

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**YAGO MOREIRA CASTRO**

**ANÁLISE DE ANOMALIAS MAGNÉTICAS NA REGIÃO DE  
ACONCÁGUA: PERSPECTIVAS A PARTIR DE  
MODELAGEM COMPUTACIONAL E TÉCNICA DE  
CAMADA DE FONTES EQUIVALENTES**

**BRASÍLIA**

**2023**

**YAGO MOREIRA CASTRO**

**ANÁLISE DE ANOMALIAS MAGNÉTICAS NA REGIÃO DE  
ACONCÁGUA: PERSPECTIVAS A PARTIR DE MODELAGEM  
COMPUTACIONAL E TÉCNICA DE CAMADA DE FONTES  
EQUIVALENTES**

Trabalho Final apresentado como requisito parcial  
para obtenção do título de “Bacharel em Geofísica”  
do Instituto de Geociências da Universidade de  
Brasília.

Orientador: Elder Yokoyama

**BRASÍLIA  
2023**

  
4.0 Internacional

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração à minha família, que sempre esteve ao meu lado, apoiando e incentivando minha jornada acadêmica e pessoal. Agradeço especialmente à minha mãe, Débora Cristina Pereira Louzada, que sempre se dedicou ao meu desenvolvimento com amor e carinho, mesmo diante de inúmeras dificuldades. Sua decisão de abrir mão de sua carreira profissional para proporcionar mais conforto para mim, minhas irmãs, Natália do Carmo Louzada e Suzanna do Carmo Louzada, e meu pai (padrasto), Osvaldo Alves Louzada Júnior, é algo que sempre lembrarei com gratidão.

Ao meu padrasto, Osvaldo Alves Louzada Júnior, agradeço por ter cuidado de mim com tanto amor desde meus primeiros anos de vida e por ter sido um modelo de resiliência em diversos aspectos da vida. Ao meu pai, Cleomar Castro e Silva, agradeço por sempre estar presente no meu desenvolvimento com carinho e atenção, apesar de não termos compartilhado o mesmo lar. Sua participação na minha educação e sua capacidade de ver a vida de forma leve, sempre buscando um ponto positivo em cada situação, foram fundamentais para mim.

À minha companheira, Bianca Freitas Santiago, agradeço por sempre me fornecer conforto, atenção e carinho, e por me apoiar todos os dias. Seu incentivo constante me ajuda a superar obstáculos e a alcançar nossos objetivos. Às minhas irmãs, Suzana, Natália e Dayanne, agradeço pelo apoio e companheirismo. Tenho grande admiração e carinho por todas vocês.

Agradeço à toda a família Louzada, que me acolheu com muito amor. Em especial, à minha tia Valéria Louzada e minha prima, Clarisse Louzada, que me forneceram um lar durante minha graduação e formaram um novo núcleo familiar para mim.

Ao meu melhor amigo, Arthur Siqueira de Macêdo, agradeço por estar comigo desde o início da fascinante jornada das Geociências. Sua sinceridade, honestidade e determinação em nossos projetos são inspiradoras. Além do Arthur, a UnB me deu outros dois irmãos, Luiz Eduardo (Bodão/Zedu) e Gabriel Borba, por quem, apesar da distância, mantenho profunda admiração.

Ao meu orientador, Elder Yokoyama, agradeço por me dar a oportunidade de trabalhar em diversos projetos desde o meu segundo semestre da graduação. Sua confiança

e comprometimento com a execução deste e de outros trabalhos foram fundamentais para o meu desenvolvimento como pesquisador. Agradeço também a todos os professores que participaram da minha formação, em especial à professora Susanne Maciel, que me orientou em outros projetos de pesquisa com paciência, organização e empatia.

Por fim, agradeço aos meus colegas do Laboratório de Estudos Magnéticos em Geociências (LEMAG), aos “PhyAmigos” da Phygeo, ao Observatório Sismológico, às amizades que cultivei ao longo da minha graduação e à banca examinadora. Todos vocês tiveram um papel importante na minha jornada e sou grato por isso.

“You can’t always get what you want, but if you try, sometimes,  
you might find you get what you need.” - The Rolling Stones

## RESUMO

Castro, Yago. **Análise de Anomalias Magnéticas na Região de Aconcágua: Perspectivas a partir de Modelagem Computacional e Técnica de Camada de Fontes Equivalentes.** 2023. 40 f. Trabalho Final (Bacharel em Geofísica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

Este estudo investigou as fontes magnéticas na região de Aconcágua por meio da aplicação de ferramentas computacionais para modelagem direta e utilização da técnica da camada de fontes equivalentes. Durante a fase de modelagem, foram desenvolvidos três modelos magnéticos distintos com o intuito de representar essas fontes e simular variações na intensidade magnética, ângulo de inclinação e declinação. No entanto, não foram identificadas diferenças significativas entre os resultados das anomalias do campo total e os componentes do campo magnético calculados para cada um desses modelos. A análise das anomalias magnéticas foi realizada empregando dados das missões Swarm e Earth Magnetic Anomaly Grid 2 (EMAG2) através da técnica da camada de fontes equivalentes. Na camada equivalente gerada a partir dos dados do EMAG2, foi observada a continuidade de padrões nas anomalias do campo magnético total, especialmente em áreas próximas às placas, na região entre a Placa de Nazca e a Placa Sul-Americana. Isso indica a provável influência da placa subduzida nas anomalias do campo magnético total. Contudo, a avaliação completa das anomalias magnéticas na região de Aconcágua foi limitada pela falta de dados em uma parcela considerável da porção continental no EMAG2, bem como pela insuficiente cobertura de dados provenientes do satélite Swarm. O estudo das fontes magnéticas em profundidade desempenha um papel crucial na compreensão de fenômenos intrínsecos à Terra. Esta pesquisa, por meio de um método original ed análise, contribuiu para a identificação de anomalias magnéticas e para o entendimento dos mecanismos geodinâmicos subjacentes à magnetização em contextos de fontes profundas.

Palavras-chave: Camadas de fontes equivalentes; EMAG2; Swarm; Modelagem direta.

(X) Autorizo a disponibilização do seguinte correio eletrônico para contato: yagomcastro1@gmail.com

## ABSTRACT

Castro, Yago. . 2023. 40 f. Trabalho Final (Bacharel em Geofísica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2023. Título original: Análise de Anomalias Magnéticas na Região de Aconcágua: Perspectivas a partir de Modelagem Computacional e Técnica de Camada de Fontes Equivalentes

This study investigated magnetic sources in the Aconcagua region using computational tools for direct modeling and the application of the equivalent sources layer technique. During the modeling phase, three distinct magnetic models were developed to represent these sources and simulate variations in magnetic intensity, inclination angle, and declination. However, no significant differences were identified between the results of total field anomalies and the components of the magnetic field calculated for each of these models. The analysis of magnetic anomalies was conducted using data from the Swarm and Earth Magnetic Anomaly Grid 2 (EMAG2) missions through the equivalent sources layer technique. In the equivalent layer generated from EMAG2 data, the continuity of patterns in the total magnetic field anomalies was observed, especially in areas near the plates, in the region between the Nazca Plate and the South American Plate. This suggests the likely influence of the subducted plate on the total magnetic field anomalies. However, the complete evaluation of magnetic anomalies in the Aconcagua region was constrained by the lack of data in a significant portion of the continental area in EMAG2, as well as insufficient data coverage from the Swarm satellite. The study of deep magnetic sources plays a crucial role in understanding intrinsic Earth phenomena. This research, through an original method of analysis, contributed to the identification of magnetic anomalies and the comprehension of geodynamic mechanisms underlying magnetization in deep source contexts.

Keywords: Equivalent sources; EMAG2; Forward modelling.

## LISTA DE FIGURAS

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 1  | – Mapa do território investigado. A sigla RPM representa a direção do movimento relativo da placa de Nazca em relação à Placa Sul-Americana (KENDRICK et al., 2003). JFR indica a posição da Cordilheira de Juan Fernández dentro da placa subduzida. As linhas que delimitam a placa são de Cahill e Isacks (1992) e estão marcadas em quilômetros. SP identifica a região que engloba as Sierras Pampeanas. O diagrama (B) exhibe os contornos da placa de Pardo et al. (2004) junto com as posições das estações do projeto Chile Argentina Geophysical Experiment, representadas por pontos pretos. Já o diagrama (C) apresenta a localização da área estudada em relação ao continente Sul-Americano | 20 |
| Figura 2  | – A) Mapa da do fundo da camada magnética na América do Sul; B) Erro estimado do cálculo da profundidade do fundo da camada magnética.  | 22 |
| Figura 3  | – Mapa da diferença calculada entre a profundidades da Moho e da FCM  | 23 |
| Figura 4  | – Mapa do fluxo térmico calculado na América do Sul   | 24 |
| Figura 5  | – Representação de um transecto de 600 quilômetros estendendo-se das coordenadas -30,72°S; -72,499°W até -28,23°S; -66,92°W. O perfil inclui dados de isócronas, representados pelas linhas rosas e derivados de Seton et al. (2020), proporcionando perspectivas cronológicas sobre a evolução geológica da região. Além disso, a figura incorpora contornos de placa subduzida, representados por linhas cinzas e obtidos de Anderson et al. (2007) e profundidades estimadas da Moho pelo modelo GMSA12 (MEIJDE; JULIÀ; ASSUMPÇÃO, 2013), representado por cores no espectro azul-vermelho.  | 27 |
| Figura 6  | – O Modelo 1 ilustra as variações na intensidade magnética. Fontes localizadas a maiores profundidades que a zona de subducção plana apresentam uma redução na intensidade magnética. Por outro lado, as fontes situadas na parte plana da subducção, abaixo da zona de Wadati-Benioff, mostram um pequeno aumento na intensidade magnética, o qual é atribuído ao magnetismo lamelar. A placa neste modelo apresenta continuidade ininterrupta, não havendo considerações sobre remagnetização.  | 28 |
| Figura 7  | – Ilustração do Modelo 2, uma versão avançada do Modelo 1, que incorpora o fenômeno da remagnetização, ao alterar o tipo de magnetização em cinco fontes, e simula desmagnetização e fusão, ao remover nove prismas. A placa agora apresenta interrupções, refletindo as mudanças aplicadas.  | 28 |
| Figura 8  | – Fluxograma do algoritmo para aplicação da técnica das camadas de fontes equivalentes.   | 31 |
| Figura 9  | – Representação das anomalias do campo total e dos componentes individuais (Bx, By e Bz) obtidos no Modelo 1 por meio do software Geoist.   | 32 |
| Figura 10 | – Ilustração das anomalias do campo total e dos componentes individuais   |    |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
|             | (Bx, By e Bz) gerados no Modelo 2 utilizando o software Geoist. ....   | 33 |
| Figura 11 – | Visualização das anomalias do campo total e dos componentes individuais (Bx, By e Bz) calculados no Modelo 3 com o auxílio do software Geoist.   | 34 |
| Figura 12 – | À esquerda: Mapa dos dados bruto do campo de anomalia total, adquiridos entre os anos de 2017 e 2022 pela missão Swarm, junto a uma linha contínua preta que representa a linha costeira; À direita: resultado da camada de fontes equivalentes calculada, linha preta representa linha costeira. .... | 35 |
| Figura 13 – | À esquerda: Mapa dos dados bruto do campo de anomalia total do conjunto EMAG2; À direita: resultado da camada de fontes equivalentes calculada .....   | 36 |

