente para representar os Neossolos Litólicos de maneira assertiva nos pontos visitados, no entanto para os Argissolos Vermelhos mostrou-se bem confiável. Sendo assim, fica definido que o critério de solos pode ser muito valioso no indicativo de locais de ocorrência de afloramentos de basalto, mas é necessário que seja adotado um mapa de solos com melhor precisão do que o utilizado.

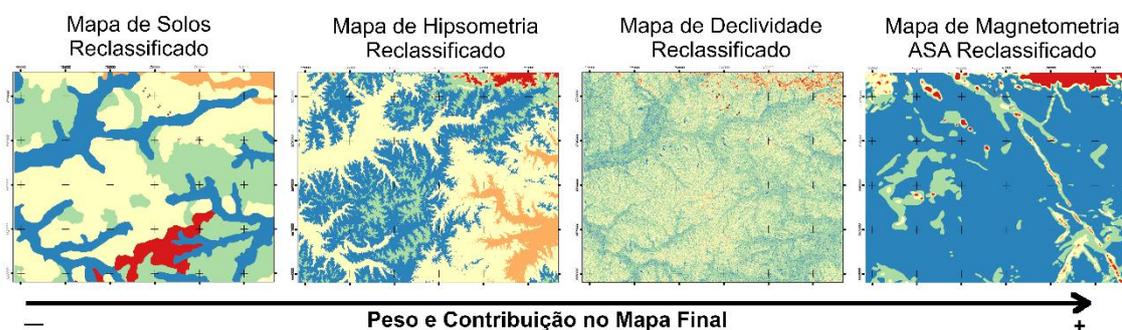
Figura 10 - Mapa de Solos Reclassificado.



Fonte – Modificado de IBGE; Autor (2022).

Com a discussão acima é possível notar que a Matriz de Combinação Paritária (MCP) se mostrou um método eficiente de atribuição de pesos, já que os pesos atribuídos a cada critério/mapa se mostraram coerentes com os resultados observados em campo. A única observação a ser feita é que o Mapa de Solos poderia receber um peso maior caso tivesse um maior nível de detalhe, podendo ser colocado acima do Mapa Hipsométrico (Figura 11).

Figura 11 - Critérios/mapas de interesse ordenados de acordo com peso e contribuição na geração do Mapa de Aptidão.

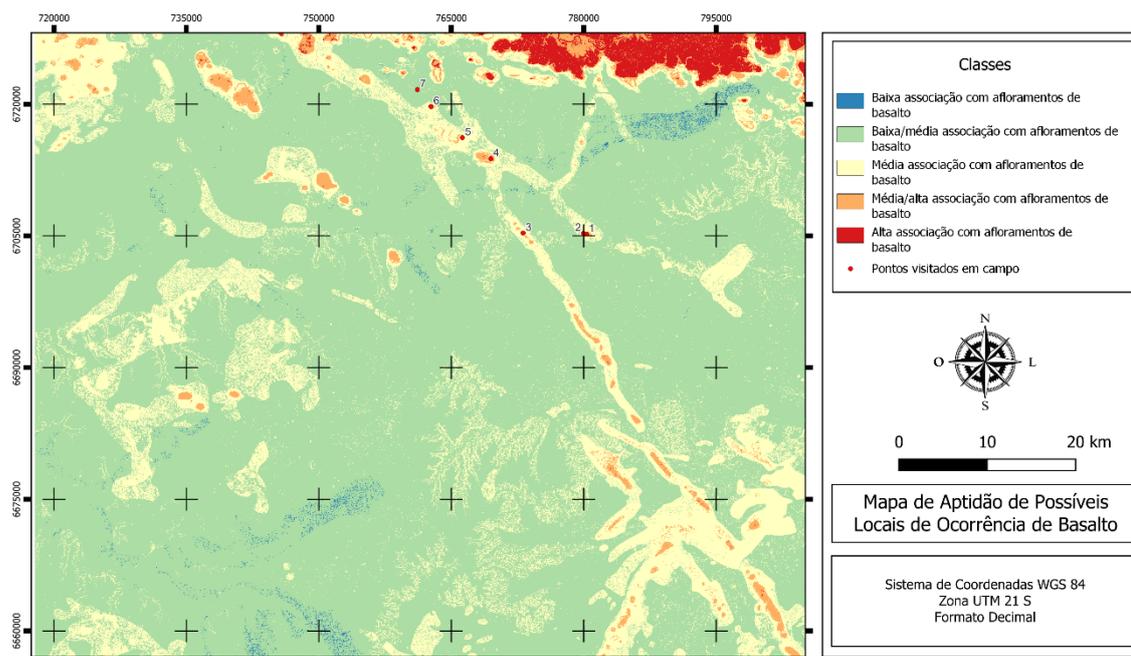


Fonte – Autor (2022).

8.2 Mapa de Aptidão (Etapa 2)

A seguir é apresentado o resultado final da aplicação da metodologia de Combinação Linear Ponderada (CLP) para a combinação de diferentes critérios/mapas em um único mapa de aptidão (Figura 12).

Figura 12 - Mapa de Aptidão de Possíveis Locais de Ocorrência de Basalto. Esse mapa foi gerado a partir da integração dos mapas reclassificados de Declividade, Hipsometria, Magnetometria e Solos.



Fonte – Autor (2022).

Ao observar o mapa de aptidão gerado é possível notar sua grande correlação com o Mapa de Magnetometria ASA Reclassificado. Isso ocorre porque a magnetometria foi justamente o critério que recebeu um maior peso, tendo uma contribuição de 49% no resultado final da CLP. Também é possível notar um aspecto pontilhado em alguns locais do mapa. Quando esses locais são visualizados em uma escala de maior detalhe, nota-se que o efeito de pontilhamento é gerado pela contribuição expressiva do Mapa de Declividade Reclassificado, que contribui com um peso de 25% no mapa de aptidão. Esse efeito pode ser removido se for utilizado um método de interpolação linear no QGIS. No entanto, nesse estudo optou-se por utilizar o método de interpolação exato, para que as classes ficassem bem definidas.

O critério de solos tem uma contribuição de apenas 6%, o que torna difícil notar sua influência no mapa de aptidão gerado. O mesmo ocorre para o Mapa

Hipsométrico, com contribuição de 20%. No entanto, nesse último caso é possível notar uma sutil interação entre o Mapa de Hipsometria Reclassificado com o Mapa de Declividade Reclassificado. Quando ocorrem as classes 4 e 5 desses dois mapas de maneira conjunta há uma representação de média associação com afloramentos de basalto no mapa de aptidão, mesmo que na ausência de anomalias magnéticas positivas.

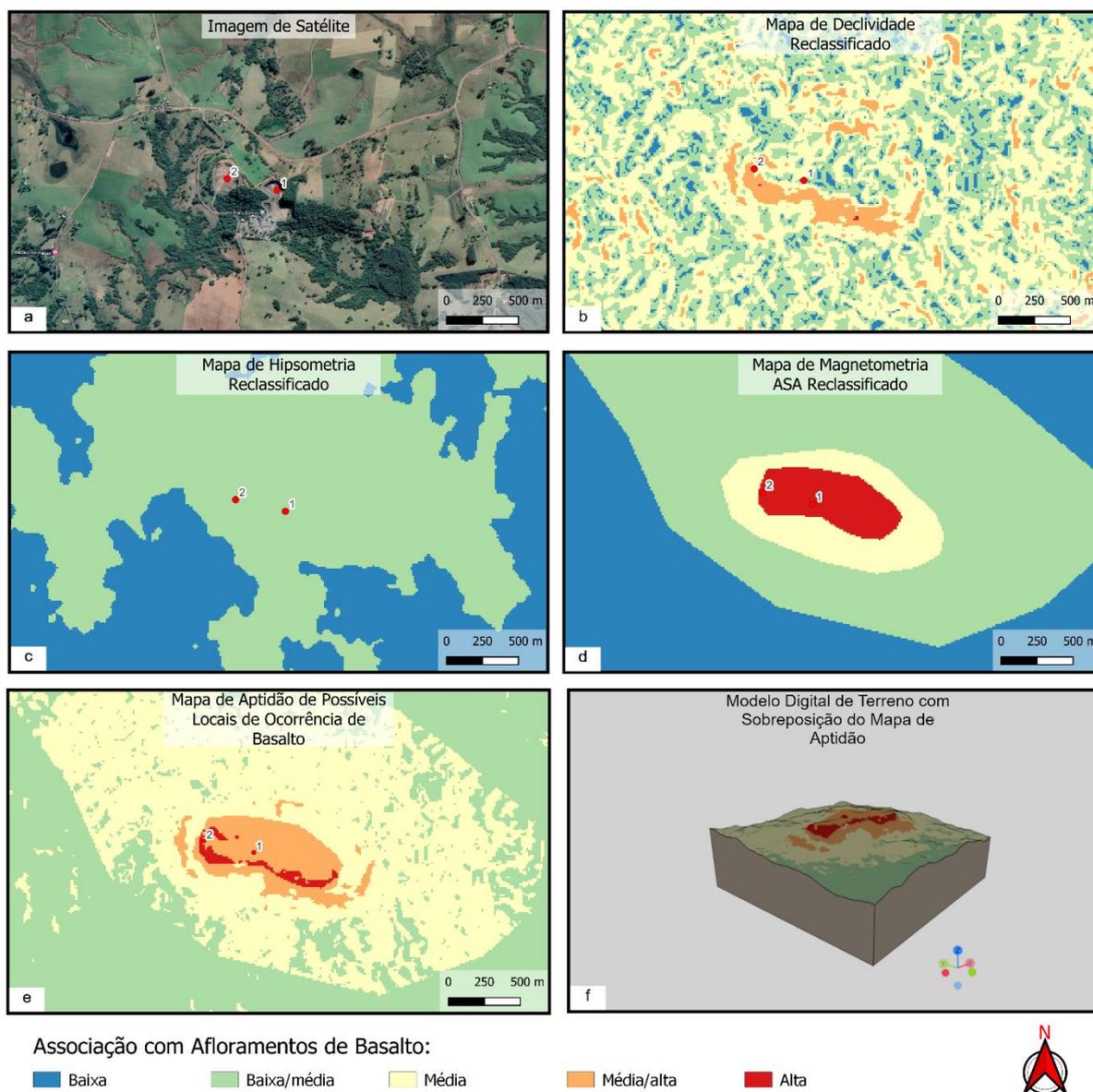
8.3 Trabalho de Campo (Etapa 3)

Para a etapa de campo foram definidos pontos de visitação que ocorriam sob os locais de alta associação com afloramentos de basalto (Figura 13). Foi dada preferência a locais que adicionalmente encontravam-se sob formas de relevo dômicas, já que há a suspeita de que os corpos basálticos da área de estudo ocorram na forma de soleiras.

O primeiro e o segundo ponto são muito próximos e por isso serão tratados de maneira conjunta. Eles estão localizados em uma zona de alta probabilidade de ocorrência de basalto (classe 5) e adicionalmente encontram-se sob uma forma de relevo dômica (Figura 13 f).

Nesses dois primeiros pontos, o Mapa de Aptidão se mostrou confiável já que no local foi verificada a ocorrência de um afloramento de basalto do tipo pedreira (Figura 13 a). A espessura máxima do basalto nesse ponto, de acordo com as informações fornecidas pela mineradora, era de aproximadamente 48 metros. Vale ressaltar que no ponto 2, foi possível identificar também a rocha que ocorria abaixo do basalto, sendo ela um arenito com estratificação plano paralela mergulhando sentido sudeste (S_0 142°/15°; *dip direction/dip*). De maneira coincidente com a informação apresentada anteriormente, a pedreira aumentava em espessura no sentido nordeste/leste. De acordo com o Mapa Geológico Regional (CPRM, 2006) a litologia do local seria composta por rochas sedimentares da Formação Sanga do Cabral (251 Ma). Por mais que a rocha sedimentar identificada no local seja, possivelmente, pertencente a essa formação, há a ocorrência de uma litologia básica, que provavelmente é do Grupo São Bento (Magmatismo Serra Geral; 132 Ma) e que não se encontra representada no mapa geológico regional.

Figura 13 - Compilação de informações dos pontos visitados em campo (pontos 1 e 2). (a) Imagem de satélite onde pode ser observada a pedreira. (b) Mapa de Declividade onde os pontos coincidiram com a classe 4. (c) Mapa de Hipsometria onde os pontos coincidiram com a classe 2. (d) Mapa de Magnetometria onde os pontos coincidiram com a classe 5. (e) Mapa de Aptidão onde os pontos coincidiram com a classe 5. (f) Modelo Digital de Terreno demonstrando a forma dômica do corpo (exagero vertical de 3) .



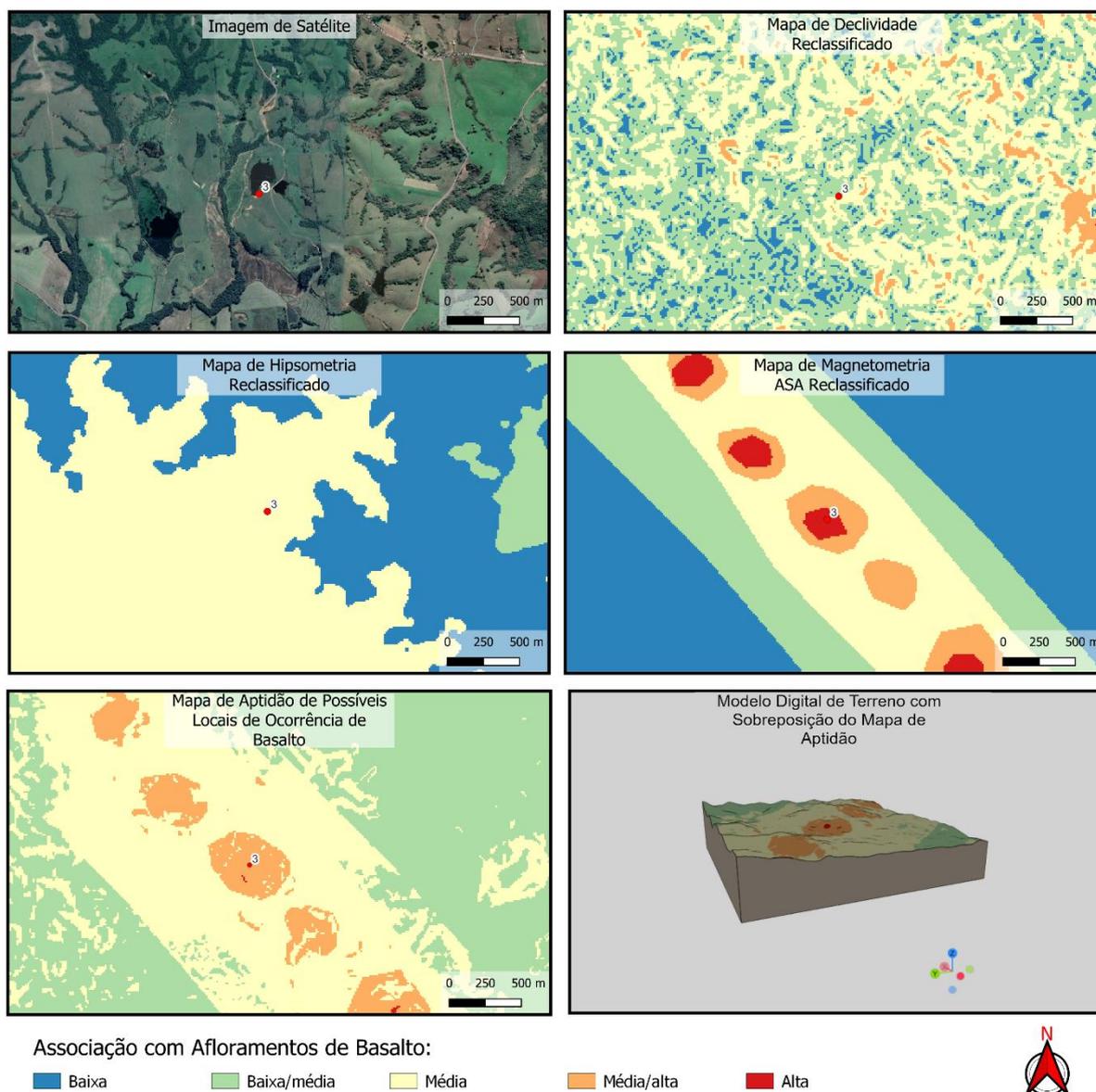
Fonte – Autor (2022).

É válido ressaltar que no Mapa de Magnetometria de Amplitude do Sinal Analítico (ASA), esse local coincide com um lineamento magnético de direção NW – SE, o Lineamento Magnético Formigueiros (LMF), que compartimenta dois domínios magnéticos (TRAVASSOS, 2014).

O ponto 3 estava localizado em uma zona de média/alta probabilidade de ocorrência de afloramentos de basalto (classe 4; Figura 14 e). No entanto, a geomorfologia do seu entorno era suave e composta de coxilhas. Nesse local não foi verificada a ocorrência de basaltos aflorando, apenas foram encontrados afloramentos de arenitos estratificados (S_0 068/15; *dip direction/dip*), esses possivelmente pertencentes a Formação Sanga do Cabral. No Mapa de Magnetometria ASA, essa zona tem aspecto pontilhado, gerado por diferenças de caráter magnético oscilando entre valores mais e menos intensos em nT e isso pode ser um indicativo de que a feição se trate de um dique, que pode não estar aflorando no local. É importante ressaltar que esse lineamento magnético, aqui identificado como Lineamento Falha (LF), se encontra muito próximo uma falha normal com bloco NE abatido, já mapeada e representada no Mapa Geológico Regional (CPRM, 2006). Essa estrutura pode ser visualizada na Figura 3 e marca o contato entre as Formações Pirambóia e Sanga do Cabral. Esse local estava repleto de zonas úmidas e lagoas, o que pode ser indicativo de que essa estrutura pode servir como zona de recarga para um aquífero mais profundo.

Devido à disponibilidade de tempo não foi possível fazer mais pontos sob o LF. No entanto, com o modelo digital de terreno foi possível observar que o relevo é suave e quase plano em quase toda sua extensão. Com os resultados obtidos em campo e com o aspecto da geomorfologia ao longo do LF, acredita-se que o LMF tenha maior associação com corpos básicos do que o LF.

