



VICTOR SOARES CARDOSO

**MODELAGEM GEOLÓGICA DO MACIÇO SIENÍTICO PIQUIRI COM BASE EM
DADOS GEOFÍSICOS**

PORTO ALEGRE

2019

VICTOR SOARES CARDOSO

**MODELAGEM GEOLÓGICA DO MACIÇO SIENÍTICO PIQUIRI COM BASE EM
DADOS GEOFÍSICOS**

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

Orientadores: Prof^a. Dr^a. Maria de Fátima Bitencourt
Prof. Dr. Jairo Francisco Savian

PORTO ALEGRE

2019

CIP - Catalogação na Publicação

Cardoso, Victor Soares

Modelagem geológica do Maciço Sienítico Piquiri com base em dados geofísicos / Victor Soares Cardoso. -- 2019.

74 f.

Orientadora: Maria de Fátima Bitencourt.

Coorientador: Jairo Francisco Savian.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Modelagem geológica. 2. Modelagem geofísica. 3. Gravimetria. 4. Magnetometria. 5. Leapfrog. I. Bitencourt, Maria de Fátima, orient. II. Savian, Jairo Francisco, coorient. III. Título.

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso **MODELAGEM GEOLÓGICA DO MACIÇO SIENÍTICO PIQUIRI COM BASE EM DADOS GEOFÍSICOS**, elaborado por VICTOR SOARES CARDOSO, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Maria Luiza Correa da Camara Rosa

Msc. Laércio Dal Olmo Barbosa

Msc. Cristiane Butori Rivera

Dedico este trabalho a meu avô
Claudio dos Santos Soares, pelo
grande homem que foi e por tudo
que me ensinou.

AGRADECIMENTOS

Começo meus agradecimentos pelas pessoas que mais me apoiaram, me incentivaram a nunca desistir e sempre me ensinaram a ser a melhor pessoa possível, meus pais Jorge e Mariângela. Além deles agradeço também a minha avó Marialda, meu irmão Matheus, minha cunhada Thamires e meus sobrinhos Gabriel e Ana Lúcia. Agradeço também ao meu primo Wagner, por me incentivar nos momentos pré-vestibular e também durante todo curso.

Quero agradecer a todos os amigos que fiz durante esses 6 anos de graduação: Andrei, Gerônimo, Cíntia, Nunes, Amanda, Priscila, Filipe, Raquel, Anderson, Jojo, Jeferson e Vitor. Um agradecimento mais especial a minha dupla de (quase) todos os trabalhos de campo Larissa, obrigado por me aguentar tanto. Ao meu grande amigo Maurício que me apoiou durante todo o curso, principalmente nos momentos mais difíceis. O agradecimento mais especial de todos é para minha grande amiga Mariana, que se tornou minha parceira para tudo, companheira de viagens e rolês de gosto duvidoso, obrigado pelos cafés, pelas conversas, pelos choros e pelas risadas, te amo.

Agradeço aos meus orientadores Fátima e Jairo, obrigado pelos ensinamentos, pela paciência e por dividirem comigo essa aventura que foi este trabalho. Ao professor Diego Marques pela ajuda na obtenção de algumas ferramentas e durante a etapa de modelamento. Quero agradecer aos meus colegas do grupo de pesquisa Magmatismo Sintectônico, em especial: Dioni, Diego, Pepe, Stephanie, Matheus, Pedrinho, Camila, Cris e um agradecimento mais especial ainda à Fran pois sem ela esse trabalho teria dado muito mais trabalho, à Duda por me ajudar quando precisei e por me animar quando queria largar tudo e à Elisa por disponibilizar seu layout do Word pra facilitar as etapas finais do trabalho e por fazer café até mesmo quando não tinha água.

Por fim agradeço a todos os professores que tive, desde o ensino fundamental até a última cadeira da graduação. Este trabalho com certeza tem um pouco do que cada um me ensinou.

"Estudar não é gasto, é investimento. Aliás, é o melhor, o mais barato e o mais duradouro investimento. Quando você forma alguém, é para sempre."

Luiz Inácio LULA da Silva

RESUMO

O Maciço Sienítico Piquiri (MSP), junto a outras seis suítes graníticas (Pinheiro Machado, Erval, Viamão, Encruzilhada do Sul, Cordilheira e Dom Feliciano), formam o Batólito Pelotas. O batólito localiza-se na parte leste do Escudo Sul-rio-grandense e é resultado da soma de diversos processos tectônico-magmáticos que ocorreram no Ciclo Brasileiro. Recentemente o MSP foi descrito como um corpo multi-intrusivo formado por três pulsos sucessivos, datados por LA-MC-ICP-MS (U-Pb em zircão), sendo o pulso mais antigo localizado na borda e o mais novo no centro da intrusão. O pulso 1 é composto predominantemente por sienitos que variam para quartzo sienitos e feldspato alcalino quartzo sienitos, com idade de $609,3 \pm 1,5$ Ma. O pulso 2 ($603,4 \pm 3,9$ Ma) é composto por feldspato alcalino sienitos e feldspato alcalino quartzo sienitos, intrusivos no pulso 1, possuindo xenólitos do mesmo. O pulso 3 ($588,8 \pm 3,1$ a $583,2 \pm 1,8$ Ma) é composto por quartzo sienitos intrusivos no pulso 2 e contém xenólitos dos pulsos 1 e 2. A revisão bibliográfica mostra que ainda faltam dados para um melhor entendimento da gênese e posicionamento do MSP. O objetivo geral da pesquisa é relacionar a morfologia do Maciço Sienítico Piquiri com sua gênese e posicionamento a partir de uma modelagem geológica tridimensional. Para isso, foram realizados levantamentos geofísicos para obtenção de dados gravimétricos e magnéticos. Com os dados geofísicos obtidos foram gerados mapas de Anomalia Bouguer, Campo Magnético Total, Amplitude do Sinal Analítico e Campo Magnético Reduzido ao Polo. A partir dos mapas de Anomalia Bouguer e Campo Magnético Total, foram modelados sete perfis bidimensionais utilizando ferramentas do *software Oasis Montaj*. A partir dos perfis modelados, foi gerado um modelo geológico tridimensional, utilizando-se o *software Leapfrog Geo*®. Através dos mapas gerados e do modelo geológico construído, foi possível observar o comportamento dos pulsos entre si e como ocorreu o posicionamento das intrusões.

Palavras-Chave: Modelagem geológica, Modelagem geofísica, Gravimetria, Magnetometria, Maciço Sienítico Piquiri, *Leapfrog*.

ABSTRACT

The Piquiri Syenitic Massif (PSM), together with other six granitic suites (Pinheiro Machado, Erval, Viamão, Encruzilhada do Sul, Cordilheira e Dom Feliciano), make up the Pelotas Batolith. The Batolith is situated in the eastern portion of the Sul-rio-grandense Shield and it results from several tectono-magmatic processes that occurred during the Brasiliano Cycle. The PSM was recently described as a multi-intrusive body formed by three successive pulses dated by LA-MC-ICP-MS (U-Pb in zircon), whereas the oldest is situated at the border and the youngest is the core of the intrusion. Pulse 1 is composed predominantly of syenites, with variation from quartz syenites to alkali-feldspar quartz-syenites, dated at $609,3 \pm 1,5$ Ma. Pulse 2 ($603,4 \pm 3,9$ Ma) is composed of alkali-feldspar syenites and alkali-feldspar quartz syenites intrusive in those of pulse 1, containing xenoliths of pulse varieties. Pulse 3 ($588,8 \pm 3,1$ a $583,2 \pm 1,8$ Ma) is composed of quartz syenites intrusive in those of pulse 2 and contains xenoliths of varieties from pulse 1 and 2. The literature review shows that there is still need for data to better understand the genesis and emplacement of the PSM. The main goal of this work is to correlate the PSM morphology with its genesis and emplacement by interpreting a 3D geological model. For that, geophysical surveys were performed to acquire gravimetric and magnetometric data. With the acquired data several maps were produced, as Bouguer Anomaly, Total Magnetic Field, Amplitude of Analytical Signal and Magnetic Field Reduced to Pole. From the Bouguer Anomaly and Total Magnetic Field maps seven profiles were modelled using tools from Oasis Montaj plataforma in Geosoft. Based on the profiles, a 3D geological model was generated with Leapfrog Geo ®. Through the interpretation of the maps and geological model it was possible to observe the interactions of the pulses and their emplacement to construct the massif.

Keywords: Geological modelling, Geophysical modelling, Gravimetry, Magnetometry, Piquiri Syenitic Massif, Leapfrog.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização e principais rodovias de acesso à área de estudo no estado do Rio Grande do Sul partindo de Porto Alegre.	14
Figura 2 – Mapa geológico simplificado dos Escudos Uruguaio, Sul-rio-grandense e Catarinense. Onde TT = Terreno Taquarembó, TSG = Terreno São Gabriel, TTJ = Terreno Tijucas e BT = Batólito Pelotas.	17
Figura 3 - Mapa geológico do Maciço Sienítico Piquiri.	20
Figura 4 – Mapa de localização dos pontos onde foram realizadas estações de leituras gravimétricas e magnéticas.	24
Figura 5 - Mapa geológico da região do levantamento, com as linhas tracejadas indicando os sete perfis selecionados para modelagem gravimétrica.	27
Figura 6 – Mapa gravimétrico de anomalia Bouguer da área de estudo, com a delimitação, pelas linhas tracejadas, dos dois domínios identificados.	31
Figura 7 - Modelo em duas dimensões do perfil EW-1, a linha tracejada vermelha indica a zona de maior incerteza. Onde CVC – Complexo Várzea do Capivarita; CMP – Complexo Metamórfico Porongos; GB – Granito Butiá; P1 MSP– Pulso 1 do Maciço Sienítico Piquiri; P2 MSP – Pulso 2 do Maciço Sienítico Piquiri; P3 MSP – Pulso 3 do Maciço Sienítico Piquiri e RS – Rochas Sedimentares.	33
Figura 8 - Modelo em duas dimensões do perfil EW-2, a linha tracejada vermelha indica a zona de maior incerteza.	33
Figura 9 - Modelo em duas dimensões do perfil EW-3, a linha tracejada vermelha indica a zona de maior incerteza.	34
Figura 10 - Modelo em duas dimensões do perfil EW-4, a linha tracejada vermelha indica a zona de maior incerteza. Onde CMP – Complexo Metamórfico Porongos; P1 MSP– Pulso 1 do Maciço Sienítico Piquiri; P2 MSP – Pulso 2 do Maciço Sienítico Piquiri; P3 MSP – Pulso 3 do Maciço Sienítico Piquiri e GE – Granito Encruzilhada.	35
Figura 11 - Modelo em duas dimensões do perfil NS-1, a linha tracejada vermelha indica a zona de maior incerteza.	36
Figura 12 - Modelo em duas dimensões do perfil NS-2, a linha tracejada vermelha indica a zona de maior incerteza.	37
Figura 13 - Modelo em duas dimensões do perfil NS-3, a linha tracejada vermelha indica a zona de maior incerteza. Onde CVC – Complexo Várzea do Capivarita; CMP – Complexo Metamórfico Porongos; GB – Granito Butiá; P1 MSP– Pulso 1 do Maciço Sienítico Piquiri; P2	

MSP – Pulso 2 do Maciço Sienítico Piquiri; P3 MSP – Pulso 3 do Maciço Sienítico Piquiri e GE – Granito Encruzilhada.....	38
Figura 14 - Mapa do campo magnético total (CMT) reduzido do IGRF, para a área de estudo.	40
Figura 15 – Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA).	41
Figura 16 – Mapa do Campo Magnético Reduzido ao Polo (RTP).	42
Figura 17 - Modelo em duas dimensões, da distribuição de susceptibilidade magnética, do perfil EW-1. As linhas tracejadas indicam as anomalias identificadas. Zona de imprecisão representada a partir de 9 km.....	43
Figura 18 - Modelo em duas dimensões, da distribuição de susceptibilidade magnética, do perfil EW-2. As linhas tracejadas indicam as anomalias identificadas. Zona de imprecisão representada a partir de 9 km.....	44
Figura 19 - Modelo em duas dimensões, da distribuição de susceptibilidade magnética, do perfil EW-3. As linhas tracejadas indicam as anomalias identificadas. Zona de imprecisão representada a partir de 9 km.....	45
Figura 20 - Modelo em duas dimensões, da distribuição de susceptibilidade magnética, do perfil EW-4. As linhas tracejadas indicam as anomalias identificadas. Zona de imprecisão representada a partir de 9 km.....	46
Figura 21 - Modelo em duas dimensões, da distribuição de susceptibilidade magnética, do perfil NS-1. As linhas tracejadas indicam as anomalias identificadas. Zona de imprecisão representada a partir de 9 km.....	47
Figura 22 - Modelo em duas dimensões, da distribuição de susceptibilidade magnética, do perfil NS-2. As linhas tracejadas indicam as anomalias identificadas. Zona de imprecisão representada a partir de 9 km.....	48
Figura 23 - Modelo em duas dimensões, da distribuição de susceptibilidade magnética, do perfil NS-3. As linhas tracejadas indicam as anomalias identificadas. Zona de imprecisão representada a partir de 9 km.....	49
Figura 24 – Superfícies geradas por interpolação dos modelos gravimétricos para todas as litologias (a) CVC, (b) CMP, (c) GB, (d) MSP Pulso 1, (e) MSP Pulso 2, (f) MSP Pulso 3, (g) GE e (h) Rochas Sedimentares.	51
Figura 25 – Modelo geológico em bloco, de todas as litologias da área, sob dois ângulos de visualização (a) azimute de 045° e (b) azimute de 225°, ambos com inclinação de +30°.	52

- Figura 26** – Mapa de amplitude do sinal analítico, com as anomalias de altos valores demarcadas pelas linhas tracejadas preta, e os contornos do pulso 1 do MSP demarcados pelas linhas tracejadas vermelha..... 54
- Figura 27** – Mapa do campo magnético reduzido ao polo, com o domínio B demarcado pela linha tracejadas preta, e os contornos do CVC demarcados pelas linhas tracejadas vermelha. 56
- Figura 28** – Comparativo entre os perfis EW-1 gerados pela modelagem gravimétrica, mais à esquerda, pela modelagem magnética, mais à direita. Onde CVC – Complexo Várzea do Capivarita; CMP – Complexo Metamórfico Porongos; GB – Granito Butiá; P1 MSP– Pulso 1 do Maciço Sienítico Piquiri; P2 MSP – Pulso 2 do Maciço Sienítico Piquiri; P3 MSP – Pulso 3 do Maciço Sienítico Piquiri e RS – Rochas Sedimentares. 57
- Figura 29** – Comparativo entre os perfis EW-2 gerados pela modelagem gravimétrica, mais à esquerda, pela modelagem magnética, mais à direita..... 58
- Figura 30** – Comparativo entre os perfis EW-3 gerados pela modelagem gravimétrica, mais à esquerda, pela modelagem magnética, mais à direita..... 59
- Figura 31** - Comparativo entre os perfis EW-4 gerados pela modelagem gravimétrica, mais à esquerda, pela modelagem magnética, mais à direita. Onde CMP – Complexo Metamórfico Porongos; P1 MSP– Pulso 1 do Maciço Sienítico Piquiri; P2 MSP – Pulso 2 do Maciço Sienítico Piquiri; P3 MSP – Pulso 3 do Maciço Sienítico Piquiri e GE – Granito Encruzilhada..... 60
- Figura 32** – Comparativo entre os perfis NS-1 gerados pela modelagem gravimétrica, mais à esquerda, pela modelagem magnética, mais à direita..... 62
- Figura 33** – Comparativo entre os perfis NS-2 gerados pela modelagem gravimétrica, mais à esquerda, pela modelagem magnética, mais à direita..... 63
- Figura 34** - Comparativo entre os perfis NS-3 gerados pela modelagem gravimétrica, mais à esquerda, pela modelagem magnética, mais à direita. Onde CVC – Complexo Várzea do Capivarita; CMP – Complexo Metamórfico Porongos; GB – Granito Butiá; P1 MSP– Pulso 1 do Maciço Sienítico Piquiri; P2 MSP – Pulso 2 do Maciço Sienítico Piquiri; P3 MSP – Pulso 3 do Maciço Sienítico Piquiri; GE – Granito Encruzilhada e RS – Rochas Sedimentares. 64
- Figura 35** - Modelo geológico 3D do Pulso 1, observado pelos azimutes (a) 045°, (b) 135°, (c) 225° e (d) 315°, todos com inclinação de +20°. 67
- Figura 36** - Modelo geológico 3D do Pulso 2, observado pelos azimutes (a) 045°, (b) 135°, (c) 225° e (d) 315°, todos com inclinação de +20°. 68
- Figura 37** - Modelo geológico 3D do Pulso 3, observado pelos azimutes (a) 045°, (b) 135°, (c) 225° e (d) 315°, todos com inclinação de +20°. 69

ABREVIACÕES

MSP – Maciço Sienítico Piquiri

ESRg – Escudo Sul-Rio-Grandense

ASM – Anisotropia de Susceptibilidade Magnética

ZCPC – Zona de Cisalhamento Passo das Canas

CVC – Complexo Várzea do Capivarita

GB – Granito Butiá

GE – Granito Encruzilhada

CMP – Complexo Metamórfico Porongos

CPRM – Serviço Geológico Brasileiro

CB – Correção Bouguer

IGRF – International Geomagnetic Reference Field

CMT – Campo Magnético Total

RTP – Redução ao Polo Magnético

ASA – Amplitude do Sinal Analítico

SUMÁRIO

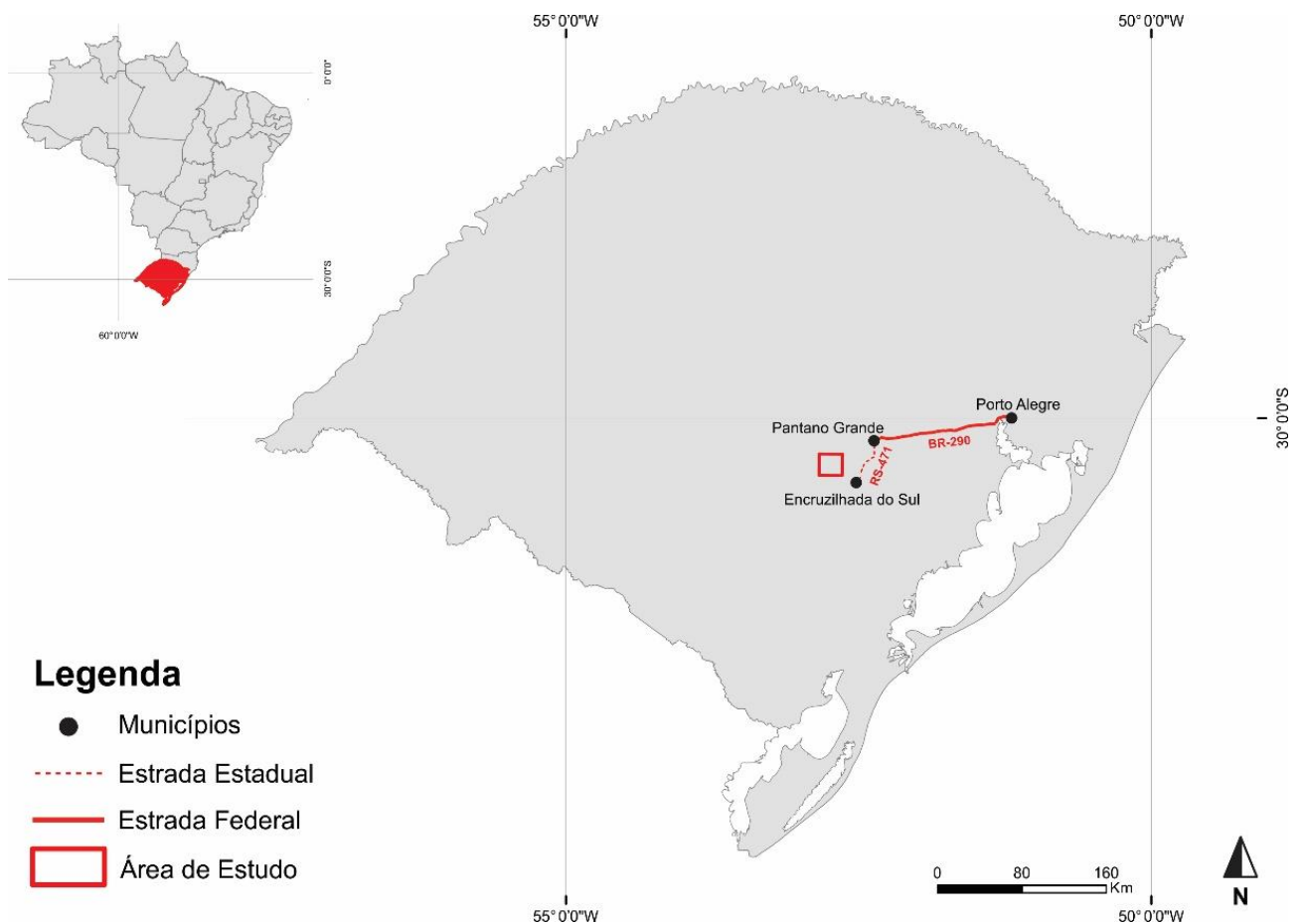
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Localização da Área de Estudo	14
1.2. Problemas	15
1.3. Premissas e Hipóteses	15
1.4. Objetivos	16
1.5. Justificativa	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1. Contexto Geológico Regional.....	17
2.2. Maciço Sienítico Piquiri	18
3. METODOLOGIA.....	21
3.1. Etapa Pré-campo	21
<i>3.1.1. Método Gravimétrico</i>	<i>21</i>
<i>3.1.2. Método Magnético.....</i>	<i>22</i>
3.2. Etapa de Campo.....	23
3.3. Etapa Pós-campo	25
<i>3.3.1. Processamento dos dados gravimétricos</i>	<i>25</i>
<i>3.3.2. Processamento dos dados magnéticos</i>	<i>25</i>
<i>3.3.3. Modelagem Geofísica.....</i>	<i>26</i>
<i>3.3.4. Modelagem Geológica</i>	<i>28</i>
4. RESULTADOS	30
4.1. Gravimetria	30
4.2. Modelagem Gravimétrica	31
4.3. Magnetometria.....	38
4.4. Modelagem Magnética	42
4.5. Modelagem Geológica	49
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	53
5.1. Gravimetria	53
5.2. Magnetometria.....	54
5.3. Modelagem Gravimétrica vs Modelagem Magnética.....	56
5.4. Modelagem Geológica	65
6. CONCLUSÕES.....	70
REFERÊNCIAS.....	71

1. INTRODUÇÃO

1.1. Localização da Área de Estudo

A área de estudo localiza-se nos arredores da cidade de Encruzilhada do Sul, porção centro-leste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Para o acesso à cidade partindo do município de Porto Alegre, deve-se usar a BR-290 no sentido SW e na cidade de Pantano Grande contornar para S na RS-471 até a cidade de Encruzilhada do Sul. As cartas topográficas utilizadas para a área de estudo tratam-se das folhas Passo das Canas - SH.22-Y-A-III-4 (MI-2984/4) e Capané - SH.22-Y-A-III-3 (MI2984/3) na escala 1:50.000, ambas produzidas pela Diretoria de Serviço Geográfico do Ministério do Exército com primeira impressão em 1979.

Figura 1 - Localização e principais rodovias de acesso à área de estudo no estado do Rio Grande do Sul partindo de Porto Alegre.



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.2. Problemas

O Maciço Sienítico Piquiri (MSP) aflora no limite entre os municípios de Encruzilhada do Sul e Cachoeira do Sul. Constitui uma das sete suítes ígneas do Batólito Pelotas no Escudo Sul-rio-grandense (ESRg), é composto por sienitos, feldspato alcalino sienitos, feldspato alcalino quartzo sienitos e quartzo sienitos, tornando-se mais diferenciado da borda para o centro.

A gênese do MSP ainda não é clara, alguns autores defendem uma formação por diferenciação *in situ*, enquanto outros um processo multi-intrusivo. Aliado a isto há também a dualidade sobre o posicionamento desta intrusão. Não há dados suficientes para afirmar a posição do possível conduto de alimentação. Sem esta informação torna-se mais difícil interpretar a qual evento tectônico está relacionada a ascensão do magma.

1.3. Premissas e Hipóteses

A revisão bibliográfica mostra que ainda faltam dados para um melhor entendimento da gênese e posicionamento do MSP. Quanto à gênese do corpo, os dados ainda não são definitivos e a hipótese levantada é de que o Maciço Sienítico Piquiri formou-se por múltiplos pulsos, onde os pulsos posteriores intrudiram e retrabalharam os pulsos anteriores.

A premissa desta hipótese baseia-se nos dados de ASM associados a dados de campo, obtidos por Sbaraini (2012). Os dados apresentados mostram que a fácies de borda apresenta uma trama planar com alto ângulo de mergulho em direção ao centro do corpo, indicando um formato cônico. As outras fácies do MSP apresentam uma variação no mergulho da foliação, tornando-se mais horizontalizada, indicando uma diferença no processo de formação da intrusão.

Quanto ao posicionamento do corpo, segundo Rivera (2019), há duas hipóteses para o processo de ascensão do magma. A primeira hipótese explicaria o posicionamento através da Zona de Cisalhamento Passo das Canas (ZCPC), relacionado a geração de bacias do tipo *pull a part*, por eventos transtrativos. Visto que a direção do mergulho das foliações segue para o centro-leste do corpo, apontando para a mesma orientação da zona. A segunda hipótese expõe

que a ascensão e posicionamento do MSP ocorreu através da falha Passo do Marinheiro, relacionado com a reativação e tamponamento da falha. Visto que o corpo é limitado pela falha, não apresentando continuidade a oeste dela.

O desenvolvimento e a construção de um modelo geológico tridimensional tornará possível a observação da evolução no posicionamento do Maciço Sienítico Piquiri. A partir disso, será possível identificar uma região original do conduto de alimentação desta intrusão, e a qual evento está relacionada.