## LISTA DE SIGLAS

|        |                                |
|--------|--------------------------------|
| JFR    | Cordilheira de Juan Fernández  |
| GMSA12 | Derived Moho for South America |
| ESA    | Agência Espacial Europeia      |
| CHAMP  | Challenging Minisatellite      |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|            |   |
|------------|---|
| B          | Campo de indução magnética                        |
| $\Gamma$   | Potencial magnético escalar                       |
| $B_\alpha$ | Campo de indução magnética na componente $\alpha$ |
| I          | Inclinação do campo magnético                     |
| D          | Declinação do campo magnético                     |
| $B_x$      | Campo magnético no eixo x                         |
| $B_y$      | Campo magnético no eixo y                         |
| $B_z$      | Campo magnético no eixo z                         |

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                           | <b>13</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS                                   | 14        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                | <b>16</b> |
| 2.1      | CAMPO DE INDUÇÃO MAGNÉTICA                  | 16        |
| 2.2      | CAMADAS EQUIVALENTES                        | 17        |
| 2.3      | MAGNETISMO EM PLACAS FRIAS                  | 18        |
| 2.3.1    | Magnetismo Lamelar                          | 18        |
| 2.4      | SUBDUCCÃO PLANA NA AMÉRICA DO SUL           | 19        |
| 2.5      | FUNDO DA CAMADA MAGNÉTICA NA AMÉRICA DO SUL | 21        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>                  | <b>25</b> |
| 3.1      | MODELAGEM DIRETA                            | 25        |
| 3.1.1    | Materiais                                   | 25        |
| 3.1.2    | Métodos                                     | 26        |
| 3.1.2.1  | Modelos                                     | 28        |
| 3.2      | TÉCNICA DAS FONTES EQUIVALENTES             | 29        |
| 3.2.1    | Materiais                                   | 29        |
| 3.2.2    | Métodos                                     | 30        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>               | <b>32</b> |
| 4.1      | MODELAGEM DIRETA                            | 32        |
| 4.2      | TÉCNICA DAS FONTES EQUIVALENTES             | 33        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO</b>                            | <b>37</b> |
|          | REFERÊNCIAS                                 | 38        |

## 1 INTRODUÇÃO

Análises geofísicas contribuíram diretamente para descobertas de estruturas importantes para a geodinâmica, como a subducção de placas litosféricas a mais de 600 km de profundidade, presença de grandes correntes de convecção e descontinuidades sísmicas (FERRÉ et al., 2021).

A priori, acreditava-se que a descontinuidade de Mohorovicic caracterizava não apenas um máximo gradiente de velocidade, mas também a mudança de contexto de uma crosta magnética para um manto não-magnético (WASILEWSKI; MAYHEW, 1992). Atualmente, convencionou-se que a base da crosta magnética é delimitada pela superfície de Curie, que representa a profundidade em que as rochas perdem a magnetização remanente (CORREA; VIDOTTI; OKSUM, 2016). Esta é um importante marcador geodinâmico, pois se relaciona diretamente com a composição mineral das rochas, além das condições do ambiente como pressão, temperatura e disponibilidade de fluidos. Além disso, define-se como a profundidade de Curie da crosta terrestre a isoterma de 580°C, que é a temperatura de desmagnetização da magnetita (FROST; SHIVE, 1986). Portanto, as profundidades associadas a esta temperatura, que segundo Wang (2017) apresenta maiores valores de profundidade a cerca de 50 Km, geralmente é um indicador da extensão do sinal magnético (CORREA; VIDOTTI; OKSUM, 2016).

Entretanto, a partir da análise de dados magnéticos de amostras de xenólitos em contexto global, Ferré et al. (2021) constataram que magnetita pura ( $Fe_3O_4$ ) é comum no manto superior, a profundidades maiores que 150 Km, particularmente em zonas de subducção. Além disso, também são encontrados outros minerais magnéticos neste tipo de região, como as soluções de cromo-espinélio (ZIEMNIAK; CASTELLI, 2003) e hematita-ilmenita (MCENROE et al., 2018). Além disso, com o objetivo de investigar a configuração geodinâmica em que a magnetização de fontes magnéticas em regiões mantélicas foi preservada ao longo do processo evolutivo, Kuppenko et al. (2019) realizaram estudos sobre a magnetização de hematita em zonas de subducção no oeste do Pacífico, regiões em que a porção subductada atinge profundidades de até 660 Km. Nestas investigações, foi verificada a manutenção da magnetização da hematita a condições extremas, atingindo pressões de 10 GPa e temperatura de 925°C.

A análise das fontes magnéticas profundas representa uma abordagem de considerável relevância para a compreensão de várias características do planeta Terra. Isso se justifica pelo fato de que tais fontes oferecem ideias valiosas para o discernimento

de múltiplos atributos terrestres, uma vez que possibilitam a exploração das dimensões e das propriedades inerentes à estrutura térmica e magnética da litosfera. Por conseguinte, esses estudos assumem um papel fundamental, a saber: viabilizar a identificação e caracterização de anomalias magnéticas, contribuir para o esclarecimento dos mecanismos geodinâmicos responsáveis pela geração do fenômeno de magnetização em profundidades geológicas, e oferecer subsídios valiosos para a avaliação das discrepâncias magnéticas manifestas em outros corpos celestes. Nesta monografia, é apresentada uma proposta original para a análise de fontes magnéticas em zonas de subducção.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente estudo propõe investigar a característica intrínseca dos sinais emanados por segmentos de placas litosféricas que ostentam remanescência magnética. Especificamente, estamos direcionando nossa atenção para aquelas regiões situadas em profundidades geológicas onde as temperaturas excedem  $580^{\circ}\text{C}$ , ponto de Curie que marca a transição de propriedades magnéticas da magnetita (FROST; SHIVE, 1986). Para atingir tal objetivo, foram delimitados os seguintes focos de investigação:

- **Investigação das dinâmicas e cenários para magnetização em grandes profundidades:** o primeiro objetivo deste estudo consiste na investigação das dinâmicas e os cenários que regem o processo de magnetização em regiões profundas. Almeja-se a compreensão dos mecanismos e fenômenos responsáveis pela magnetização em camadas mais profundas da crosta terrestre na região de Aconcágua, examinando as possíveis interações entre diferentes sistemas geológicos e características magnéticas;
- **Aplicação de técnicas de modelagem direta do campo magnético no contexto da região de Aconcágua:** objetiva-se a utilização de modelos de subducção de placas, estimativas de profundidade crustal e a investigação de áreas com anomalias de baixo fluxo térmico. Esta abordagem permite compreensão mais aprofundada das características magnéticas da região;
- **Análises de anomalias magnéticas de dados satelitais e aeromagnéticos utilizando a abordagem das camadas de fontes equivalentes:** o terceiro objetivo é a condução de uma análise detalhada das anomalias magnéticas na região estudada, utilizando dados provenientes de satélites e aeromagnéticos. Emprega-se a abordagem das camadas de fontes equivalentes para identificar e interpretar

as anomalias observadas, possibilitando uma melhor compreensão das estruturas geológicas subjacentes e contribuindo para a delimitação de informações geofísicas essenciais para a região.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CAMPO DE INDUÇÃO MAGNÉTICA

Conforme os princípios da magnetostática, um campo de indução magnética ( $B$ ) é gerado por um grupo de fontes magnéticas na ausência de densidades de corrente, e é definido por

$$B(x, y, z) = -\nabla\Gamma(x, y, z). \quad (1)$$

O potencial magnético escalar ( $\Gamma$ ), por sua vez, é estabelecido como

$$\Gamma(x, y, z) = -\gamma_m \iiint_v m(x', y', z') \cdot \nabla \frac{1}{r'} dv', \alpha = x, y, z, \quad (2)$$

com  $(x', y', z')$  indicando um ponto localizado dentro do volume das fontes (REIS, 2020).

Além disso,

$$\frac{1}{r'} = \frac{1}{[(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

corresponde à função inversa da distância entre um ponto  $(x', y', z')$  e um ponto  $(x, y, z)$  situado fora das fontes e vetor de magnetização no interior das fontes é representado por

$$m(x', y', z') = \begin{pmatrix} m_x(x', y', z') \\ m_y(x', y', z') \\ m_z(x', y', z') \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Neste sentido,

$$B_\alpha(x, y, z) = \gamma_m \iiint_v m(x', y', z') \cdot \delta_\alpha \nabla \frac{1}{r'} dv', \alpha = x, y, z \quad (5)$$

define a componente  $\alpha$  (em que  $\alpha = x, y, z$ ) do campo de indução magnética gerado pelas fontes ( $B_\alpha$ ), sendo  $\delta_\alpha \equiv \delta/\delta\alpha$  a derivada parcial em relação à coordenada  $\alpha = x, y, z$ . Ademais, sob tais condições, o campo de indução magnética  $B(x, y, z)$  obedece à lei de Ampère,

$$\nabla \cdot B(x, y, z) = \begin{pmatrix} \delta_y B_z(x, y, z) - \delta_z B_y(x, y, z) \\ \delta_z B_x(x, y, z) - \delta_x B_z(x, y, z) \\ \delta_x B_y(x, y, z) - \delta_y B_x(x, y, z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

e à lei de Gauss para campos magnéticos (REIS, 2020):

$$\nabla \cdot B(x, y, z) = \delta_x B_x(x, y, z) + \delta_y B_y(x, y, z) + \delta_z B_z(x, y, z). \quad (7)$$

Por meio das fórmulas que caracterizam o campo de indução magnética produzido por um conjunto diversificado de fontes magnéticas, é viável estabelecer um parâmetro de grande relevância empregado na geofísica aplicada, denominado de anomalia de campo total. Esta medida é frequentemente conceituada da seguinte forma (BLAKELY, 1996):

$$\Delta T(x, y, z) = \hat{u}(I_0, D_0) \cdot B(x, y, z), \quad (8)$$

$I_0$  e  $D_0$  simbolizam, respectivamente, a inclinação e a declinação do campo principal na área em análise, ao passo que  $\hat{u}(I_0, D_0)$  é um vetor unitário definido pela função vetorial

$$\hat{u}(I, D) = \begin{pmatrix} \hat{u}_x(I, D) \\ \hat{u}_y(I, D) \\ \hat{u}_z(I, D) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos I \cos D \\ \cos I \sin D \\ \sin I \end{pmatrix}, \quad (9)$$

em que  $I = I_0$  e  $D = D_0$  (REIS, 2020).