Figura 14 – Compilação de informações do ponto visitado em campo (ponto 3). (a) Imagem de satélite onde pode ser observado que o ponto estava em meio a dois pequenos lagos. (b) Mapa de Declividade onde o ponto coincidiu com a classe 3. (c) Mapa de Hipsometria onde o ponto coincidiu com a classe 3. (d) Mapa de Magnetometria onde o ponto coincidiu com a classe 5. (e) Mapa de Aptidão onde o ponto coincidiu com a classe 4. (f) Modelo Digital de Terreno demonstrando que o alvo encontrava-se em uma depressão (exagero vertical de 3).

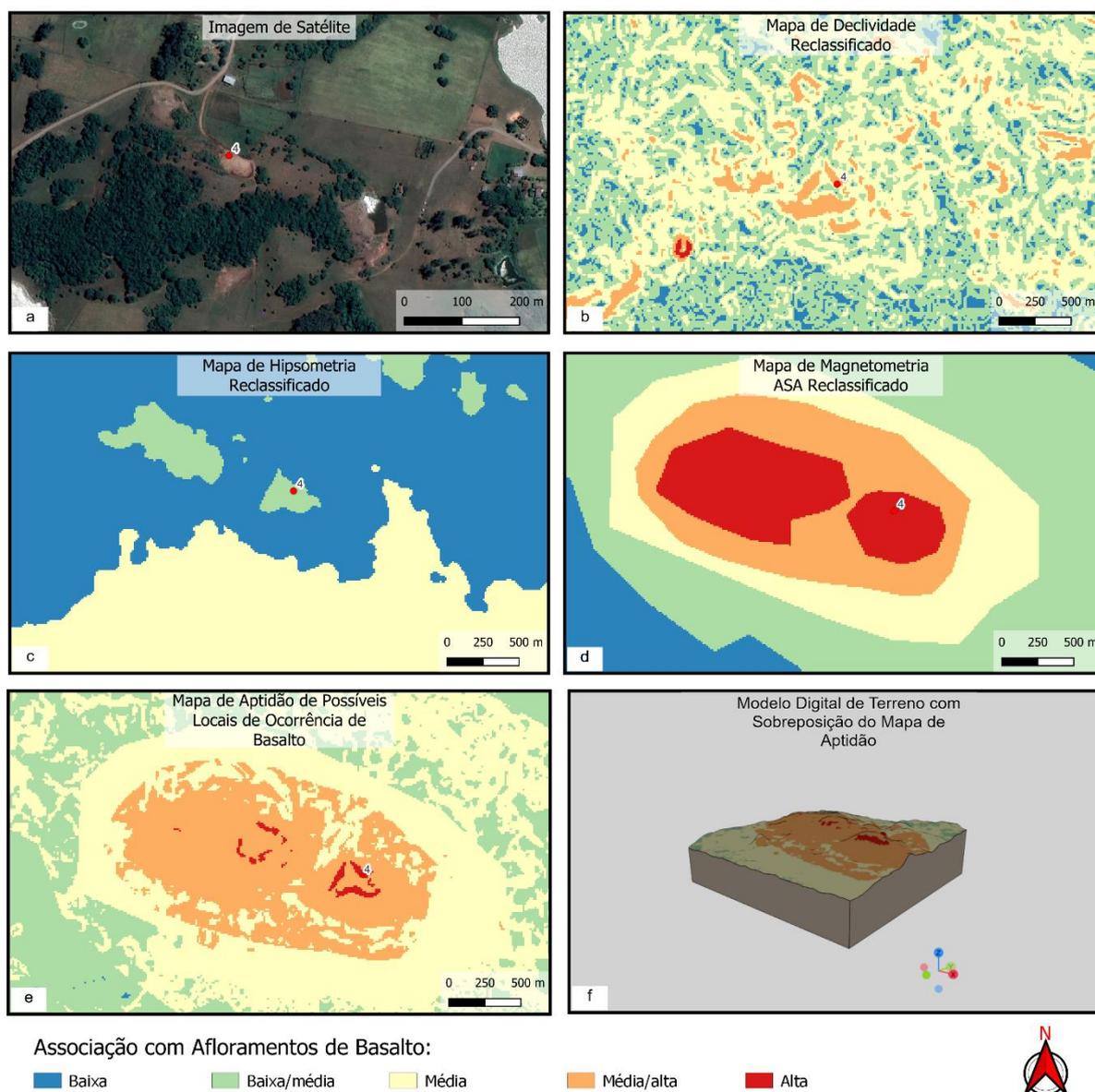


Fonte – Autor (2022).

No ponto 4, assim como nos pontos 1 e 2, o Mapa de Aptidão mostrou-se bastante assertivo em indicar os afloramentos de basalto. O ponto foi marcado sob um local de alta associação com afloramentos de basalto (classe 5; Figura 15 e) e que adicionalmente encontrava-se sob uma forma de relevo dômico (Figura 15 f). Nesse

ponto o Mapa de Aptidão demarcou com precisão uma pedreira de basalto (Figura 15 a). As rochas desse ponto apresentavam maior grau de alteração do que as rochas dos pontos 1 e 2 e tinham uma coloração mais mesocrática, o que pode ser um indicativo que nesse ponto o basalto possui maior conteúdo de quartzo em sua composição.

Figura 15 - Compilação de informações do ponto visitado em campo (ponto 4). (a) Imagem de satélite onde pode ser observado que o ponto está localizado em uma pedreira. (b) Mapa de Declividade onde o ponto coincidiu com a classe 4. (c) Mapa de Hipsometria onde o ponto coincidiu com a classe 2. (d) Mapa de Magnetometria onde o ponto coincidiu com a classe 5. (e) Mapa de Aptidão onde o ponto coincidiu com a classe 5. (f) Modelo Digital de Terreno demonstrando que o alvo encontrava-se sob uma forma de relevo dômica (exagero vertical de 3).



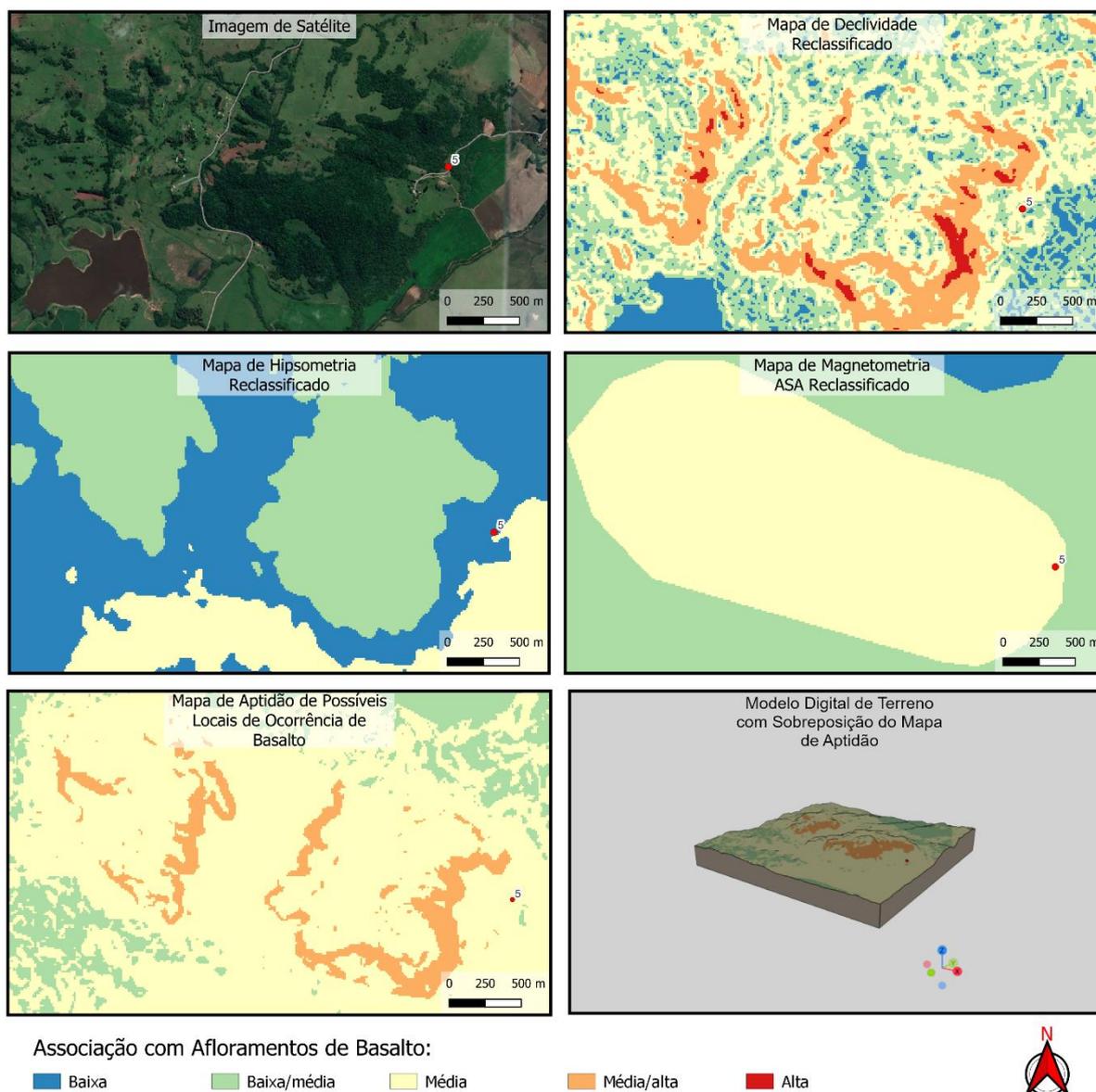
Fonte – Autor (2022).

O ponto 5 foi demarcado em uma zona de média/alta associação com afloramentos de basalto (classe 4; Figura 16 e). Nesse ponto não foram encontrados basaltos aflorando *in-situ*, no entanto, foi verificada a ocorrência de blocos de basalto rolados no leito de um rio próximo ao ponto. O rio vertia do topo do cerro até a base,

onde foi feito o ponto. O ideal seria mapear o cerro em busca de afloramentos. No entanto, devido a dinâmica de campo isso não foi possível. É importante ressaltar que apesar de não terem sido identificados afloramentos de basalto nesse ponto, o Mapa Geológico Regional (CPRM, 2006; Figura 3) tem duas unidades basálticas semicirculares já mapeadas (Serra Geral Fácies Gramado), coincidentes com os dois cerros que ocorrem no local. Sendo assim, o Mapa de Aptidão mostrou-se novamente confiável, quando utilizado em conjunto com o Modelo Digital de Terreno (Figura 16 f).

Cabe aqui observar que o ponto 5 está representado na Figura 16 no local onde foi possível o seu acesso, mas a intenção real é que esse ponto estivesse localizado no topo do cerro. Sendo assim, as informações dispostas na legenda da Figura 16, são considerando sua localização pretendida (no topo do cerro).

Figura 16 - Compilação de informações do ponto visitado em campo (ponto 5). (a) Imagem de satélite do cerro a oeste do ponto 5, onde a vegetação mostra-se mais densa. (b) Mapa de Declividade onde o ponto coincidiu com a classe 5. (c) Mapa de Hipsometria onde o ponto coincidiu com a classe 2. (d) Mapa de Magnetometria onde o ponto coincidiu com a classe 3. (e) Mapa de Aptidão onde o ponto coincidiu com a classe 4. (f) Modelo Digital de Terreno demonstrando que o alvo encontrava-se sob uma forma de relevo dômica (exagero vertical de 3).



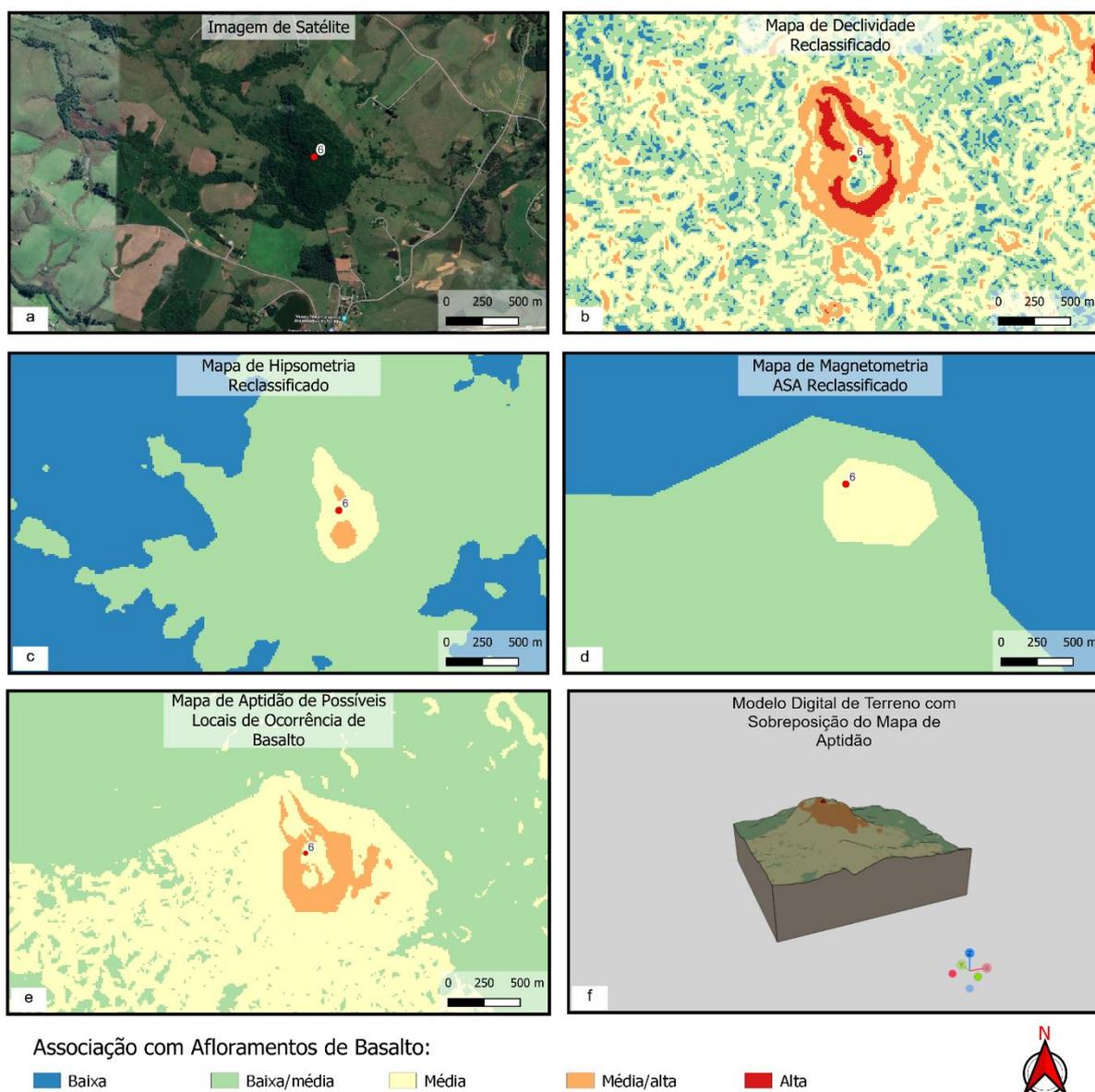
Fonte – Autor (2022).

O ponto 6 encontra-se sob um local de média/alta ocorrência de basalto (classe 4; Figura 17 e) e adicionalmente sob uma forma de relevo dômica. Nesse ponto foram identificadas rochas metamórficas aflorando. Sendo assim, nesse local o Mapa de Aptidão não delimitou corretamente a ocorrência de afloramentos de basalto, mas é

importante ressaltar que o ponto não está localizado sob um local onde o Mapa de Aptidão indica alta possibilidade de ocorrência de basalto (classe 5). Para os pontos onde o Mapa de Aptidão indicava classe 5 (pontos 1, 2 e 4), ele mostrou-se 100% assertivo (considerando os pontos visitados em campo).

No Mapa de Magnetometria ASA, esse ponto está localizado sob uma anomalia magnética positiva, que possui menor intensidade do que as anomalias observados nos pontos 1, 2, 3 e 4. Uma vez que o filtro de Amplitude do Sinal Analítico tem a finalidade de realçar fontes anômalas rasas, é possível considerar a hipótese de que nesse ponto o basalto pode ocorrer em maior profundidade, abaixo da rocha metamórfica que ocorre no local. Apesar de ser apenas uma hipótese, isso poderia justificar o metamorfismo da rocha que aflora no local, que poderia ter sido gerada por metamorfismo de contato, gerado pelo alto gradiente geotérmico fornecido pelo magma basáltico, que possui temperaturas entre 1000 e 1200°C (SGARBI, 2007).

Figura 17 - Compilação de informações do ponto visitado em campo (ponto 6). (a) Imagem de satélite exibe o cerro, que pode ser visto com uma cobertura vegetal mais densa que o entorno. (b) Mapa de Declividade onde o ponto coincidiu com a classe 5. (c) Mapa de Hipsometria onde o ponto coincidiu com a classe 4. (d) Mapa de Magnetometria onde o ponto coincidiu com a classe 3. (e) Mapa de Aptidão onde o ponto coincidiu com a classe 4. (f) Modelo Digital de Terreno demonstrando que o alvo se encontrava sob uma forma de relevo dômica (exagero vertical de 3).