1.4. Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é relacionar a morfologia do Maciço Sienítico Piquiri com sua gênese e posicionamento. Tal objetivo geral foi alcançado com o cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- (1) caracterizar as anomalias gravimétricas e magnéticas;
- (2) modelar perfis bidimensionais a partir das anomalias geofísicas;
- (3) modelar a geologia, em subsuperfície, a partir dos perfis bidimensionais.

1.5. Justificativa

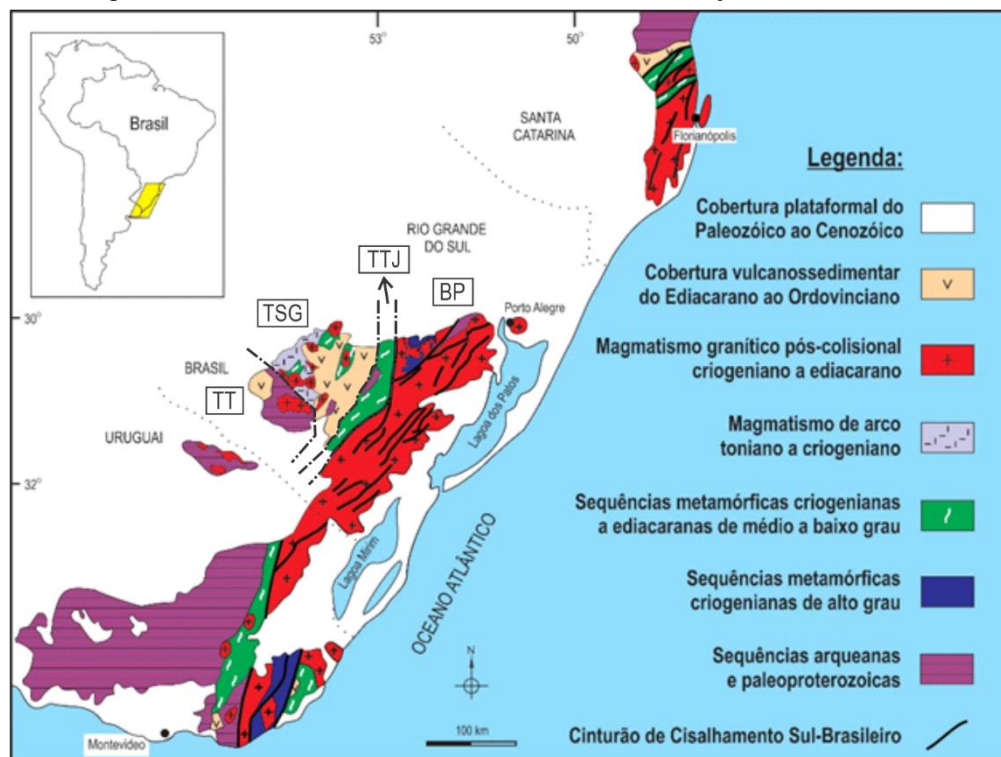
O presente trabalho se propõe a fornecer mais dados geofísicos, e um modelo geológico tridimensional de todo o Maciço Sienítico Piquiri. Entende-se que apenas com estudos de maior detalhe será possível avançar no entendimento da gênese e posicionamento do MSP, e também de todo o Bloco Encruzilhada. Assim sendo, o presente trabalho tem como justificativa contribuir para o conhecimento acadêmico quanto à evolução do Bloco Encruzilhada por meio de um melhor entendimento da gênese e posicionamento de uma de suas unidades, o Maciço Sienítico Piquiri.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Contexto Geológico Regional

Com uma área de aproximadamente 65.000 km² (Chemale Jr, 2000), o Escudo Sul-rio-grandense (Figura 2) está localizado na parte sul do Escudo Brasileiro. Sua estratigrafia e divisão geotectônica tem sido muito estudada ao longo das últimas décadas. Sua primeira coluna estratigráfica foi proposta por Carvalho (1932), a partir deste, diversos trabalhos foram atualizando a estratigrafia e divisão geotectônica ao longo das décadas seguintes. Uma das mais recentes divisões foi proposta por Hartmann *et al.*, (2007a), com base em dados geocronológicos de U-Pb em zircões e dados isotópicos de Sm-Nd foram definidas quatro unidades geotectônicas principais do ESRg: Terreno Taquarembó, Terreno São Gabriel, Terreno Tijuca e o Batólito Pelotas.

Figura 2 – Mapa geológico simplificado dos Escudos Uruguiaio, Sul-rio-grandense e Catarinense. Onde TT = Terreno Taquarembó, TSG = Terreno São Gabriel, TTJ = Terreno Tijuca e BT = Batólito Pelotas.



Fonte: Extraído de Bitencourt (2011).

O Batólito Pelotas localiza-se na parte leste do Escudo Sul-rio-grandense, tem área de aproximadamente 40.000 km², se estende a norte em Santa Catarina, e a sul no Uruguai (Shukowsky *et al.*, 1991, Hallinan *et al.*, 1993, Bitencourt & Nardi 2000). O batólito é composto por vários corpos intrusivos, formados entre 630 Ma e 570 Ma. É resultado da soma de diversos

processos tectônicos que ocorreram no Ciclo Brasileiro, processos estes que envolvem subducção de crosta oceânica em margem continental espessa (Figueiredo *et al.*, 1990, Philipp 1990, Fragoso Cesar 1991, Philipp *et al.*, 1993, Philipp 1998, Chemale Jr. 2000), colisão continental (Hartmann *et al.*, 2000, Philipp & Machado 2001) e reativações, tardi- a pós-colisionais, de fontes mantélicas (Bitencourt & Nardi 1993, 2000). No batólito foram caracterizadas seis suítes graníticas (Pinheiro Machado, Erval, Viamão, Encruzilhada do Sul, Cordilheira e Dom Feliciano) e uma sienítica, o Maciço Sienítico Piquiri.

2.2. Maciço Sienítico Piquiri

O Maciço Sienítico Piquiri (Figura 3) apresenta uma área de aproximadamente 140 km², com forma praticamente circular. Na borda sudoeste e norte intrude o Complexo Metamórfico Porongos. Na borda leste é intrusivo nos gnaisses e sienitos sintectônicos do Complexo Várzea do Capivarita (CVC). Intrude uma pequena área do Granito Butiá (GB) na borda nordeste. Na borda sul e sudeste é intrudido pelo Granito Encruzilhada (GE). A borda oeste do MSP é afetada por um conjunto de falhas de orientação NE-SW e NW-SE, que o separa dos Membros Mangueirão e Vargas, da Formação Arroio dos Nobres.

Foi classificado pela primeira vez em 1966 por Tessari & Picada, que o nomearam como Sienito Gnáissico Piquiri, seguindo a descrição feita por Picada em 1963, que as interpretou como resultado de metamorfismo regional em rochas do Pré-Cambriano. O termo Sienito Gnáissico Piquiri só deixou de ser usado em 1985, quando denominado por Jost *et al.*, 1985 de Sienito Piquiri.

Jost *et al.*, (1985) descreveram pela primeira vez o MSP com litotipos distintos. Estes autores definiram os litotipos como três zonas: borda, intermediária e central. O que indica um processo genético de diferenciação *in situ*.

Viera Jr. *et al.*, (1989) fez a última alteração na nomenclatura do corpo, chamando-o de Maciço Sienítico Piquiri, devido a diversidade composicional de suas litologias. Os litotipos do maciço só foram mapeados detalhadamente por UFRGS (2008), onde foram descritas quatro fácies: quartzo sienito, sienito médio a grosso, sienito fino a médio e sienogranito.

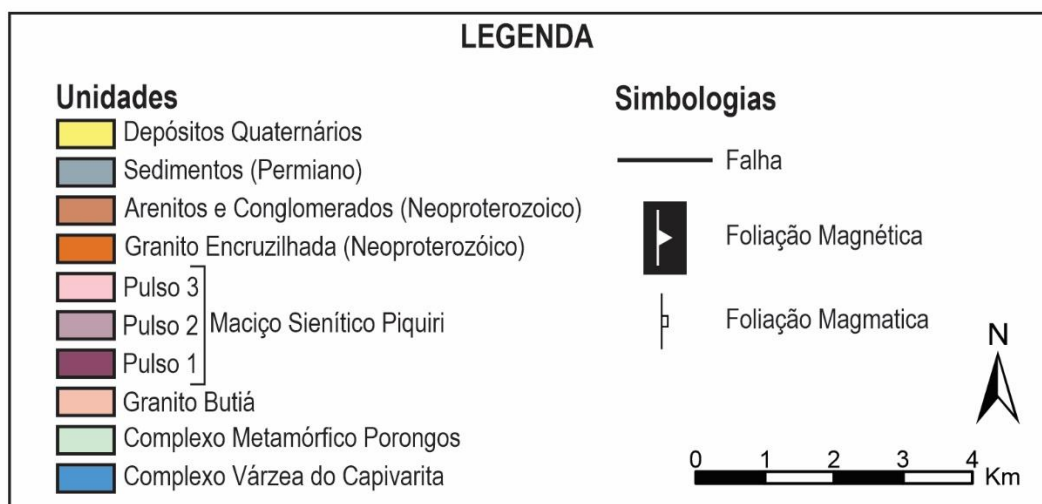
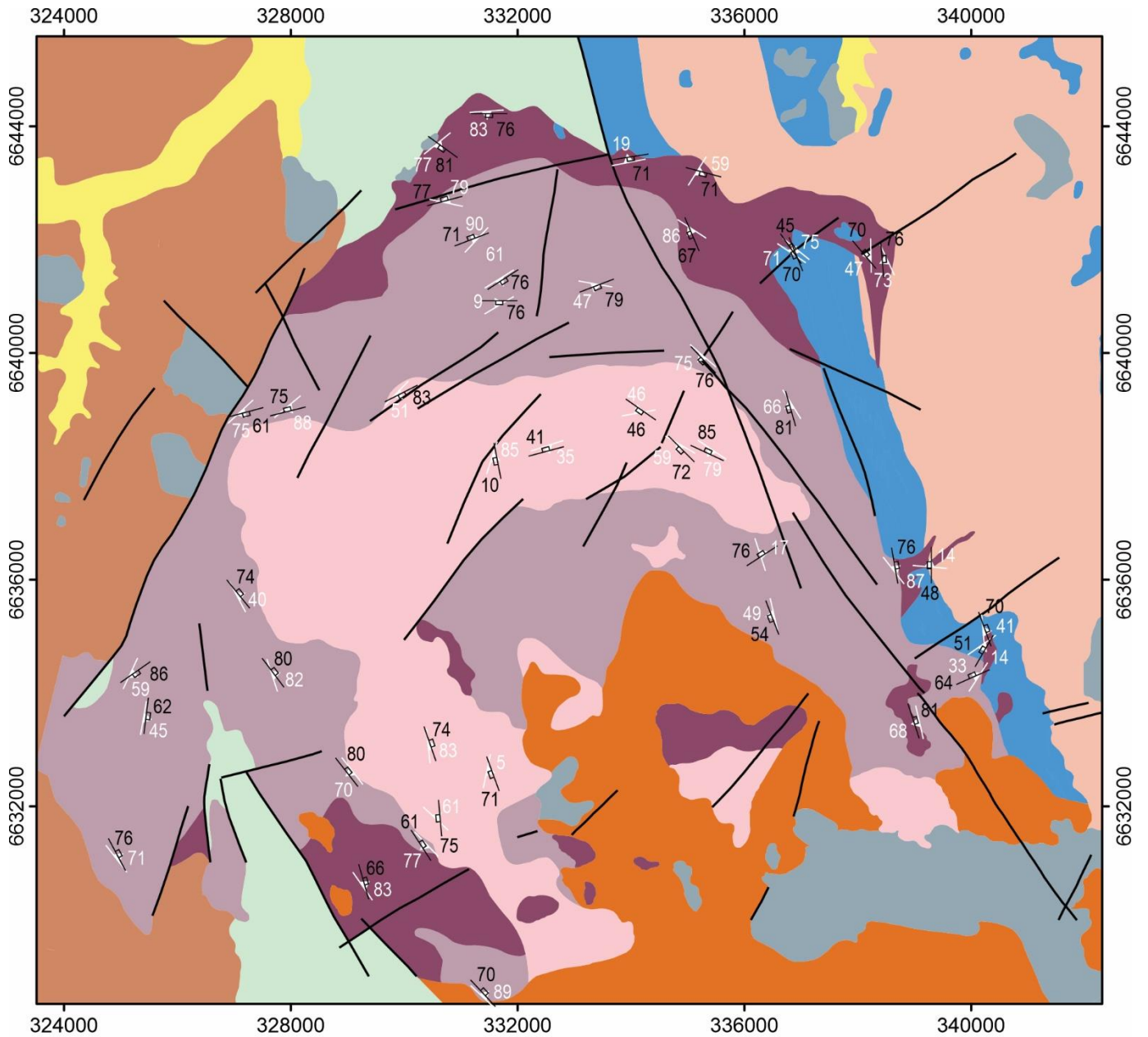
A última separação dos litotipos foi proposta por Rivera (2019), que descreveu três pulsos relacionados temporalmente, sendo o mais antigo localizado na borda do maciço, e o mais novo no centro: i) Pulso 1 – composto, predominantemente, por sienitos que variam para quartzo

sienitos e feldspato alcalino quartzo sienitos, com idades de U-Pb em zircão de $609,3 \pm 1,5$ Ma; ii) Pulso 2 – composto por feldspato alcalino sienitos e feldspato alcalino quartzo sienitos, intrusivos no pulso 1, possuindo xenólitos do mesmo. Apresenta idades de U-Pb em zircão de $603,4 \pm 3,9$ Ma; iii) Pulso 3 – composto por quartzo sienitos, intrusivos no pulso 2, contém xenólitos dos pulsos 1 e 2. Apresenta idades, por U-Pb em zircões, de $588,8 \pm 3,1$ a $583,2 \pm 1,8$ Ma.

As foliações magmática e magnética do MSP são concordantes, seguindo a orientação das bordas do corpo, com sentido de mergulho para o centro do corpo, o que resulta em uma trama concêntrica. O pulso 1 apresenta uma lineação com caimento de alto ângulo, enquanto o pulso 2 exibe caimento moderado, ambas com orientação seguindo as bordas em contato com a encaixante. O pulso 3 apresenta uma lineação com caimento sub-horizontal e orientação contornando a morfologia interna. O sentido de mergulho das foliações também segue a orientação das bordas do corpo (Sbaraini, 2012).

Sbaraini (2012), com base nas mudanças de orientação da trama magnética nos diferentes litotipos, e Rivera (2019), com base nas relações petrográficas e geoquímicas entre os litotipos, sustentam a hipótese de que o Maciço Sienítico Piquiri foi produzido por múltiplos pulsos. Contradizendo Jost *et al.*, (1985) que interpretaram o MSP como uma intrusão única apresentando uma zonação resultante do resfriamento rápido nas bordas e lento no centro, característicos de diferenciação *in situ*.

Figura 3 - Mapa geológico do Maciço Sienítico Piquiri.



Fonte: Compilado de Sbaraini (2012) e Rivera (2019).

3. METODOLOGIA

Neste trabalho a metodologia foi dividida em três etapas de ação, etapa pré-campo, de campo e pós-campo. Na etapa pré-campo foi feita uma revisão bibliográfica dos métodos a serem utilizados e dos dados já existentes na região, além do planejamento do campo. Na etapa de campo foram adquiridos dados geofísicos terrestres (gravimetria e magnetometria). Na etapa pós-campo foi realizado o processamento dos dados geofísicos em laboratório e a modelagem geofísica e geológica.

3.1. Etapa Pré-campo

Durante a etapa pré-campo foi realizado o planejamento do campo. Foram confeccionados mapas das estradas e regiões onde seriam feitos os perfis de levantamento de dados com imagens de satélite disponíveis como mapa base no ArcGIS®. Este *software* foi a principal ferramenta de geoprocessamento utilizado para confecção dos mapas apresentados neste trabalho. Devido à extensão da área do corpo estudado e a quantidade de dias de campo, optou-se por realizar os perfis de levantamento seguindo as estradas que cobrem o corpo. Assim, foram feitas mais leituras e uma área maior foi coberta. A seguir será apresentada a revisão bibliográfica dos métodos empregados.

Telford *et al.* (1990) define a Geofísica Aplicada como “medidas tomadas e interpretadas de propriedades físicas da Terra para determinar as condições de subsuperfície [...]”. Os métodos magnéticos e gravimétricos se encaixam neste contexto, pois utilizam campos naturais, portanto, são chamados métodos passivos. Para a aplicação destes métodos a subsuperfície não precisa ser excitada por uma fonte artificial para que possamos obter uma medida do campo físico, tornando a aquisição de dados muito mais simples e direta. Este é um dos motivos que levam os métodos magnéticos e gravimétricos serem muito utilizados para estudos de corpos rochosos em subsuperfície.

3.1.1. Método Gravimétrico

O método gravimétrico utilizado para investigação do interior da Terra tem como base a medição e interpretação das variações do campo gravitacional terrestre, causadas pelas diferenças de densidade entre as rochas em subsuperfície. Essa variação é chamada de anomalia gravimétrica (Δg).

O sinal da anomalia de gravidade é dado pelo sinal do contraste de densidade entre dois corpos ou meios geológicos. Isso significa que se a densidade de um corpo intrusivo for maior que a de sua encaixante a anomalia é positiva, mas, se a densidade for menor, a anomalia terá sinal negativo (Kearey *et al.*, 2009).

O campo gravitacional terrestre não é constante em todas as partes do planeta, ele varia no espaço. Portanto, para obter a anomalia causada por um corpo geológico é necessária a correção da medida de aceleração da gravidade obtida em um ponto específico sobre a superfície da Terra. São corrigidas as variações causadas pela latitude, pelas marés terrestres e lunares, pela deriva do próprio instrumento e pela topografia.

A interpretação da anomalia gravimétrica baseia-se em estipular as características físicas, de profundidade, extensão lateral e contraste de densidade, do corpo que causa a anomalia (Kearey *et al.*, 2009). Para tal é preciso ter um conhecimento prévio da geologia local. Em seguida são feitos modelos teóricos onde parâmetros físicos como profundidade, extensão e contraste de densidade são fixados. Com isso, é feito o cálculo da anomalia teórica, depois comparada com a anomalia medida em campo, até obter um ajuste entre os dois valores. Esse trabalho é chamado de modelagem da anomalia gravimétrica.

3.1.2. Método Magnético

Quando um determinado material é colocado sob a presença de um campo magnético ele adquire uma magnetização na direção deste campo. Se, quando afastada da área de influência do campo causador, a magnetização se anular, chamamos de magnetização induzida. Este fenômeno pode ser melhor compreendido quando pensamos que o determinado material é composto por pequenos dipolos que se orientam na mesma direção das linhas de força do campo induzido, quando isso ocorre houve uma polarização magnética. O resultado dessa polarização é o material se comportar como um dipolo (Kearey *et al.*, 2009). Nas rochas os dipolos são os minerais com características magnéticas. A maioria dos minerais formadores de rochas não apresentam propriedades magnéticas. No entanto, existem rochas que contêm minerais magnéticos suficientes para gerar anomalias magnéticas.

O método magnético é baseado na medida e interpretação destas anomalias magnéticas causadas pelas rochas. O objetivo em estudar e compreender essas anomalias é adquirir informações sobre a geologia em superfície e subsuperfície.

A unidade de medida do campo magnético terrestre (B) é expressa em Gauss (G) no sistema csg, e é expressa por 10^{-4} Tesla (T) no sistema internacional (S.I.). Para a quantificação das anomalias causadas por corpos rochosos são utilizadas as sub-unidades nanotesla (nT) onde $1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$, e gama (γ) que vale 10^{-5} G .

Outro tipo de magnetização que as rochas podem apresentar é a adquirida durante o resfriamento dos seus minerais magnéticos no decorrer da cristalização. Esta magnetização só ocorre se a cristalização for abaixo da temperatura de Curie. Essa magnetização é chamada de magnetização remanente, pois não se anula na ausência do campo magnético que a gerou.

Para obter apenas a componente do campo magnético gerada pelos corpos rochosos magnetizados em subsuperfícies, é necessário aplicar correções nas leituras obtidas em campo. As correções tem como objetivo eliminar os efeitos das variações temporais seculares e diurnas do campo magnético terrestre.

3.2. Etapa de Campo

Durante a etapa de campo as leituras foram feitas em perfis irregulares seguindo as estradas. A escala do levantamento foi de 750 metros e foram realizadas 78 estações de leituras (Figura 4).

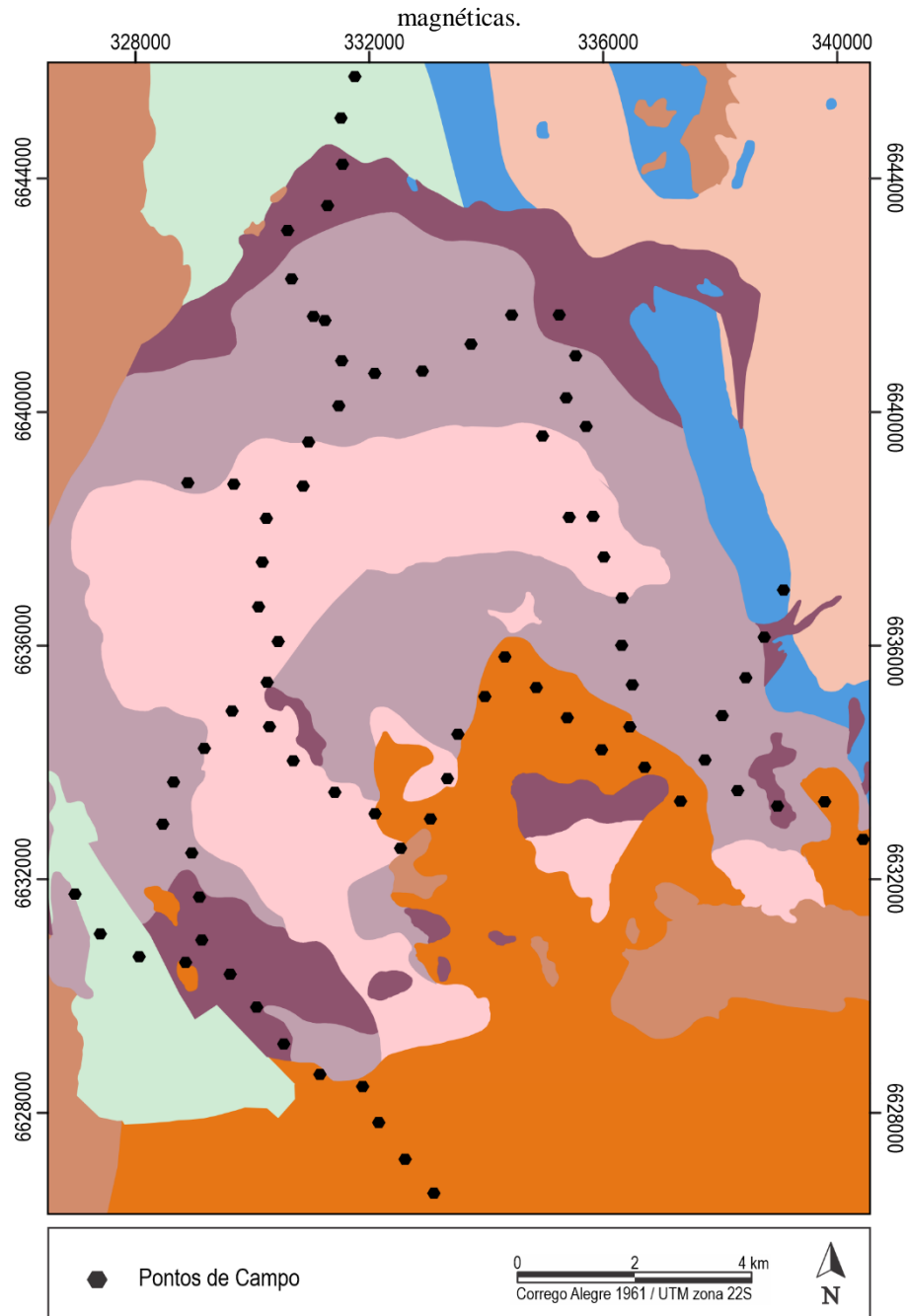
Para aquisição de coordenadas e altitude, foi utilizado um GPS Geodésico modelo *Hiper Lite*, da marca *TopCon*, pertencente ao Departamento de Geodésia do IGEO-UFRGS. A precisão deste equipamento é de 3 mm no eixo horizontal e 5 mm no eixo vertical. Esse equipamento foi configurado para o *datum* Córrego Alegre 1961 e projeção UTM.

As medidas de gravidade foram obtidas com um gravímetro modelo CG-3 da marca *Scintrex*, que pertence ao Departamento de Geodésia do IGEO-UFRGS. A resolução deste equipamento é de 0,005 miligal (mGal) ou 0,05 unidades gravimétricas (gu). Para correções posteriores foram realizadas medidas, no início e no fim de cada dia de campo, sobre o marco topográfico RN 1795R, localizado na margem direita da Rodovia BR-290, em um canteiro em frente a um posto de gasolina, Posto Muller (PETROBRAS). Em campo foi obtida uma medida em cada ponto, sendo que cada medida é resultado da média de 60 leituras realizadas em sequência.

Na obtenção de medidas magnéticas foram utilizados dois magnetômetros de precessão de prótons modelo GST19, da marca *GEM System Inc Canadá*, cedidos pela CPRM. A

resolução deste equipamento é de 0,01 nanotesla (nT). Para as posteriores correções das medidas foi deixado um magnetômetro base, no terreno atrás da Escola Municipal de Ensino Fundamental Pio XII, configurado para realizar leituras com intervalo de cinco minutos. O outro magnetômetro foi utilizado de maneira itinerante, onde foram realizadas três leituras em cada ponto.

Figura 4 – Mapa de localização dos pontos onde foram realizadas estações de leituras gravimétricas e magnéticas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3. Etapa Pós-campo

3.3.1. Processamento dos dados gravimétricos

As correções dos dados gravimétricos foram realizadas através da extensão *Gravity and Terrain Correction*, dentro da plataforma *Oasis Montaj*, do software *GeoSoft*.