## 2.2 CAMADAS EQUIVALENTES

Uma camada arbitrária, definida no plano  $z = z_c$ , é considerada, composta por dipolos com uma direção de magnetização uniforme representada pelo vetor unitário  $\hat{u}(I; D)$ . Além disso, considere o potencial magnético escalar (HANSEN; MIYAZAKI, 1984)

$$\phi(x, y, z) = -\gamma_m \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p(x'', y'', z_c) \hat{u}(I, D) \cdot \nabla \frac{1}{r''} dS'' \quad (10)$$

e

$$\frac{1}{r''} = \frac{1}{[(x - x'')^2 + (y - y'')^2 + (z - z_c'')^2]^{\frac{1}{2}}}. \quad (11)$$

Esta função representa a distância entre um ponto  $(x, y, z)$  localizado acima da camada ( $z < z_c$ ) e um ponto  $(x'', y'', z_c)$  localizado sobre a camada. O campo de indução magnética é definido por (REIS, 2020):

$$B(x, y, z) = -\nabla \Phi(x, y, z). \quad (12)$$

Ademais, a componente  $\alpha$  (em que  $\alpha = x, y, z$ ) do campo de indução magnética é

expressa por:

$$\tilde{B}_\alpha(x, y, z) = \gamma_m \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p(x'', y'', z_c) \hat{u}(I, D) \cdot \delta_\alpha \nabla \frac{1}{r''} dS'' \quad (13)$$

e a camada de dipolos, conhecida como camada de fontes equivalentes, exibe uma anomalia de campo total representada por (REIS, 2020):

$$\Delta \tilde{T}(x, y, z) = \hat{u}(I_0, D_0) \cdot \tilde{B}(x, y, z). \quad (14)$$

## 2.3 MAGNETISMO EM PLACAS FRIAS

A subducção de uma placa fria é um processo onde a placa subduzida tem uma temperatura mais baixa do que o manto circundante. Nesse tipo de subducção, os óxidos de ferro são as únicas fontes potenciais de anomalias magnéticas nas profundidades do manto (DUNLOP; KLETETSCHKA, 2001; KUPENKO et al., 2019). A magnetita ( $Fe_3O_4$ ), que é o principal óxido de ferro em profundidades rasas (<300 km), é formada como subproduto da serpentinização de peridotitos do manto no fundo do mar e da alteração hidrotermal de basaltos em dorsais médio-oceânicas (KLEIN et al., 2014). Quando a relação entre água e rocha é alta o suficiente, a magnetita é ainda mais oxidada em hematita ( $\alpha - Fe_2O_3$ ), formando uma camada oxidada com vários quilômetros de espessura. O crescimento desta camada é limitado apenas pela permeabilidade da água do mar na crosta oceânica (LÉCUYER; RICARD, 1999). A subducção dessa litologia, juntamente com a litosfera oceânica, resulta na reintrodução de óxidos de ferro no manto. No entanto, a estabilidade da magnetita em profundidade é limitada, pois ela se decompõe em frações equimolares de hematita e  $Fe_4O_5$  acima de 10 GPa e 1.000 K. Essas frações só devem se recombinar a pressões de cerca de 20 GPa para produzir uma fase de magnetita de alta pressão (UENVER-THIELE et al., 2017). Isso resulta na hematita sendo a fase de óxido magneticamente dominante entre profundidades de 300 km e 600 km (KUPENKO et al., 2019).

### 2.3.1 Magnetismo Lamelar

O magnetismo lamelar é um fenômeno que ocorre quando o material lamelar exsolvido atinge seu tamanho mínimo e sua abundância máxima, o que maximiza a área de superfície das camadas de contato. Este fenômeno é mais forte quando a proporção de material lamelar exsolvido é grande (ROBINSON et al., 2002; GEIGER, 2001). Em

condições naturais favoráveis, um momento magnético saturado de 0,3 mB p.f.u. pode ser alcançado, correspondendo a 55 kA m<sup>-1</sup>, quando os momentos magnéticos de todas as lamelas estão em fase e alinhados. No contexto de placas frias, este fenômeno é observado em rochas que contêm lamelas finamente exsudadas na série mineral hematita-ilmenita ( $Fe_2O_3 \sim FeTiO_3$ ) (MCENROE et al., 2004). A hematita, especificamente, possui uma magnetização remanente natural mais alta do que a ilmenita, enquanto a ilmenita possui uma magnetização induzida maior que a hematita (KUPENKO et al., 2019). Quando as lamelas são finamente exsudadas, elas podem exibir uma magnetização de saturação cerca de 20 vezes mais forte do que a hematita pura, mantendo sua alta coercividade e estabilidade térmica (MCENROE et al., 2004). Isso implica que as lamelas podem contribuir significativamente para as propriedades magnéticas da rocha, mesmo em baixas concentrações de óxidos (KUPENKO et al., 2019). O mecanismo exato do magnetismo lamelar ainda não é totalmente compreendido, mas acredita-se que esteja relacionado ao alinhamento de domínios magnéticos nas fronteiras das lamelas, o que pode criar um momento magnético líquido para as lamelas como um todo. O magnetismo lamelar foi proposto como uma explicação para a forte magnetização remanente observada em algumas rochas (KUPENKO et al., 2019).

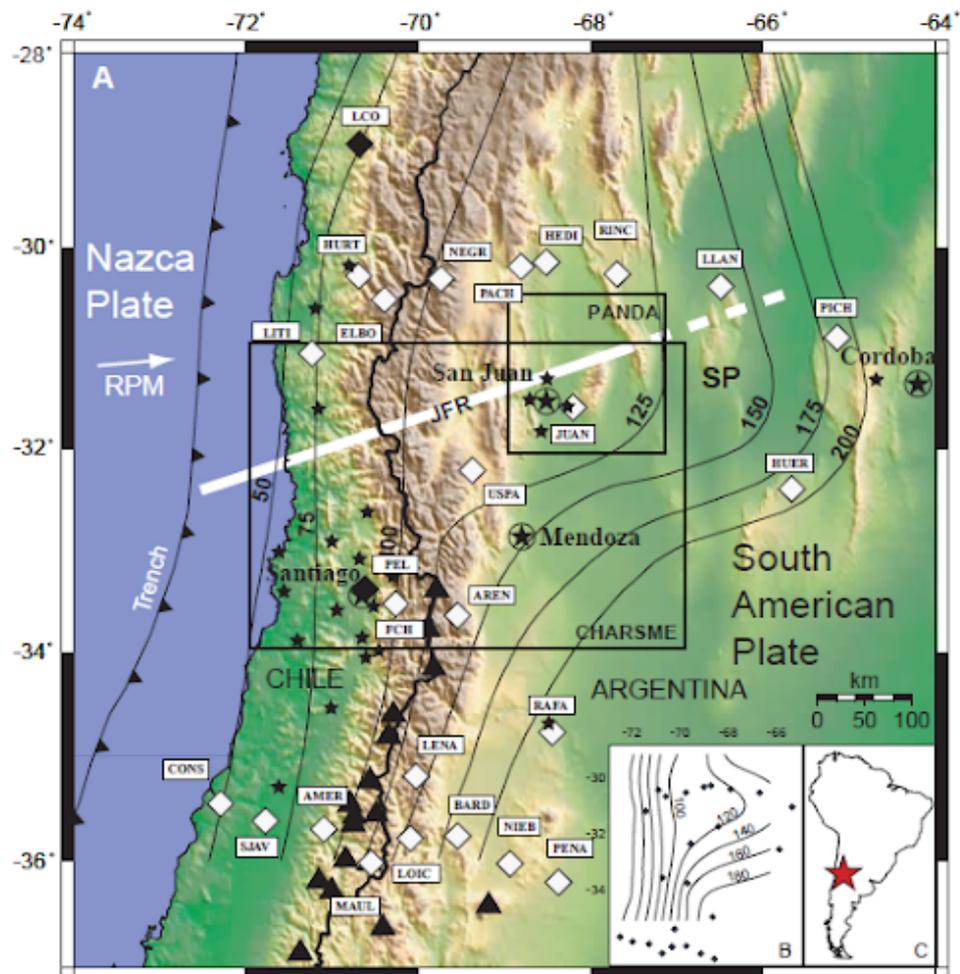
## 2.4 SUBDUCÇÃO PLANA NA AMÉRICA DO SUL

O segmento plano-subduzido da placa de Nazca é identificado por uma mudança considerável entre áreas íngremes e planas da placa subduzida, ocorrendo próximo aos 15°S, e uma torção acentuada da placa nas proximidades dos 33°S. As dimensões subterrâneas das duas seções quase planas da placa subduzida são equivalentes, aproximadamente 750 km mensurados desde o eixo da trincheira até cerca de 160 km de profundidade. Já o segmento intermediário, mais inclinado, entre essas seções é ligeiramente mais curto, estendendo-se por aproximadamente 650 a 700 km até uma profundidade de cerca de 300 km. A continuidade das características da zona de arco e das características do arco magmático sugere que a mudança principal de subducção íngreme para plana ocorre por volta dos 27°S (JORDÁN et al., 1983).

No contexto da subducção plana da placa de Nazca na latitude aproximada de 33°S, a zona de Wadati-Benioff apresenta uma configuração achatada, acompanhada por deformações na placa subduzida. Essa configuração peculiar tem sido objeto de análises e especulações acerca da dinâmica relacionada à subducção nessa área específica (ANDERSON et al., 2007). Uma das teorias mais aceitas para explicar o aplainamento

da subducção observado na placa indica que o fenômeno ocorreu devido à influência da Cordilheira de Juan Fernández (JFR) (Figura 1), que contém parcela mais espessa da crosta oceânica. Esta maior e mais espessa concentração de massa pode catalisar o fenômeno do achatamento e aplainamento da placa (HUENE et al., 1997; GUTSCHER et al., 2000; GUTSCHER, 2002; ANDERSON et al., 2007).