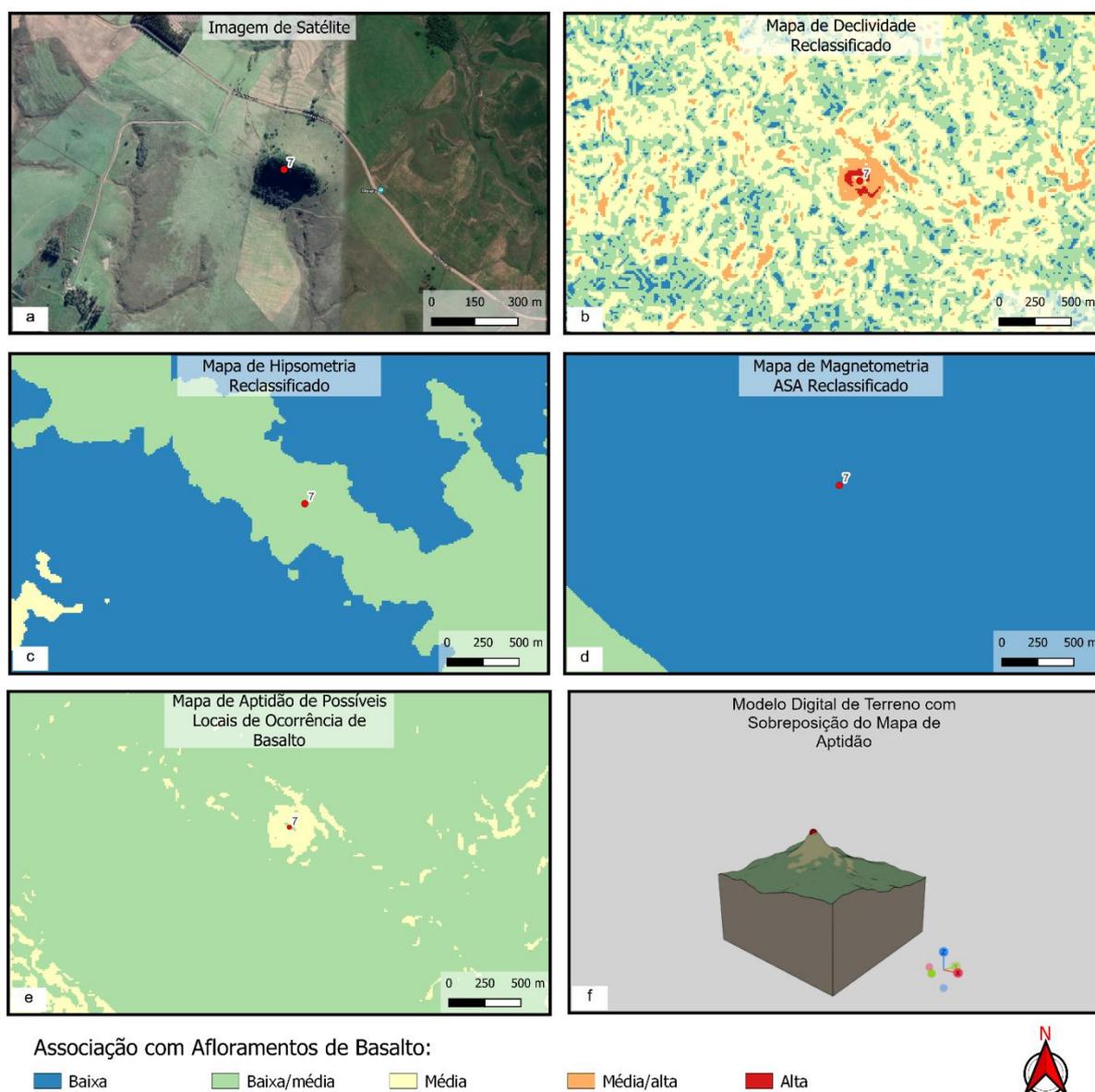


Fonte – Autor (2022).

O ponto 7 foi demarcado em uma em um local de média probabilidade de ocorrência de afloramentos de basalto (classe 3; Figura 18 e). Nesse ponto foi verificado o afloramento de rochas sedimentares. Ao observar a Figura 18 (b & e) torna-se fácil entender a contribuição do Mapa de Declividade no Mapa de Aptidão.

Mesmo em um local onde o Mapa de Magnetometria possui classe 1 o Mapa de Aptidão possui classe 3. Essa classe só ocorre devido a contribuição do Mapa de Declividade, que no local possui classe 5. Com isso também é possível entender a relevância do Mapa de Magnetometria, uma vez que fica entendido que altas declividades, quando não combinadas com zonas de anomalias magnéticas positivas, não representam boa probabilidade de afloramento de basaltos.

Figura 18 - Compilação de informações do ponto visitado em campo (ponto 7). (a) Imagem de satélite exibe o relevo escarpado destoante do entorno. (b) Mapa de Declividade onde o ponto coincidiu com a classe 5. (c) Mapa de Hipsometria onde o ponto coincidiu com a classe 2. (d) Mapa de Magnetometria onde o ponto coincidiu com a classe 1. (e) Mapa de Aptidão onde o ponto coincidiu com a classe 3. (f) Modelo Digital de Terreno demonstrando que o alvo se encontrava sob uma forma de relevo escarpada (exagero vertical de 3).

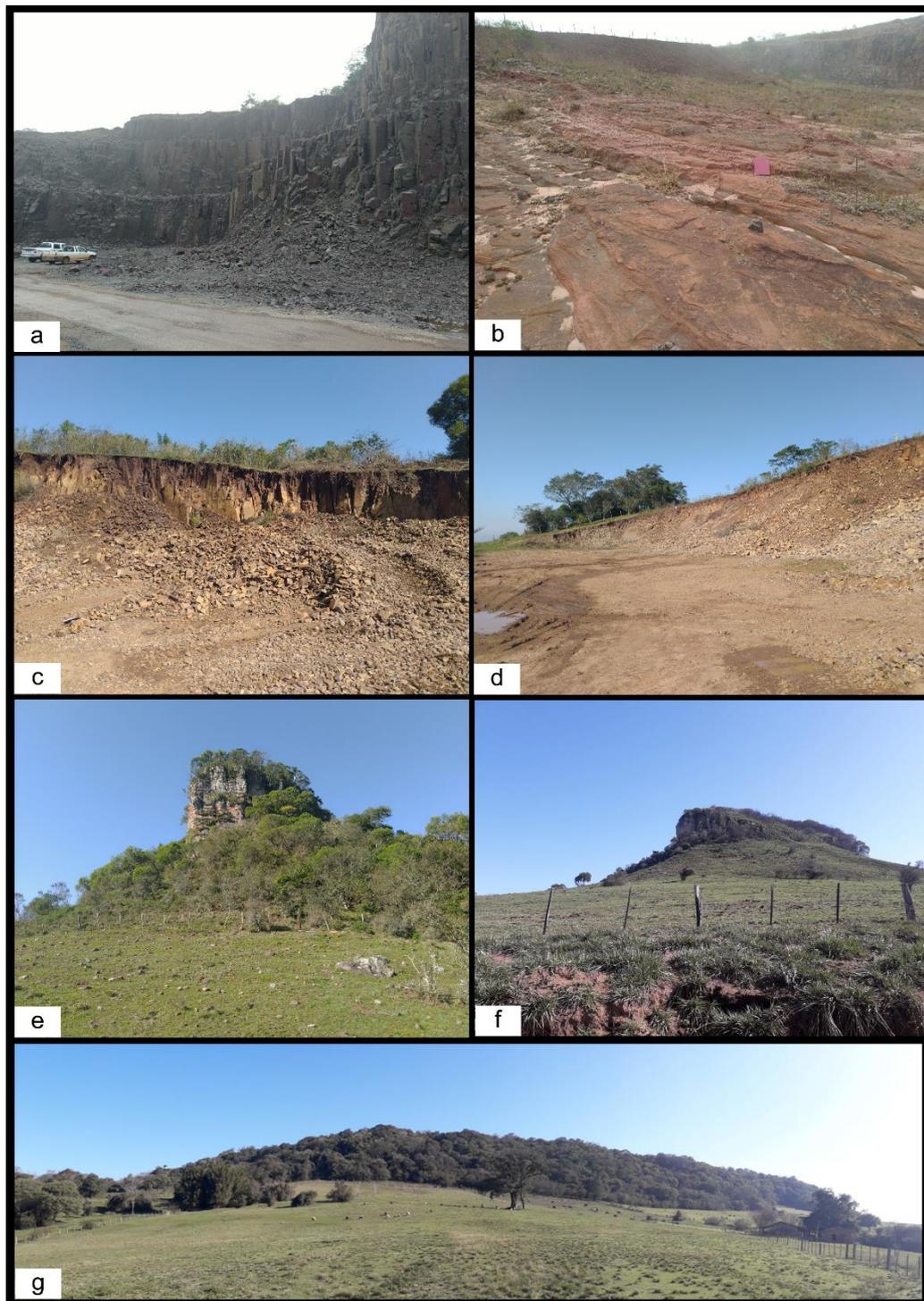


Fonte – Autor (2022).

8.3.1 Registros de Campo

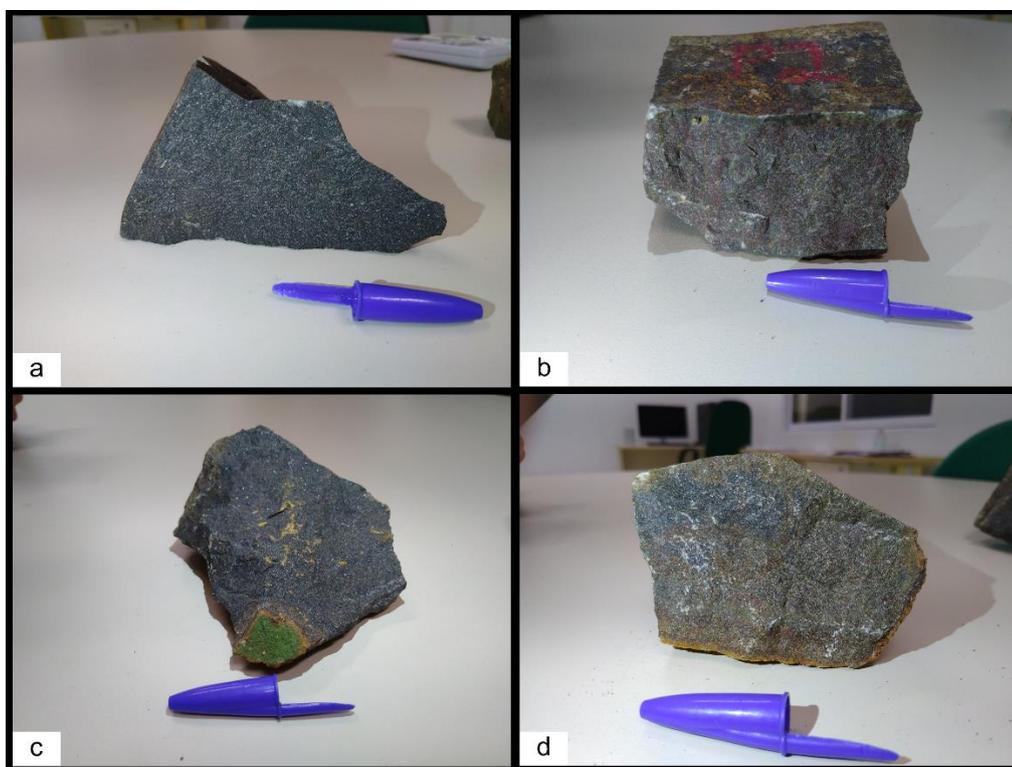
Nesse tópico é apresentada uma compilação dos registros de campo para facilitar o entendimento da geomorfologia, tipo de afloramento e rocha verificados em cada ponto visitado (Figuras 19 e 20).

Figura 19 - Compilado de registros de campo. (a) Pedreira de basalto visitada no ponto 1. (b) Rocha sedimentar que ocorria abaixo do basalto no ponto 2. (c;d) Pedreira de basalto visitada no ponto 4. (e;f) Relevo escarpado onde afloravam rochas sedimentares no ponto 7. (g) Forma de relevo dômica do ponto 6, semelhante ao relevo dos pontos 1, 2, 4 e 5.



Fonte – Autor (2022).

Figura 20 - Compilado de amostras de rochas coletadas em campo. (a) Amostra de basalto retirada da pedreira no ponto 1. (b) Amostra de basalto/dacito retirada no ponto 4. (c;d) Amostras de rochas metamórficas retiradas no ponto 6.



Fonte – Autor (2022).

9 CONCLUSÃO

A utilização das metodologias de Análise Hierárquica em conjunto com a Combinação Linear Ponderada mostraram-se muito confiáveis na atribuição de pesos e determinação de critérios/mapas de interesse uma vez que o Mapa de Aptidão gerado foi capaz de apontar com boa assertividade os locais onde o basalto aflorava. O Mapa de Aptidão mostrou-se ainda mais confiável quando utilizado junto de um Modelo Digital de Terreno, já que quando combinadas as zonas de alta probabilidade de ocorrência de afloramentos basalto a forma de relevos dômicas o mapa apresentou 100% de assertividade nos pontos visitados em campo.

Fica também entendido que o Lineamento Magnético Formigueiros (LMF) mostra boa correlação com a ocorrência de corpos básicos e que, apesar de ser um lineamento visível apenas em mapas de magnetometria, ele pode representar uma estrutura que pode ter servido de conduto para a ascensão do magma da Formação Serra Geral. Ainda assim, para comprovar essa hipótese são necessários estudos

mais detalhados sob o LMF. Isso demonstra que o LMF e demais lineamentos magnéticos de direção NW – SE (possivelmente ocorrem associados ao Arco de Rio Grande) não vêm recebendo a devida atenção, sendo necessário mais estudos para o entendimento de seu significado geológico e entendimento de suas relações com o Magmatismo Serra Geral.

Para determinar se os corpos basálticos identificados em campo ocorrem em forma de soleira ou derrame é sugerido que sejam feitos estudos mais detalhados a cerca da geometria e estruturas que cada um apresenta. No entanto, é possível afirmar que todos os corpos basálticos visitados em campo possuíam formas dômicas.

9 REFERÊNCIAS

ADEYEYE, O.A.; IKPOKONTE, E.A.; ARABI, S.A. *GIS-based groundwater potential mapping within Dengi area, North Central Nigeria. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences.* 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.04.003>

ASF – Alaska Satellite Facility. *Data Search Vertex.* 2022. Acesso disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/#/>

ALMEIDA, F. F. M.; MELO, M. S. A. Bacia do Paraná e o vulcanismo mesozóico. In: **Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT.** Mapa Geológico do Estado de São Paulo, São Paulo: IPT, 1981, v.1, p.46-81. Escala 1:500.000.

ASMUS, H.; BAISCH, P. R. M. *Geological evolution of Brazilian continental margin. Episodes,* vol. 1983, No. 4.

BELLIENI, G; COMIN-CHIARAMONTI, P; MARQUES, L, S; MELFI, A.J; PICCIRILLO, A.J.R; ROISEMBERG, A. *High-and-low-TiO₂ flood basalts from the Paraná Plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. Neues Jahrbuch fur Mineralogie, Stuttgart,* v. 150, n. 3, p.273-306, 1984

BRUCKMANN, P.A.; PHILIPP, R.P. A Importância do Arco de Rio Grande na Sedimentação Triássica da Bacia do Paraná, Sul do Brasil. **Salão UFRGS 2016: SIC - XXVIII Salão de Iniciação Científica da UFRGS.** 2016.

CASTRO, F.R; OLIVEIRA, S.P; SOUZA, J; FERREIRA, J.F.J. GRAV-MAG SUITE: an open source MATLAB-based program for processing potential field data. **Sociedade Brasileira de Geofísica,** v. 8, n. 2, p. 1-6, 2018.

CHEMALE JR., F. Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: M. HOLZ, L. F. DE ROS, M. HOLZ, & L. F. DE ROS (Eds.), *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, CIGO/UFRGS. p. 13-52. 2000.

COSTA A. F.U. **Teste e modelagem geofísica das associações litotectônicas pré-cambrianas no Escudo Sul-rio-grandense**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1997.

CHENCI, G.P; RIGNEL, D.G.S; LUCAS, C.A. Uma Introdução a Lógica Fuzzy. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica**, vol. 01, 2011.

COSTA, V.H.H; GREGORY, T.R.; GUADAGNIN, F. **Contribuição Geofísica ao Estudo de Parte do Terreno São Gabriel – Escudo Sul-Riograndense, Rio Grande do Sul – Brasil, Através da Aeromagnetometria e Aerogamaespectrometria**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pampa, 2016.

CPRM. **Geologia E Recursos Minerais da Folha Santa Maria SH.22-V-C-IV**. Escala 1:100.000. Programa Geologia do Brasil, CPRM, 2018.

CPRM. **Mapa Geológico do Estado de Rio Grande do Sul**. Escala 1:750.000. Programa, CPRM, 2006.

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.

EASTMAN, J. R.; *IDRISI Kilimanjaro: Guide to GIS and Image Processing*. Clark University, 2003. 328 p.

EMBRAPA; **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 5ª edição revisada e ampliada, Brasília, 2018.

FAÉ, Y.A.; GUADAGNIN, F.; GREGORY, T.R. **Investigação de Lineamentos Magnéticos no Rio Grande Do Sul: um estudo preliminar**. 9º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, Universidade Federal do Pampa, 2017.

FACCINI, U.F. **Estratigrafia do permo-triássico do Rio Grande do Sul: estilos deposicionais versus espaço de acomodação**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2000.

FRAGOSO CESAR, A.R.S; FIGUEIREDO, M.C.H. **Tectônica de placas no ciclo brasileiro: as orogenias dos cinturões Dom Feliciano e Ribeira no Rio Grande do Sul**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

GALLAGHER, K.; HAWKESWORTH, C. *Mantle plumes, continental magmatism and asymmetry in the South Atlantic*. **Earth and Planetary Science Letters**, 123 (1-3), 105-117. 1994.

GREGORY, T. R.; GUADAGNIN, F., FAÉ, Y. A; MACEDO, R. M; Significado de Lineamentos Magnéticos no Escudo Sul-rio-grandense: Resultados Preliminares. XI Simpósio Sul-brasileiro de Geologia. In: **Anais [...]**, pág.124. Bento Gonçalves. 2019.

HARTMANN, L. A., CHEMALE JR., F., & PHILIPP, R. P.. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: R. IANNUZZI, & J. FRANTZ, **50 Anos de Geologia**: Instituto de Geociências. Porto Alegre: Comunicação e Identidade, pp. 99-126. 2007.

HILDENBRAND, J.D. Aerogeofísica no Brasil e a Evolução das Tecnologias nos Últimos 50 Anos. **I Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica**. São Paulo. 2004.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal**, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto>

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Geomorfologia**, 2ª edição. Rio de Janeiro, 2009.