As correções aplicadas foram:

(i) Altitude Elipsoidal e Ortométrica: a altura de interesse para a gravimetria é a ortométrica, que representa a altura da medida em relação ao nível médio do mar. Para obter esse valor a correção é feita utilizando a altitude elipsoidal.

(ii) Correção de Latitude: como a Terra não tem uma forma esférica, a aceleração centrípeta varia do equador para o polo, portanto, deve-se aplicar esta correção.

(iii) Correção de Maré: assim como no mar, a força gravitacional que a Lua exerce sobre a Terra provoca as chamadas marés terrestres. Em consequência disto ocorre uma variação na elevação do ponto de amostragem, que resulta em uma perturbação no valor do campo gravitacional que deve ser corrigida da aceleração da gravidade medida no campo.

(iv) Deriva Instrumental (Drift): durante o trabalho de campo a condição elástica da mola do gravímetro varia. Para corrigir essa variação, em todos os dias de campo, o perfil de levantamento começa e termina na mesma estação-base.

(vi) Correção Bouguer (CB): corrige a influência das rochas entre a estação e o datum.

Após a aplicação das correções foi realizada a interpolação dos dados, pelo método da Mínima Curvatura. O produto final do processamento é o mapa de Anomalia Bouguer para a área de estudo.

3.3.2. Processamento dos dados magnéticos

A correção dos dados magnéticos foi realizada através da extensão *MagMap*, dentro da plataforma *Oasis Montaj*, do software *GeoSoft*.

As correções feitas nos dados magnéticos foram:

(i) Remoção da variação magnética diurna: esta correção é necessária pois durante o dia a radiação eletromagnética emitida pelo Sol altera o campo geomagnético, alterando de forma anômala os dados medidos em campo.

(ii) Remoção do International Geomagnetic Reference Field (IGRF): o campo magnético terrestre está em constante variação, os polos magnéticos apresentam uma trajetória irregular por longos períodos de tempo. O IGRF determina o valor teórico do campo magnético sem perturbações para qualquer ponto na superfície da Terra (Kearey et al., 2009). É utilizado para remover as variações atribuídas ao campo teórico dos dados magnéticos coletados.

Após a aplicação das correções foi realizada a interpolação dos dados, pelo método da Mínima Curvatura. O produto final do processamento é o mapa de Campo Magnético Total reduzido do IGRF. Sobre o qual foram aplicados filtros com o objetivo de realçar feições e corpos causadores das anomalias. Os filtros aplicados são descritos abaixo:

(i) Filtro de Redução ao Polo Magnético (RTP): este filtro reposiciona os dados para sobre o polo magnético, transformando assim anomalias dipolares em anomalias monopolares. Com isso seus valores extremos convergem para sobre o corpo gerador.

(ii) Amplitude do Sinal Analítico (ASA): este filtro consiste no ajuste do gradiente horizontal e vertical da anomalia. Com o filtro aplicado os valores extremos de amplitude de sinal convergem para as bordas ou sobre o corpo gerador. Os melhores resultados são obtidos para corpos rasos, com magnetização remanescente expressiva, localizados em uma latitude magnética baixa (Nabighian, 1974).

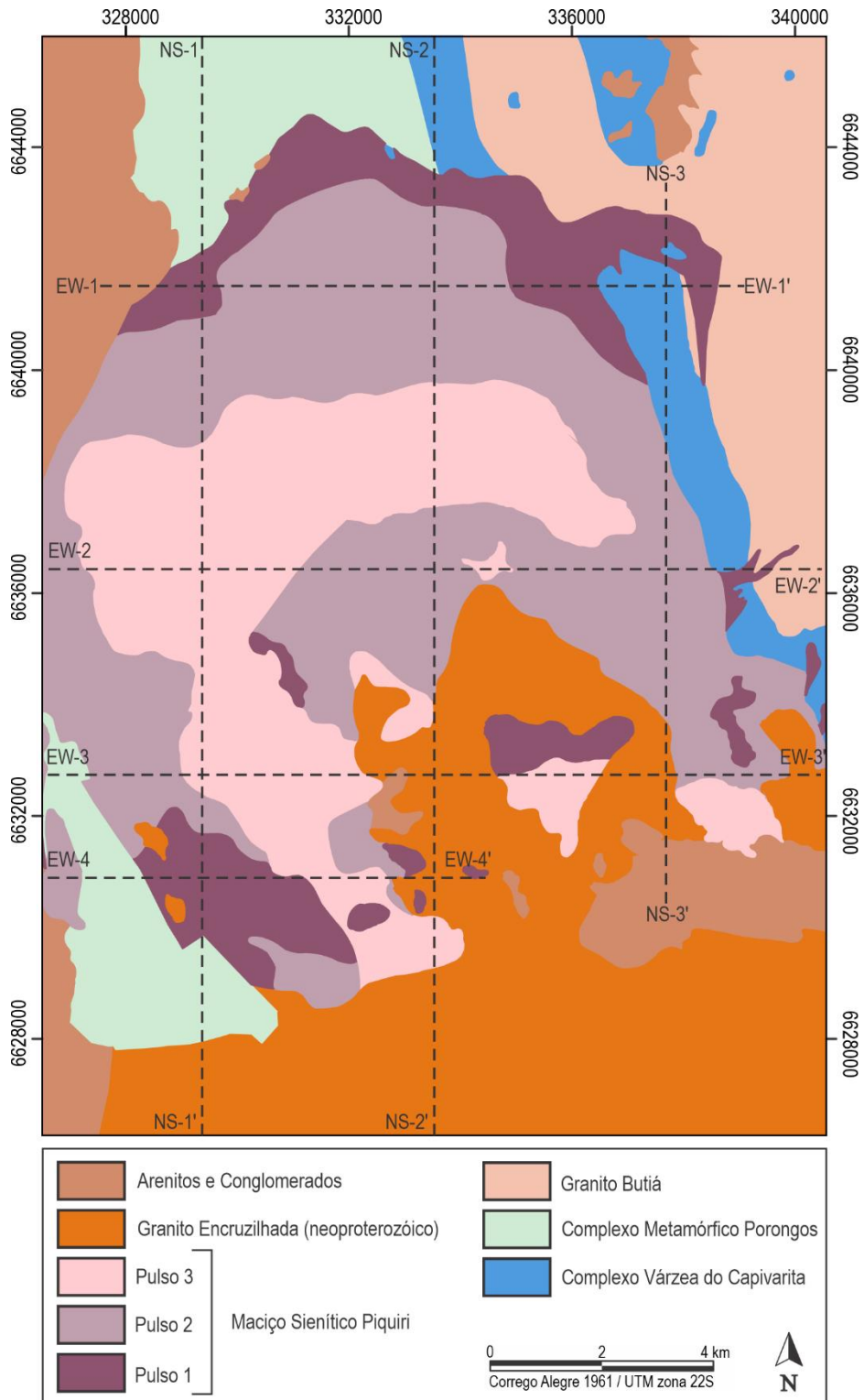
3.3.3. Modelagem Geofísica

Para a modelagem de corpos em subsuperfícies a partir de dados geofísicos, pode ser empregado dois métodos: do problema direto e do problema inverso. A se destacar que independente do método utilizado, a modelagem geofísica é caracterizada pelo problema da não unicidade, onde uma anomalia pode ser causada por corpos com diferentes propriedades físicas e geométricas (Castro, 2005, Damaceno *et al.*, 2017).

A fim de modelar a geologia em profundidade, foram selecionados sete perfis, sendo três de direção norte-sul e quatro de direção leste-oeste. A disposição dos perfis foi definida

buscando cobrir toda a área do corpo, respeitando os limites dos mapas geofísicos. Na Figura 5 é apresentado um mapa geológico com a posição dos sete perfis.

Figura 5 - Mapa geológico da região do levantamento, com as linhas tracejadas indicando os sete perfis selecionados para modelagem gravimétrica.



Fonte: Modificado de Rivera, 2019.

Para a modelagem dos dados gravimétricos foi utilizado o método do problema direto, onde é elaborado um modelo da distribuição das litologias em subsuperfície, que é ajustado até sua anomalia calculada corresponder com a anomalia observada. Os parâmetros ajustados foram seus limites geométricos de subsuperfície, enquanto que os limites em superfície foram definidos pelos contatos mapeados, onde os valores de densidade foram fixados para cada litologia.

A densidade calculada para cada litologia foi adquirida em amostras de trabalho anteriores cedidas pelos autores. Para o cálculo da densidade foi utilizada a seguinte equação:

$$\rho_a = \frac{m_2 - m_1}{(m_2 - m_1) - (m_3 - m_4)} \quad \dots (1)$$

Onde ρ_a é a densidade calculada, m_1 a massa do picnômetro vazio, m_2 a massa do picnômetro com a amostra, m_3 a massa do picnômetro com a amostra preenchido com água, e m_4 a massa do picnômetro vazio preenchido com água. Foram calculadas as densidades de três amostras de cada litologia, e utilizada a média delas.

Os modelos foram gerados através do módulo *GM-SYS*, dentro da plataforma *Oasis Montaj*, do software *GeoSoft*. A anomalia gravimétrica usada foi extraída do mapa de anomalia Bouguer, conforme perfis apresentados na Figura 5.

Para a modelagem dos dados magnéticos foi utilizado o método do problema inverso, onde o software gera um modelo de distribuição de susceptibilidade magnética. Utilizando a ferramenta *Voxi Earth Modelling*, da plataforma *Oasis Montaj*, do software *Geosoft*, foi feita a inversão, que começa com a importação de um modelo digital de terreno, depois com o mapa de CMT.

3.3.4. Modelagem Geológica

Para a modelagem geológica foi utilizado o software *Leapfrog Geo*. O software gera modelos geológicos a partir de superfícies geocronológicas, que consistem da interpolação dos contatos entre uma litologia e sua encaixante.

O fornecimento de dados para a interpolação das superfícies geocronológicas se deu pela importação e georreferenciamento dos perfis modelados a partir dos dados gravimétricos. Em seguida foram delimitadas as bordas de cada litologia, individualmente, em todos os perfis. Após todas as litologias terem seus limites definidos, foram interpoladas suas respectivas

superfícies geocronológicas, de acordo com o tipo de corpo, se depósito sedimentar, intrusão ou veio. As superfícies então são ordenadas seguindo a estratigrafia, visando manter as relações estratigráficas.

A fase final da modelagem é a geração de um sólido para cada litologia. Estes sólidos são limitados pelas superfícies geocronológicas. O modelo geológico final é a união de todos os sólidos individuais, formando um bloco regular.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos serão apresentados em cinco itens. Nos quatro primeiros serão expostos os resultados dos métodos geofísicos, os quais foram divididos em: gravimetria, modelagem gravimétrica, magnetometria e modelagem magnética. No último item será apresentada a modelagem geológica a partir dos resultados geofísicos.

4.1. Gravimetria

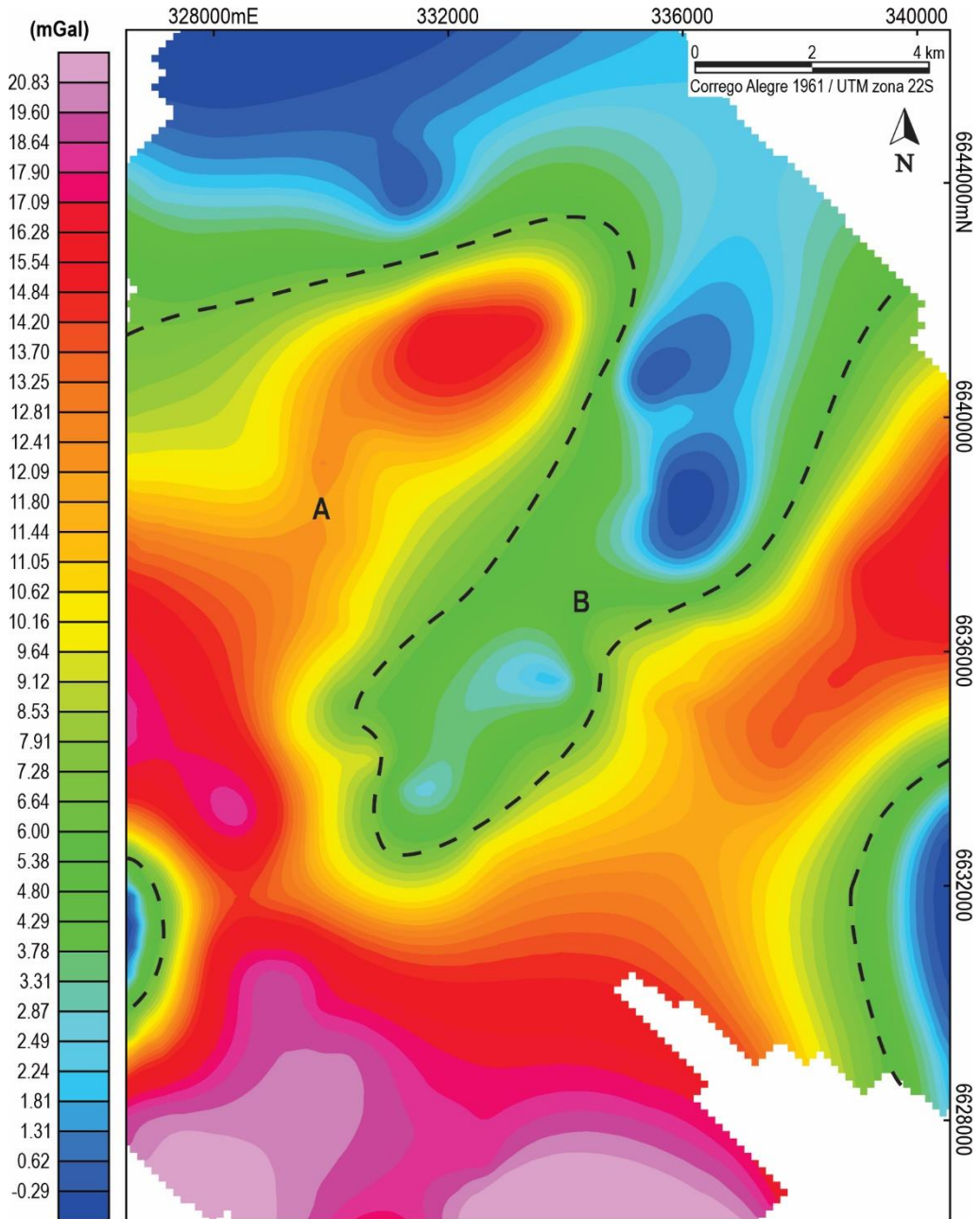
Analisando o mapa de anomalia Bouguer da área apresentado na Figura 6, observa-se uma nítida separação das anomalias gravimétricas. Os valores positivos estão concentrados na porção meridional e os valores negativos na porção setentrional.

O domínio A apresenta caráter anômalo positivo. Observam-se duas anomalias alongadas de direção NE-SW, com valores que variam entre 12 e 17 mGal, e uma anomalia com valores muito positivos, chegando a 26 mGal, a sul.

O domínio B apresenta caráter anômalo negativo. Observa-se uma anomalia alongada de direção NE-SW, do centro para o norte, com valores que variam entre -1,2 e 6 mGal. e uma anomalia com valores muito negativos, chegando a -2,9 mGal.

Nas áreas SE e SW da Figura 6 é possível observar duas anomalias negativas. No entanto, devido às áreas serem pequenas e estarem localizadas nas bordas do mapa, não foram consideradas e interpretadas como novos domínios.

Figura 6 – Mapa gravimétrico de anomalia Bouguer da área de estudo, com a delimitação, pelas linhas tracejadas, dos dois domínios identificados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. Modelagem Gravimétrica

Para a modelagem pelo método do problema direto foram calculadas as densidades das rochas da região. As rochas do Complexo Varzea do Capivarita apresentam densidade de 2,609 g/cm³; as do Complexo Metamórfico Porongos, 2,486 g/cm³; o Granito Butiá (GB), corresponde à rocha mais densa da região, com 2,675 g/cm³. O Maciço Sienítico Piquiri, dividido em seus três pulsos, apresenta uma grande variação de densidade, sendo o pulso 2 o

mais denso com $2,672 \text{ g/cm}^3$; o pulso 3 o menos denso com $2,487 \text{ g/cm}^3$, enquanto o pulso 1 tem densidade de $2,642 \text{ g/cm}^3$. O Granito Encruzilhada é a rocha menos densa da região com $2,432 \text{ g/cm}^3$. Para as rochas sedimentares foi utilizado o mesmo valor de densidade, baseado na literatura, de $2,50 \text{ g/cm}^3$. Todos os valores apresentados estão de acordo com as variações apontadas por Telford (1990).

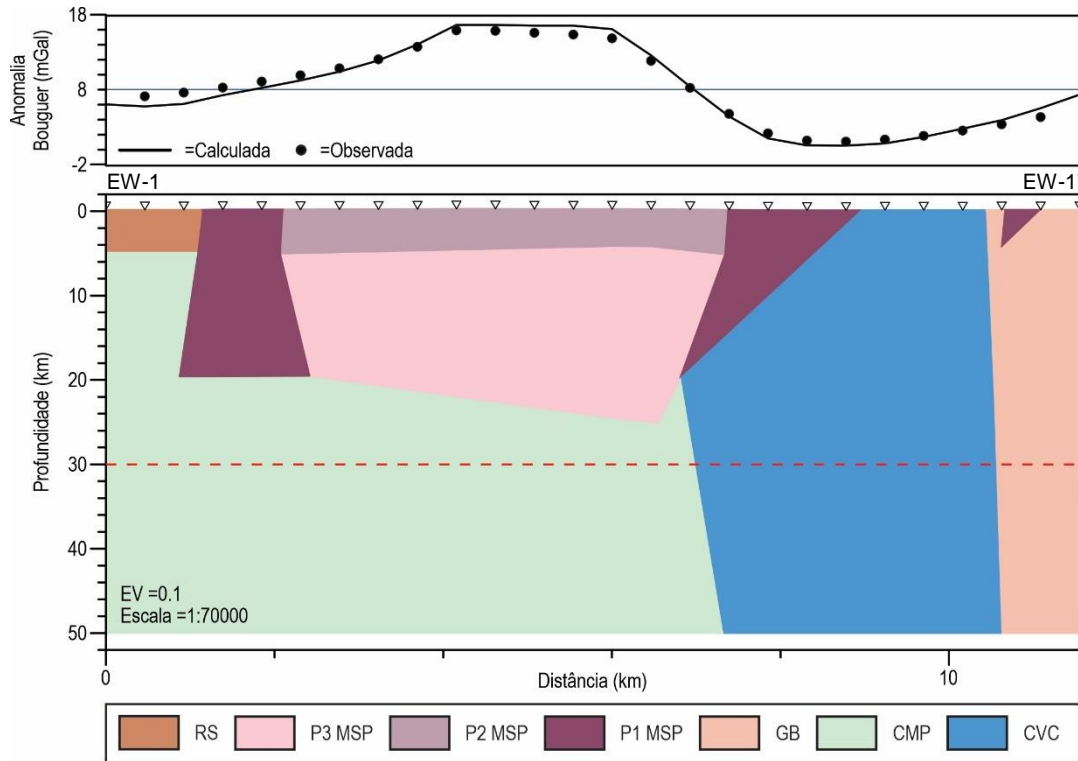
Foram modelados os sete perfis definidos durante o processamento dos dados e apresentados na Figura 5. Durante a modelagem foi observado que a partir dos 30 km de profundidade o modelo se torna mais incerto. Abaixo desta profundidade a variação entre a anomalia observada e calculada torna-se muito baixa, tornando o resultado ambíguo.

O perfil EW-1 (Figura 7), é limitado pelas coordenadas 327525,7 mE e 339074,5 mE, na latitude 6641518 mN. As rochas sedimentares no extremo oeste se apresentam como uma camada de aproximadamente 5 km de profundidade. Os dois corpos do pulso 1 do MSP a leste tem formato muito semelhante, ambos têm uma inclinação para oeste, sendo a principal diferença a profundidade que atingem. O corpo mais a leste chega a aproximadamente 5 km e o corpo central a quase 20 km, já o corpo mais a oeste é mais verticalizado e também chega a 20 km de profundidade. A destacar o grande corpo do pulso 3 imediatamente abaixo do pulso 2 aflorante, que chega até 25 km. As rochas do CVC e do GB fazem um contato subvertical e atingem profundidades de 50 km. Destaque para o grande pacote do CMP em profundidade sob os pulsos 1 e 3, no centro oeste do perfil.

O perfil EW-2 (Figura 8), é limitado pelas coordenadas 326601,8 mE e 340460,4 mE, na latitude 6636437 mN. Os dois corpos do pulso 2 que afloram a oeste demonstram ser lateralmente contínuos em subsuperfície. Apresentam profundidades de, aproximadamente, 15 km no extremo oeste indo até 50 km no centro do perfil, marcando uma inclinação do corpo. O outro corpo aflorante do pulso 2, mais a leste, apresenta uma profundidade mais baixa, chegando a 5 km. O pacote correspondente ao pulso 3 a oeste se mostra como uma camada fina, com profundidade máxima de 5 km. Já o corpo mais a leste chega a 50 km e tem uma continuidade lateral considerável, em comparação com a parte aflorante.

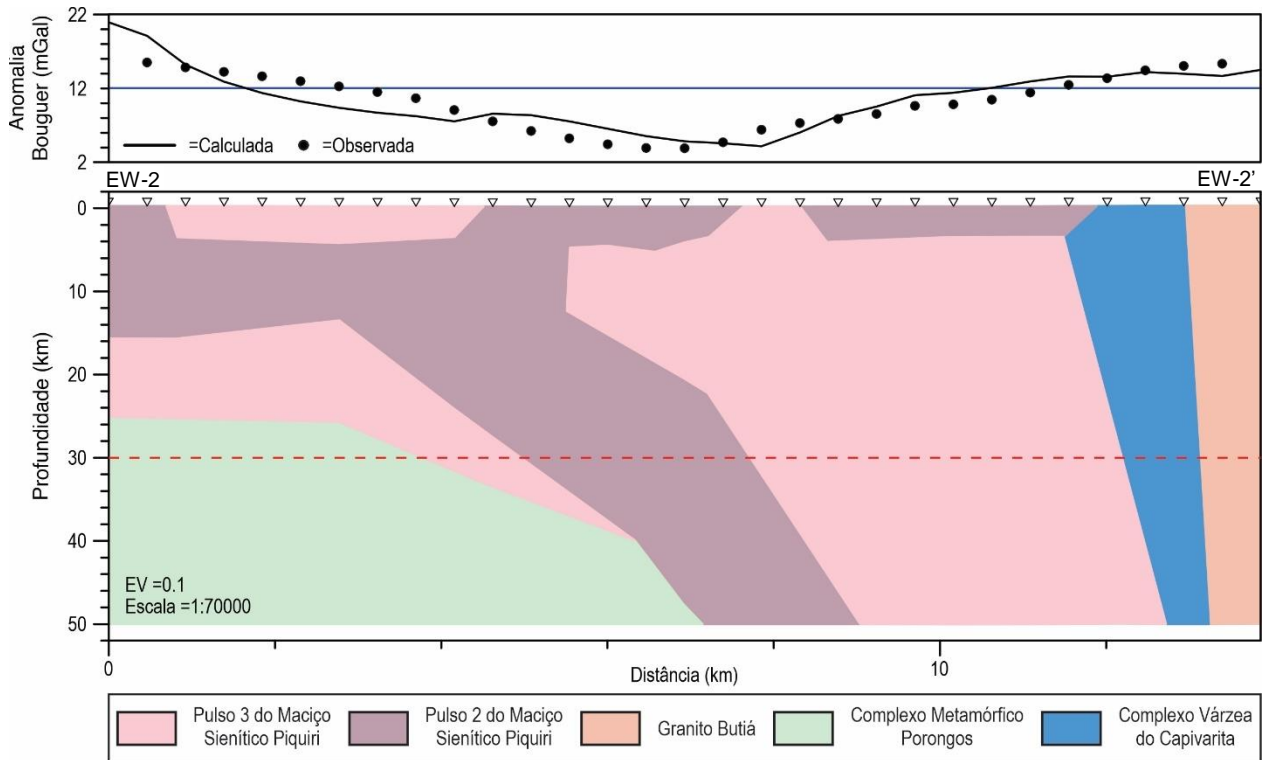
Assim como no perfil EW-1, as rochas do CVC e do GB mantêm um contato subvertical em profundidades de até 50 km. A destacar o pacote de pulso 3 localizado a oeste, sob o pulso 2, seguindo a mesma inclinação, com profundidade de 25 km a oeste e 38 km no centro, e também a presença do CMP abaixo deste pacote do pulso 3.

Figura 7 - Modelo em duas dimensões do perfil EW-1, a linha tracejada vermelha indica a zona de maior incerteza. Onde CVC – Complexo Várzea do Capivarita; CMP – Complexo Metamórfico Porongos; GB – Granito Butiá; P1 MSP – Pulso 1 do Maciço Sienítico Piquiri; P2 MSP – Pulso 2 do Maciço Sienítico Piquiri; P3 MSP – Pulso 3 do Maciço Sienítico Piquiri e RS – Rochas Sedimentares.



Fonte: Elaborado pelo autor.