**Figura 1** – Mapa do território investigado. A sigla RPM representa a direção do movimento relativo da placa de Nazca em relação à Placa Sul-Americana (KENDRICK et al., 2003) (Kendrick et al. 2003). JFR indica a posição da Cordilheira de Juan Fernández dentro da placa subduzida. As linhas que delimitam a placa são de Cahill e Isacks (1992) e estão marcadas em quilômetros. SP identifica a região que engloba as Sierras Pampeanas. O diagrama (B) exhibe os contornos da placa de Pardo et al. (2004) junto com as posições das estações do projeto Chile Argentina Geophysical Experiment, representadas por pontos pretos. Já o diagrama (C) apresenta a localização da área estudada em relação ao continente Sul-Americano



Fonte: Anderson et al. (2007)

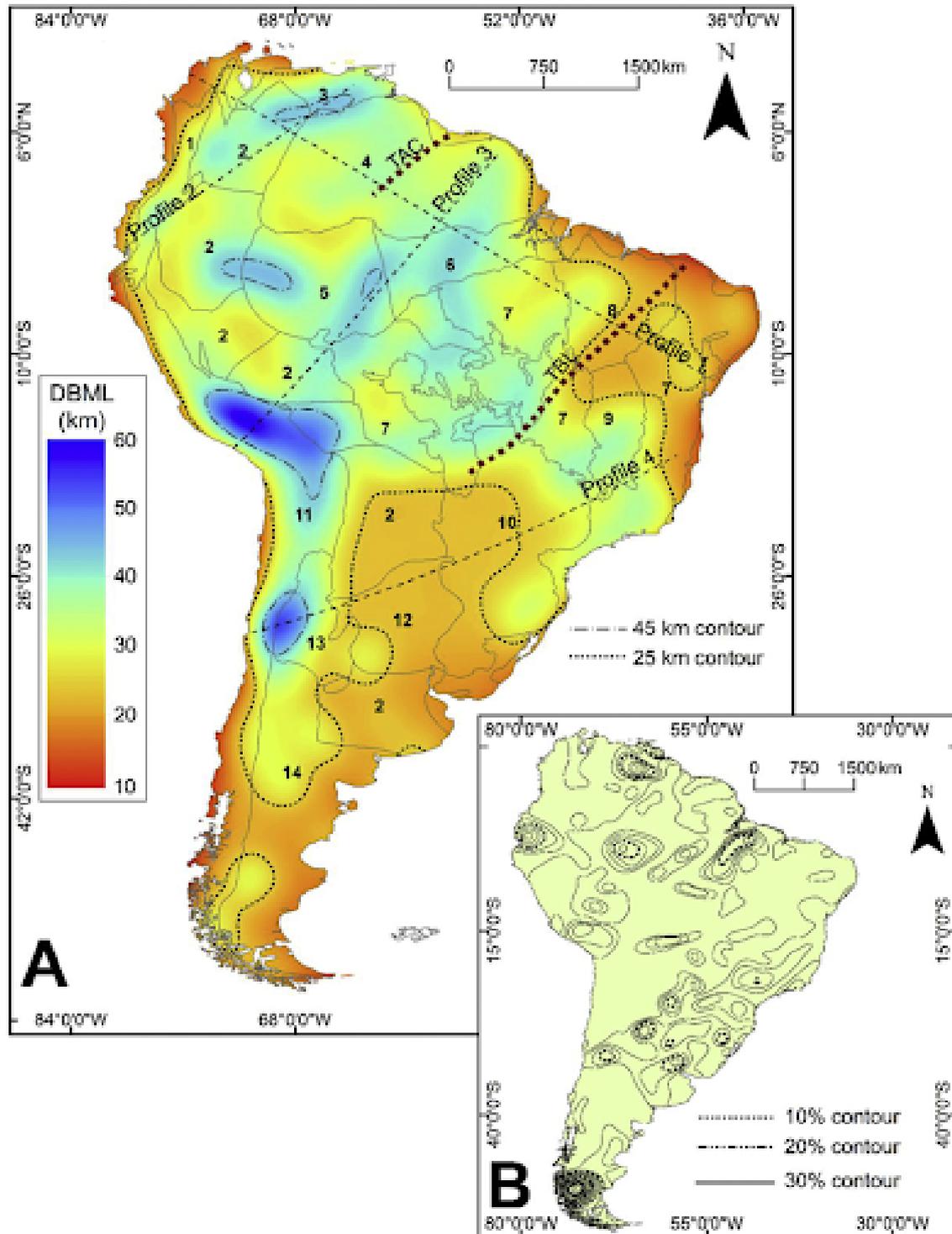
## 2.5 FUNDO DA CAMADA MAGNÉTICA NA AMÉRICA DO SUL

O estudo conduzido por Idárraga-García e Vargas (2018) tem como foco a estimativa do fundo da camada magnética (FCM), geralmente considerada como uma representação aproximada da isoterma de Curie. Inicialmente, foi elaborado um mapa abrangendo toda a extensão da América do Sul que apresenta a FCM, juntamente com os erros associados (Figura 2).

Além disso, a pesquisa avaliou a discrepância entre as estimativas da profundidade da Moho e os valores da FCM (Figura 3). Nessa análise, foram identificadas duas áreas de anomalias negativas, notavelmente concentradas na região do Cráton Amazônico e na área de Aconcágua.

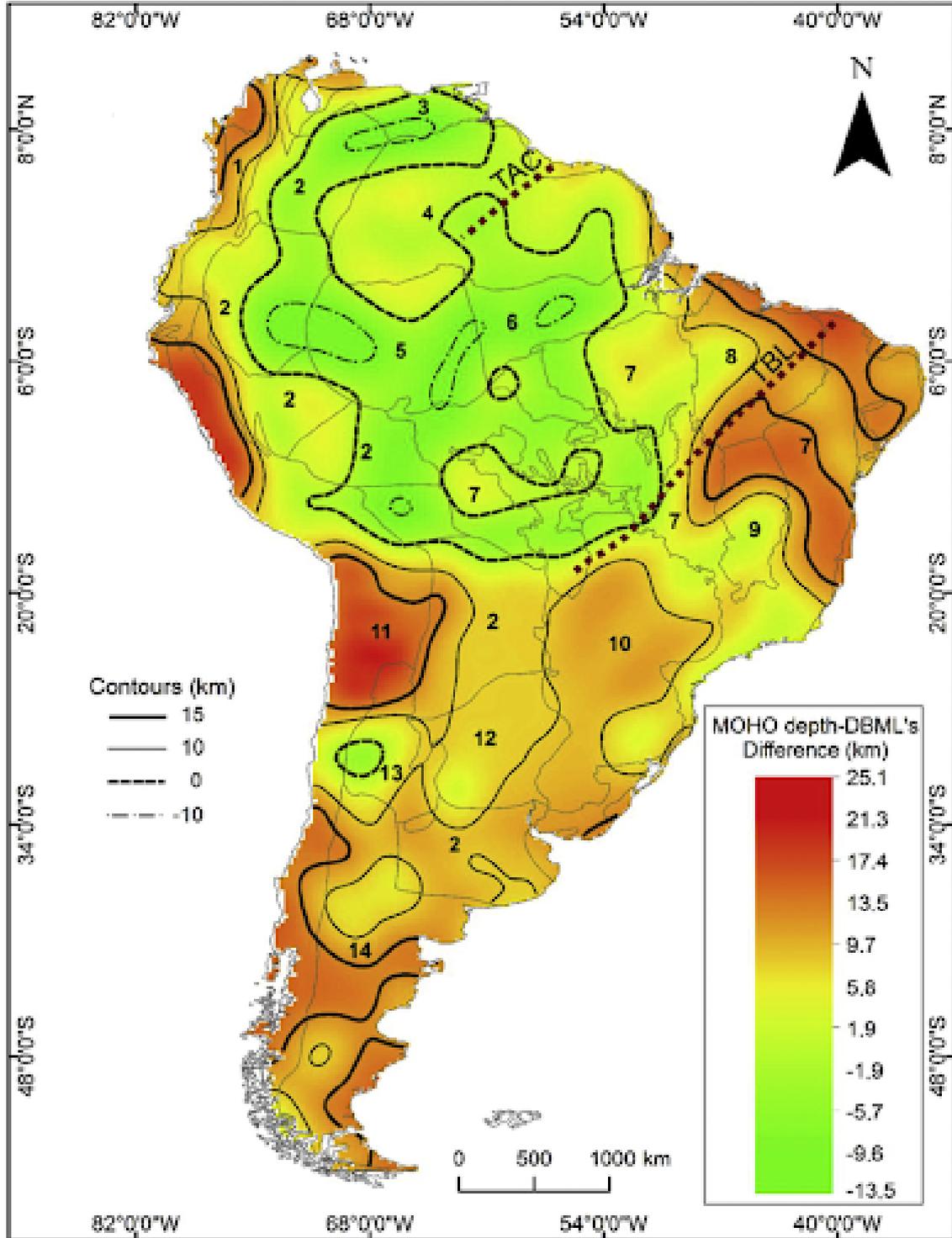
Adicionalmente, Idárraga-García e Vargas (2018) realizaram uma estimativa do fluxo térmico na América do Sul (Figura 4), revelando a presença de duas anomalias de fluxo térmico negativas, localizadas aproximadamente nas latitudes 15°S e 33°S. Estas anomalias são consideradas como resultado da subducção de placas frias (IDÁRRAGA-GARCÍA; VARGAS, 2018), coincidindo com as regiões previamente apresentadas na Seção 2.4.

**Figura 2** – A) Mapa da do fundo da camada magnética na América do Sul; B) Erro estimado do cálculo da profundidade do fundo da camada magnética.