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

MARAN, E.; RAFAEL GREGORY, T.; GUADAGNIN, F.; RAFAEL GREGORY, T.; GUADAGNIN, F. Contribuição Geofísica Na Parte Noroeste do Escudo Sul-riograndense. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 11, n. 2, 28 ago. 2020.

MARAN, E.; AUGUSTO SCHÜTZ MARAN, E.; RAFAEL GREGORY, T.; GUADAGNIN, F. Contribuição Geofísica Na Parte Noroeste do Escudo Sul-riograndense – Parte 2. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 12, n. 2, 4 dez. 2020.

MILANI, E.J.; RAMOS, V.A. Orogenias Paleozóicas no Domínio Sul-Occidental do Gondwana E Os Ciclos de Subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, vol. 28, pág. 474 - 484, 1998.

MILANI, E.J. *et al.* Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências - Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 265-287. Rio de Janeiro. 2007.

MANTOVANI, M. S. M.; MARQUES, L. S.; SOUSA, M. A.; CIVETTA, L.; ATALLA, L.; INNOCENTI, F. *Trace element and strontium isotope constraints on the origin and evolution of Paraná continental flood basalts of Santa Catarina State, southern Brazil. Journal of Petrology. Oxford*, v. 26, p.187-209, 1985.

PASSOS, A.C. **Definição de um Índice de Qualidade para Distribuidoras de Energia Elétrica Utilizando O Apoio Multicritério À Decisão E Análise de Séries Temporais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010.

PHILIPP, R.P; ROLIM, S.B.A; MALTA, L; JELINEK, A.R.Rolim. **Estruturação do Arco de Rio Grande E da Sinclinal de Torres, Bacia do Paraná, RS: evidências por levantamentos magnetotélúricos**. Simpósio Brasileiro de Geofísica. 2014.

PEATE, D. W.; HAWKESWORT, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. *Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution*. **Bulletin of Volcanology**, Berlin, v. 55, p. 119-139, 1992.

PRESS, F; SIEVER, R; GROTZINGER, J; JORDAN, T. **Para Entender a Terra**. Artmed Editora S.A & Bookman Companhia Editora, pag 293, 2006.

RAMOS, V. A.; JORDAN, T. E.; ALLMENDINGER, R.W.; MPODOZIS, C.; KAY, J. M.; CORTÉS, J. M.; PALMA, M. *Paleozoic terranes of the central Argentine-Chilean Andes*. **Tectonics**, Washington, v. 5, n. 6, p.855-880, 1986.

SAATY, T.L; *A scaling method for priorities in hierarchical structures*. *J. Math. Psychol.* 1977.

SAATY, T.L; VARGAS, L.C. **Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process**. Editora Springer. 2012

SAMPAIO, R.G.S.P. **Petrologia de Rochas Hipabissais Básicas Relacionadas a Lineamentos Magnéticos no Escudo Sul-rio-grandense**. Trabalho de Conclusão de Curso – Programa de Graduação em Geologia, Universidade Federal do Pampa, 2019.

SOUZA, A. R. **Identificação de áreas prioritárias à implementação de programas de Pagamento por Serviços Ambientais na Bacia do Ribeirão do Feijão, São**

Carlos-SP. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática - NEPA, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

TRAVASSOS, R. P. **Interpretação Estrutural Regional do Escudo Sul-Rio-Grandense – Rio Grande do Sul – Brasil, Com Base em Aeromagnetometria.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2014

ZADEH, L.A; *Fuzzy sets. Information and control.* **Cambride University Press**, vol. 8, pág. 338–353, 1965.

VOOGD, H. *Multicriteria evaluation for urban and regional planning.* **Londres.** Pion, 1983.

APÊNDICE A

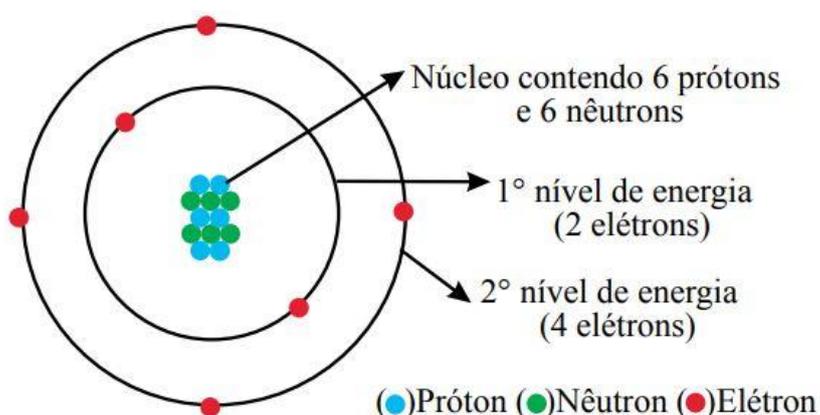
A.1 Fundamentos Teóricos Magnetometria

Magnetometria é um método de estudo geofísico que permite analisar o comportamento magnético de rochas e outros materiais. O que gera um comportamento magnético em qualquer material é o spin dos elétrons dos átomos que a compõem (KEAREY et al., 2009). Para melhor entender esse conceito é importante entender como é a organização interna de um átomo e como os elétrons são capazes de gerar um campo magnético.

A.1.1 Estrutura atômica

O átomo é a menor porção da matéria, capaz de reter as propriedades físicas e químicas desta (SGARBI, 2007). Ele é composto de 3 principais unidades: os elétrons, os prótons e os nêutrons. Os prótons possuem carga elétrica positiva (+1) e os elétrons possuem carga negativa (-1), enquanto os nêutrons não possuem carga alguma. Os nêutrons e prótons se agrupam no centro do átomo formando o núcleo e os elétrons se organizam ao redor do núcleo em orbitais, gerando a dita nuvem de elétrons (Figura A1). Ao contrário dos prótons e nêutrons, que se encontram estáticos no núcleo, os elétrons ficam constantemente em movimento dentro de seus respectivos orbitais. Esse movimento de elétrons ao redor do núcleo é chamado de spin. Cargas em movimento geram força de magnetização de modo que todas as substâncias são magnéticas em um nível atômico, devido ao spin de seus elétrons (KEAREY et al., 2009).

Figura A1 - Diagrama esquemático de um átomo de carbono.

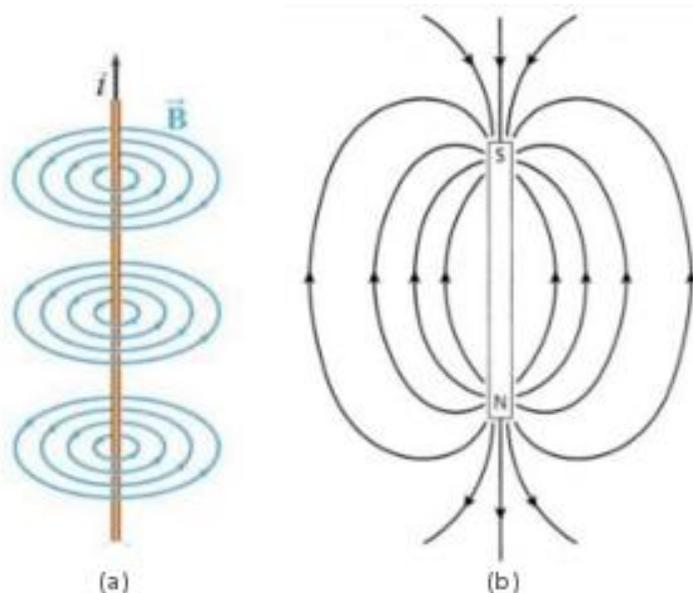


Fonte – Sgarbi (2007)

A.1.2 Campo magnético

Como visto anteriormente, cargas elétricas em movimento são capazes de gerar força de magnetização e, conseqüentemente, campos magnéticos perpendiculares ao sentido em que se movimentam. O campo magnético tem a capacidade de alterar o sentido de uma corrente elétrica para o sentido do seu fluxo magnético (Figura A2). Nas proximidades de um material magnético é desenvolvido um fluxo magnético que flui de uma extremidade do magneto para a outra. Esses pontos de onde o fluxo converge são chamados de polos magnéticos. Em qualquer material existem dois polos magnéticos, o polo negativo (polo norte magnético) e o positivo (polo sul magnético) e, sendo assim, todo material pode ser chamado de dipolo. O fluxo magnético pode ser representado como um conjunto de linhas que sai do polo norte e entram no polo sul (Figura A2).

Figura A2 – A imagem da esquerda ilustra o comportamento do campo magnético perpendicular ao sentido da corrente elétrica. A imagem da direita ilustra as linhas de fluxo magnético em uma barra magnética.



Fonte – Modificado de Kearey (2009).

A Terra pode ser entendida como um grande dipolo magnético, onde as cargas convergem do polo sul magnético para o polo norte magnético, gerando o dito campo geomagnético. Esse comportamento ocorre devido ao movimento de convergência de

partículas carregadas no núcleo externo da Terra. Esse movimento de partículas seria responsável por gerar um efeito de dínamo que gera corrente elétrica e, conseqüentemente, um campo magnético (KEAREY et al, 2009). O padrão de convergência desse material líquido do núcleo externo não é fixo e varia lentamente ao longo dos séculos. Isso pode ser observado atualmente na gradual rotação do polo norte magnético ao redor do polo norte geográfico. Esse campo geomagnético é justamente o que protege a Terra de ser bombardeada com partículas carregadas emitidas pelo Sol. Quando essas partículas se aproximam da Terra, elas ficam submetidas ao sentido de fluxo magnético do campo geomagnético e são conduzidas pela ionosfera até os polos magnéticos. Esse bombardeamento de partículas carregadas é inconstante e pode variar diariamente gerando uma variação diurna no campo.

A.1.3 O magnetismo em rochas e minerais

Anteriormente foi citado que átomos possuem ao redor do núcleo uma nuvem de elétrons. Os elétrons dessa nuvem vão sempre se organizar em orbitais, que são locais onde é mais provável que os elétrons sejam encontrados, apesar de não serem dadas como órbitas fixas (SGARBI, 2007). Esses orbitais são chamados de níveis de energia e um átomo pode contar com no máximo sete desses níveis. Cada nível desses contém um número máximo de elétrons que pode abrigar. Por exemplo, o primeiro orbital pode acomodar dois elétrons enquanto o segundo pode abrigar até oito. No entanto, o número máximo de elétrons que um nível pode conter é sempre um número par. Isso ocorre porque os elétrons sempre vão se organizar em pares com órbitas opostas e, quando isso ocorre, é dito que os elétrons estão pareados (KEAREY et al, 2009). Quando um nível alcança o seu número máximo de elétrons ele é dito estável. Os átomos podem compartilhar, doar ou receber elétrons de átomos vizinhos para que alcancem a estabilidade de seus orbitais. Em um elemento diamagnético, todos os níveis de energia de seus átomos estão completos, de maneira que os spins dos elétrons são todos cancelados pelo seu próprio par. Em elementos paramagnéticos, ocorrem níveis de energia incompletos, com um número ímpar de elétrons, o que resulta na geração de um campo magnético derivado do spin dos elétrons não pareados. Os elementos paramagnéticos podem ser subdivididos em três:

os ferromagnéticos são elementos que possuem seus níveis de energia incompletos (domínios magnéticos) organizados de forma paralela, gerando assim um forte magnetismo mesmo na ausência de um campo magnético externo;

os ferrimagnéticos são elementos onde os domínios magnéticos se alinham de forma antiparalela, porém com diferenças de intensidade dos dipolos, gerando uma forte magnetização espontânea;

os antiferromagnéticos são elementos como os ferrimagnéticos, porém nesse caso seus dipolos antiparalelos se anulam completamente. Esses elementos só são capazes de gerar campos magnéticos quando desenvolvem antiferromagnetismo parasita, gerado por defeitos em seus retículos cristalinos.

A magnetização remanescente é um fenômeno que ocorre quando os minerais têm seus domínios magnéticos permanentemente orientados no sentido de um paleo campo magnético. Existem quatro maneiras pelas quais as rochas e minerais podem adquirir esse tipo de magnetização:

Magnetização termoremanescente (primária): quando os minerais são resfriados abaixo da temperatura de Curie já na exposição de um campo magnético externo;

Magnetização remanescente detrítica (primária): quando os minerais detríticos são depositados orientados no sentido de um campo magnético externo;

Magnetização remanescente química (secundária): quando os minerais são recristalizados ou sofrem acreção durante o metamorfismo;

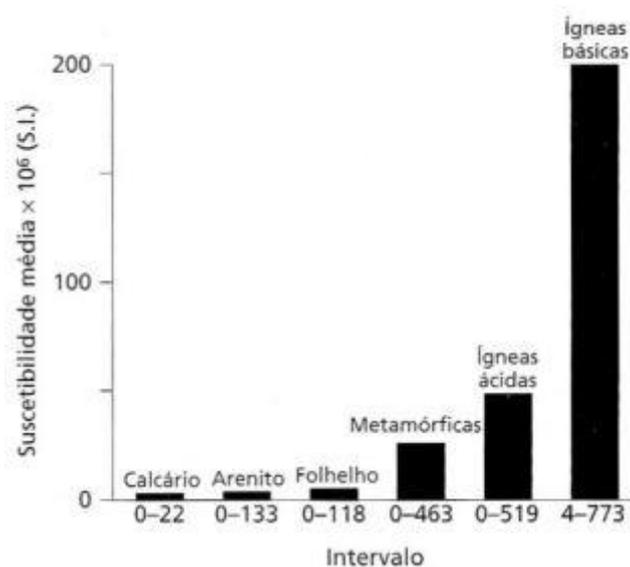
Magnetização remanescente viscosa (secundária): quando uma rocha fica muito tempo exposta a um campo magnético externo de modo que seus domínios magnéticos relaxem no sentido do campo externo.

A maioria dos minerais da crosta terrestre são paramagnéticos. Porém, em geral possuem suscetibilidade magnética muito baixa. Há apenas dois grupos geoquímicos capazes de gerar materiais com comportamento magnético capaz de gerar anomalias no campo, sendo eles o grupo ferro-titânio-oxigênio e o ferro-enxofre (KEAREY, 2009). Desses grupos, os minerais magnéticos mais comuns são a magnetita, a hematita e a pirrotita. No entanto, a hematita só é capaz de gerar anomalias magnéticas caso se desenvolva um antiferromagnetismo parasita em sua estrutura, já que ela é um mineral naturalmente antiferromagnético. Quando rochas possuem um comportamento magnético capaz de perturbar a leitura do campo

magnético terrestre ou a orientação do pináculo de uma bússola, geralmente se assume que o mineral responsável seja a magnetita, já que esse é o mineral ferrimagnético mais comum nas rochas da superfície. Ainda que a magnetita seja um dos minerais magnéticos mais comuns da crosta, sua ocorrência em proporção a outros minerais de uma mesma rocha é geralmente muito baixa.

Considerando que os metais pesados são em geral incorporados nos primeiros estágios de cristalização de um magma devido à alta compatibilidade (pequeno raio iônico e alta eletronegatividade) é comum que as rochas com maior conteúdo de magnetita (Fe_3O_4) sejam rochas básicas (Figura A3). Em outras palavras, a proporção de magnetita em rochas ígneas tende a diminuir com o aumento da acidez (KEAREY, 2009). A magnetita geralmente está associada a rochas ígneas. Porém, metamorfismo com alta pressão de oxigênio em rochas com alto conteúdo de ferro pode resultar na formação de magnetita em rochas metamórficas. O comportamento de rochas sedimentares é tipicamente não magnético. As causas mais comuns de anomalias magnéticas são diques, soleiras, embasamento metamórfico ou intrusões de maciços básicos (KEAREY, 2009).

Figura A3 – Gráfico de valores médios e intervalos de suscetibilidade magnética dos tipos de rochas mais comuns.



Fonte – Kearey (2009)

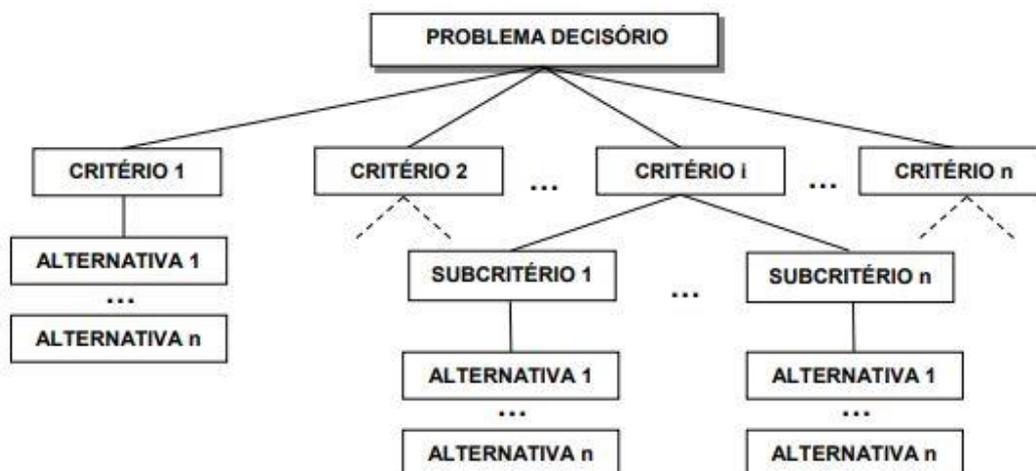
A.2 Fundamentos Teóricos Lógica Fuzzy

A Lógica Fuzzy (ZADEH, 1965) permite a resolução de problemas de natureza não binária. Certos problemas tem por natureza uma resposta binária (verdadeira ou falsa) como, por exemplo, a ocorrência de chuvas, onde a chuva pode (verdadeira) ou não (falsa) ocorrer. No entanto, as vezes há problemas que são atrelados a interpretação humana ou a um contexto específico, onde uma resposta binária não é o suficiente para abranger todas as respostas possíveis do problema como, por exemplo, definir se uma determinada temperatura é “quente” ou “fria”. Como a resposta de um problema tal qual o anterior estaria atrelada a mais de uma interpretação, a Lógica Fuzzy trata de atribuir um grau de veracidade à informação fornecida, estabelecendo um limite entre 0% e 100% para a informação a ser considerada verdadeira. Isso permite que informações sejam verdadeiras ou falsas em diferentes graus de veracidade. Por exemplo, uma informação com valor de 100% será uma verdade absoluta, enquanto uma informação com valor de 70% será “possivelmente” verdadeira. De uma maneira geral, a Lógica Fuzzy é uma ferramenta capaz de capturar informações vagas e convertê-las em um formato numérico (CHENCI et al., 2011).