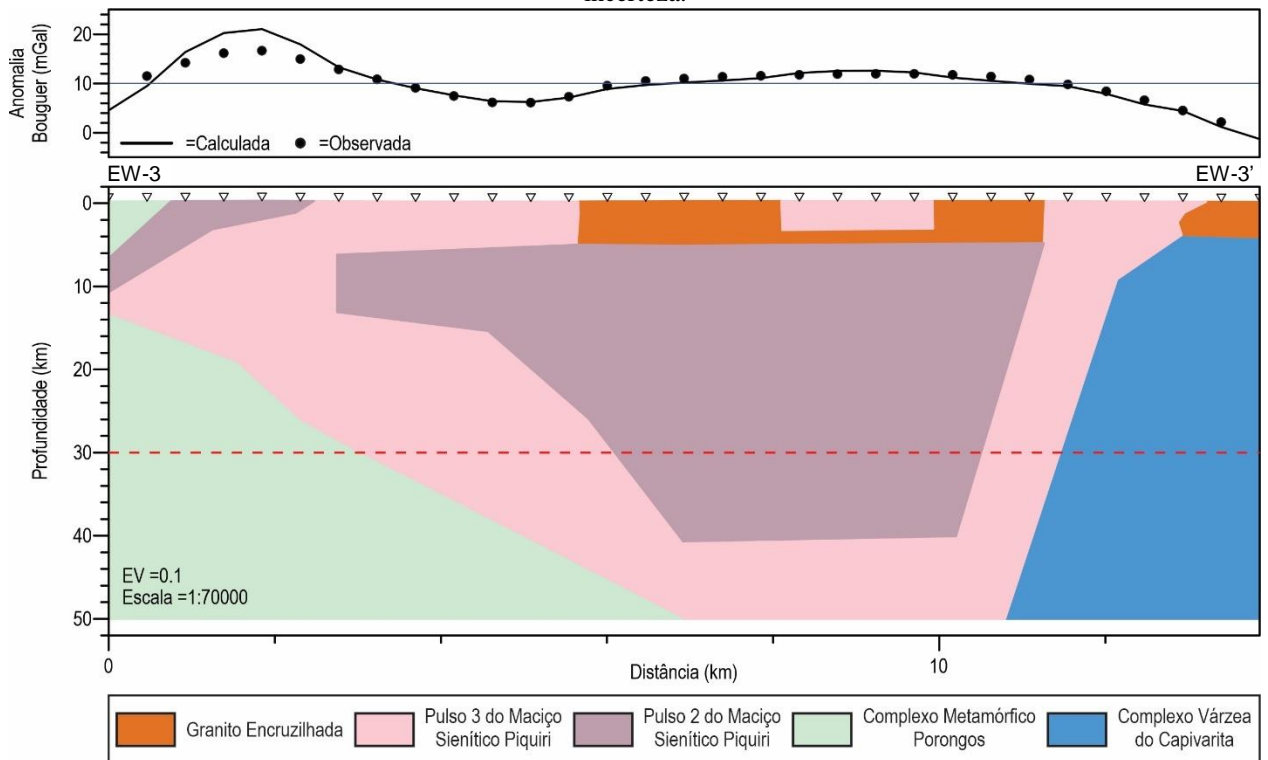
Figura 8 - Modelo em duas dimensões do perfil EW-2, a linha tracejada vermelha indica a zona de maior incerteza.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O perfil EW-3 (Figura 9), limitado pelas coordenadas 326601,8 mE e 340460,4 mE, na latitude 6632741 mN. É o primeiro a interceptar, em superfície, o CMP e o GE. Neste perfil observa-se o CMP aflorante como um pequeno corpo no extremo oeste, mas com uma grande área em profundidade indo de 15 à 50 km. O pulso 2 do MSP também contém uma pequena área em superfície, porém, é mais expressivo em profundidade, sob o GE. O pulso 3, que em superfície é encontrado como três corpos isolados, em profundidade apresenta-se como um corpo único, conectados a mais de 40 km. O corpo central é mais fino, com profundidade de aproximadamente 5 km. O GE é caracterizado por corpos com baixa profundidade, com no máximo 6 km. Destaque para o CVC, que representa uma área considerável abaixo do corpo mais a leste do GE.

Figura 9 - Modelo em duas dimensões do perfil EW-3, a linha tracejada vermelha indica a zona de maior incerteza.

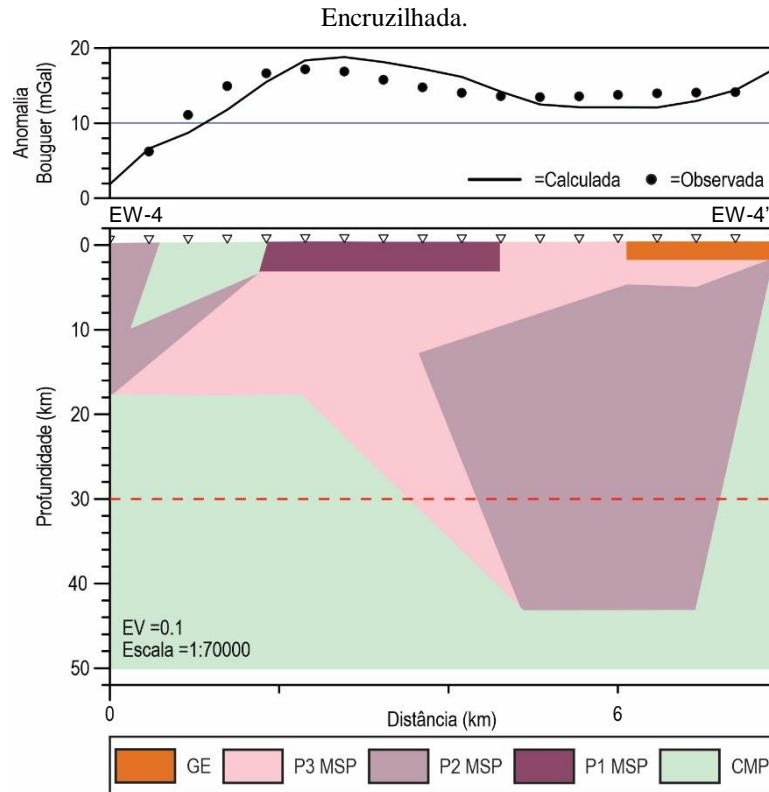


Fonte: Elaborado pelo autor.

O perfil EW-4 (Figura 10), entre as coordenadas 326601,8 mE e 334455 mE, na latitude 6630893 mN. É o perfil mais curto dos quatro de direção leste-oeste devido a limitação do mapa gerado. Em superfície intercepta os três pulsos do MSP. O pulso 2 representa uma área extensa em subsuperfície, no centro-leste do perfil, com profundidade de 45 km. O pulso 3 também representa uma grande área em profundidade, indo de 28 a 45 km. Já o pulso 1 se apresenta

como um pacote fino de aproximadamente 6 km. O CMP, que além do corpo em superfície, está presente em toda a extensão do perfil sob as rochas do MSP.

Figura 10 - Modelo em duas dimensões do perfil EW-4, a linha tracejada vermelha indica a zona de maior incerteza. Onde CMP – Complexo Metamórfico Porongos; P1 MSP – Pulso 1 do Maciço Sienítico Piquiri; P2 MSP – Pulso 2 do Maciço Sienítico Piquiri; P3 MSP – Pulso 3 do Maciço Sienítico Piquiri e GE – Granito



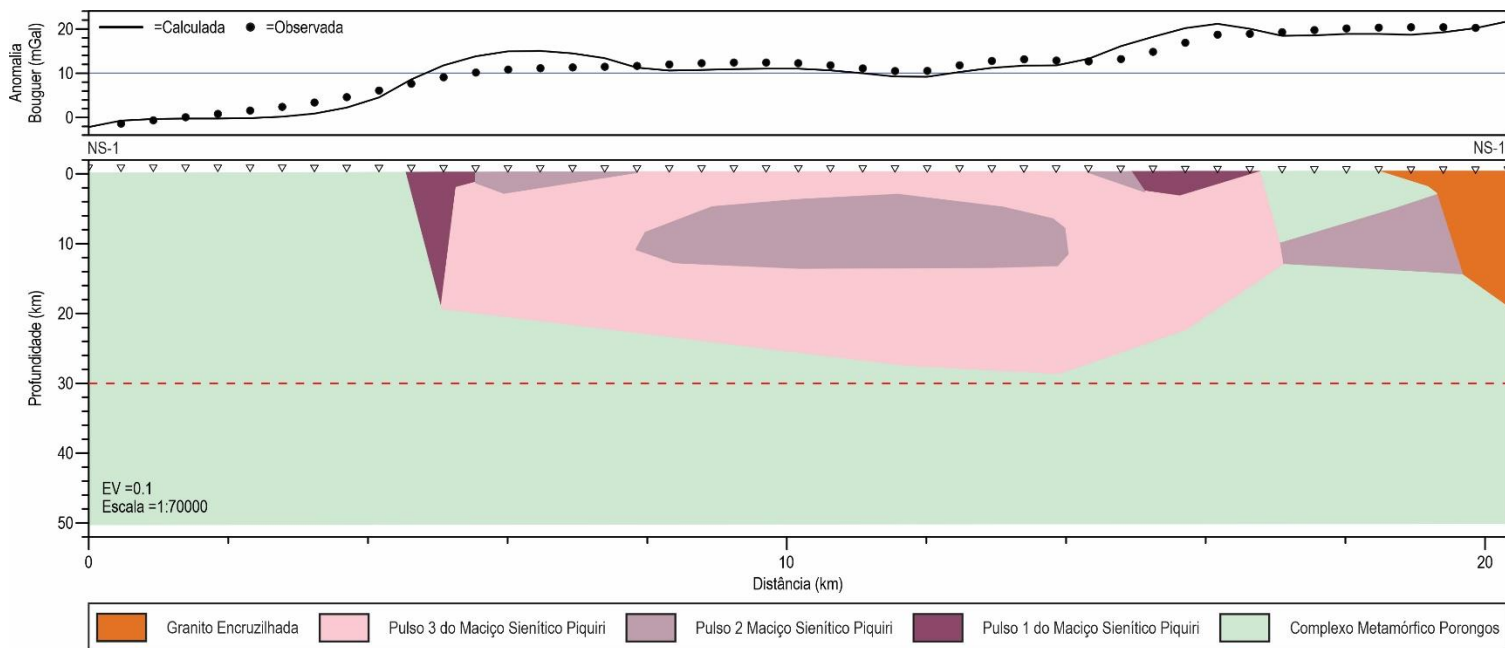
Fonte: Elaborado pelo autor.

O perfil NS-1 (Figura 11), entre as coordenadas 6626274 mN e 6646600 mN, na longitude 329373,5 mE. Em superfície, intercepta os três pulsos do MSP. O pulso 1 representa um corpo de baixa profundidade, 5 km, a sul, e um corpo mais profundo a norte chegando a aproximadamente 20 km de profundidade. O pulso 2 representado por dois corpos em superfície, com baixa profundidade, porém, também é observado em pacotes em subsuperfície, um mais centralizado e outro a sul, com uma expressão maior que os pacotes aflorantes. O pulso 3 apresenta uma continuação lateral com profundidade média de 25 km. O GE, no extremo sul, chega a 18 km de profundidade, com uma certa inclinação para sul. O CMP, em profundidade cobre toda a extensão do perfil, porém o corpo a sul está isolado pelo pulso 2.

O perfil NS-2 (Figura 12), entre as coordenadas 6626274 mN e 6646600 mN, na longitude 333531,1 mE. Em superfície intercepta os três pulsos do MSP. O pulso 1 representa um corpo a norte com profundidade de, aproximadamente, 16 km. O pulso 2 é representado por dois corpos em superfície com baixa profundidade, porém, nota-se dois corpos em subsuperfície,

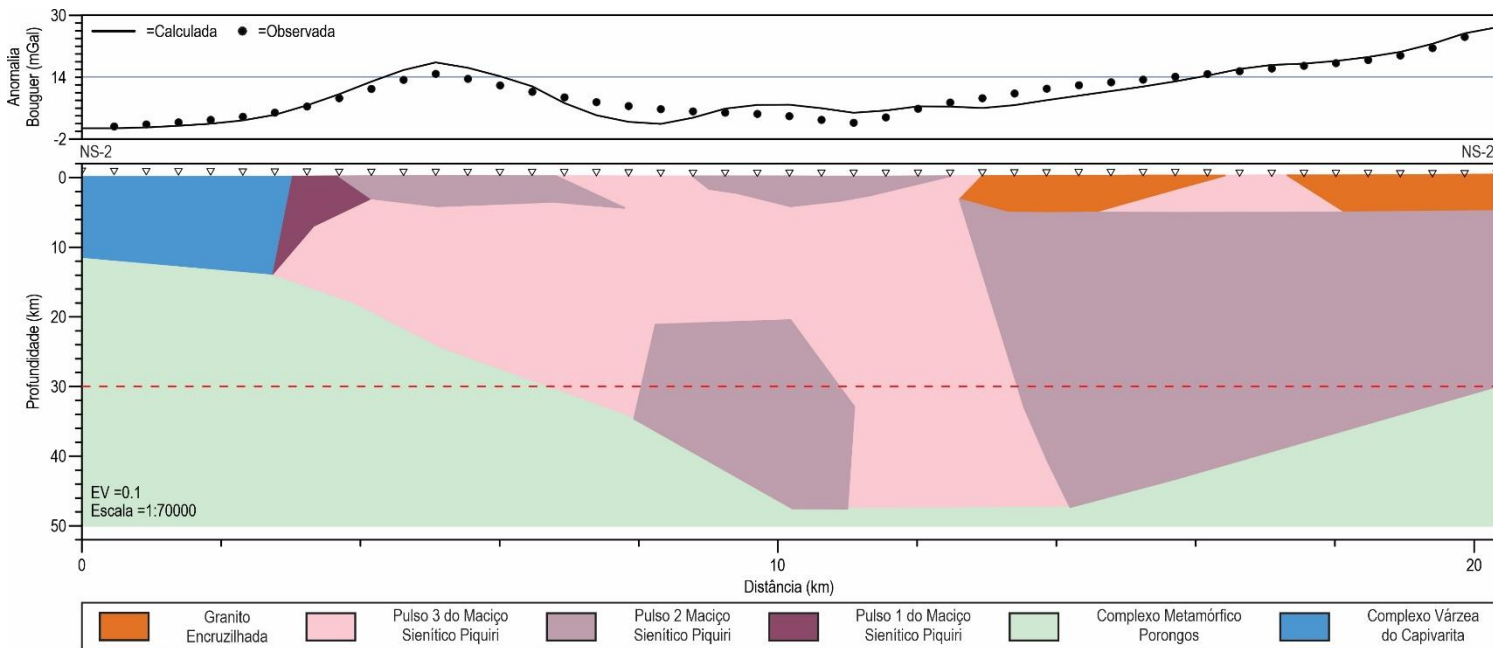
um mais centralizado e outro a sul, com dimensões maiores que os aflorantes. O pulso 3 apresenta três pequenos corpos em superfície, sendo os dois mais a norte em continuação lateral e profundidade chegando a 46 km, já o corpo mais a sul tem baixa profundidade, com apenas 6 km. O GE, no extremo sul, volta a se apresentar com uma profundidade baixa de, no máximo, 6 km. O CMP, em profundidade cobre toda a extensão do perfil, porém não aflora. O CVC aparece pela primeira vez nos perfis de direção norte-sul, no extremo norte, com profundidade média de 12 km.

Figura 11 - Modelo em duas dimensões do perfil NS-1, a linha tracejada vermelha indica a zona de maior incerteza.



Fonte: Elaborado pelo autor.

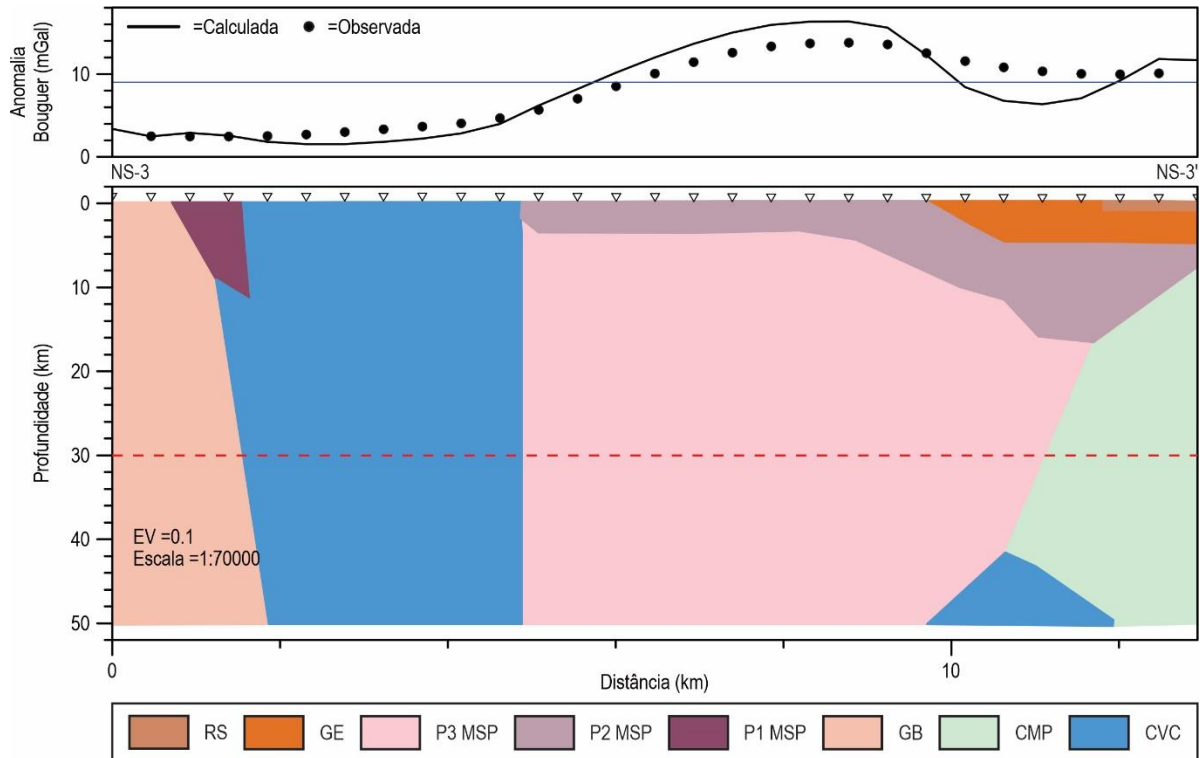
Figura 12 - Modelo em duas dimensões do perfil NS-2, a linha tracejada vermelha indica a zona de maior incerteza.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O perfil NS-3 (Figura 13), é limitado pelas coordenadas 6630431 mN e 6643366 mN, na longitude 337688,7 mE. Em superfície, intercepta os pulsos 1 e 2 do MSP. O pulso 1 com um corpo a norte de profundidade, aproximadamente, de 12 km com uma tendência de inclinação para sul. O pulso 2 aumenta sua profundidade de norte para sul, indo de 4 a 17 km, onde se posiciona sob o GE. O contato entre as rochas do CVC e o GB aparece pela primeira vez nos perfis de direção norte-sul, e mantém-se subvertical. O GE, no extremo sul, volta a se apresentar com uma profundidade baixa de, no máximo, 6 km. As rochas sedimentares voltam a aparecer, exposta como uma camada de menos de 1 km de profundidade, no extremo sul. Nesse perfil destacam-se a presença de um corpo expressivo do pulso 3, imediatamente abaixo do pulso 2, assim como as rochas do CMP no extremo sul e do CVC.

Figura 13 - Modelo em duas dimensões do perfil NS-3, a linha tracejada vermelha indica a zona de maior incerteza. Onde CVC – Complexo Várzea do Capivarita; CMP – Complexo Metamórfico Porongos; GB – Granito Butiá; P1 MSP – Pulso 1 do Maciço Sienítico Piquiri; P2 MSP – Pulso 2 do Maciço Sienítico Piquiri; P3 MSP – Pulso 3 do Maciço Sienítico Piquiri e GE – Granito Encruzilhada..



4.3. Magnetometria

Para a área de estudo foi elaborado, a partir dos dados de campo, o mapa do campo magnético total reduzido do IGRF. Sobre esse mapa foram aplicados os filtros de Redução ao Polo Magnético (RTP) e de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) para gerar, respectivamente, os mapas de redução ao polo magnético e amplitude do sinal analítico.

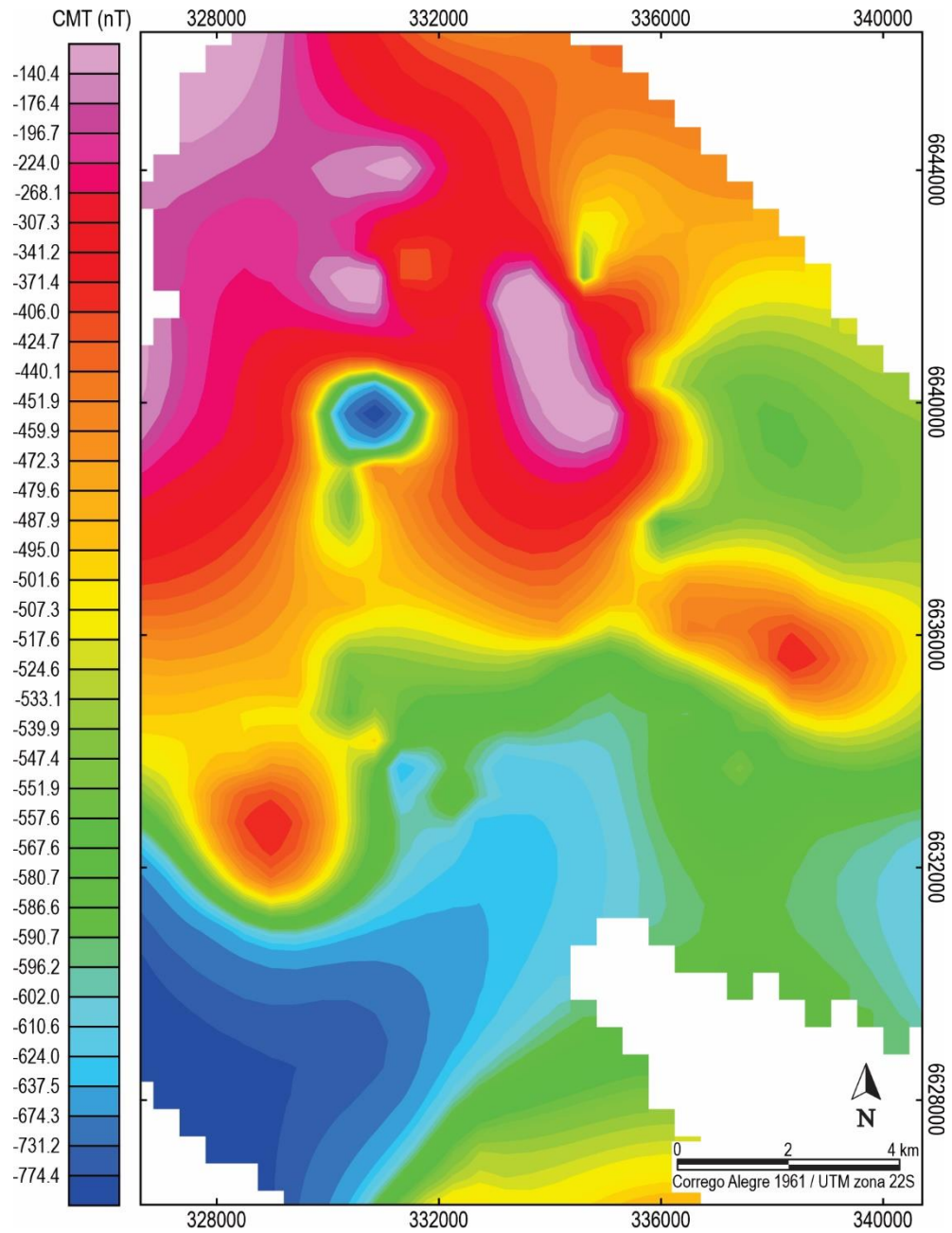
O mapa de CMT (Figura 14) apresenta uma amplitude de aproximadamente 950 nT, indo de 107 nT a -846 nT. Os valores mais altos são encontrados na região norte e noroeste, enquanto os valores mais baixos na região sudoeste.

O mapa de Amplitude do Sinal Analítico (Figura 15), exibe uma baixa amplitude com valores de 1,281 nT/m. Os valores mais altos estão concentrados nas regiões centro-norte e sudoeste do mapa, os valores mais baixos nas regiões nordeste e centro-oeste.

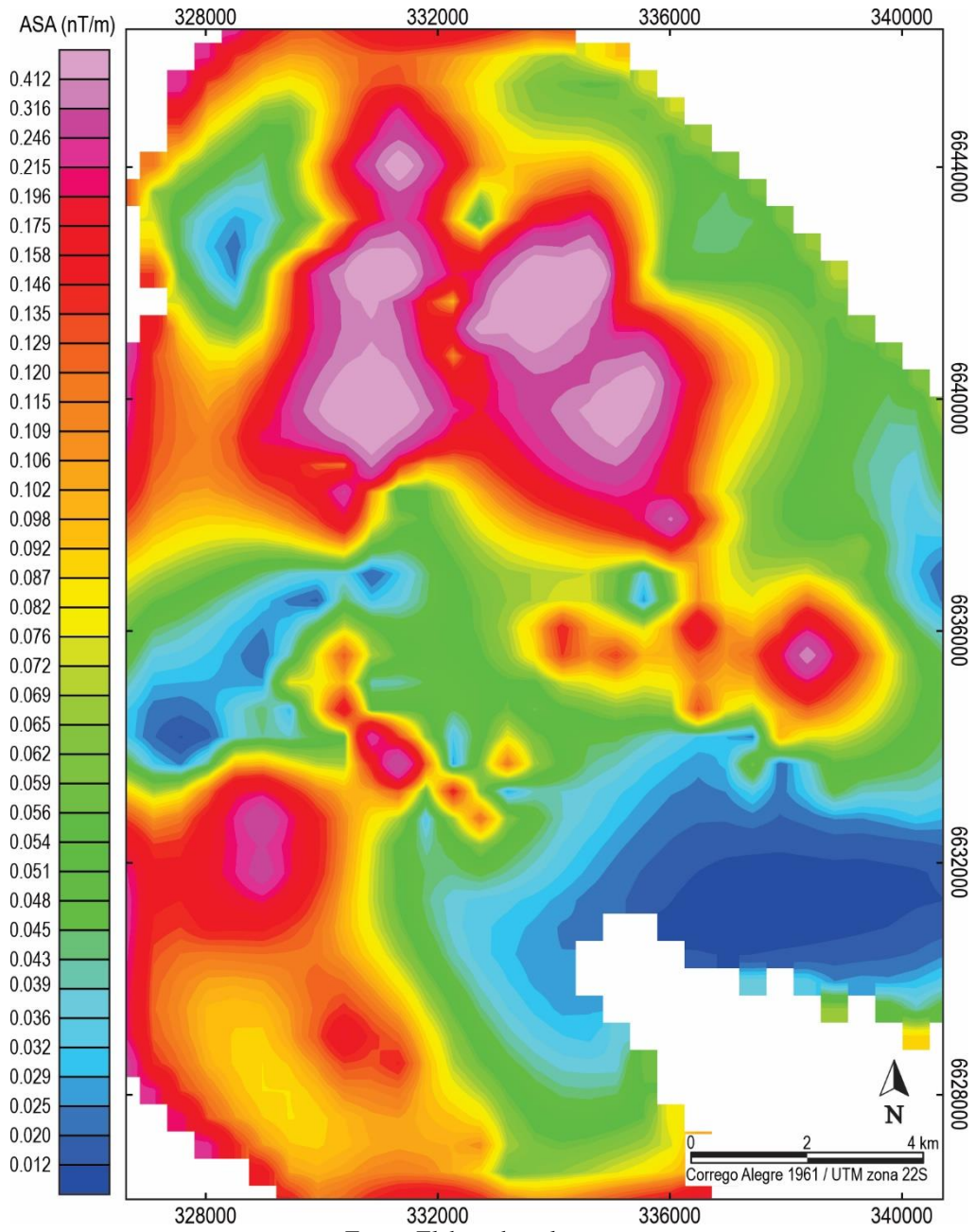
No mapa de Campo Magnético Reduzido ao Polo (Figura 16), foram separados quatro domínios, sendo três com valores mais baixos, e um com valores mais altos.