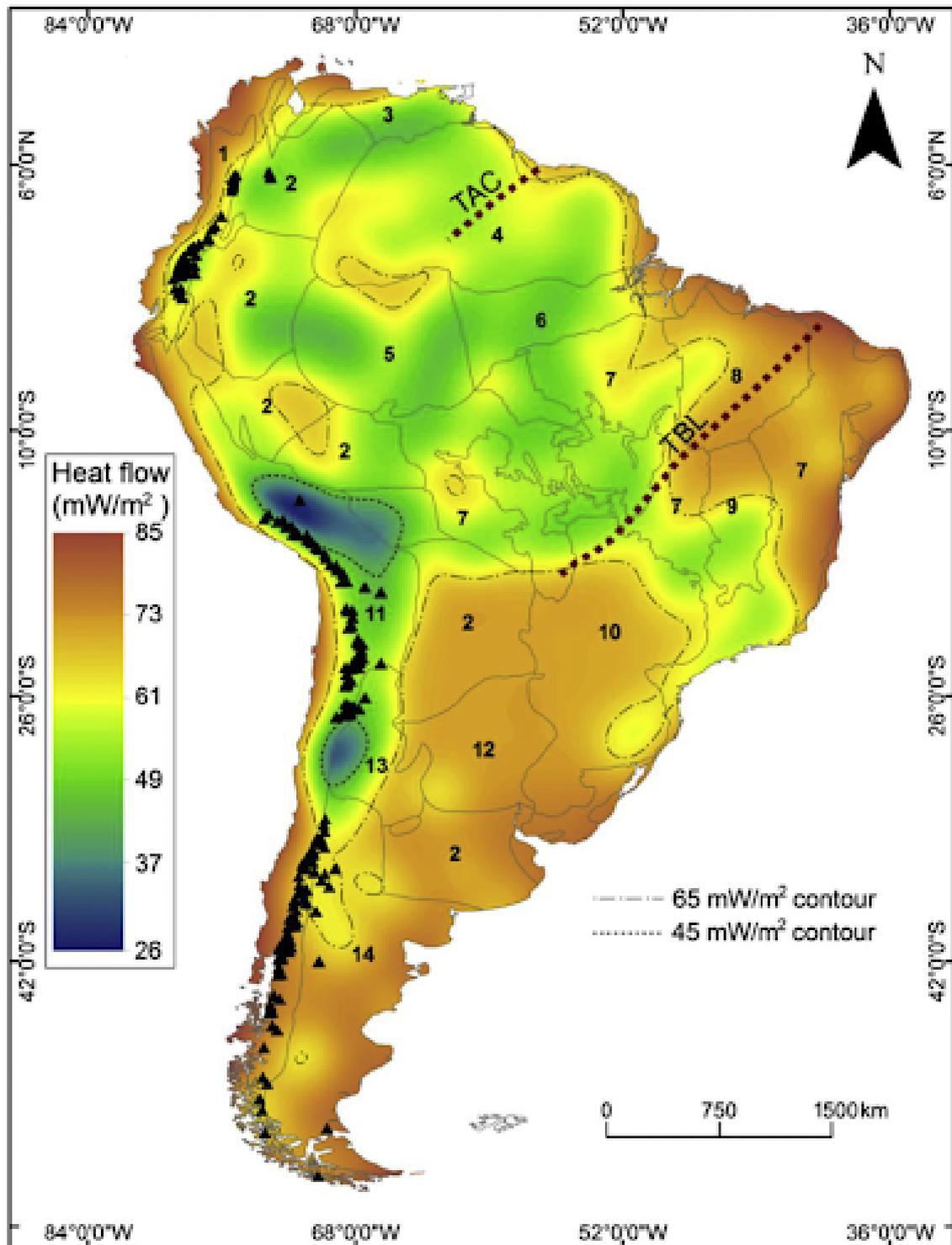
Fonte: Idárraga-García e Vargas (2018)

**Figura 3** – Mapa da diferença calculada entre a profundidades da Moho e da FCM



Fonte: Idárraga-García e Vargas (2018)

Figura 4 – Mapa do fluxo térmico calculado na América do Sul



Fonte: Idárraga-García e Vargas (2018)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MODELAGEM DIRETA

##### 3.1.1 Materiais

O presente estudo emprega diversas fontes e conjuntos de dados para a etapa de modelagem direta. As curvas de subducção da Placa de Nazca, conforme descritas por Anderson et al. (2007), constituem uma dessas fontes primárias. O estudo de Anderson emprega uma abordagem de realocação sísmica por busca em grade para a remoção de 1098 eventos dentro da placa subduzida, resultando na obtenção dos contornos da zona de Wadati-Benioff (ANDERSON et al., 2007). São utilizados dados do projeto Chile Argentina Geophysical Experiment (CHARGE), uma implementação de sísmica de banda larga, com o intuito de aprimorar as análises prévias relacionadas à geometria e à deformação dentro da placa subduzida de Nazca. Notavelmente, na região compreendida no intervalo de 30°S a 36°S, evidencia-se a ocorrência de subducção plana da Placa de Nazca a uma profundidade aproximada de 100 km (ANDERSON et al., 2007).

Adicionalmente, o trabalho se apoia no modelo Gravity Derived Moho for South America (GMSA12), desenvolvido por Meijde, Julià e Assumpção (2013), que oferece informações referentes à topografia da Moho na América do Sul, obtidas através da inversão de dados gravimétricos de satélites.

Além disso, são utilizados os dados das linhas isócronas, apresentadas por Seton et al. (2020), que constituem uma atualização das linhas delineadas por Müller et al. (1997). Essas linhas isócronas são desenvolvidas considerando o modelo global de placas de Müller et al. (2019) e incorporam modificações no espalhamento do fundo oceânico. Ademais, o modelo de linhas isócronas proposto por Seton et al. (2020) adota a escala de tempo geológico de Gee e Kent (2007).

O Geoist (Chen et al, 2020) é outro recurso empregado. Trata-se de um pacote de software geofísico de código aberto, desenvolvido em Python e baseado nos códigos do projeto Fatiando a Terra (UIEDA; JR; BARBOSA, 2013) que oferece uma ampla variedade de funcionalidades para o processamento de dados geofísicos. Com uma estrutura modular e metodologia orientada a objetos, o Geoist incorpora algoritmos para o processamento de dados de gravidade, campos potenciais, análise de catálogos de terremotos e séries temporais contínuas. Finalmente, este estudo também faz uso

dos dados de inclinação do campo magnético disponíveis na escala de tempo geológico fornecida pela organização The Geological Society of America (WALKER et al., 2013).

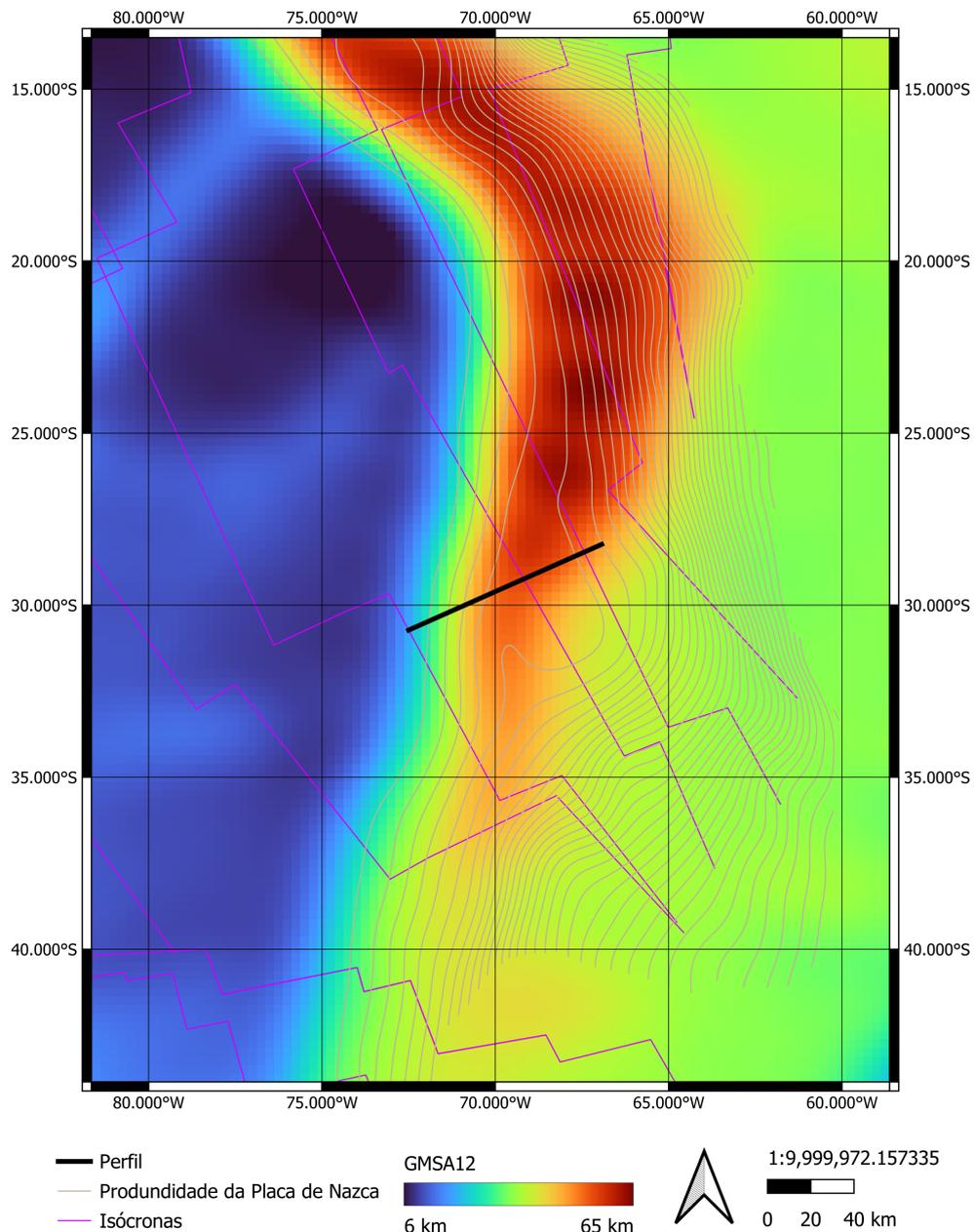
### 3.1.2 Métodos

A fim de representar as fontes magnéticas na região de Aconcágua, foram definidos três tipos distintos de fontes modeladas em forma de prismas para a construção dos modelos: fontes referentes à crosta continental, fontes correspondentes à placa magnetizada e fontes representativas da placa de magnetização invertida. Todas as fontes relativas à crosta continental possuem seus topos posicionados a 0 km de profundidade e suas bases determinadas pelos valores da Moho fornecidos pelo GMSA12. Para simplificar a geometria do sistema, todas as fontes que representam a placa subduzida possuem uma espessura fixa de 10 km.

Com o intuito de determinar o tipo de magnetização das fontes subduzidas (se normal ou reversa), foi realizada uma avaliação da posição relativa entre as isócronas, considerando suas respectivas idades e magnetizações, conforme a escala de tempo geológico estabelecida pela organização The Geological Society of America. Além disso, cada fonte modelada apresenta valores específicos de intensidade magnética, ângulo de inclinação magnética e ângulo de declinação magnética.

Foram desenvolvidos três modelos representativos das fontes magnéticas ao longo de um perfil que se estende entre as coordenadas  $-30,72^{\circ}\text{S}$ ,  $-72,499^{\circ}\text{W}$  e  $-28,23^{\circ}\text{S}$ ,  $-66,92^{\circ}\text{W}$ , abrangendo aproximadamente 600 km na região de Aconcágua (Figura 5). Em todos os modelos, o pacote de software Geost foi empregado para calcular as anomalias do campo total e os campos  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$ . Além disso, o ponto de observação escolhido para a simulação de cada modelo localiza-se a 465 km da superfície, correspondendo à altitude média dos satélites da missão Swarm.