A.3 Fundamentos Teóricos Análise Hierárquica (AHP)

O método de Análise Hierárquica foi desenvolvido em meados da década de 1970 pelo Pesquisador Thomas L. Saaty e se difundiu rapidamente devido à facilidade de aplicação. A premissa desse método é que um problema complexo pode ser desmembrado em problemas menores, mais fáceis de serem resolvidos (PASSOS, 2010). Do problema (topo da hierarquia) se ramificam atributos/critérios, que condicionam esse problema, e estes podem se ramificar em subcritérios e assim sucessivamente (Figura A4). Na base da hierarquia se encontram as possíveis soluções, condicionadas cada uma a um ou mais critérios/subcritérios. Dessa maneira, é como se um problema complexo fosse desmembrado em problemas menores. Isso permite a análise individual de cada problema para posteriormente propor, dentre as possíveis soluções, a mais eficiente para o problema no topo da hierarquia.

Figura A4 – Modelo de estrutura hierárquica AHP.



Fonte – Passos (2010).

A.3.1 Matriz de Comparações Paritárias (MCP)

Com a hierarquia definida, o próximo passo é atribuir um peso para cada critério. O peso é o que define a importância de cada critério. Sendo assim, quanto maior o peso, maior a relevância. Para definir o peso é elaborada a Matriz de Comparações Paritárias, que é uma matriz quadrada com número de colunas e linhas igual ao número de critérios (Figura A5). Essa matriz permite a análise paritária de todos os critérios entre si (SAATY, 1977).

Figura A5 – Modelo de matriz de combinação paritária.

Crítérios	Crit 1	...	Crit p	...	Crit m
Crit 1	1	...	a_{1p}	...	a_{1m}
...
Crit p	a_{p1}	...	1	...	a_{pm}
...
Crit m	a_{m1}	...	a_{mp}	...	1

Fonte – Passos (2010).

Após a montagem da matriz, faz-se o preenchimento dessa com valores da Escala Fundamental de Saaty (Tabela A1). Cada valor numérico tem um valor verbal também, o que torna o uso da escala intuitivo. Nota-se que essa tabela faz essencialmente o que a Lógica Fuzzy propõe ao correlacionar valores numéricos a

informações verbais. Para que o preenchimento da tabela tenha um bom grau de veracidade são chamados um ou mais especialistas na área do estudo em questão para determinarem um valor em consenso na comparação dos critérios (PASSOS, 2010).

Tabela A1 – Escala fundamental de Saaty.

ESCALA NUMÉRICA	ESCALA VERBAL
1	Mesma importância
3	Importância moderada de um sobre o outro
5	Importância essencial ou forte
7	Importância muito forte
9	Importância extrema
2,4,6,8	Valores intermediários

Fonte – Passos (2010)

O preenchimento de cada célula da tabela se dá por um comparativo, na ordem linha seguida de coluna. Por exemplo: se o critério da linha for considerado 5 vezes mais importante ao da coluna, o valor da célula será 5; se for o oposto, o valor da célula será 1/5. Com a matriz preenchida, é possível obter o peso de cada critério. Para isso, faz-se a média aritmética de cada linha separadamente. O valor de cada linha estará associado a um critério. O último passo é normalizar os valores obtidos por média aritmética (dividir o valor de cada critério pelo somatório de todos). Com isso, cada critério terá um valor entre 0 e 1, que será seu peso (PASSOS, 2010). Posteriormente, pode-se transformar os pesos em porcentagem, multiplicando-os por 100.

A.3.2 Razão de Consistência (RC)

Saaty (1977) sugere que os dados da MCP sejam submetidos a uma análise de consistência. A razão de consistência serve para avaliar o grau de confiabilidade

da MCP por meio da aplicação da equação da Razão de Consistência expressa na equação 1:

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

Onde RC é a Razão de Consistência da MCP, que segundo Saaty (2012) não deve ser maior que 0,1; IC é o Índice de Consistência da MCP cujo o cálculo está descrito na equação 2; ICA é o Índice de Consistência de uma matriz aleatória. Saaty (2012) fornece os valores de ICA para matrizes de diferentes tamanhos (Tabela A2).

Tabela A2 – Índice de consistência para diferentes matrizes.

Ordem da Matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ICA	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49

Fonte – Saaty (2012).

Abaixo está descrita a equação 2:

$$IC = \frac{(\lambda \max - n)}{(n - 1)}$$

Onde n é a ordem da MCP. O $\lambda \max$ é calculado da seguinte forma:

1° - Cada coluna da MCP é multiplicada pelo peso da linha (critério) correspondente;

2° - É feita o somatório dos valores de cada linha e o resultado é dividido pelo peso da linha (critério);

3° - Os resultados do cálculo acima, para cada linha (critério), são somados entre si e então o resultado é dividido pelo número de critérios da MCP.

A.4 Fundamentos Teóricos Combinação Linear Ponderada (CLP)

A CLP é uma metodologia de AMC desenvolvida pelo pesquisador Voogd (1983). A implementação desse modelo em ambientes de SIG permite que mapas distintos sejam integrados em um único mapa (ADEYEYE, 2018). A premissa desse método é compilar mapas de informações variadas a fim de gerar um mapa final

(mapa de aptidão) capaz de melhor representar o alvo do estudo. Os mapas precisam ter uma relação com o alvo de estudo e é comum que seja aplicada a metodologia AHP para identificar quais mapas (critérios) estão relacionados a ele.

Para gerar um mapa de CLP é necessário que os critérios a serem utilizados sejam normalizados para uma escala numérica comum ou, em outras palavras, para o mesmo número de classes (EASTMAN, 2003). Mapas com mesmo número de classes serão passíveis de serem integrados para geração de um mapa de aptidão final que terá o mesmo número de classes que os mapas utilizados no processo. São atribuídos pesos aos critérios após a reclassificação dos mesmos para o mesmo número de classes.

O número de classes deve ser definido de acordo com a finalidade do mapa. Por exemplo, se um mapa é feito para indicar a ocorrência de água superficial, é natural que ele tenha apenas 2 classes (mapa binário): uma onde ocorre a água na superfície e outra onde não ocorre. No entanto, o mais comum é que mapas de aptidão tenham mais de 2 classes, uma vez que o julgamento humano geralmente não é algo absoluto, passível de ser englobado em apenas duas classes.

Em síntese, existem quatro principais etapas na aplicação da CLP (EASTMAN, 2003):

Identificação dos critérios: o primeiro passo é identificar os critérios que tenham relação com o objeto de estudo e que sejam relevantes para o estudo em questão. Como citado anteriormente, é comum que seja aplicado o procedimento de AHP para auxiliar na definição desses critérios;

Padronização dos critérios: o segundo passo é padronizar os critérios que serão utilizados para um valor numérico comum e assim tornar eles comparáveis entre si. Para essa padronização é comum que seja aplicada a Lógica Fuzzy (SOUZA, 2019);

Definição do peso dos critérios: o terceiro passo é definir o peso de cada critério. O peso do critério determina sua relevância para a composição do mapa final. Sendo assim, um critério com maior peso terá mais representatividade no mapa de aptidão gerado. O peso geralmente é definido por meio da aplicação da MCP da AHP (SOUZA, 2019);

Integração dos critérios: o último passo é integrar os critérios por meio da média ponderada, fazendo a multiplicação de cada fator por seu respectivo peso e somando-os entre si.

APÊNDICIE B

Esse apêndice detalha quais foram os materiais e métodos utilizados na aquisição dos dados aeromagnéticos utilizados nesse trabalho. Nesse mesmo tópico podem ser encontradas informações detalhadas de como foram processados os mapas aeromagnéticos utilizados nesse estudo. Cada mapa é apresentado com uma breve discussão de suas características e qualidades.

B.1 Dados LASA PROSPECÇÕES S.A

Os dados adquiridos pela LASA são públicos e podem ser acessados no site <https://geosgb.cprm.gov.br>. No site GeoSbg é possível acessar o “Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos” de Lasa Prospecções S.A (2010). Esse relatório contempla todos os materiais e métodos aplicados na aquisição das imagens e também todo o procedimento aplicado para a geração dos produtos finais. Os dados utilizados nesse trabalho são dados no formato XYZ. Esses dados contém os seguintes itens (LASA PROSPECÇÕES S.A, 2010):

- Dados magnetométricos brutos e reduzidos da variação diurna;
- Dados magnetométricos nivelados, reduzidos do IGRF e micronivelados;
- Dados radiométricos brutos e corrigidos e respectivas razões;
- Altura e altitude média do terreno;
- Posicionamento GPS: Coordenadas UTM, Latitude, Longitude e elevação GPS.

B.1.1 Materiais e métodos LASA PROSPECÇÕES S.A

O método de aquisição das imagens aerogeofísicas consistiu em acoplar um aeromagnetometro Scintrex CS-2 a cauda (tipo *stinger*) de 3 aeronaves distintas que voaram em direção N-S, com um espaçamento entre linhas de vôo de 500 m, direção de linhas de controle E-W com espaçamento de 10 km entre linhas. O intervalo entre medições magnéticas consecutivas foi de 0,1 s. A altura média de vôo das aeronaves foi de 100 m e a velocidade de voo média das 3 aeronaves foi 245 km/h (Tabela B1).

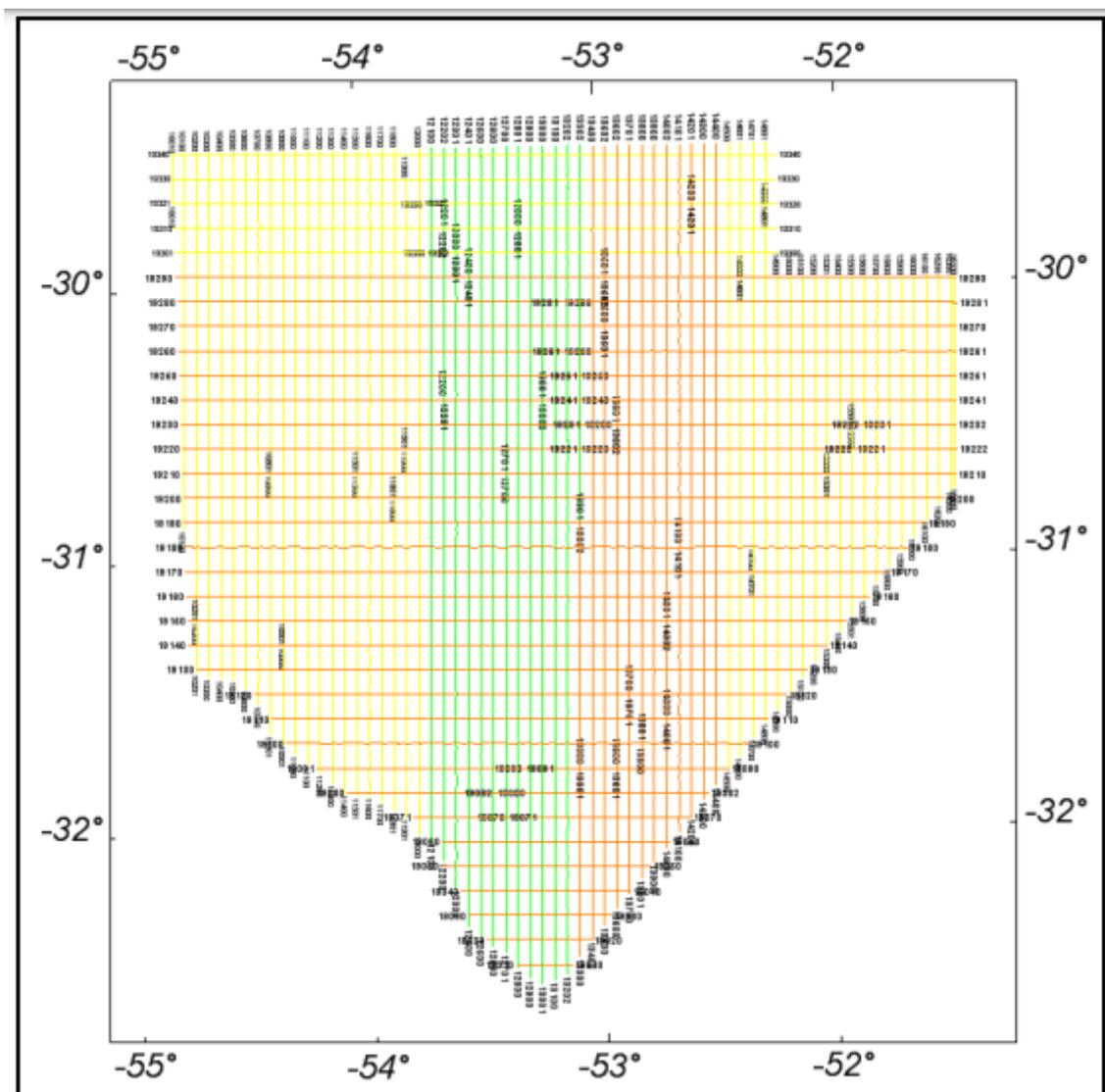
Tabela B1 – Principais características do levantamento de Lasa Prospecções S.A.

Características do levantamento	
Direção das linhas de vôo	N - S
Espaçamento das linhas de vôo	500 m
Direção das linhas de controle	E - W
Espaçamento das linhas de controle	10 Km
Intervalo entre medições geofísicas (espectrômetro)	1 s
Intervalo entre medições geofísicas (magnetômetro)	0,1 s
Altura média de vôo	100 m
Velocidade aproximada de vôo PR - SSB	227 Km/h
Velocidade aproximada de vôo PT - WOT	272 Km/h
Velocidade aproximada de vôo PT - MEP	235 Km/h

Fonte – Modificado de Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos” de Lasa Prospecções S.A (2010).

O levantamento é constituído de 633 linhas de vôo e 34 linhas de controle (Figura B1).

Figura B1 – Linhas de vôo feitas pela aeronave SSB em amarelo; linhas de vôo feitas pela aeronave MET em verde; linhas de vôo feitas pela aeronave WOT em laranja.



Fonte - Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos” de Lasa Prospecções S.A (2010).

B.1.2 Correções aplicadas pela LASA PROSPECÇÕES S.A

B.1.2.1 Correção erro paralaxe/lag

Essa correção serve para corrigir a defasagem de tempo entre a medição da posição da aeronave e valor da medida do campo magnético. A correção de lag aplicada nas 3 aeronaves foi a mesma (0,30 s).

B.1.2.2 Correção diurna

A correção magnética diurna foi feita ainda a bordo das aeronaves. Essa correção foi aplicada sobre todos os dados, com um nível de base definido em 28,708 nT somado algebricamente a todas as medidas inicialmente obtidas; disponível no arquivo XYZ na coluna intitulada "MAGCOR".

B.1.2.3 Nivelamento

O nivelamento consiste em um ajuste da intensidade do campo magnético baseado na diferença de medidas obtidas entre as linhas de voo e as linhas de controle, disponível no arquivo XYZ na coluna intitulada "MAGNIV".

B.1.2.4 Micronivelamento

O micronivelamento dos dados nivelados consiste na aplicação de um filtro passa-alta tipo Butterworth. Esse filtro reduziu o ruído presente nos dados, gerando um *grid* menos poluído, o qual foi reduzido de um *grid* normal para obtenção do valor a ser subtraído do *grid* pré-nivelado, disponível no arquivo XYZ na coluna intitulada "MAGMIC".

B.1.2.5 Correção IGRF

A última correção aplicada foi a remoção do Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF), aplicada sobre os dados micronivelados considerando a altitude de aquisição de dados em 200 m e o IGRF do ano de 2010, disponível no arquivo XYZ na coluna intitulada "MAGIGRF".

B.2 Geração dos Mapas Aeromagnéticos

Inicialmente o banco de dados foi aberto dentro do Grav-Mag Suite (MATLAB). A partir desses dados foi gerado um *grid* utilizando o método de interpolação Bi-Direcional com um espaçamento de células de 125 m para gerar o mapa de toda a área levantada pela Lasa Prospecções S.A. O espaçamento de células e o método de interpolação dos dados utilizado foi o mesmo definido pela Lasa. O espaçamento de 125 m é equivalente a um quarto do espaçamento das linhas de voo.

B.2.1 Mapa Reduzido ao Polo

O objetivo do filtro de redução ao polo é dispor as informações do *grid* da maneira mais fiel à sua localização real por meio da correção de inclinação e declinação do sinal capturado pelo *Flux Gate*, uma vez que, não estando sob o polo magnético as “linhas” magnéticas não “deixam” a superfície terrestre na vertical, logo, não tem suas leituras feitas em suas reais posições. Esse é também responsável por converter anomalias do campo magnético anômalo total, de caráter dipolar, em “anomalias monopolares”.

Para gerar o *grid* reduzido ao polo será utilizado aplicado o filtro de redução ao polo. A declinação magnética utilizada no filtro será a do ponto central do polígono de estudo. Vale ressaltar que é sobre esse *grid* que serão aplicados todos os demais filtros para a geração dos mapas a seguir.

B.2.2 Mapa Passa Baixa (Low Pass)

O objetivo da aplicação do filtro passa-baixa é reduzir o “ruído” (oscilações de alta frequência e, geralmente, baixa amplitude) gerado por elementos superficiais deixando evidente apenas as oscilações na frequência desejada, no caso desse relatório, as geradas por corpos mais profundos (baixa frequência e alta amplitude).

Na aplicação do filtro Passa Baixa, o valor de corte definido será de 7000 m, sendo assim, oscilações com comprimento de onda inferior ao valor de corte serão ignoradas.

B.2.3 Mapa Amplitude do Sinal Analítico (ASA)

O filtro ASA tem a característica de realçar a borda dos corpos anômalos. Isso ocorre porque geralmente as altas amplitudes se localizam nas bordas do corpo. Essa técnica é boa para realçar fontes rasas uma vez que o aumento de profundidade é inversamente proporcional ao aumento da amplitude.