O domínio A apresenta os valores mais altos, indo de -15 nT até -500 nT. Este domínio está distribuído aleatoriamente nas regiões central, oeste, noroeste e nordeste. No domínio B os valores variam de -505 nT a -850 nT. Está localizado na região nordeste do mapa, e apresenta um *trend* de orientação noroeste. O domínio C, menor dos quatro, tem valores que variam de -510 nT até -750 nT. Localiza-se no centro-oeste da área, e apresenta um *trend* de orientação norte-sul. O domínio D apresenta os valores mais baixos, de -515 nT a -910 nT. Está distribuído em toda a região sul, porém com os valores mais negativos pro lado sudoeste.

Figura 14 - Mapa do campo magnético total (CMT) reduzido do IGRF, para a área de estudo.

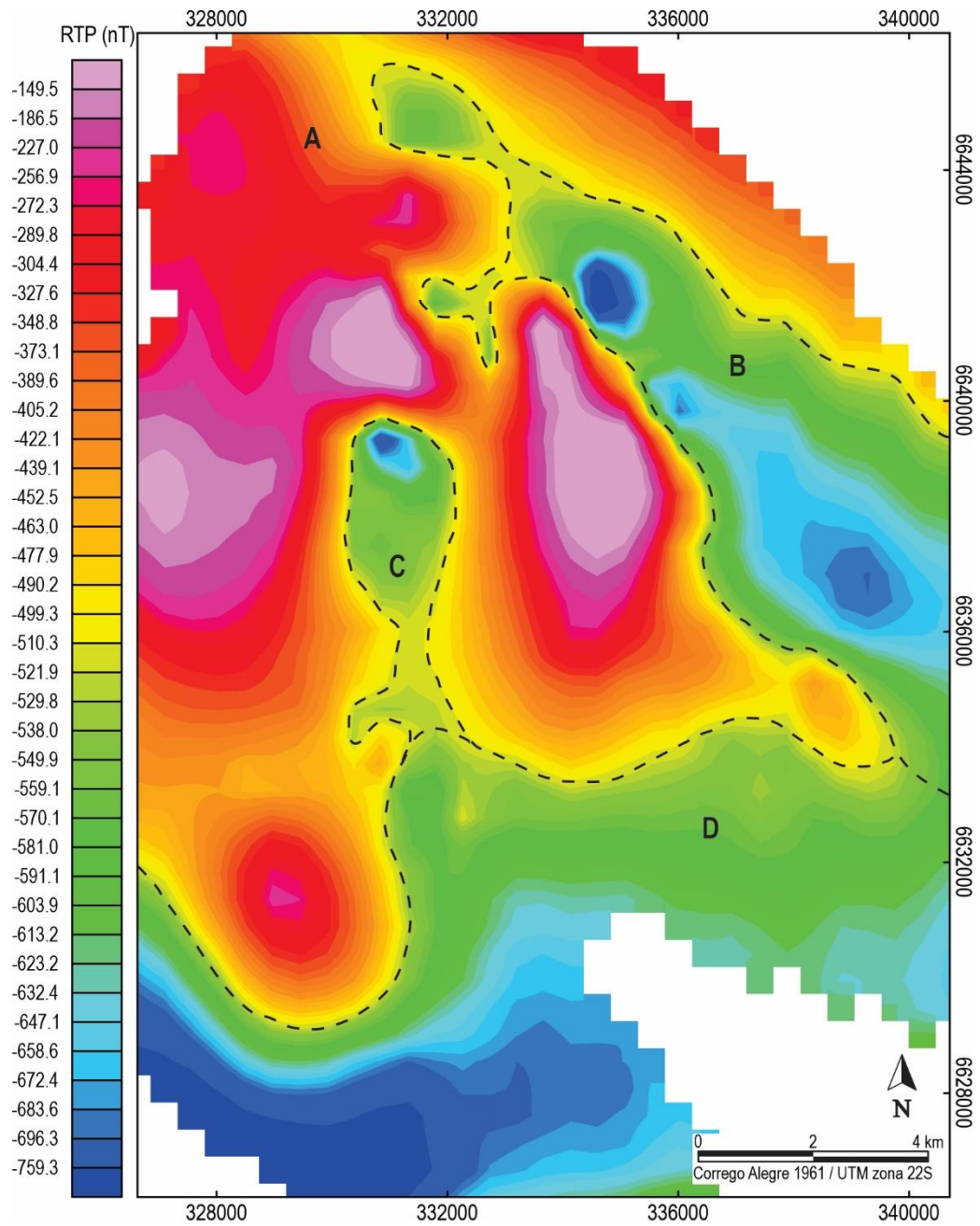


Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 – Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Mapa do Campo Magnético Reduzido ao Polo (RTP).



4.4. Modelagem Magnética

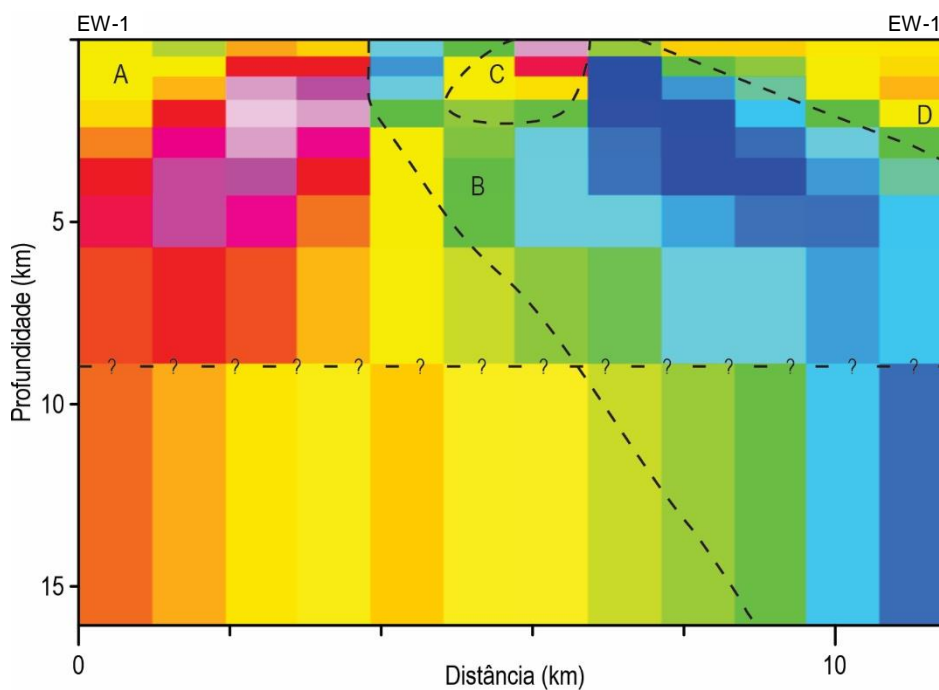
A partir dos dados magnéticos foi realizada a inversão e geração de um modelo tridimensional de distribuição de susceptibilidade magnética (onde valores altos são representados pela cor vermelha e valores baixos pela cor azul). Neste modelo foram feitos sete cortes, nas mesmas coordenadas dos perfis do modelo gravimétrico, para comparação de resultados. Durante a modelagem foi observado que a partir de 9 km de profundidade o

resultado se mostra mais impreciso. Esta imprecisão é relacionada a interpolação e precisão do método.

O perfil EW-1 (Figura 17), é limitado pelas coordenadas 327525,7 mE e 339074,5 mE, na latitude 6641518 mN. Neste perfil foram definidas quatro anomalias, três de alto valor (A, B e D) e uma de baixo valor (C).

A anomalia A cobre a maior área entre as quatro e apresenta altos valores de susceptibilidade, concentrados na parte mais rasa, lateralmente é mais fina próximo à superfície e se alarga em profundidade. A anomalia B apresenta os valores mais baixos, e segue uma orientação bem definida com mergulho para leste. A anomalia C cobre a menor área entre as quatro e está localizada na região central do perfil, bem próximo da superfície. Apresenta valores altos e uma possível orientação com mergulho para oeste. A anomalia D, no extremo leste, exhibe valores intermediários de susceptibilidade, e está bem próxima da superfície.

Figura 17 - Modelo em duas dimensões, da distribuição de susceptibilidade magnética, do perfil EW-1. As linhas tracejadas indicam as anomalias identificadas. Zona de imprecisão representada a partir de 9 km.



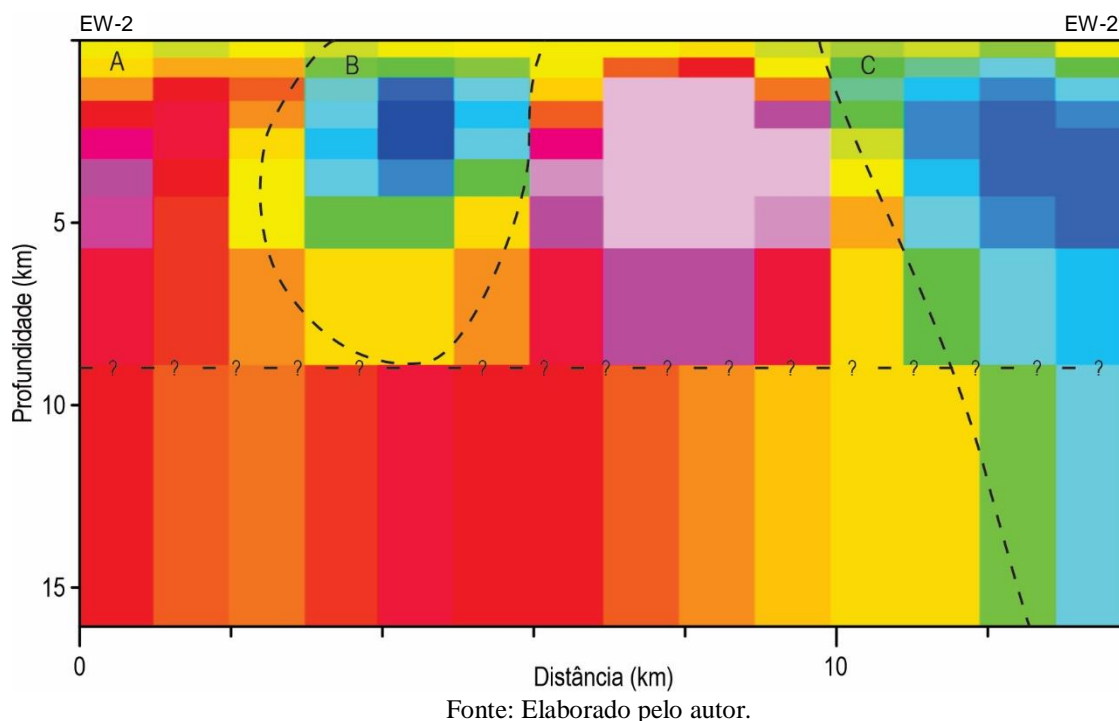
Fonte: Elaborado pelo autor.

O perfil EW-2 (Figura 18), é limitado pelas coordenadas 326601,8 mE e 340460,4 mE, na latitude 6636437 mN. Neste perfil foram definidas três anomalias, duas de baixo valor (B e C) e uma de alto valor (A).

A anomalia A, maior em área das três, apresenta duas regiões com altos valores de susceptibilidade, uma no extremo oeste e outra na parte central do perfil, que, na porção mais

rasa são separadas pela anomalia B, mas em profundidade mostram uma continuidade. A anomalia B apresenta valores mais baixos, e como dito anteriormente, separa duas regiões com altos valores de susceptibilidade magnética. A anomalia C, também com valores baixos, está localizada no extremo leste do perfil, e segue uma possível orientação com mergulho para leste.

Figura 18 - Modelo em duas dimensões, da distribuição de susceptibilidade magnética, do perfil EW-2. As linhas tracejadas indicam as anomalias identificadas. Zona de imprecisão representada a partir de 9 km.



O perfil EW-3 (Figura 19), é limitado pelas coordenadas 326601,8 mE e 340460,4 mE, na latitude 6632741 mN. Neste perfil foram definidas três anomalias, duas de baixo valor (A e C) e uma de alto valor (B).

A anomalia A, apresenta uma região com valores baixos de susceptibilidade no centro do perfil e uma apófise rasa no extremo oeste. A anomalia B apresenta os valores mais altos, e se estende por todo perfil. Os valores mais altos da anomalia B estão concentrados na região mais a oeste, sob a apófise da anomalia A. A anomalia C, de baixo valor, está localizada, em profundidade, no extremo leste do perfil.

O perfil EW-4 (Figura 20), é limitado pelas coordenadas 326601,8 mE e 334455 mE, na latitude 6630893 mN. Neste perfil foram definidas três anomalias, duas de baixo valor (A e C) e uma de alto valor (B).

A anomalia A, no extremo oeste do perfil, exibe valores medianos próximos da superfície. A anomalia B apresenta os valores mais altos, está localizada na região central próximo à superfície e mais para oeste em profundidade. A anomalia C, de baixo valor, está localizada no lado leste do perfil e, em profundidade, se estende para oeste.

Figura 19 - Modelo em duas dimensões, da distribuição de susceptibilidade magnética, do perfil EW-3. As linhas tracejadas indicam as anomalias identificadas. Zona de imprecisão representada a partir de 9 km.

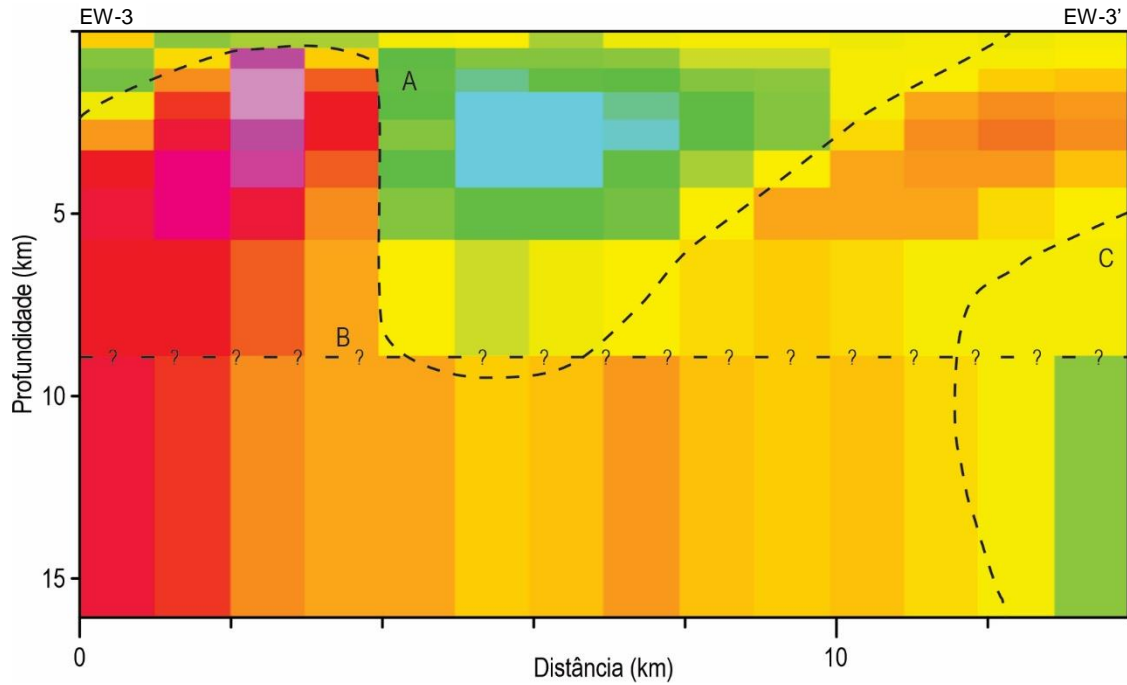
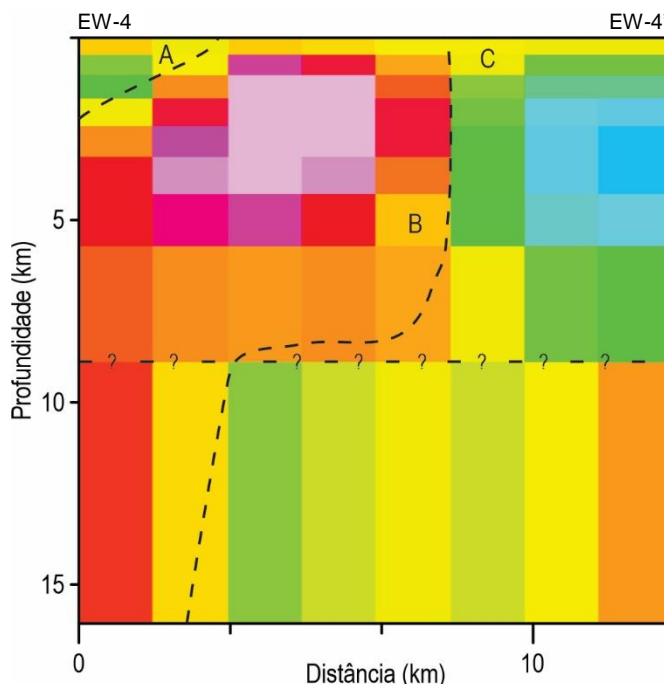


Figura 20 - Modelo em duas dimensões, da distribuição de susceptibilidade magnética, do perfil EW-4. As linhas tracejadas indicam as anomalias identificadas. Zona de imprecisão representada a partir de 9 km.

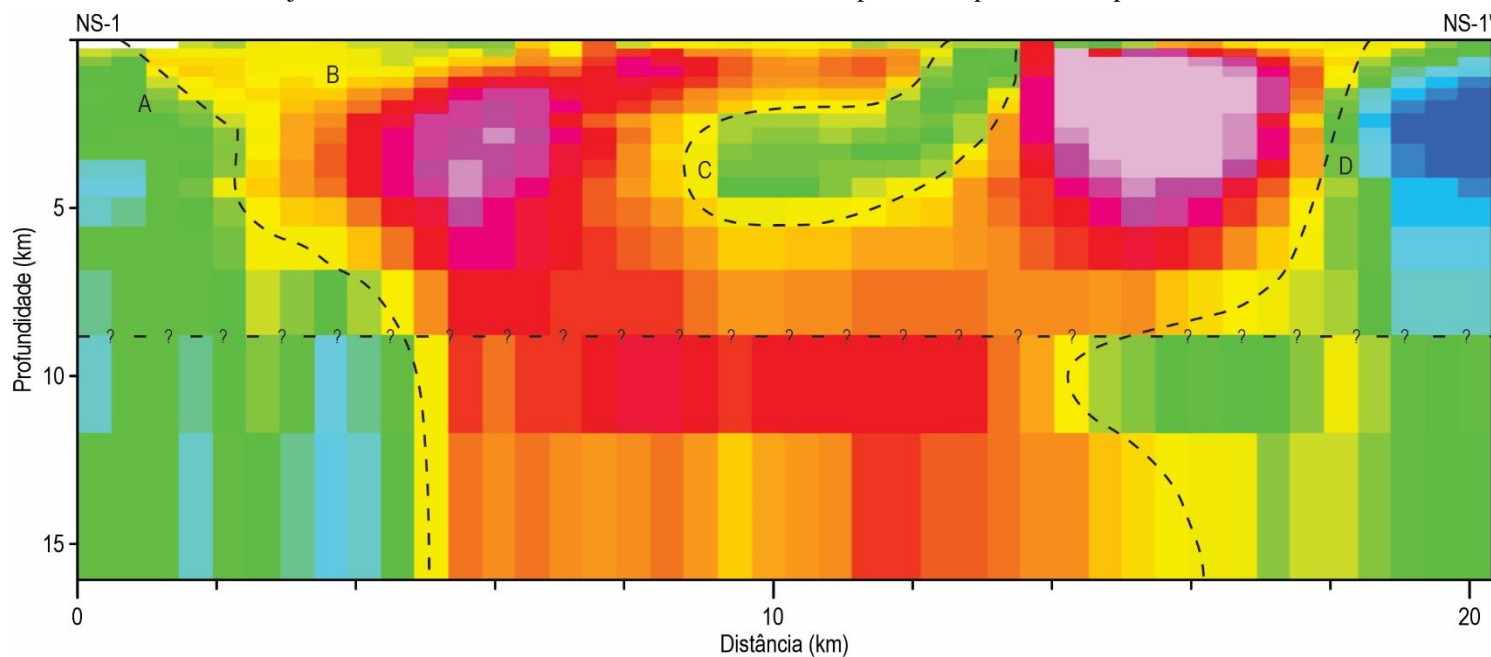


Fonte: Elaborado pelo autor.

O perfil NS-1 (Figura 21), é limitado pelas coordenadas 6626274 mN e 6646600 mN, na longitude 329373,5 mE. Neste perfil foram definidas quatro anomalias, três de baixo valor (A, C e D) e uma de alto valor (B).

A anomalia A apresenta baixos valores de susceptibilidade, está localizada na parte norte do perfil, lateralmente é mais estreita próximo à superfície e se alarga em profundidade. A anomalia B, única com altos valores, contém duas zonas de mais alta susceptibilidade, uma mais a norte outra mais a sul que são separadas pela anomalia C. A anomalia C, menor em área das quatro, está localizada na região central do perfil, bem próximo à superfície, apresenta valores intermediários e uma possível orientação com mergulho para norte. A anomalia D, no extremo sul, exhibe os valores mais baixos de susceptibilidade.

Figura 21 - Modelo em duas dimensões, da distribuição de susceptibilidade magnética, do perfil NS-1. As linhas tracejadas indicam as anomalias identificadas. Zona de imprecisão representada a partir de 9 km.

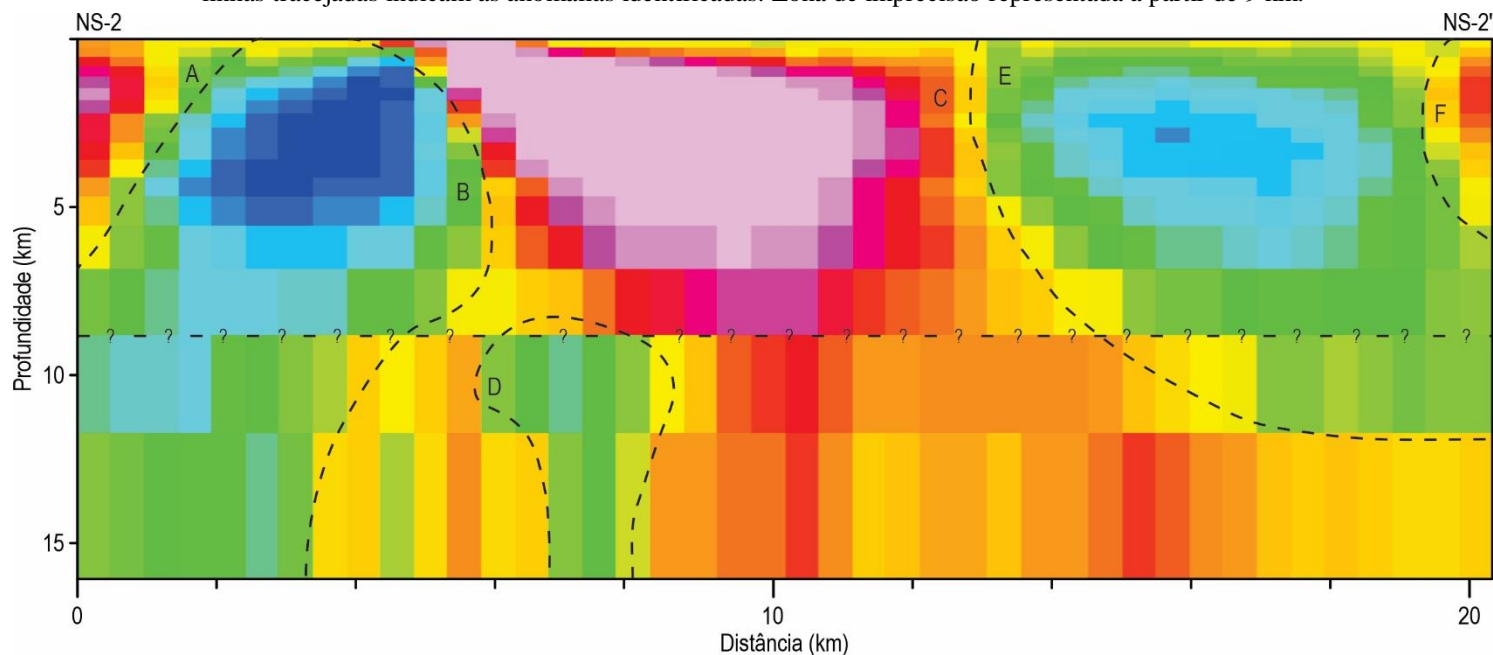


Fonte: Elaborado pelo autor.