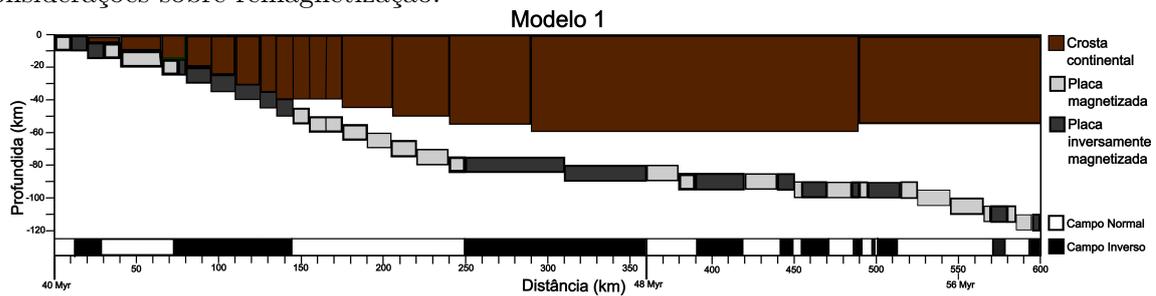
**Figura 5** – Representação de um transecto de 600 quilômetros estendendo-se das coordenadas -30,72°S; -72,499°W até -28,23°S; -66,92°W. O perfil inclui dados de isócronas, representados pelas linhas rosas e derivados de Seton et al. (2020), proporcionando perspectivas cronológicas sobre a evolução geológica da região. Além disso, a figura incorpora contornos de placa subduzida, representados por linhas cinzas e obtidos de Anderson et al. (2007) e profundidades estimadas da Moho pelo modelo GMSA12 (MEIJDE; JULIÀ; ASSUMPÇÃO, 2013), representado por cores no espectro azul-vermelho.



### 3.1.2.1 Modelos

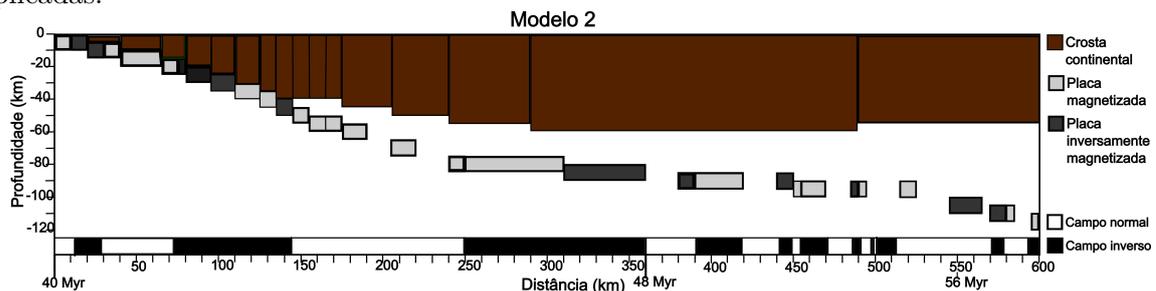
O Modelo 1 (Figura 6) é composto por um conjunto de 16 fontes representativas da crosta continental e 40 fontes relacionadas à placa subduzida. Destas últimas, 24 apresentam magnetização normal e 16 exibem magnetização invertida. Nesse modelo, a placa subduzida é contínua, não havendo espaços vazios lateralmente entre as fontes consecutivas. Em geral, os valores de intensidade magnética diminuem à medida que a profundidade aumenta. Entretanto, um aspecto importante é a simulação do magnetismo lamelar, realizado por um aumento abrupto na intensidade de magnetização na porção correspondente à subducção plana, abrangendo da vigésima à trigésima quarta fonte subduzida na direção NW.

**Figura 6** – O Modelo 1 ilustra as variações na intensidade magnética. Fontes localizadas a maiores profundidades que a zona de subducção plana apresentam uma redução na intensidade magnética. Por outro lado, as fontes situadas na parte plana da subducção, abaixo da zona de Wadati-Benioff, mostram um pequeno aumento na intensidade magnética, o qual é atribuído ao magnetismo lamelar. A placa neste modelo apresenta continuidade ininterrupta, não havendo considerações sobre remagnetização.



O Modelo 2 (Figura 7) guarda similaridades com o Modelo 1, entretanto, houve modificações. Cinco fontes tiveram o tipo de magnetização alterado e nove prismas foram excluídos. Essas mudanças visam simular os efeitos de remagnetização, desmagnetização e fusão nas fontes de profundidade intermediária e alta.

**Figura 7** – Ilustração do Modelo 2, uma versão avançada do Modelo 1, que incorpora o fenômeno da remagnetização, ao alterar o tipo de magnetização em cinco fontes, e simula desmagnetização e fusão, ao remover nove prismas. A placa agora apresenta interrupções, refletindo as mudanças aplicadas.



Já o Modelo 3 apresenta geometria similar ao Modelo 2, porém com uma variante: apresenta valores de declinação modificados aplicados ao segmento da placa profundamente subduzida. Este ajuste tem o propósito de simular a paleomovimentação da Placa de Nazca sob a Placa Sul Americana.

## 3.2 TÉCNICA DAS FONTES EQUIVALENTES

### 3.2.1 Materiais

O presente estudo se vale de informações advindas dos dados satelitais da missão Swarm da Agência Espacial Europeia (ESA) durante o intervalo de tempo de 2017 a 2022 (disponíveis em: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm>). Esta missão é a pioneira da ESA em adotar uma configuração de constelação para observação terrestre. A missão consiste em três satélites similares, denominados Alpha, Bravo e Charlie (A, B e C), lançados em órbita próxima aos pólos terrestres no dia 22 de novembro de 2013.

O principal objetivo da missão Swarm é conduzir uma investigação minuciosa e extensiva sobre o campo geomagnético terrestre, monitorando sua evolução ao longo do tempo e examinando o campo elétrico na atmosfera. Para atingir tais metas, a missão emprega uma constelação de satélites equipados com magnetômetros e outros instrumentos científicos especializados. Esta abordagem permite uma análise detalhada e precisa desses fenômenos físicos, contribuindo significativamente para o entendimento da magnetosfera terrestre e dos processos atmosféricos correlatos.

Além disso, o projeto faz uso dos dados provenientes do Earth Magnetic Anomaly Grid 2 (EMAG2), que constitui um conjunto de informações compiladas a partir de medições magnéticas coletadas por satélites, embarcações e medições aéreas (MAUS et al., 2009). Esta versão aprimorada apresenta uma resolução melhorada de 2 minutos de arco em comparação com a versão anterior de 3 minutos de arco, e uma altitude reduzida de 5 km para 4 km acima do geóide (MAUS et al., 2009). Adicionalmente, empregam-se os dados de anomalias de campo, que foram calculados para os modelos adquiridos durante a fase de modelagem direta (Seção 3.1).

Este estudo empregou ferramentas computacionais do projeto Fatiando a Terra para auxiliar na condução da pesquisa. O Fatiando a Terra é uma plataforma de código aberto voltada para fornecer suporte às geociências, oferecendo bibliotecas em Python específicas para processamento de dados, modelagem e inversão em diferentes campos

geocientíficos (UIEDA; JR; BARBOSA, 2013). Dentro do escopo deste estudo, foram adotados dois pacotes específicos do Fatiando a Terra: Harmonica (SOLER; UIEDA, 2021) e Verde (UIEDA, 2018).

O Harmonica se concentra no tratamento e na modelagem de informações obtidas por levantamentos gravimétricos e magnéticos. Esta plataforma oferece uma gama de procedimentos de processamento convencionais, como cálculos de correção de Bouguer e terreno, bem como funcionalidades para modelar formas geométricas básicas e realizar métodos de inversão (SOLER; UIEDA, 2021).

Enquanto isso, o Verde é um pacote especializado no processamento e interpolação de dados espaciais, como informações batimétricas e levantamentos geofísicos. Sua principal função consiste em converter esses dados em grades regulares, por meio de técnicas de interpolação inspiradas no campo do aprendizado de máquina (UIEDA, 2018).

### 3.2.2 Métodos

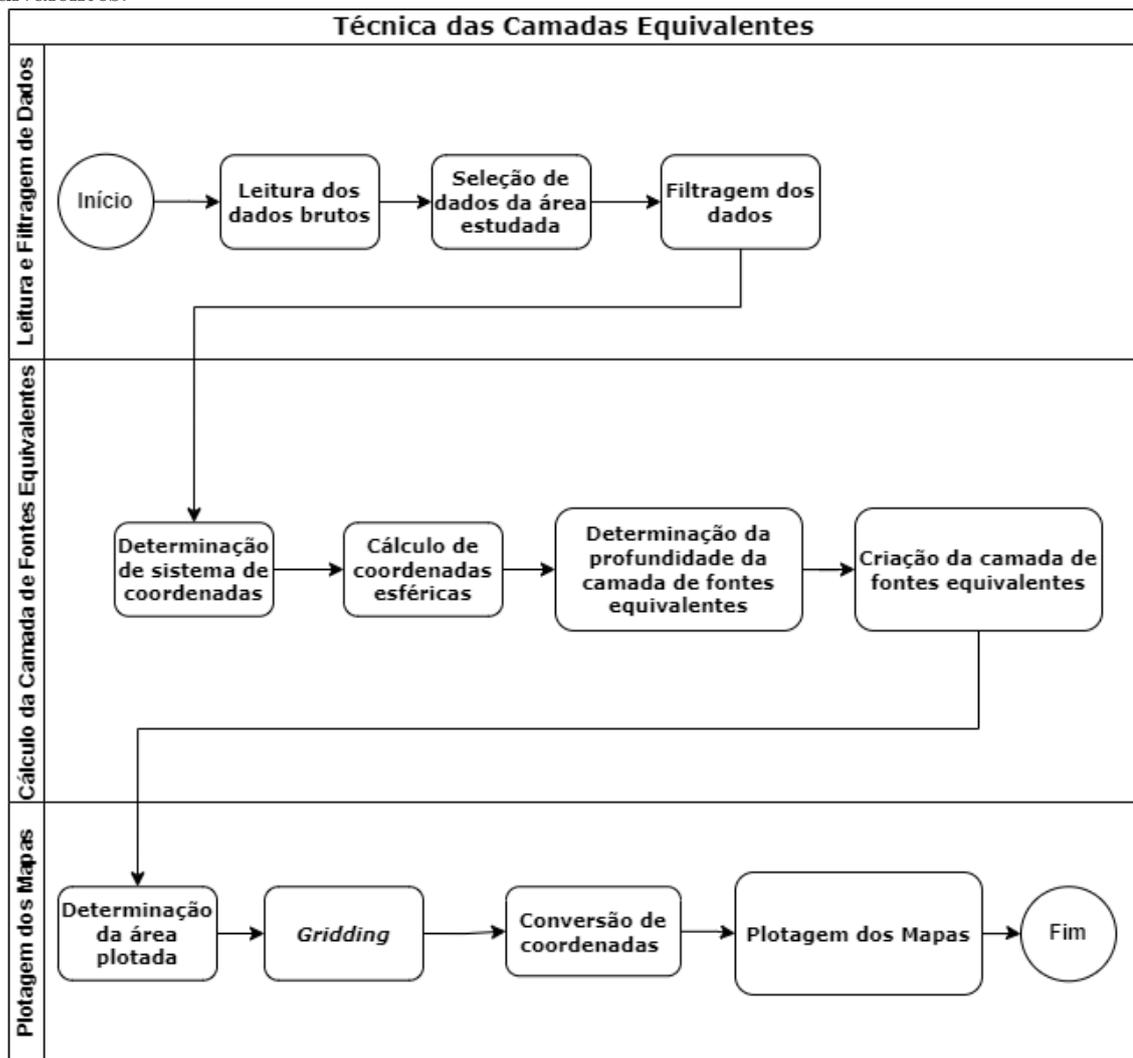
Os resultados derivados do processo de cálculo das camadas de fontes equivalentes foram adquiridos por meio de um algoritmo desenvolvido em Python. Este algoritmo segue uma sequência de etapas bem definidas (Figura 8):