B.2.4 Mapa Derivada Vertical

O mapa de Derivada Vertical tem por característica o realce de fontes anômalas rasas em detrimento de anomalias regionais de baixa frequência e grande comprimento de onda. Quanto maior a ordem da derivada, maior é o realce de ondas

de alta frequência. Isso é o que permite o realce de fontes anômalas rasas. No entanto, vale ressaltar que ruídos têm por característica baixos comprimentos de onda e alta frequência. Logo, esse filtro pode acabar ressaltando ruídos se aplicado de maneira errônea.

Na aplicação do filtro, a ordem da derivada será definida ao comparar os mapas e verificar qual apresenta o melhor resultado. Junto ao filtro de Derivada, será aplicado um filtro Passa Baixa, para filtrar apenas as frequências desejadas, eliminando o ruído que não é de interesse para o estudo.

B.3 Resultados

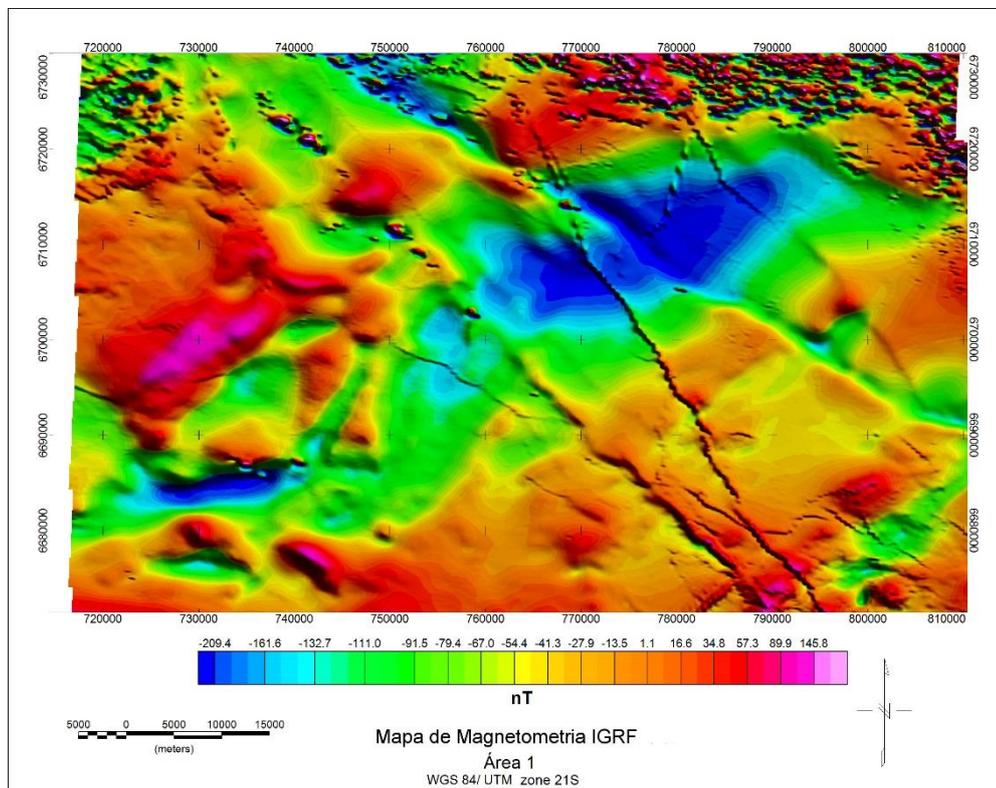
Aqui são apresentados os mapas aeromagnéticos gerados no Projeto de Pesquisa “Investigação de Lineamentos Magnéticos no Rio Grande do Sul” (GREGORY et al., 2019; MARAN et al., 2020), com a demarcação de todos os lineamentos magnéticos identificados. Adicionalmente será apresentada uma breve interpretação acerca dos lineamentos magnéticos encontrados em cada um.

B.3.1 Mapa dos valores do campo magnético anômalo total reduzido do IGRF

O mapa IGRF (Figuras B2 e B3) é o mapa com o valor do campo magnético anômalo total subtraído do IGRF para a área do levantamento. Esta correção foi aplicada pela LASA PROSPECÇÕES S.A. Vale ressaltar que sem o filtro de redução ao polo (RTP), que converte a anomalia dipolar do campo magnético anômalo total em uma "anomalia monopolar", a visualização e interpretação das anomalias pode tornar-se complexa. A aplicação do filtro RTP possibilita a visualização das anomalias no centro das fontes magnéticas causativas.

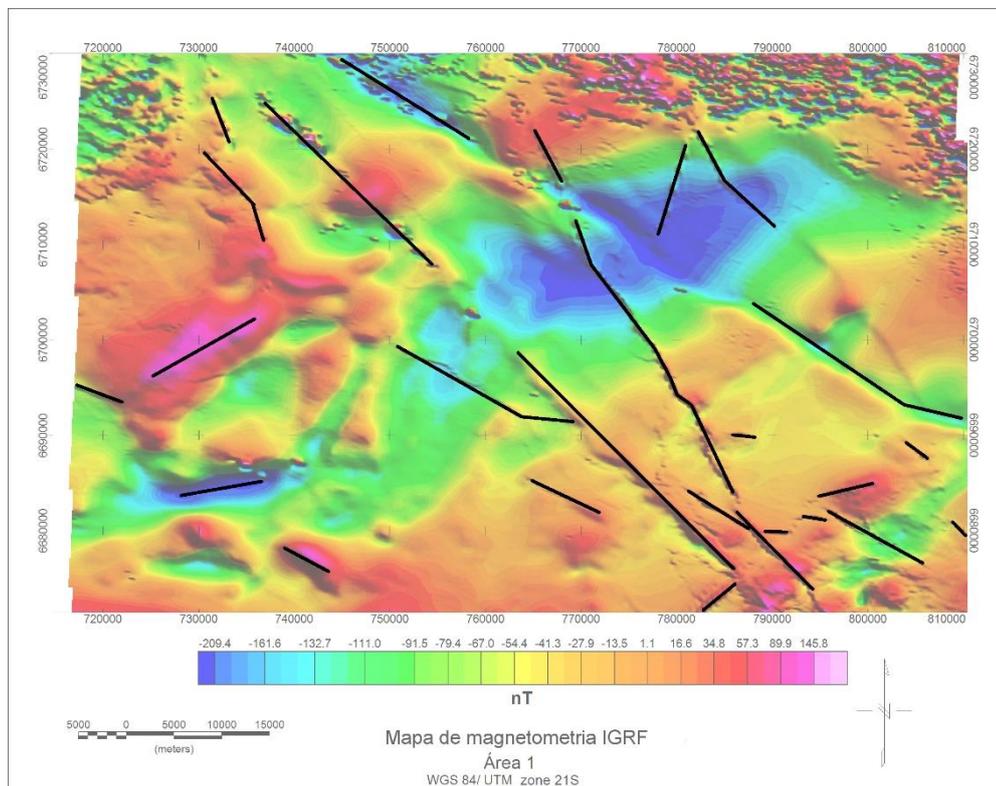
Após a análise visual das feições lineares do mapa elas foram identificadas como orientadas para NW-SE. Essas feições identificadas podem corresponder tanto a fraturas e falhas como a diques. Porém, vale ressaltar que a anomalia que corta a parte central direita do mapa (Figura B3) tem uma escala considerável, logo, possivelmente trata-se de uma falha ou dique. O seu aspecto “pontilhado” e sua coloração avermelhada indicam ondas de alta frequência com amplitudes oscilando entre valores mais e menos intensos em nT e isso pode ser um indicativo de que a feição se trate de um dique, devido ao seu comportamento dipolar evidente.

Figura B2 –Mapa dos valores do campo magnético anômalo total reduzidos do IGRF
Área 1.



Fonte – Maran et al. (2020).

Figura B3 – Mapa dos valores do campo magnético anômalo total reduzidos do IGRF da Área 1 com marcação dos principais lineamentos identificados.



Fonte – Maran et al. (2020).

B.3.2 Mapa dos valores do campo magnético anômalo total reduzidos ao polo

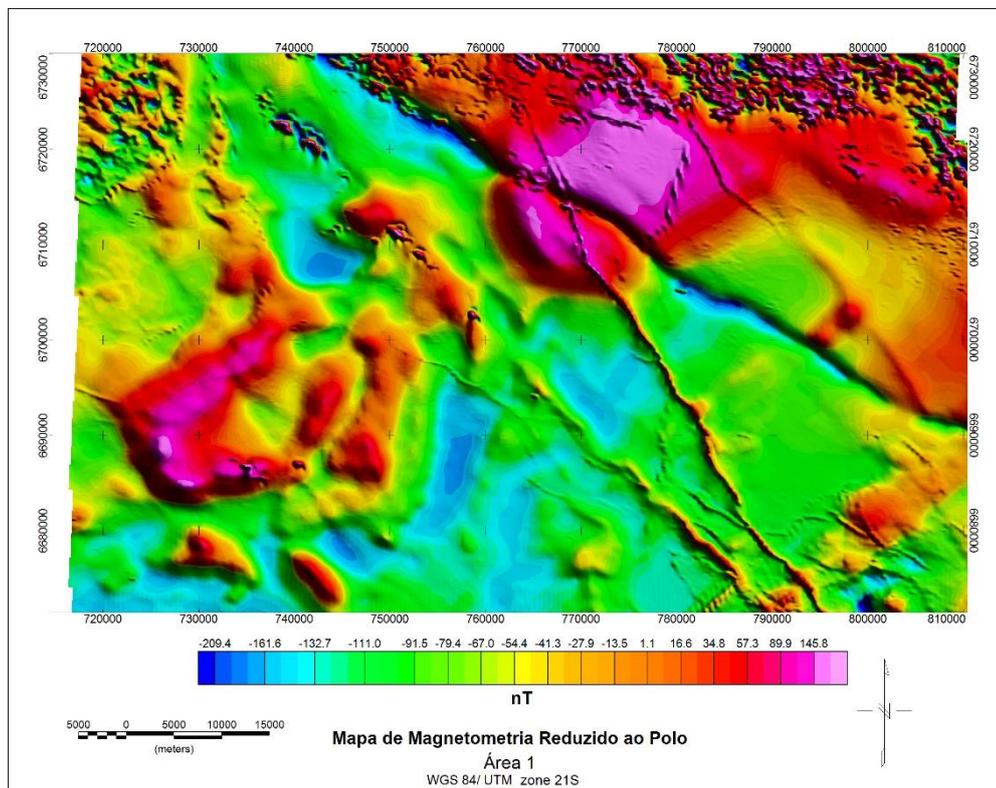
A finalidade do filtro de redução ao polo é representar com maior fidelidade a posição real dos corpos visualizados no *grid* IGRF por meio da correção de inclinação e declinação do campo magnético na área amostrada. Sendo assim, a análise desse mapa será considerada mais relevante que a análise do mapa IGRF.

Apesar das semelhanças desse mapa com o anterior existem diferenças a serem pontuadas, sendo que a mais relevante é a de que o lineamento NW-SE ressaltado anteriormente agora aparenta, com maior clareza, cortar um corpo com altos valores em nT (possivelmente um corpo ígneo básico em forma de domo). Isso pode reforçar a hipótese de que esse lineamento se trata de uma falha.

O mapa foi gerado utilizando os dados de inclinação e declinação magnética do centro do polígono de estudo, sendo, respectivamente:

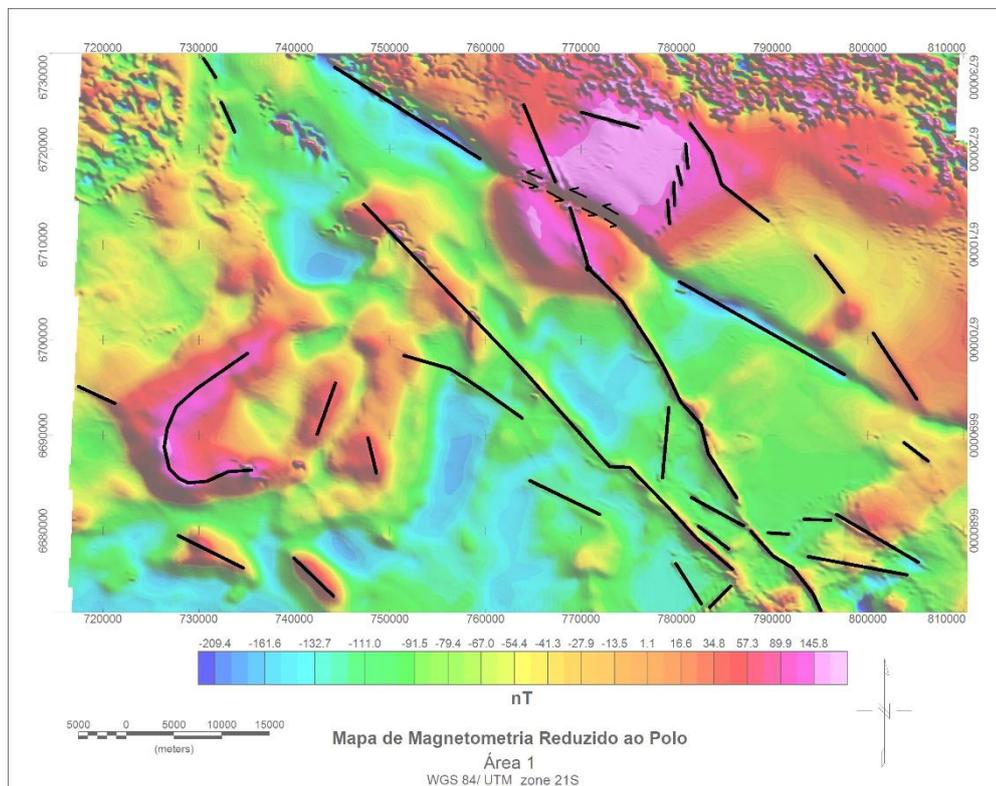
- Inclinação: - 35,49°;
- Declinação: 13,42°.

Figura B4 – Mapa dos valores do campo magnético anômalo total reduzido do IGRF e reduzido ao polo, da Área 1.



Fonte – Maran et al. (2020).

Figura B5 –Mapa dos valores do campo magnético anômalo total reduzido do IGRF e reduzido ao polo, da Área 1, com principais lineamentos identificados.

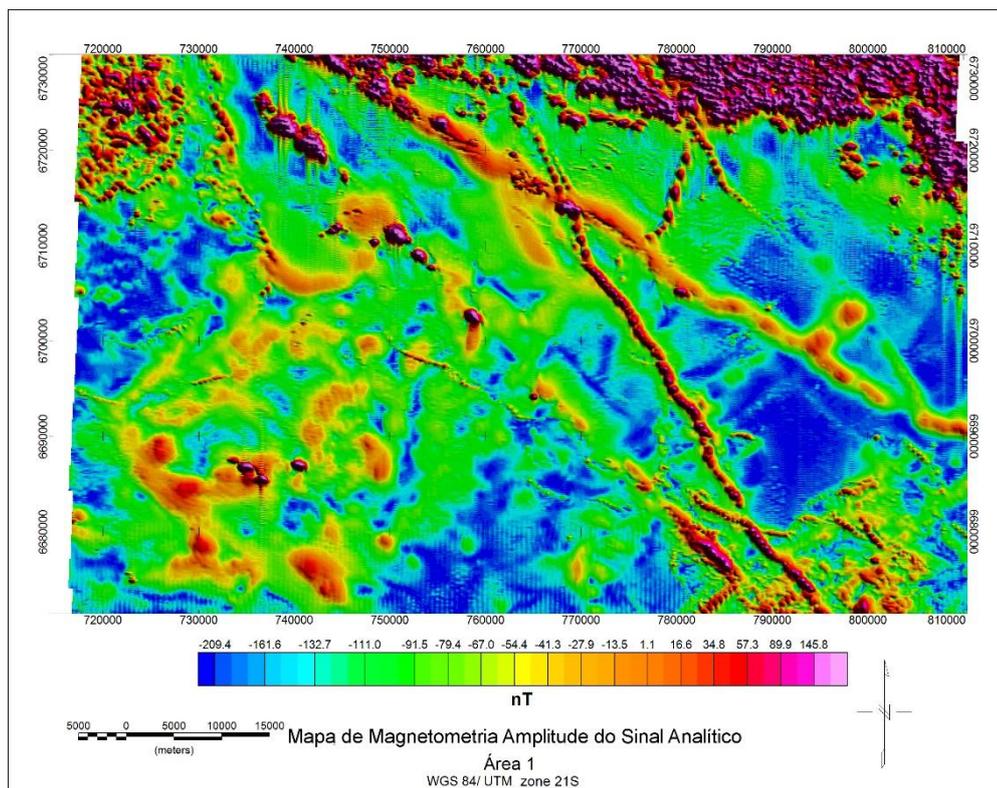


Fonte – Maran et al. (2020).