O perfil NS-2 (Figura 22), é limitado pelas coordenadas 6626274 mN e 6646600 mN, na longitude 333531,1 mE. Neste perfil foram definidas seis anomalias, três de baixo valor (B, D e E) e três de alto valor (A, C e F).

A anomalia A está localizada no extremo norte do perfil, apresenta altos valores de susceptibilidade e está próxima da superfície. A anomalia B, exibe os valores mais baixos do perfil, contém uma possível orientação, com mergulho para norte. A anomalia C cobre a maior área entre as seis, está localizada na região central do perfil próximo à superfície, porém em profundidade se estende até o extremo sul e apresenta os valores mais altos do perfil. A anomalia D, foi identificada na parte central, em profundidade, e exibe valores baixos a moderados de susceptibilidade. A anomalia E, localizada no lado sul, apresenta valores baixos e uma possível orientação com mergulho para sul. A anomalia F, cobre a menor área entre as seis, está localizada próxima à superfície, no extremo sul, e apresenta valores altos de susceptibilidade.

Figura 22 - Modelo em duas dimensões, da distribuição de susceptibilidade magnética, do perfil NS-2. As linhas tracejadas indicam as anomalias identificadas. Zona de imprecisão representada a partir de 9 km.

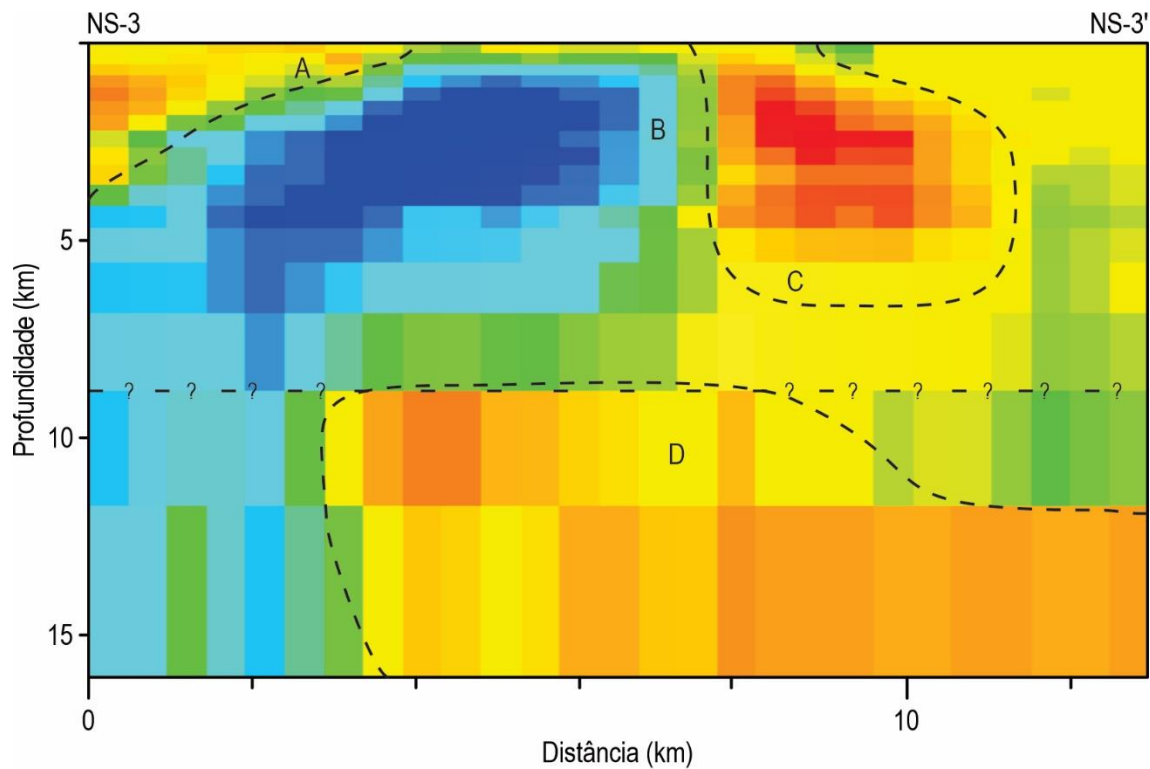


Fonte: Elaborado pelo autor.

O perfil NS-3 (Figura 23), é limitado pelas coordenadas 6630431 mN e 6643366 mN, na longitude 337688,7 mE. Neste perfil foram definidas quatro anomalias, três de alto valor (A, C e D) e uma de baixo valor (B).

A anomalia A está localizada no extremo norte do perfil, apresenta altos valores de susceptibilidade, e está próxima da superfície. A anomalia B, maior em área das quatro, exhibe os valores mais baixos do perfil e se estende por todo o perfil. A anomalia C está localizada na região centro-sul do perfil, próximo à superfície, e contém os valores mais altos. A anomalia D, está alojada na parte mais profunda, do centro para sul, com susceptibilidade moderada a alta.

Figura 23 - Modelo em duas dimensões, da distribuição de susceptibilidade magnética, do perfil NS-3. As linhas tracejadas indicam as anomalias identificadas. Zona de imprecisão representada a partir de 9 km.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5. Modelagem Geológica

Tendo como base os sete perfis bidimensionais gerados pelos dados gravimétricos, foi realizada a modelagem geológica tridimensional. Para tanto, foi interpolada uma superfície geocronológica para cada litologia (Figura 24), todas geradas como superfícies intrusivas, exceto a das rochas sedimentares, gerada como depósito.

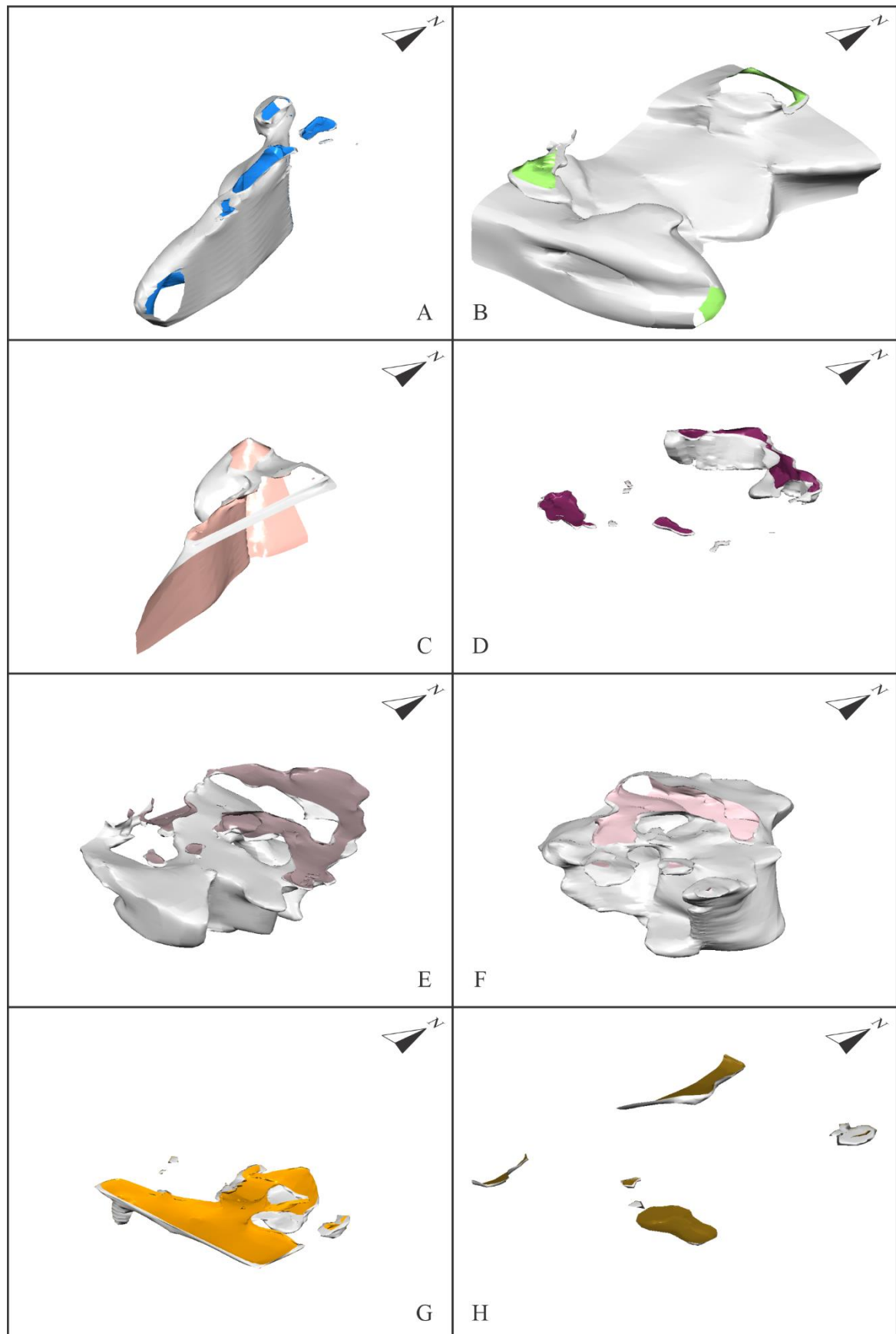
Devido ao tamanho da área a ser modelada e da quantidade de perfis, algumas superfícies apresentam erros de continuidade por falta de dados. Alguns destes erros não são perpetuados no sólido vinculado à superfície devido ao comportamento e hierarquia dos contatos entre as litologias, porém algumas imperfeições se mantêm no sólido. Para corrigir estas imperfeições foram aplicados *trends*, de acordo com o formato do corpo ou conforme a orientação das foliações minerais e magnéticas, visando a melhor interpolação possível evitando assim buracos ou protuberâncias que não correspondem com o comportamento conhecido das rochas.

Cada superfície geocronológica gera um sólido. Estes sólidos se moldam de acordo com a ordem estratigráfica informada para cada superfície. Portanto, é de extrema importância a

ordenação correta das superfícies para que não haja erros na limitação dos contatos intrusivos e nos depósitos sedimentares.

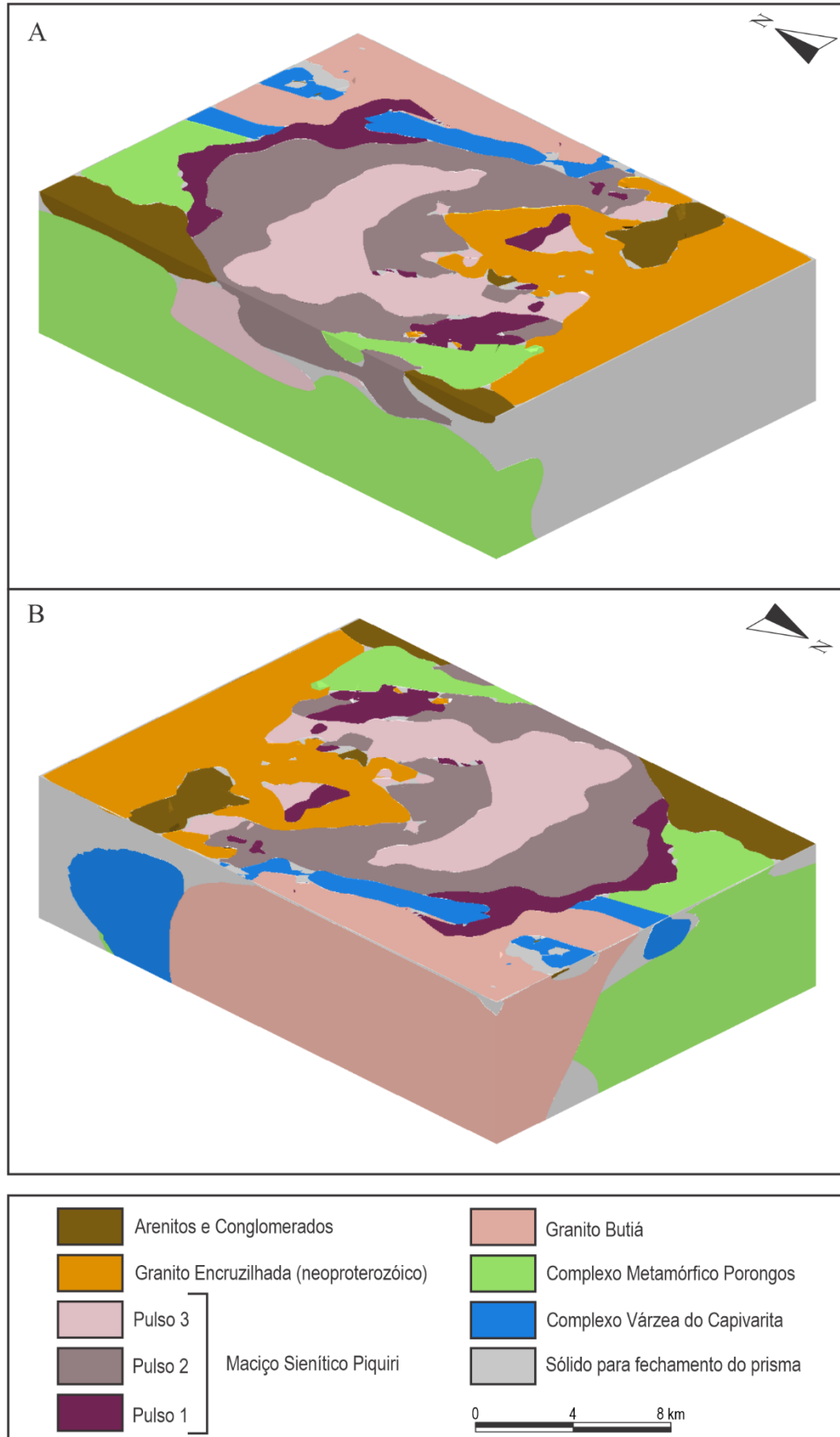
O bloco da modelagem final (Figura 25) necessariamente deve ser uma figura geométrica regular que, neste caso, é um paralelepípedo. Para isso, é gerado um sólido final que preenche todos os espaços vazios em decorrência da falta de dados ou erros de interpolação.

Figura 24 – Superfícies geradas por interpolação dos modelos gravimétricos para todas as litologias (a) CVC, (b) CMP, (c) GB, (d) MSP Pulso 1, (e) MSP Pulso 2, (f) MSP Pulso 3, (g) GE e (h) Rochas Sedimentares.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Modelo geológico em bloco, de todas as litologias da área, sob dois ângulos de visualização (a) azimute de 045° e (b) azimute de 225°, ambos com inclinação de +30°.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Gravimetria

As anomalias de gravidade são determinadas principalmente pelo contraste de densidade, mas, também pela morfologia e profundidade do corpo. Os corpos mais rasos geram anomalias com maior amplitude e definição, enquanto corpos profundos geram anomalias com menor amplitude e definição.

No mapa de anomalia Bouguer da área não foi identificada nenhuma anomalia bem definida ou com grande amplitude. Este mapa (Figura 6) apresenta apenas uma possível orientação, de direção NE-SW, na região central, o que sugere que a maioria dos corpos ali presentes são corpos mais profundos.

Considerando os valores de densidade obtidos para as rochas do embasamento, composto pelo Complexo Várzea do Capivarita e pelo Complexo Metamórfico Porongos, e suas áreas aflorantes, é possível relacionar as regiões com valores negativos a presença dessas litologias. Da mesma forma, os pulsos 1 e 2 do Maciço Sienítico Piquiri estão, em grande parte, nas áreas com valores mais altos, por apresentarem os maiores valores de densidade.

O Granito Butiá, rocha mais densa encontrada na área, aparece nas regiões leste e nordeste do mapa gravimétrico. Na porção leste exibe valores muito altos, compatível com a sua densidade. Já na porção nordeste exibe valores medianos, no entanto, nessa região há uma variação litológica maior, com densidades próximas a do granito. Portanto, a diferença acaba por ser menor, resultando em valores medianos.

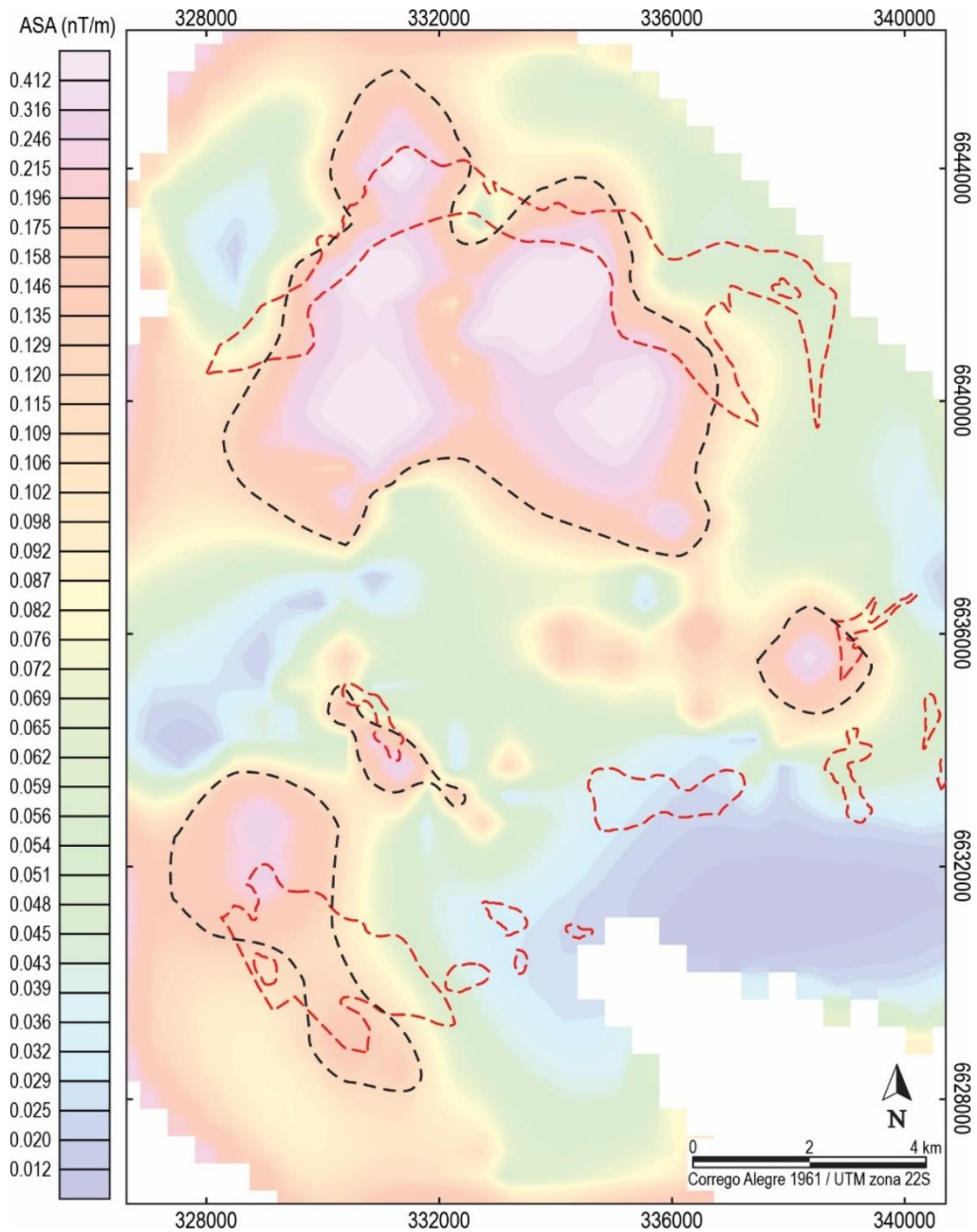
A se destacar o comportamento do Granito Encruzilhada que apesar de ser a litologia menos densa da região, está localizado numa região com valores muito altos. Essa inconsistência poderia ser explicada pelo fato de o GE ser uma fina camada intrusiva, estando abaixo dele grandes volumes do pulso 2 do MSP, cuja densidade é superior.

Outro caso importante é a dualidade do pulso 3 do MSP. A região nordeste do corpo está associada aos valores mais baixos de gravidade, o que condiz com a sua densidade calculada. Porém, na região oeste, os valores de gravidade são mais altos. Essa condição seria muito semelhante ao Granito Encruzilhada, pois sob essa área é possível que haja um grande volume do pulso 2 em profundidade, sugerindo uma continuação lateral do corpo, que se faz presente nas proximidades.

5.2. Magnetometria

O mapa de Campo Magnético Anômalo não apresentou nenhuma correspondência bem definida com alguma litologia, se mostrando pouco nítido. Mesmo assim é possível associar os valores altos nas regiões oeste, noroeste e norte com as maiores áreas do MSP e do CMP, e os valores mais baixos das regiões sudoeste, sul e leste com o GE e o CVC.

Figura 26 – Mapa de amplitude do sinal analítico, com as anomalias de altos valores demarcadas pelas linhas tracejadas preta, e os contornos do pulso 1 do MSP demarcados pelas linhas tracejadas vermelha.

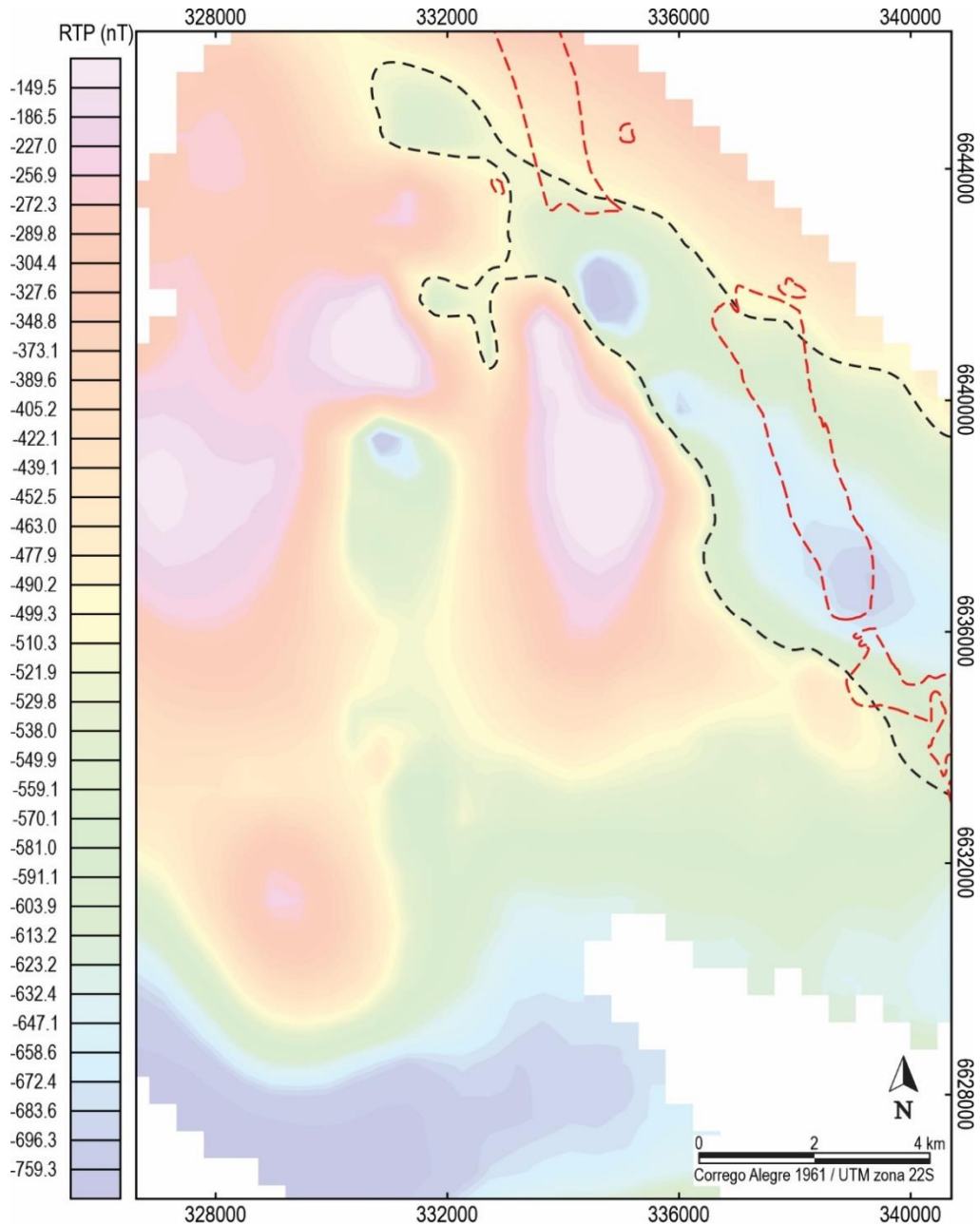


Fonte: Elaborado pelo autor.

O filtro de Amplitude do Sinal Analítico é muito eficiente na delimitação de corpos, pois quando aplicado as anomalias podem estar diretamente sobre o corpo ou demarcando seus limites. Na Figura 26 pode-se observar que os valores mais altos estão intensamente associados com o pulso 1 do MSP.

O mapa de campo magnético reduzido ao polo, assim como o de campo magnético total (CMT), não mostrou anomalias relacionadas com o MSP. Porém, o domínio B está orientado com uma direção muito semelhante à direção do CVC (Figura 27), evidenciando a orientação do contato da intrusão com o embasamento.

Figura 27 – Mapa do campo magnético reduzido ao polo, com o domínio B demarcado pela linha tracejada preta, e os contornos do CVC demarcados pelas linhas tracejadas vermelha.