- **Leitura e Filtragem de Dados:** a primeira etapa envolve a leitura dos dados brutos de uma fonte específica, seguida pela seleção de dados pertinentes à área de interesse. Posteriormente, os dados são filtrados para remover partes com alto valor de erro estimado, assegurando assim a qualidade dos dados utilizados na análise;
- **Cálculo da Camada de Fontes Equivalentes:** após a preparação dos dados, o algoritmo procede ao cálculo da camada de fontes equivalentes. Este processo é iniciado pela determinação de um sistema de coordenadas adequado para a representação do espaço em estudo. Em seguida, as coordenadas esféricas necessárias para a análise são calculadas, incluindo a determinação da profundidade da camada de fontes. Utilizando as coordenadas esféricas calculadas e os valores da anomalia do campo total, o algoritmo cria a camada de fontes equivalentes.
- **Plotagem dos Mapas:** nesta fase, o algoritmo se concentra na representação gráfica dos resultados. O processo começa com a determinação da região específica a ser representada em coordenadas geodésicas. Em seguida, ocorre o processo de gridding, e a conversão do grid de coordenadas geodésicas para esféricas,

possibilitando a representação espacial dos resultados calculados. Finalmente, o algoritmo gera os mapas a partir dos dados brutos e dos resultados obtidos do cálculo das camadas equivalentes. Estes mapas oferecem uma representação visual das informações geofísicas, facilitando uma interpretação mais acessível e informativa dos dados.

O algoritmo foi empregado de maneira independente nos conjuntos de dados da missão Swarm e do EMAG2. Foi utilizada a profundidade fixa de 100 km para as camadas de fontes equivalentes, com o intuito de realçar o conteúdo de menor frequência do dado, consequentemente realçando as anomalias magnéticas que se encontram em profundidades maiores.

**Figura 8** – Fluxograma do algoritmo para aplicação da técnica das camadas de fontes equivalentes.



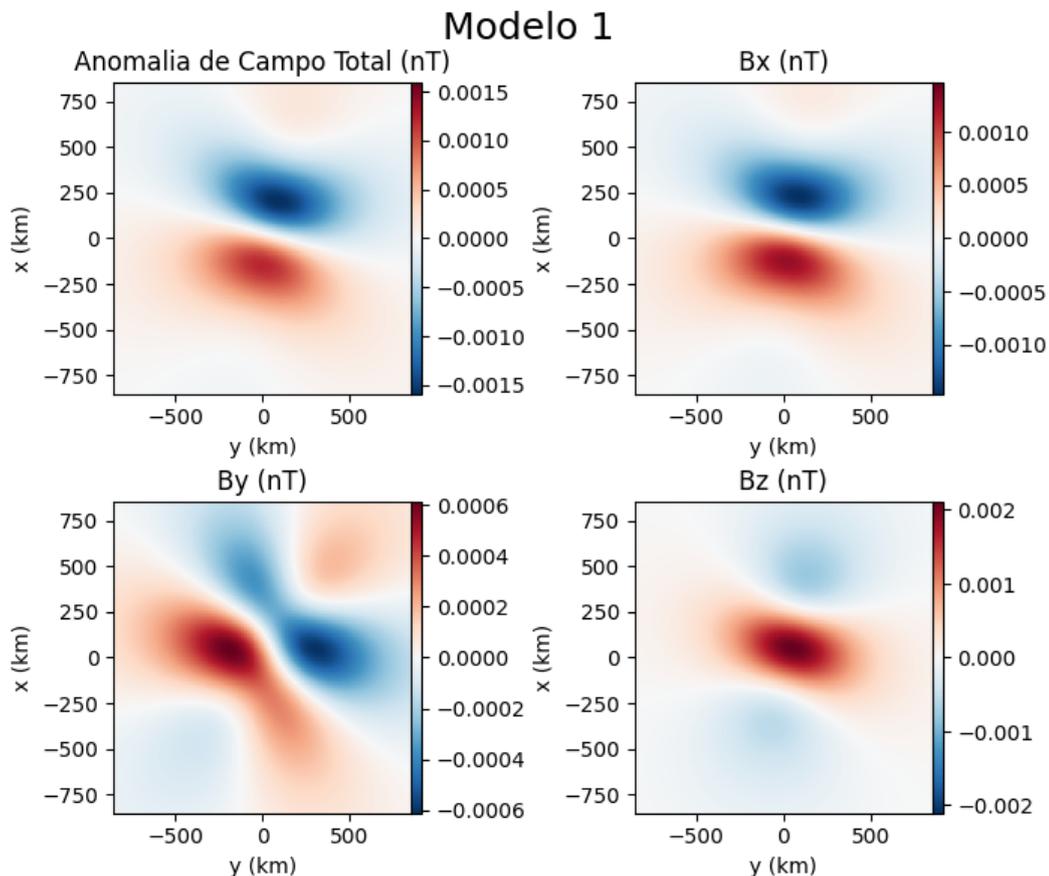
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 MODELAGEM DIRETA

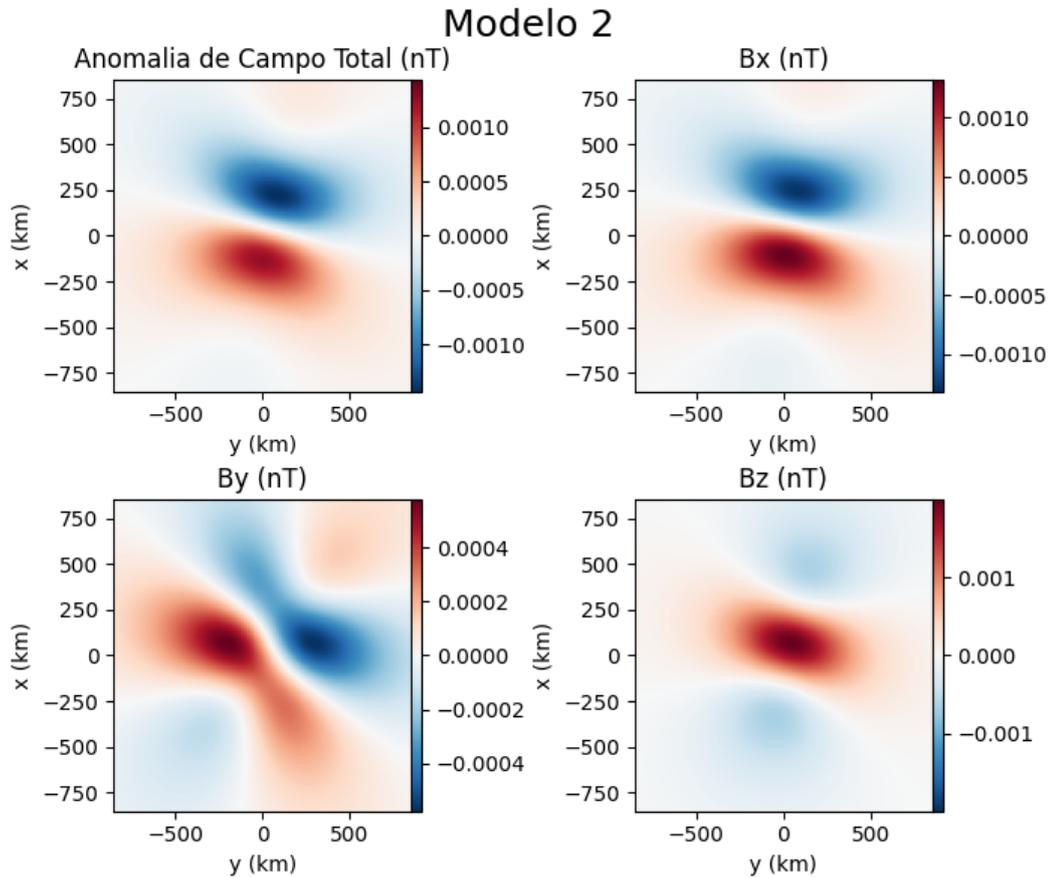
Nesta seção, os resultados das anomalias do campo total e seus componentes individuais ( $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$ ) são apresentados para os três modelos (Figuras 9, 10 e 11), calculados por meio do software Geost.

Não foram identificadas diferenças significativas entre eles. Especificamente, nos modelos dois e três, observam-se pequenas alterações nas posições em que as fontes subduzidas localizam em maiores profundidades. Contudo, os efeitos das fontes menos profundas parecem ter maior impacto do que as fontes mais profundas, dificultando a identificação de diferenças notáveis nos resultados. Isso implica que a detecção de fontes situadas em profundidades consideráveis pode não ser precisa quando realizada a partir de altitudes satelitais.

**Figura 9** – Representação das anomalias do campo total e dos componentes individuais ( $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$ ) obtidos no Modelo 1 por meio do software Geost.



**Figura 10** – Ilustração das anomalias do campo total e dos componentes individuais ( $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$ ) gerados no Modelo 2 utilizando o software Geoist.