B.3.3 Mapa de amplitude do sinal analítico (ASA)

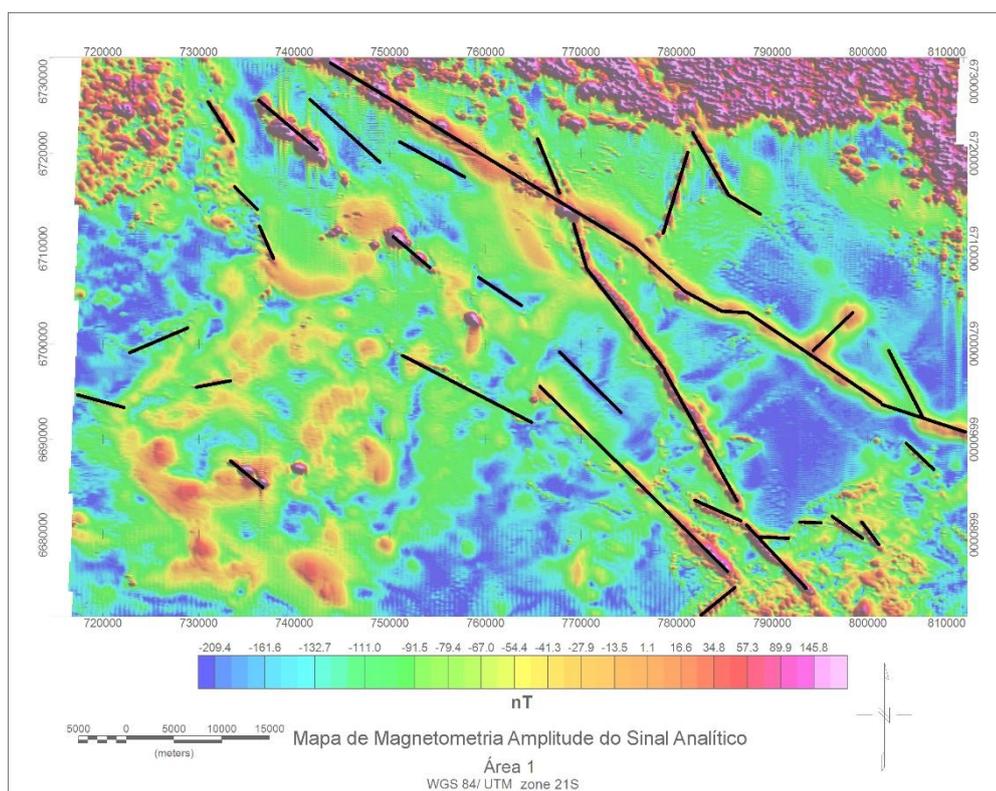
O mapa de amplitude do sinal analítico (Figuras B6 e B7) proporcionou a visualização de elementos estruturais antes não visíveis, possivelmente devido a perturbações geradas por corpos mais profundos, com um caráter magnético intenso o bastante para ocultar essas perturbações de menor escala mais superficiais (comprimento de onda e amplitudes mais suaves). Além disso, o aspecto “pontilhado” do principal lineamento tornou-se mais evidente.

Figura B6 – Mapa de Amplitude do Sinal Analítico da Área 1.



Fonte – Maran et al. (2020).

Figura B7 - Mapa de Amplitude do Sinal Analítico da Área 1 com principais lineamentos identificados.

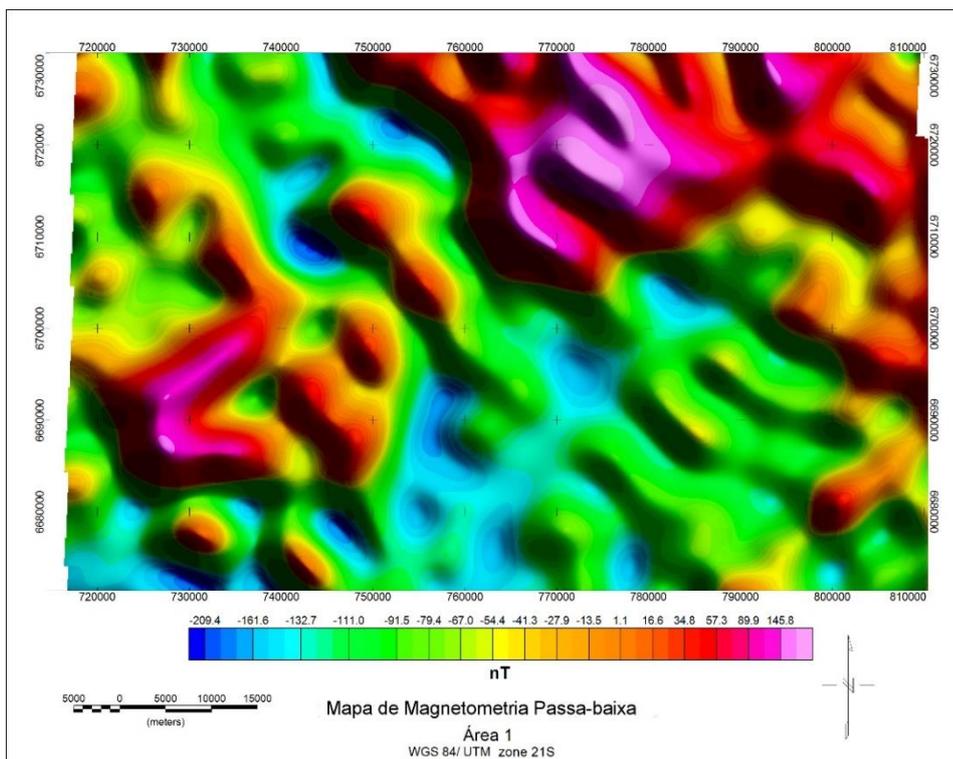


Fonte – Maran et al. (2020).

B.3.4 Mapa passa-baixa

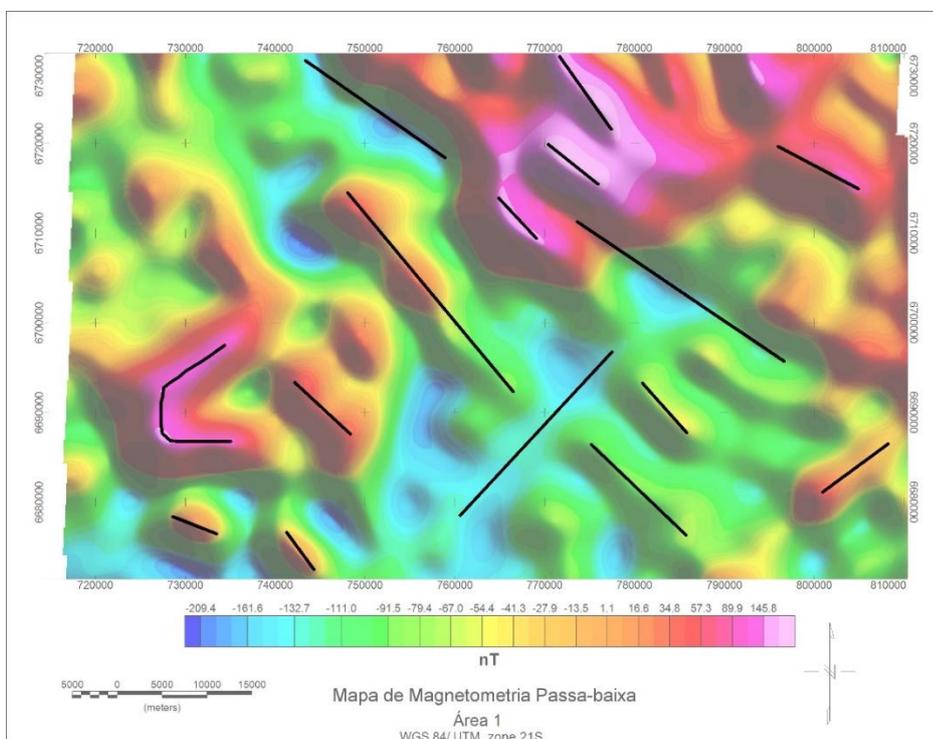
O mapa passa-baixa (Figuras B8 e B9) foi útil para realçar corpos mais profundos por meio da remoção de ruídos gerados por corpos de menor profundidade e até mesmo perturbações geradas por áreas urbanas. Com esse filtro e o filtro ASA anteriormente analisado entendeu-se que a anomalia localizada sobre a cidade de São Pedro do Sul não é proveniente das construções e perturbações antrópicas uma vez que não é visível na imagem ASA, mas é bem delimitada com a aplicação do filtro Passa-baixa. Dessa maneira, interpreta-se que a anomalia seria proveniente de um corpo mais profundo com alta resposta magnética. Esse corpo poderia tratar-se de uma soleira basáltica, gerada durante o magmatismo Serra Geral.

Figura B8 – Mapa Passa Baixa da Área 1.



Fonte – Maran et al. (2020).

Figura B10 – Mapa Passa Baixa da Área 1 com principais lineamentos identificados.

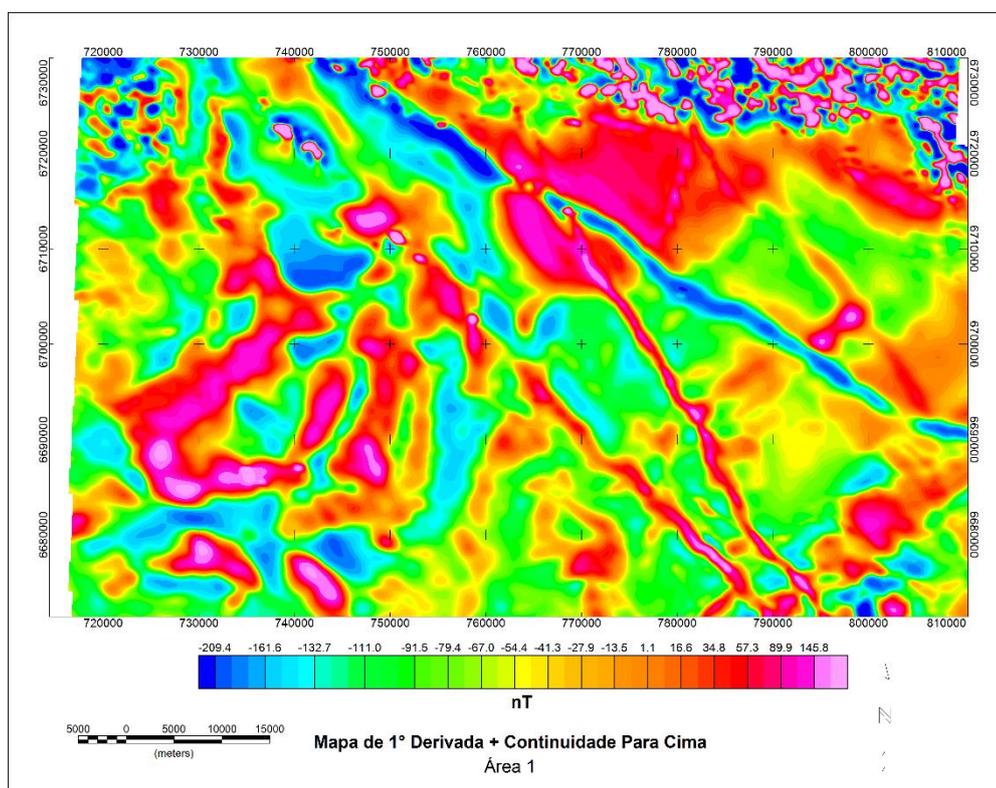


Fonte – Maran et al. (2020).

B.3.5 Mapa da 1° Derivada Vertical + Continuidade Para Cima

O mapa de 1° Derivada Vertical com filtro de Continuidade Para Cima de 500 m (Figura B11) tem a finalidade de realçar corpos mais rasos. A continuidade para cima de 500 m, tem o efeito de atenuar os efeitos gerados pela aplicação do filtro de 1° derivada, que valoriza mais as ondas de alta frequência em detrimento das ondas de baixa. A aplicação desse filtro mostrou-se de suma importância para demonstrar o efeito atenuante que se tem na amplitude das anomalias magnéticas no centro de grandes corpos ao aplicar o filtro ASA. Os corpos que antes eram interpretados como sendo profundos são verdadeiramente mais rasos do que o imaginado e o lineamento Formigueiro teve o seu comportamento magnético alterado de uma anomalia positiva para uma anomalia negativa. Pouco se sabe ao que se deve tal alteração, logo esse local torna-se um alvo de visitação em campo, para o entendimento do tipo de rocha e estrutura que se encontra associada a esse fen meno.

Figura B11 – Mapa 1° Derivada + Continuidade Para Cima 500 m.



Fonte – Maran et al. (2020).

APÊNDICE C

Esse apêndice detalha os materiais e métodos empregados na geração dos mapas que foram reclassificados para posterior integração pelo método de Combinação Linear Ponderada. Adicionalmente é descrito como foram obtidos os mapas auxiliares, que serviram de complemento para entender o comportamento da geomorfologia no entorno das anomalias magnéticas positivas.

C.1 Processamento

Para a geração dos mapas pelo programa QGIS serão utilizadas as imagens de resolução 12,5 m X 12,5 m do sensor Palsar do satélite Alos (Tabela C1), obtidas pelo sistema de pesquisa de dados Vertex do *Alaska Satellite Facility*. Imagens de modelo digital de elevação do satélite com correção de terreno já aplicada serão utilizadas para a geração do mapa hipsométrico e para a extração dos canais e bacias de drenagens da área.

Tabela C1 – Principais aspectos do satélite Alos Palsar.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)	Resolução Radiométrica	Área Imageada
ANIVIR - 2	1	0,42 - 0,50	12,5	8 bits	70 Km (nadir)
	2	0,52 - 0,60			
	3	0,61 - 0,69			
	4	0,76 - 0,89			

Fonte – Modificado de Embrapa (2022).

C.1.1 Mosaico de imagens e recorte da área

O Mapa de Mosaico de Imagens será o mapa base utilizado para todos os processamentos posteriores.

Para a geração do mosaico de imagens, necessário para a extração do MDE da área de estudo, a ferramenta “Raster – Miscelânea – Mesclar” será utilizada e todas as imagens serão integradas em um só raster. O próximo passo será utilizar a ferramenta de recorte “Recortar raster pela camada de máscara” onde a máscara utilizada será os *shapefiles* das áreas de estudo.

C.1.2 Extração de bacias e redes de drenagem

O mapa de rede de drenagens será utilizado para analisar uma possível correlação de anomalias magnéticas com altos e baixos topográficos. Uma vez que as anomalias magnéticas da área de estudo são atribuídas a ocorrência basaltos, se eles realmente ocorrem em soleiras eles devem soerguer o terreno acima, gerando relevos dômicos. Isso implicaria que próximo do centro dessas anomalias magnéticas deve haver uma alta concentração de nascentes, enquanto em locais com anomalias magnéticas mais baixas devem concentrar menor número de nascentes.

A ferramenta SAGA “*Terrain analysis - hidrology – Fill sinks (Wang & Liu)*” será utilizada para que o raster das bacias de drenagem da área e o de direção de fluxo seja gerado. Com a ferramenta “*Terrain analysis - Channels – Channel network and drainage basins*” será utilizado o raster de direção do fluxo para obter a rede de drenagem.

C.1.3 Mapa hipsométrico

O Mapa Hipsométrico deve ter uma relação proporcional com o mapa de anomalias magnéticas, de modo que quanto maior o valor (nT) da anomalia magnética, maior é a probabilidade do terreno acima dessa estar soerguido.

Para a geração do mapa hipsométrico a ferramenta “Reclassificar por Tabela” foi empregada e o modelo digital de terreno do satélite Alos Palsar foi reclassificado em 10 classes com espaçamento de 44 metros entre sí. Tratando-se de soleiras, dificilmente haverá a ocorrência de uma soleira pouco espessa, dessa forma fica justificado não utilizar um menor espaçamento entre cotas, além disso, a área de estudo é muito extensa e processar um menor intervalo entre curvas de nível poderia ser muito custoso para o computador. Para gerar o sombreamento que será utilizado no mapa de hipsometria a ferramenta de análise raster “Sombreamento” será empregada, sem exagero vertical e com azimute de insolação de 315° e altitude de 45°.

C.1.4 Mapa de Declividade

O Mapa de Declividade será empregado na MCP, mas não pode ser utilizado isolado para a avaliação da ocorrência de basalto, nem possui relação direta com o

Mapa de Anomalias Magnéticas. Ele servirá de artifício para ajudar a localizar locais onde o basalto aflora, mas não necessariamente condiciona a ocorrência dessa litologia.

Para a geração desse mapa foi utilizada a ferramenta “Raster – Análise – Declividade” e foi utilizada a opção de representação do resultado da análise em porcentagem ao invés de graus. Após a geração do mapa de declividade, ele foi reclassificado de acordo com as classes de morfologia apresentadas no Manual Técnico de Geomorfologia (IBGE, 2009). Para sua reclassificação foi empregada a ferramenta “reclassificar por tabela”.

C.1.5 Mapa de Solos

O Mapa de Solos também será um dos critérios utilizados na MCP. O solo da área de estudo pode refletir de maneira direta ou indireta o tipo de rocha que ocorre em subsuperfície (solos eluviais ou aluviais). Esse mapa, se feito com detalhamento suficiente pode ser um dos critérios mais importantes para a geração do Mapa de Aptidão final.

Para geração desse mapa, inicialmente foi feito o georreferenciamento do Mapa Exploratório de Solos do Estado do Rio Grande do Sul. Para georreferenciar esse mapa foi utilizada a ferramenta “Raster – Georreferenciador” e o mapa foi georreferenciado no sistema de coordenadas WGS 84/ zona utm 21 S, com sistema de reamostragem “Vizinho Mais Próximo”. Adicionalmente cita-se que para o arquivo final não ficar muito grande, foi feito um recorte do mapa, afim de representar apenas a região de interesse. Esse recorte foi salvo em formato PNG para posteriormente ser aberto no QGIS e então ser georreferenciado de acordo com o passo a passo descrito acima.

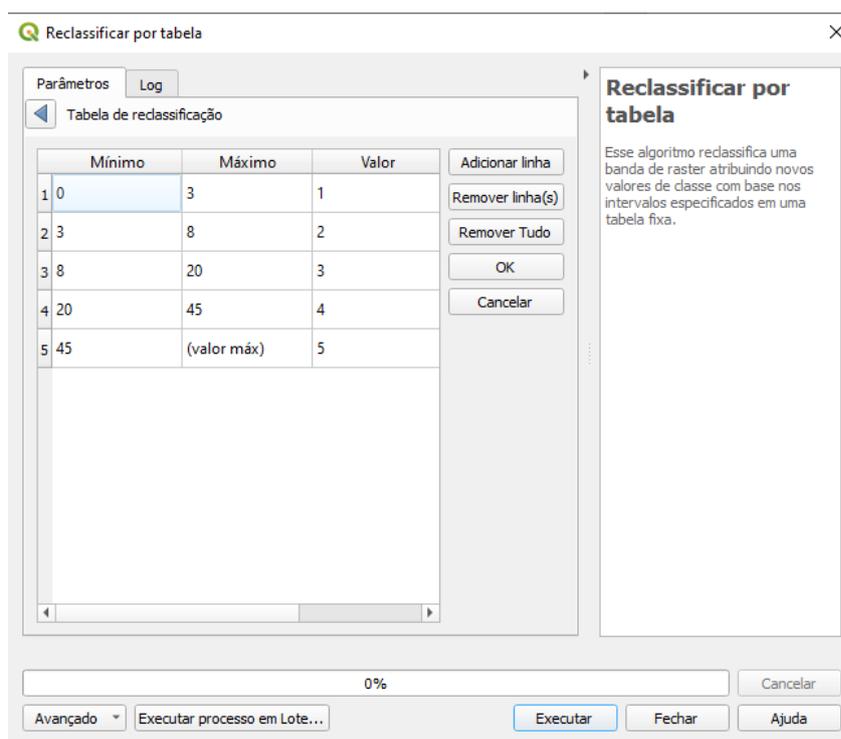
Com o mapa georreferenciado aberto no QGIS, foi gerada uma camada *vetorial* do tipo polígono e adicionado um campo do tipo “*integer (32 bit)*” a essa camada. Com isso, foi possível delimitar visualmente as classes de solo já atribuindo o valor determinado na tabela de reclassificação de solos (Tabela 6).