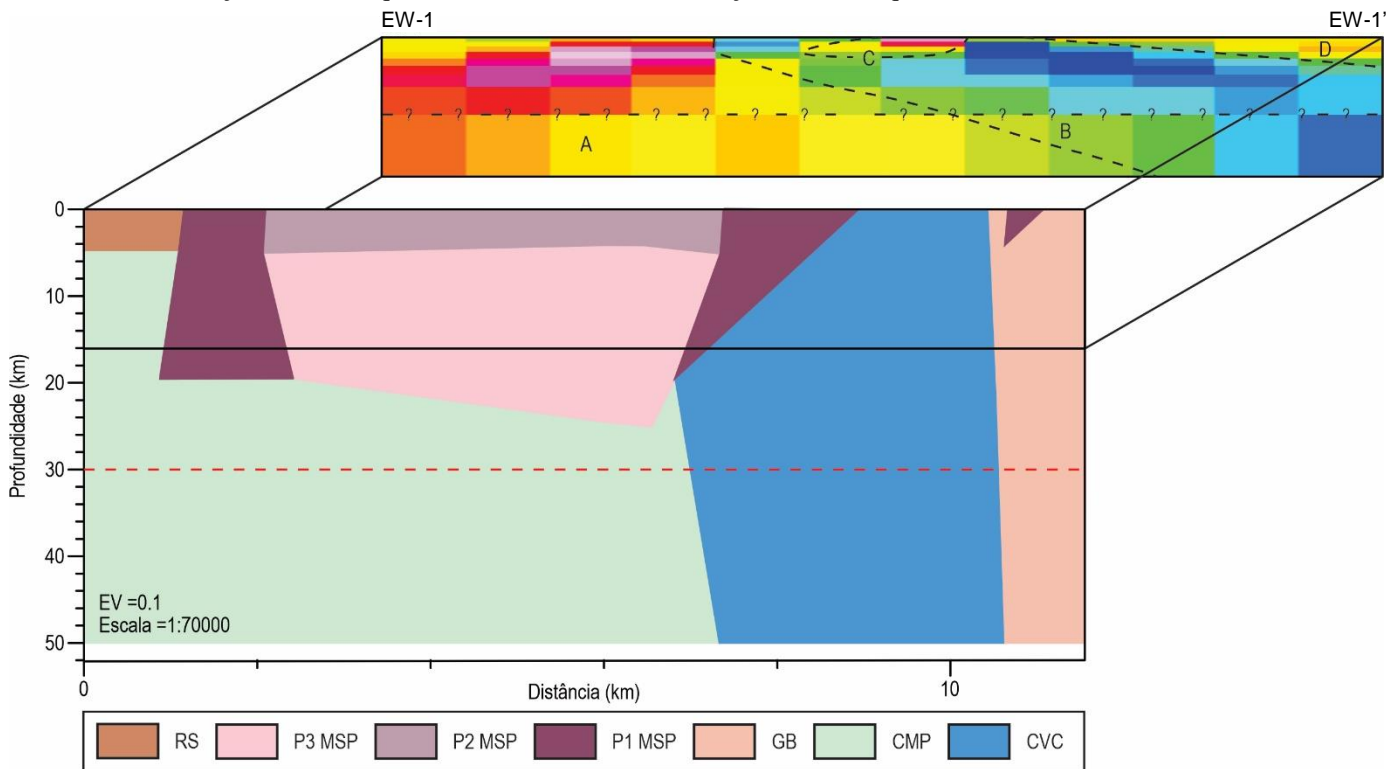


5.3. Modelagem Gravimétrica vs Modelagem Magnética

Devido ao método de modelagem utilizado para os dois dados, problema direto para dados gravimétricos e problema inverso para dados magnéticos, decidiu-se priorizar o modelo gravimétrico. Dessa forma, o modelo magnético foi utilizado para corroborar os dados obtidos.

Comparando os dois perfis EW-1 (Figura 28), a região com valores mais altos da anomalia magnética A está relacionada com o corpo do pulso 1 do MSP, mais a oeste. A anomalia B, de valores mais baixos, pode ser relacionada ao CVC. A anomalia C, apesar de um pouco deslocada, pode ser originada do corpo de pulso 1 mais centralizado, sendo o deslocamento associado a interferência do CVC. No extremo leste, a anomalia D combina com o pequeno corpo de pulso 1, e não apresenta interferência do CVC uma vez que está intrudindo o Granito Butiá.

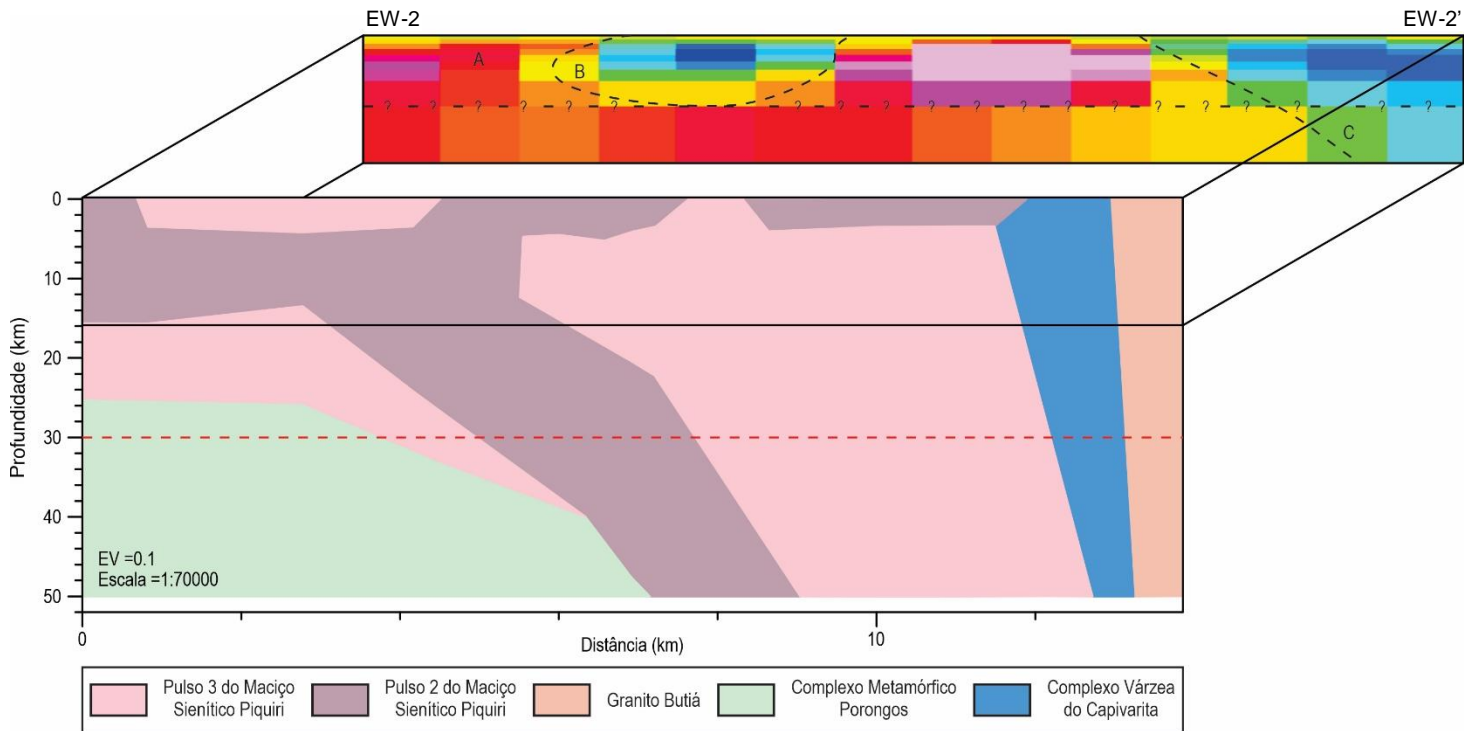
Figura 28 – Comparativo entre os perfis EW-1 gerados pela modelagem gravimétrica, mais à esquerda, pela modelagem magnética, mais à direita. Onde CVC – Complexo Várzea do Capivarita; CMP – Complexo Metamórfico Porongos; GB – Granito Butiá; P1 MSP – Pulso 1 do Maciço Sienítico Piquiri; P2 MSP – Pulso 2 do Maciço Sienítico Piquiri; P3 MSP – Pulso 3 do Maciço Sienítico Piquiri e RS – Rochas Sedimentares.



Fonte: Elaborado pelo autor.

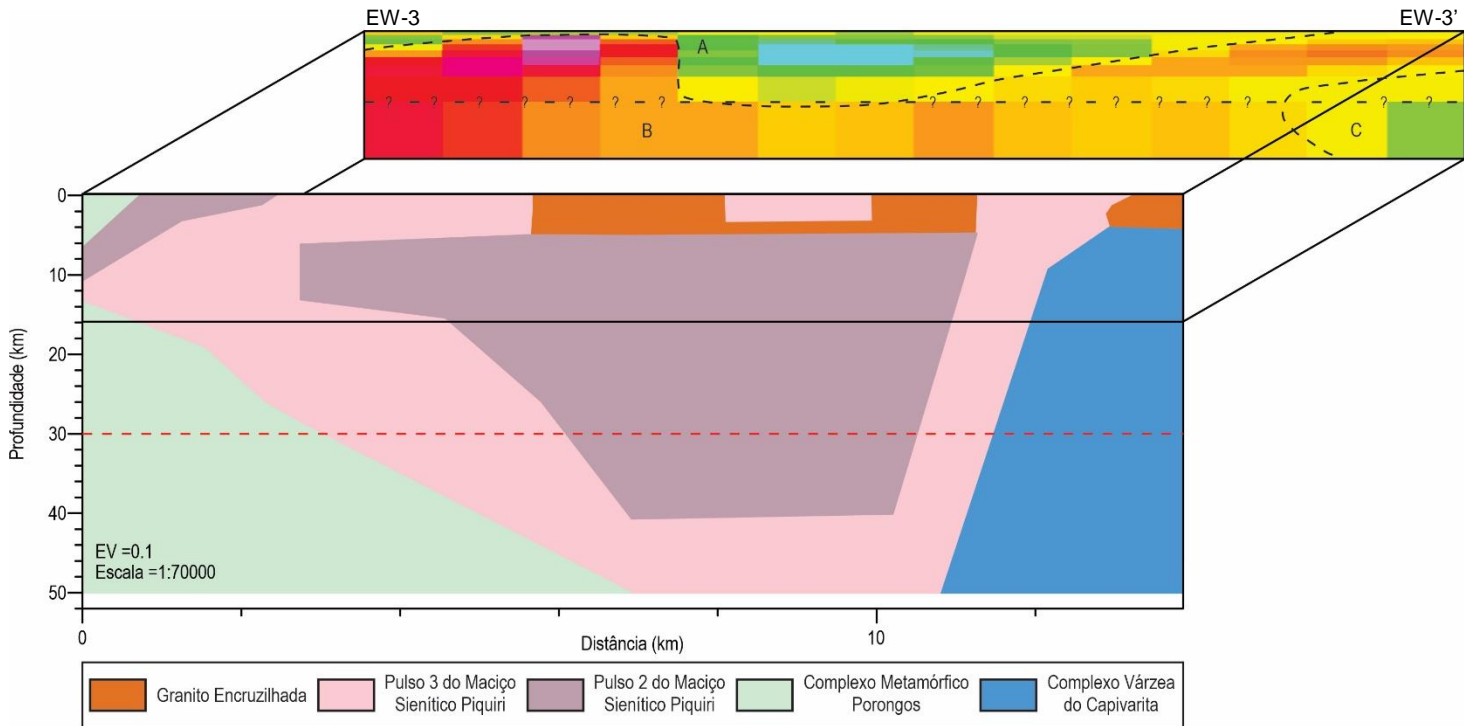
Nos perfis EW-2 (Figura 29), a anomalia C, de valores baixos, está associada ao CVC, assim como no perfil EW-1. Na anomalia A, a região de valores mais altos na porção central do perfil está fortemente relacionada ao pulso 3 do MSP que, apesar de em superfície apresentar uma pequena área, em profundidade se mostra muito maior. Já a região mais oeste da anomalia está mais relacionada ao pulso 2, porém pode estar influenciada pelo pulso 3, que também está presente com menor área. A anomalia B, de valores baixos, é a única que não condiz com o modelo.

Figura 29 – Comparativo entre os perfis EW-2 gerados pela modelagem gravimétrica, mais à esquerda, pela modelagem magnética, mais à direita.



Os perfis EW-3 (Figura 30) quando comparados possibilitam correlacionar a anomalia A, na região central, com o Granito Encruzilhada. A anomalia B é compatível com o pulso 3 do MSP. Na região a oeste exibe altos valores e a maior área, assim como visto no perfil EW-2. A anomalia C, no extremo leste, aparenta ser ocasionada pelo Complexo Várzea do Capivarita.

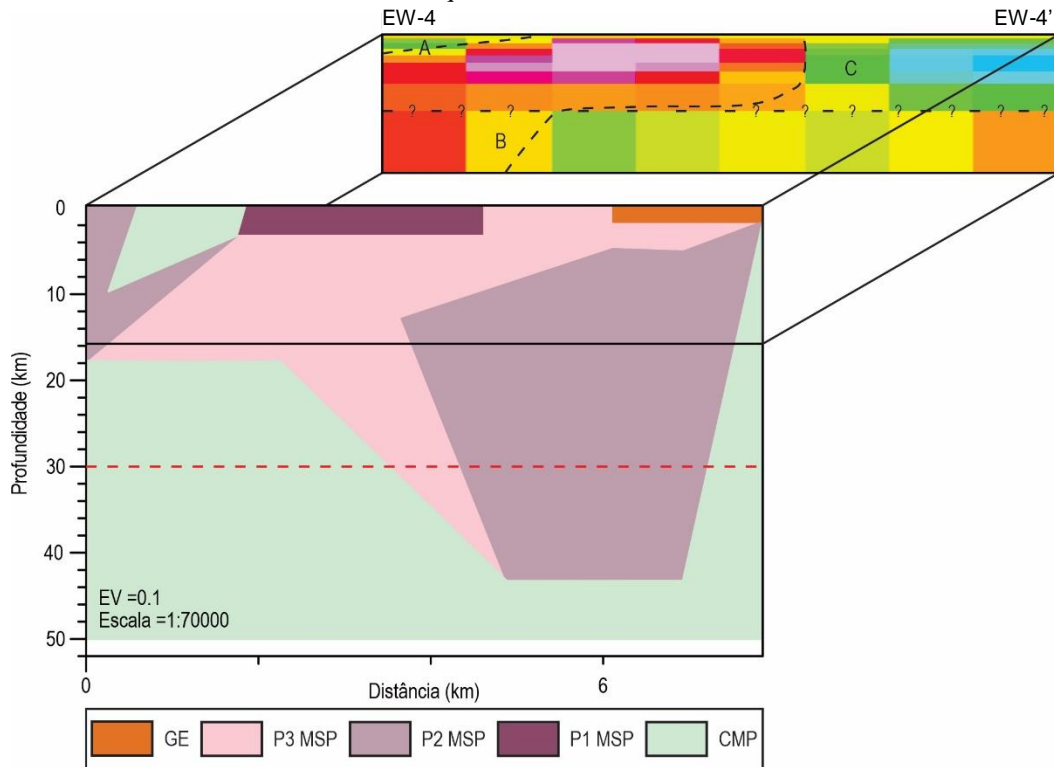
Figura 30 – Comparativo entre os perfis EW-3 gerados pela modelagem gravimétrica, mais à esquerda, pela modelagem magnética, mais à direita.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a comparação dos perfis EW-4 (Figura 31) torna-se possível correlacionar a anomalia A, na região oeste, com o Complexo Metamórfico Porongos. A anomalia B é compatível com os pulsos 1 e 3 do MSP. Na região centro-oeste exibe altos valores e a maior área, semelhante ao observado no perfil EW-1. A anomalia C, no extremo leste, aparenta estar relacionada com o pulso 2 do MSP e com o Granito Encruzilhada.

Figura 31 - Comparativo entre os perfis EW-4 gerados pela modelagem gravimétrica, mais à esquerda, pela modelagem magnética, mais à direita. Onde CMP – Complexo Metamórfico Porongos; P1 MSP – Pulso 1 do Maciço Sienítico Piquiri; P2 MSP – Pulso 2 do Maciço Sienítico Piquiri; P3 MSP – Pulso 3 do Maciço Sienítico Piquiri e GE – Granito Encruzilhada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

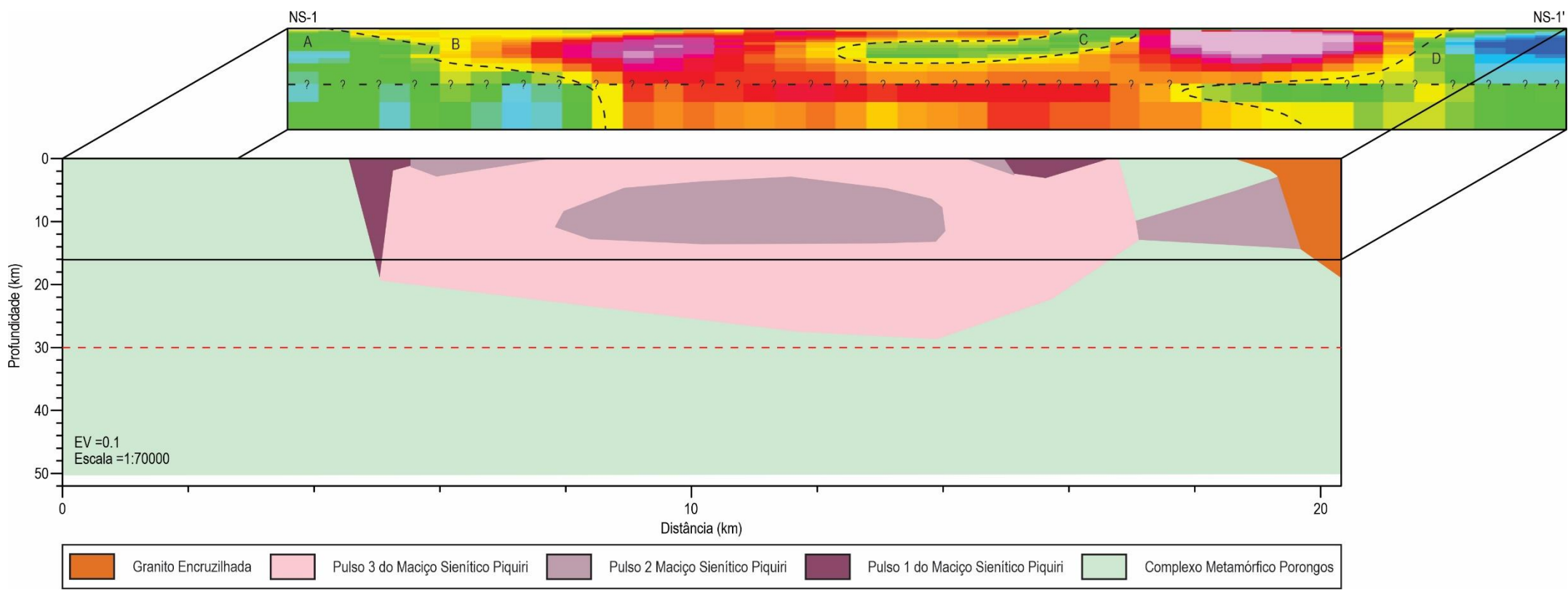
Comparando os dois perfis NS-1 (Figura 32), a região que compreende a anomalia magnética A está relacionada com o Complexo Metamórfico Porongos. A anomalia B, de valores mais altos, pode ser relacionada ao pulso 1 do MSP nas regiões norte e sul, e com o pulso 3 do MSP na região central. A anomalia C apresenta valores intermediários, e pode estar associada ao pulso 2 do MSP, que é observado em profundidade. No extremo sul, a anomalia D combina com o pequeno corpo do Granito Encruzilhada, e também com o Complexo Metamórfico Porongos.

Nos perfis NS-2 (Figura 33), a anomalia B, de valores baixos, está associada ao CVC, assim como nos perfis anteriores. A anomalia A, de valores altos, não está associada a nenhum corpo encontrado na modelagem gravimétrica, no entanto pode representar uma interferência do Granito Butiá, que ocorre próximo a esta região. A anomalia C, de valores muito altos, pode ser originada pelo pulso 3 do MSP, que apresenta uma grande área em profundidade, justificando valores tão elevados. Na região central em profundidade, a anomalia D, pode ser relacionada ao corpo de pulso 2 do MSP localizado na mesma região, assim como a anomalia

E, também de valores baixos, é relacionada a grande área do pulso 2 do MSP na região sul do perfil.

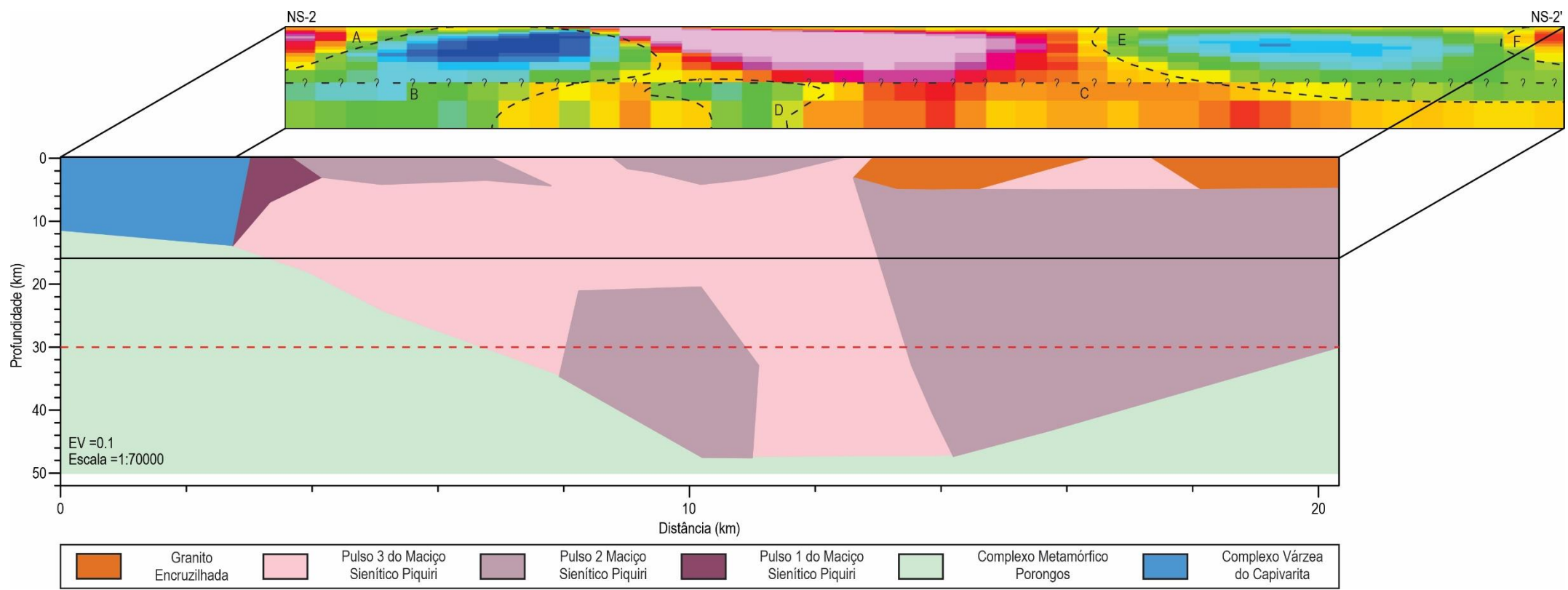
Os perfis NS-3 (Figura 34) quando comparados possibilitam correlacionar a anomalia A, na região norte, com o pulso 1 do MSP e com o Granito Butiá. Porém ela pode representar uma interferência da anomalia B. A parte norte da anomalia B, de valores muito baixos, é compatível com o Complexo Várzea do Capivarita. A porção sul, de valores intermediários, pode ser relacionada ao pulso 2 do MSP. A anomalia C e D, parece ser ocasionada pelo pulso 3 do MSP, que ocupa uma área considerável nessa região.

Figura 32 – Comparativo entre os perfis NS-1 gerados pela modelagem gravimétrica, mais à esquerda, pela modelagem magnética, mais à direita.



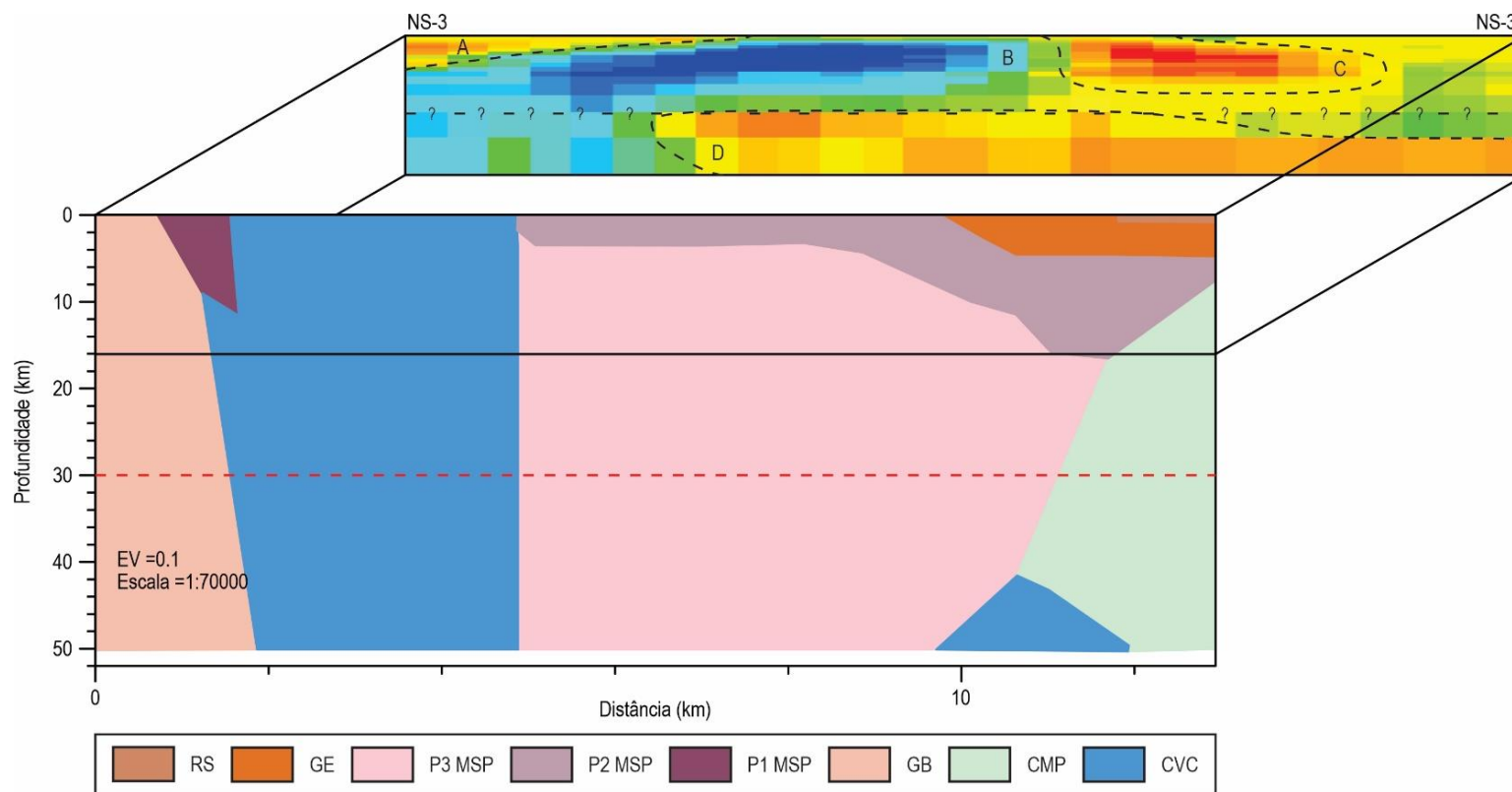
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Comparativo entre os perfis NS-2 gerados pela modelagem gravimétrica, mais à esquerda, pela modelagem magnética, mais à direita.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Comparativo entre os perfis NS-3 gerados pela modelagem gravimétrica, mais à esquerda, pela modelagem magnética, mais à direita. Onde CVC – Complexo Várzea do Capivarita; CMP – Complexo Metamórfico Porongos; GB – Granito Butiá; P1 MSP – Pulso 1 do Maciço Sienítico Piquiri; P2 MSP – Pulso 2 do Maciço Sienítico Piquiri; P3 MSP – Pulso 3 do Maciço Sienítico Piquiri; GE – Granito Encruzilhada e RS – Rochas Sedimentares.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4. Modelagem Geológica

A modelagem geológica resultou da integração de todos os resultados obtidos. Através da confecção do modelo geológico várias questões relacionadas ao posicionamento do Maciço Sienítico Piquiri puderam ser esclarecidas.

O modelo geológico gerado para o pulso 1 do MSP (Figura 35) mostra que a porção norte preserva a possível orientação do conduto de intrusão, com mergulho de alto ângulo para sul, exibindo um formato semelhante a um cone. Essa feição é concordante com a orientação da lineação magnética definida por Sbaraini (2012). Já os corpos para sul, por não apresentarem continuidade vertical, são classificados como *roof-pendants* sobre os pulsos 2 e 3 do MSP, e sobre o Granito Encruzilhada. Essas morfologias estão de acordo com as ideias de gênese e posicionamento apresentadas por Riveira (2019).

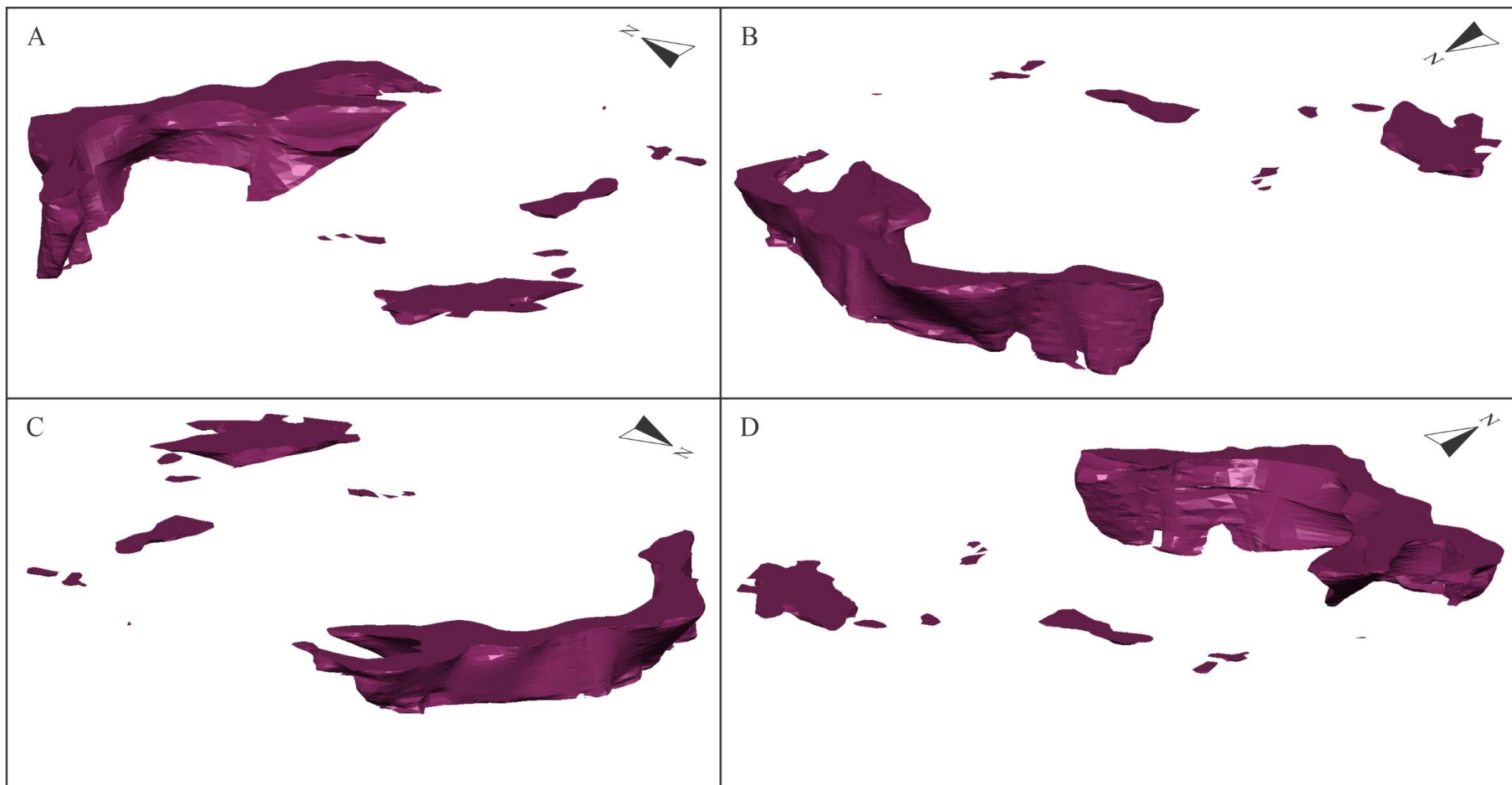
Referente ao pulso 2 do MSP (Figura 36), assim como o pulso 1, representa possíveis *roof-pendants* sobre o pulso 3, acentuando a relação intrusiva entre eles. Os dados de lineação magnética para o pulso 2 (Sbaraini, 2012) exibem caimentos de baixo ângulo em relação ao pulso 1, o que coincide com o modelo gerado que, apesar de apresentar um conduto na região central, se mostra menos verticalizado nas extremidades. A se destacar o fato da grande massa do pulso 2 não estar posicionada imediatamente abaixo da porção aflorante do mesmo, mas na região sul, sob o Granito Encruzilhada, o que visto em planta torna o formato cilíndrico/cônico ainda mais evidente.

O pulso 3 do MSP (Figura 37) não apresenta a maior área superficial, mas é o mais volumoso em subsuperfície. Abrange uma região muito profunda, chegando a 50km de profundidade, na borda leste do corpo, que segue a mesma direção do contato com o Complexo Várzea do Capivarita. Sua morfologia, entremeado com o pulso 2, indica que sua ascensão se deu por zonas de menor resistência, como falhas, onde sua baixa densidade contribuiu para tal movimentação. Os corpos isolados deste pulso no pulso 2 correspondem à “janelas” e não *roof-pendants*, o que já era esperado considerando sua relação intrusiva no pulso 2. Diferente disso, o corpo em contato com o pulso 1, sobre o Granito Encruzilhada, pode ser classificado como *roof-pendant*. Pelo modelo é possível observar que este pulso é mais distribuído, no eixo horizontal, que os anteriores o que corresponde com a lineação magnética sub-horizontal apresentada por Sbaraini (2012).

Sobre o Granito Encruzilhada, sua morfologia segue a relação de intrusão nas rochas do MSP. Observa-se a ocorrência de *roof-pendants* dos pulsos 1 e 3 sobre ele. Esta relação intrusiva já era prevista, com base em dados de campo, por Bitencourt *et al* (1993).

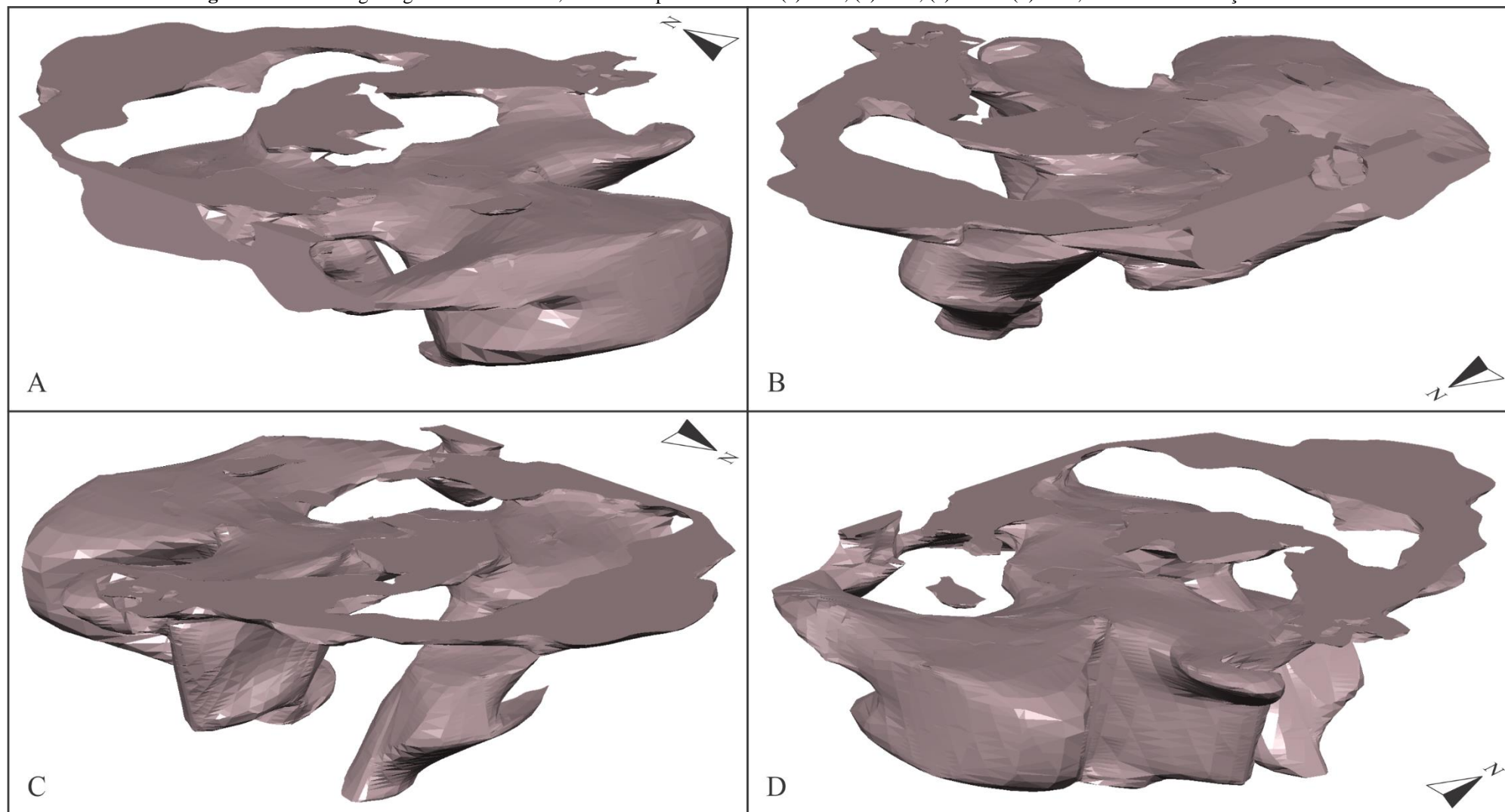
Se observado o modelo geológico do Maciço Sienítico Piquiri como um corpo único, vemos que as maiores profundidades estão na porção leste. A profundidade torna-se mais baixa nas porções oeste e norte, e intermediária na porção sul. Aliado a isto temos o sentido do mergulho das foliações magnética e magmática para a região centro-leste. Hartmann *et al.* (2016), já haviam sugerido que o MSP era um corpo intrusivo com grande profundidade com base na integração da geologia, aerogamaespectrometria e aeromagnetometria do ESRg. Estes comportamentos indicam que a ascensão do magma ocorreu pela borda leste, associado a Zona de Cisalhamento Passo das Canas.

Figura 35 - Modelo geológico 3D do Pulso 1, observado pelos azimutes (a) 045°, (b) 135°, (c) 225° e (d) 315°, todos com inclinação de +20°.



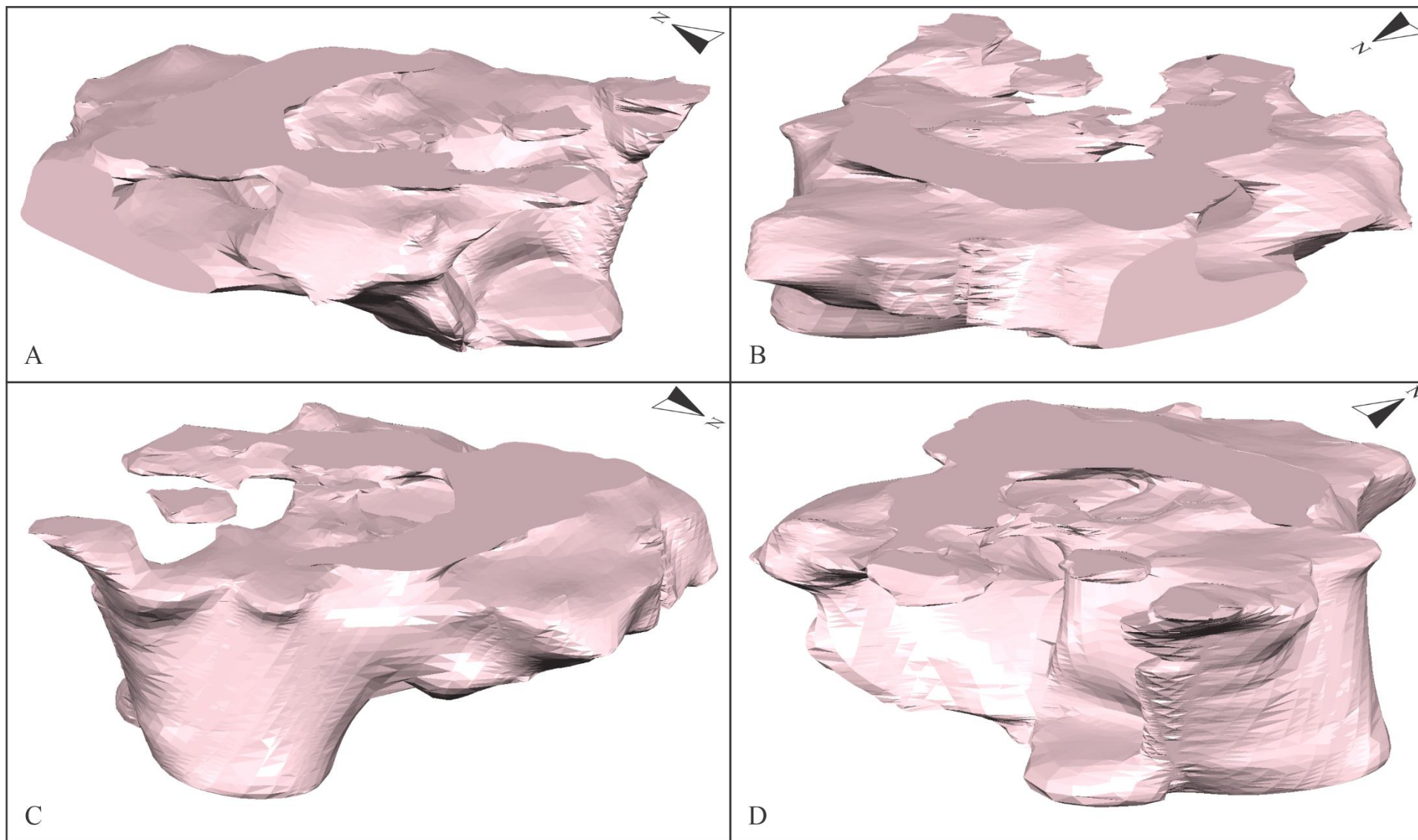
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - Modelo geológico 3D do Pulso 2, observado pelos azimutes (a) 045°, (b) 135°, (c) 225° e (d) 315°, todos com inclinação de +20°.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Modelo geológico 3D do Pulso 3, observado pelos azimutes (a) 045°, (b) 135°, (c) 225° e (d) 315°, todos com inclinação de +20°.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6. CONCLUSÕES

Com base em todo o estudo desenvolvido, que inclui a revisão dos dados de trabalhos anteriores, os levantamentos gravimétricos e magnéticos terrestres, a modelagem dos dados em perfis bidimensionais e posteriormente a elaboração do modelo geológico 3D do Maciço Sienítico Piquiri concluiu-se que:

I. A morfologia do Pulso 1, com as ruínas de um conduto a norte e os *roof-pendants* a sul, evidencia o processo intrusivo e de retrabalhamento ocorrido devido às múltiplas intrusões;

II. O pulso 1 apresenta um sinal muito característico no mapa de Amplitude do Sinal Analítico, um levantamento mais detalhado seria de grande valia para o refinamento dos contatos;

III. O grande volume em profundidade e sua maior distribuição permitem inferir que a ascensão do pulso 3 ocorreu por meio de estruturas profundas;

IV. A morfologia do MSP, aliada aos dados de ASM, reforça a hipótese da formação por múltiplos pulsos, cuja ascensão ocorreu por meio de um conduto de formato cônico para os pulsos 1 e 2, e por estruturas de extensão em profundidade para o pulso 3;

V. Com base na disposição geográfica das zonas de maior profundidade, é evidente que o posicionamento do MSP ocorreu durante a abertura da Zona de Cisalhamento Passo das Canas;

Um novo levantamento gravimétrico e magnético na área, com o objetivo de adensar a malha já existente e cobrir áreas onde faltam dados irá melhorar a resolução dos mapas e modelos obtidos, refinando ainda mais os resultados e conclusões deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BITENCOURT M.F.; NARDI L.V.S. Late- to post-collisional Brasiliano Magmatism in Southernmost Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 65:3-16, 1993.
- BITENCOURT, M. F.; NARDI, L. V. S. Tectonic setting and sources of magmatism related to the Southern Brazilian Shear Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 1, p. 186-189, 2000.
- BITENCOURT, M. F. et al. Structural geology and U-Pb age of unusual Neoproterozoic syn-collisional syenite-tonalite association from southernmost Brazil. In: Seventh Hutton Symposium on Granites and Related Rocks, Abstracts Book, Universidad de Salamanca, Avila. 2011.
- BITENCOURT, M. F. et al. Idades U-Pb e a duração do magmatismo ultrapotássico do Maciço Sienítico Piquiri. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 9, 2015, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis, SBG. 2015.
- CARVALHO, P.F de. Reconhecimento geológico no estado do Rio Grande do Sul. *Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil*, v. 66, p. 1-72, 1932.
- CASTRO, D. L de. Modelagem gravimétrica 3-D de corpos graníticos e bacias sedimentares com embasamento estrutural de densidade variável. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 3, p. 295-308, 2005.
- CHEMALE JR, F. Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense. *Geologia do Rio Grande do Sul*, p. 13-52, 2000.
- DAMACENO, J. G. et al. Magnetic and gravity modeling of a Paleogene diabase plug in Northeast Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, v. 136, p. 219-230, 2017.
- FIGUEIREDO, M. C. H.; FRAGOSO CESAR, A. R. S.; KRONBERG, B. L. Litogeoquímica das principais unidades do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul. In: 36º Congresso Brasileiro de Geologia. Natal, Anais. 1990. p. 1723-1738.
- FRAGOSO CESAR, A. R. S. et al. O Batólito Pelotas (Proterozóico Superior/Eo-Paleozóico) no Escudo do Rio Grande do Sul. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia. 1986. p. 1322-1342.

FRAGOSO CESAR, A. R. S. Tectônica de placas no ciclo brasileiro: as orogenias dos cinturões Dom Feliciano e Ribeira no Rio Grande do Sul. 1991. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

HALLINAN, S. E. et al. Estrutura do Escudo Sul-Brasileiro: uma revisão através de dados gravimétricos e magnetométricos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 23, n. 3, p. 201-214, 1993.

HARTMANN, L. A. et al. Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil. *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 47, n. 5, p. 829-844, 2000.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE JR, F.; PHILIPP, R. P. Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Precambriano. *Ianuzzi R. & Frantz JC.(Org.)*, v. 50, p. 97-123, 2007a.

HARTMANN, L. A.; LOPES, W. R.; SAVIAN, J. F. Integrated evaluation of the geology, aerogammaspectrometry and aeromagnetometry of the Sul-Riograndense Shield, southernmost Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 88, n. 1, p. 75-92, 2016.

JOST, H. et al. Geologia estrutural, petrografia e petrologia do sienito Piquiri (Proterozóico Superior), Rio Grande do Sul. *SBG, Simp. Sul-Bras. Geol*, v. 2, p. 63-80, 1985.

JOST, H.; HARTMANN, L. A. Província Mantiqueira-Setor Meridional. *O Pre-Cambriano do Brasil*, p. 345-68, 1984.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. Geofísica de exploração. *Oficina de Textos*, 2009.

NABIGHIAN, M. N. Additional Comments on the Analytic Signal of Two-Dimensional Magnetic Bodies with Polygonal Cross-Section. *Geophysics*, v. 39, n. 1, p. 85-92, 1974.

NARDI, L. V. S.; PLÁ CID, J.; BITENCOURT, M. F. Minette mafic microgranular enclaves and their relationship to host syenites in systems formed at mantle pressures: major and trace element evidence from the Piquiri Syenite Massif, southernmost Brazil. *Mineralogy and Petrology*, v. 91, n. 1-2, p. 101-116, 2007.

NARDI, L. V. S. et al. Geochemistry and petrogenesis of post-collisional ultrapotassic syenites and granites from southernmost Brazil: the Piquiri Syenite Massif. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 80, n. 2, p. 353-371, 2008.

PHILIPP, R. P. et al. Reconhecimento estrutural e geoquímico dos Granitóides Brasileiros da região de Pelotas, RS. Pesquisas, v. 20, n. 1, p. 3-13, 1993.

PHILIPP, R. P. Geologia e petroquímica dos granitóides da região de Monte Bonito, Pelotas, RS. Porto Alegre, Dissertação de Mestrado, 231p. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1990.

PHILIPP, R. P.; MACHADO, R. Estratigrafia e significado tectônico das suítes graníticas do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul, Brasil. Revista Brasileira de Geociências, v. 31, n. 3, p. 257-266, 2001.

PHILIPP, R. P. et al. O magmatismo granítico Neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. Brazilian Journal of Geology, v. 32, n. 2, p. 277-290, 2002.

PHILIPP, R. P. A evolução geológica e tectônica do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul. 1998. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

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

RIVERA, C. B. Gênese, evolução e posicionamento do Maciço Sienítico Piquiri. 2019. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação UFRGS.

SBARAINI, S. Dados de anisotropia de susceptibilidade magnética na modelagem tridimensional do Maciço Sienítico Piquiri. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

SHUKOWSKY, W.; MANTOVANI, M. S. M. Estruturação dos terrenos Pré-Cambrianos da região sul do Brasil e oeste do Uruguai: um estudo por modelamento gravimétrico. Revista Brasileira de Geofísica, v. 9, n. 2, p. 275-287, 1991.

STABEL, L. Z.; NARDI, L. V. S.; PLÁ CID, J. Química mineral e evolução petrológica do Sienito Piquiri: magmatismo shoshonítico, neoproterozóico, pós-colisional no sul do Brasil. Rev Bras Geoc, v. 31, p. 211-222, 2001.

TELFORD, W. M. et al. Applied geophysics. Cambridge university press, 1990.

TESSARI, R. I.; PICADA, R. S. Formação Caneleiras. In: Conferência no Núcleo do Rio Grande do Sul da Sociedade Brasileira de Geologia/Porto Alegre. 1963.

TESSARI, R. I.; PICADA, R. S. Geologia da quadrícula de Encruzilhada do Sul. Divisão de Fomento da Produção Mineral, 1966.

UFRGS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Mapeamento Geológico 1:25 000 de parte das folhas Passo das Canas SH-22-Y-A-III-3 (MI2984/4) e Capané SH22-Y-A-III-43(MI2984/3), RS. Porto Alegre, UFRGS, 1 vol., 2 mapas, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, 2008.

VIEIRA JR. N., FERNANDES L. A.D., KOESTER E., SCHERER C.S.; Enclaves Microgranulares do Maciço de Piquiri - RS. Acta Geológica Leopoldensia, 29:185-206, 1989.