C.1.6 Mapas Reclassificados

Para a geração dos mapas reclassificados foram adotadas duas abordagens, uma para o Mapa de Solos e o Mapa de Aeromagnetometria ASA, e outra para os mapas de Hipsometria e Declividade.

Com os mapas de Hipsometria e Declividade abertos no QGIS, foi utilizada a ferramenta “Reclassificar por tabela” e então os dois mapas foram reclassificados utilizando os seguintes intervalos limites “min < valor <= máx”. Dessa forma, a tabela de reclassificação sempre representava os valores do intervalo da classe e qual o valor que essa classe receberia no mapa final. Abaixo está ilustrado a tabela de reclassificação de declividade para facilitar o entendimento (Figura C1).

Figura C1 – Tabela de reclassificação utilizada na geração do Mapa de Declividade (ferramenta reclassificar por tabela).



Fonte – Autor (2022).

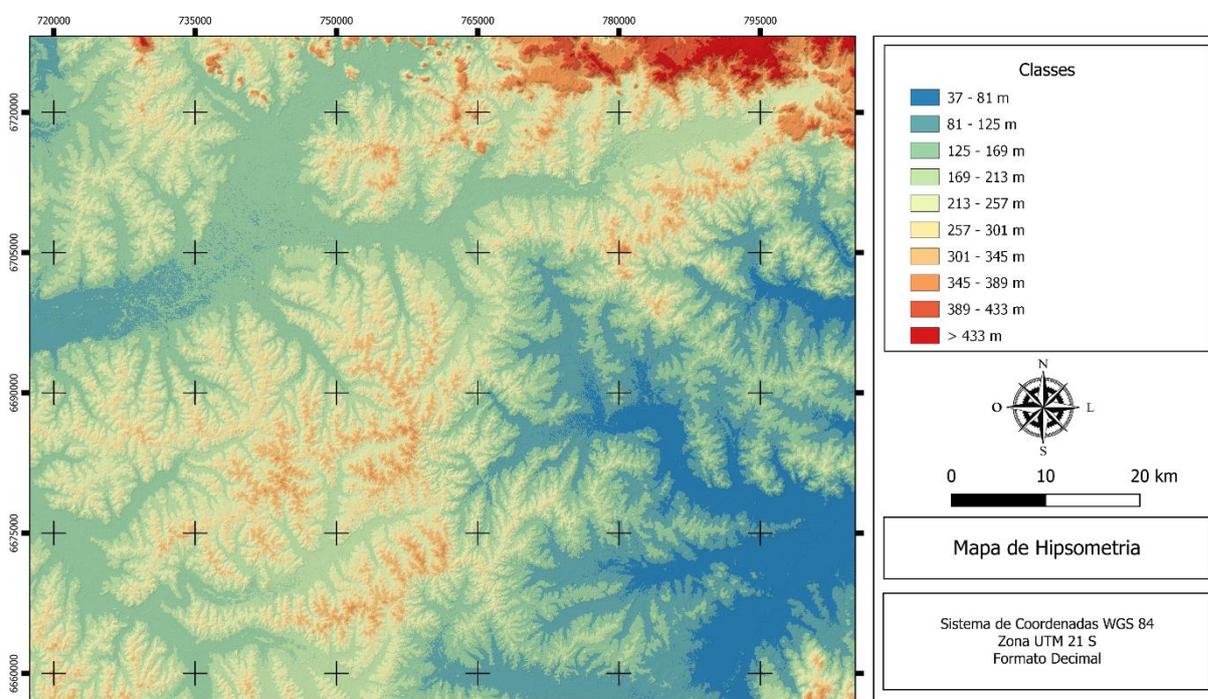
Com os mapas de Aeromagnetometria e Solos abertos no QGIS, foi criada uma camada vetorial para cada mapa, do tipo polígono, e então foi adicionado um campo do tipo “integer (32 bit)” a cada uma dessas camadas. Após isso, foi desenhado visualmente polígonos delimitando as classes de valores desejadas. Após finalizar a

edição de cada polígono é possível determinar o valor de classe que esse polígono receberá.

C.2 Resultados

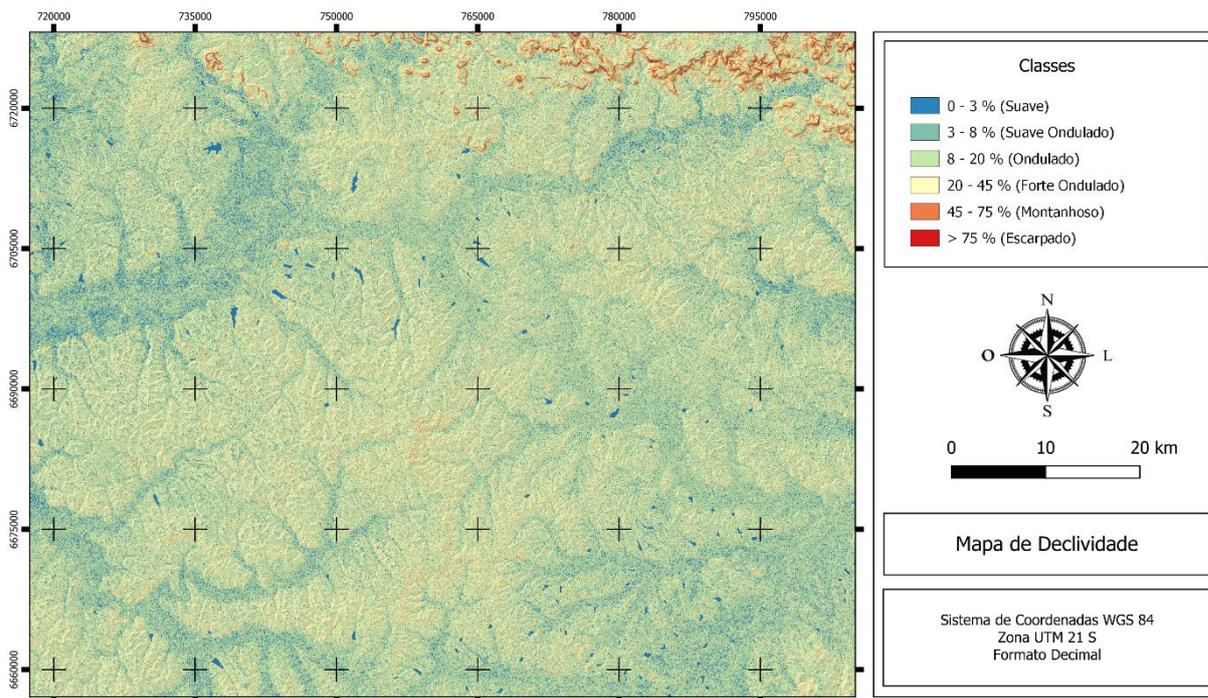
Abaixo segue o resultado dos mapas gerados antes do processo de reclassificação (Figuras C2, C3, C4 e C5). Esses mapas são correspondentes aos 4 critérios utilizados na Combinação Linear Ponderada na geração do Mapa de Aptidão. Os resultados dos mapas após o processo de reclassificação são apresentados no tópico 8.1 desse relatório.

Figura C2 – Mapa de Hipsometria.



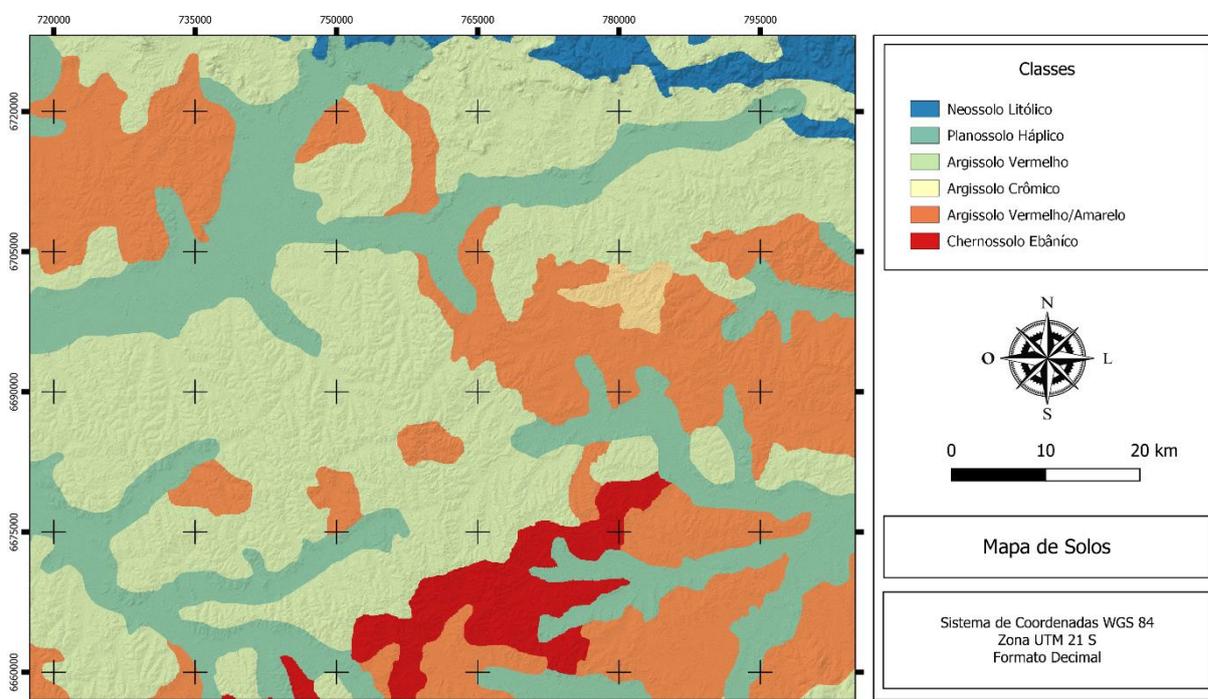
Fonte – Modificado de Alaska Satellite Facility; autor (2022).

Figura C3 – Mapa de Declividade.



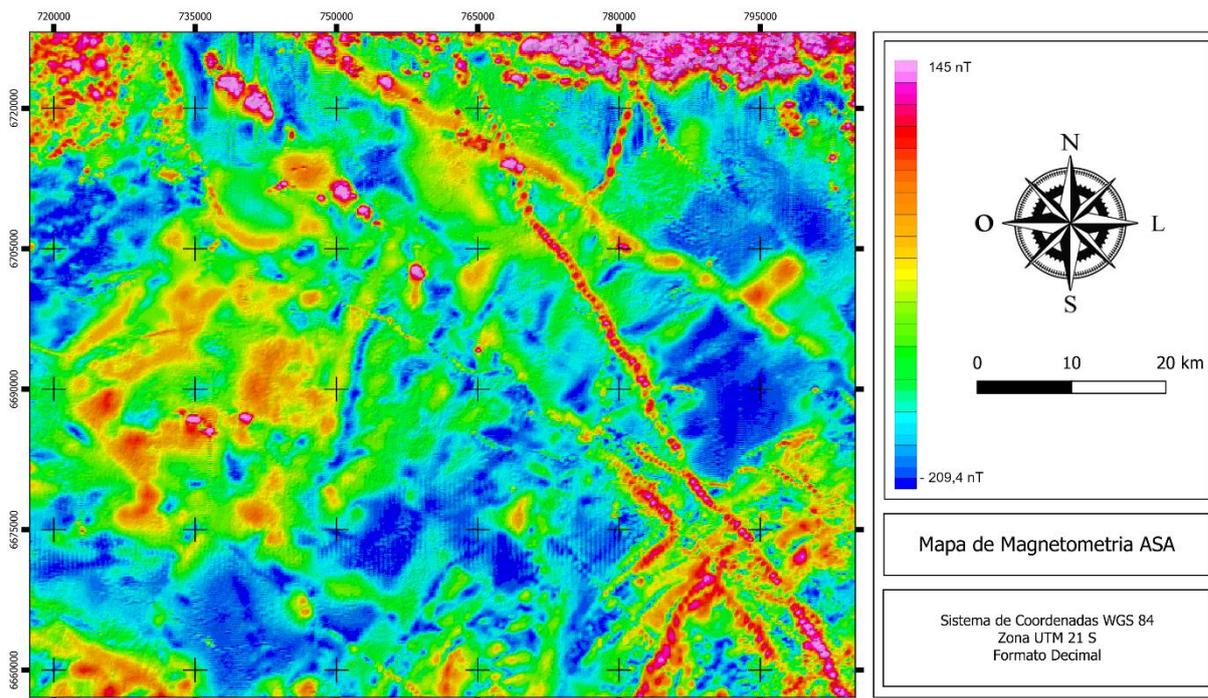
Fonte – Modificado de Alaska Satellite Facility; autor (2022).

Figura C4 – Mapa de Solos



Fonte – Modificado de IBGE; Autor (2022).

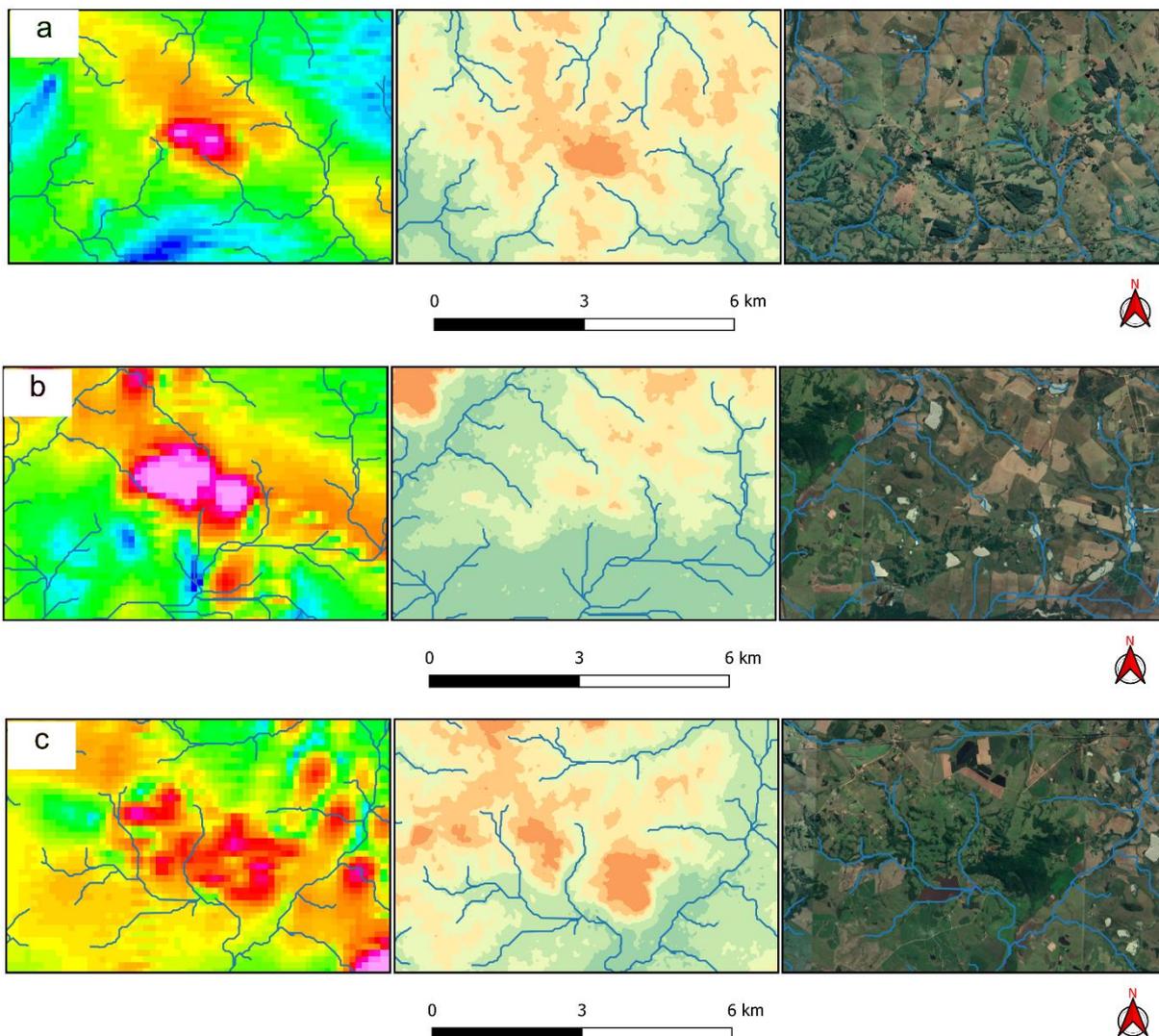
Figura C5 – Mapa de Magnetometria ASA. A geração desse mapa está descrita no Apêndice B.



Fonte – Modificado de Maran et al; Autor (2022).

A seguir é apresentado uma interação que pode ser observada entre os mapas de Magnetometria e Hipsometria (Figura C6). O que pode se observar foi que, nos pontos representados, as anomalias magnéticas positivas ocorrem relacionadas a cotas de nível mais altas do que as cotas que ocorrem nos seus arredores. Também é possível associar as anomalias magnéticas a padrões de drenagem radiais, que convergem do centro desses corpos anômalos para o seu exterior.

Figura C6 – Interações dos mapas de Magnetometria ASA (esquerda) e Hipsometria (centro). (a) interação observada nos pontos de campo 1 e 2. (b) interação observada no ponto de campo 4. (c) interação observada no ponto 5.



Fonte – Autor (2022).