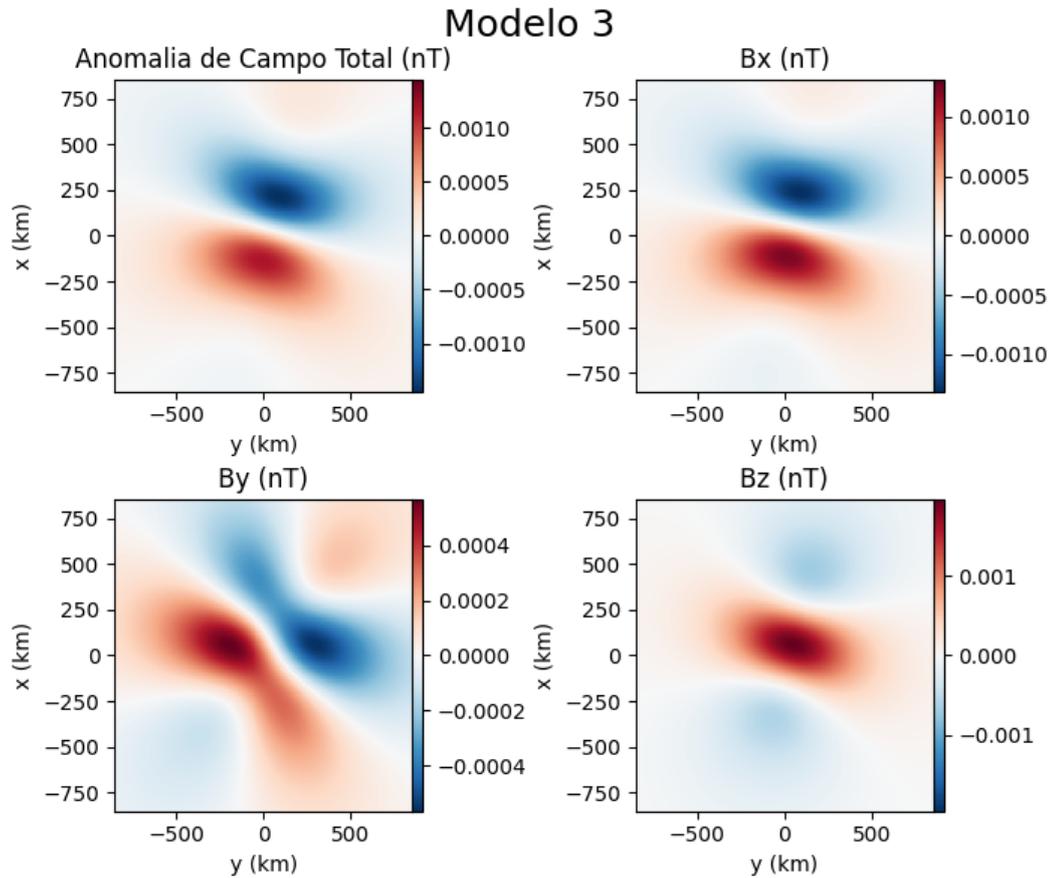
## 4.2 TÉCNICA DAS FONTES EQUIVALENTES

Os dados obtidos da missão Swarm (Figura 12), infelizmente, não se mostraram adequados para a análise proposta, uma vez que a resolução não foi suficiente para a obtenção de imagens claras da região em estudo. Em contrapartida, o modelo EMAG2, apesar de não possuir cobertura abrangente para análise na porção continental da região, apresentou uma cobertura melhor nas áreas marinhas e costeiras (Figura 13).

Nas áreas marinhas e costeiras, foi possível identificar a continuidade das anomalias nas zonas situadas ao longo do limite entre a Placa de Nazca e a Placa Sul-Americana. Tais continuidades sugerem que o sinal da placa fria subduzida tem influência sobre a anomalia de campo total, ao menos nas porções mais superficiais.

Adicionalmente, observou-se a presença do padrão zebado magnético, que

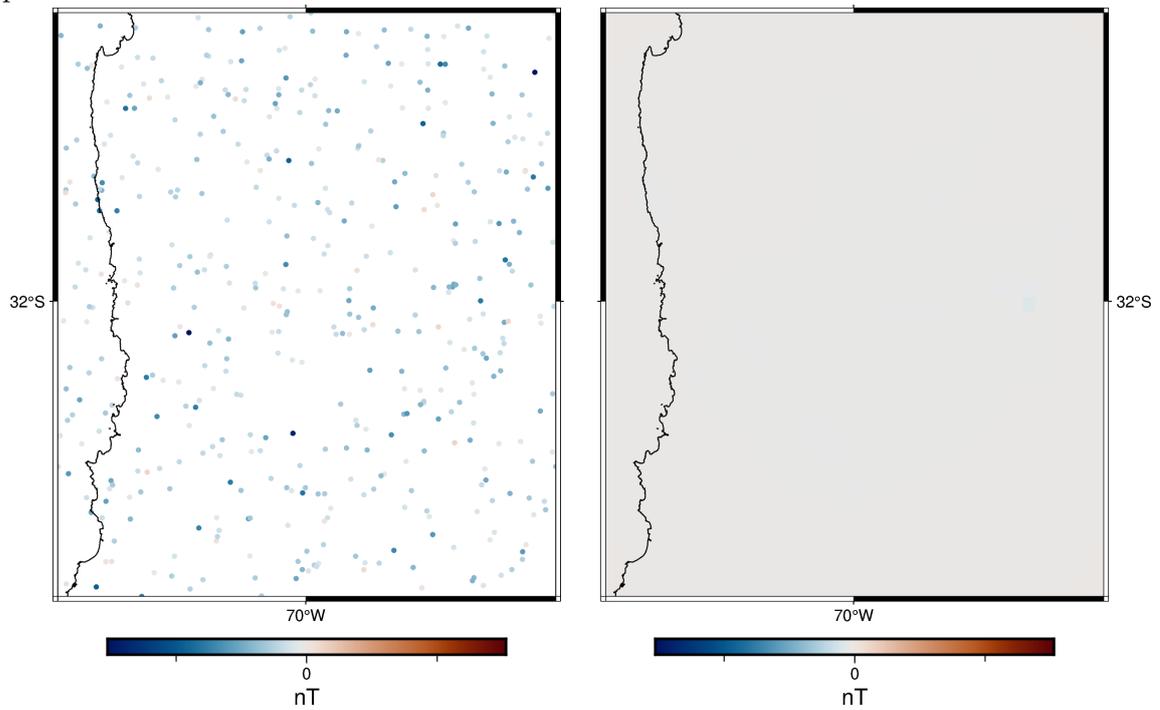
**Figura 11** – Visualização das anomalias do campo total e dos componentes individuais ( $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$ ) calculados no Modelo 3 com o auxílio do software Geost.



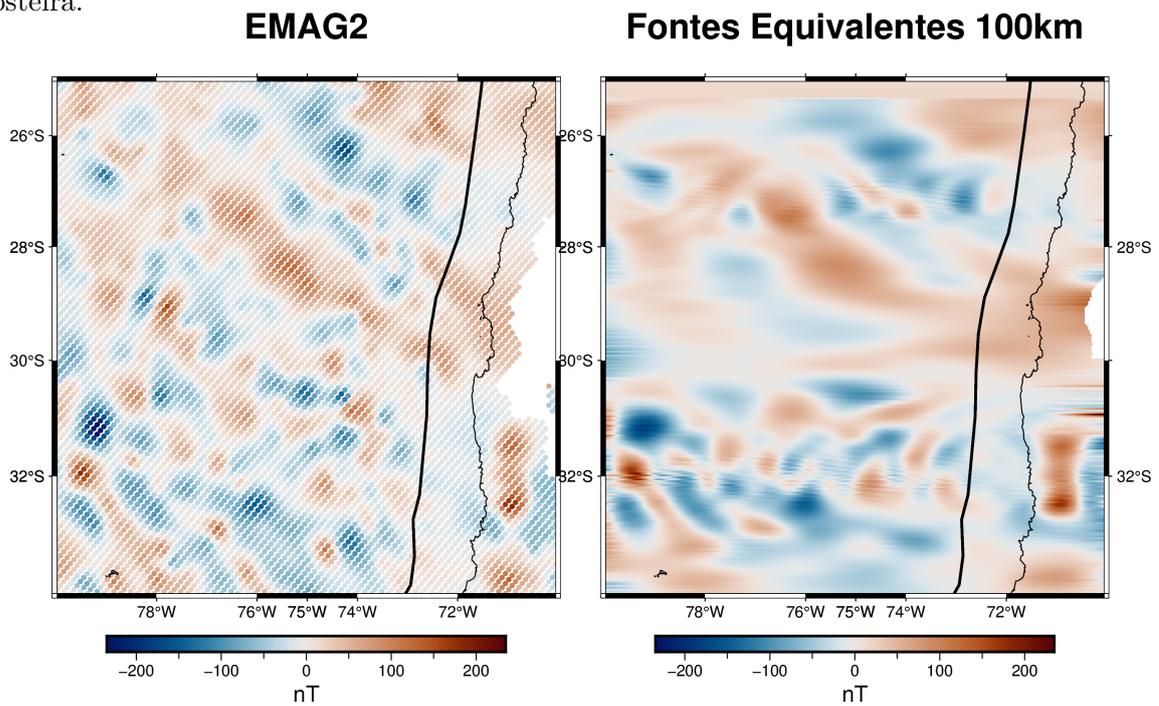
geralmente segue a direção de deslocamento da Placa de Nazca, aproximadamente NE. Este fenômeno também foi observado a leste do limite entre as placas, o que corrobora a hipótese de que as fontes magnéticas da placa fria subduzida influenciam a anomalia de campo total abaixo da porção continental. Observou-se, ainda, a presença do fenômeno de aliasing em algumas áreas do mapa de fontes equivalentes, sobretudo nas proximidades das anomalias de módulo.

A implementação do algoritmo destinado à aplicação da técnica de camadas de fontes equivalentes aos dados adquiridos na fase de modelagem direta (conforme descrito na Seção 3.2.2) não resultou em sucesso. A densidade do *grid* é excessivamente alta, demandando uma quantidade substancial de memória de acesso aleatório. Este obstáculo poderia ser superado através do emprego de técnicas de decimação de dados.

**Figura 12** – À esquerda: Mapa dos dados bruto do campo de anomalia total, adquiridos entre os anos de 2017 e 2022 pela missão Swarm, junto a uma linha contínua preta que representa a linha costeira; À direita: resultado da camada de fontes equivalentes calculada, linha preta representa linha costeira.



**Figura 13** – À esquerda: Mapa dos dados bruto do campo de anomalia total do conjunto EMAG2, junto a duas linhas contínuas pretas. A linha a oeste representa o limite entre as placas de Nazca e Sul-Americana e a leste corresponde à linha de costa; À direita: resultado da camada de fontes equivalentes calculada e de duas linhas contínuas pretas. A linha ocidental delimita as placas de Nazca e Sul-Americana, enquanto a linha oriental coincide com a linha costeira.



## 5 CONCLUSÃO

Este estudo realizou uma investigação das fontes magnéticas, utilizando dados de missões satelitais e softwares geofísicos especializados. Os dados dos satélites da missão Swarm e do Earth Magnetic Anomaly Grid 2 (EMAG2) foram analisados com o auxílio de ferramentas computacionais, como as bibliotecas Harmonica e Verde do projeto Fatiando a Terra e o Geost.

A análise focou nas anomalias magnéticas na região de Aconcagua. Para representar as complexas fontes magnéticas ao longo de um perfil de 600 quilômetros nesta região, foram desenvolvidos três modelos magnéticos distintos (Modelo 1, Modelo 2 e Modelo 3). Esses modelos foram fundamentais para simular e compreender as variações na intensidade magnética, ângulo de inclinação e declinação.

O Modelo 1 serviu como uma representação inicial das fontes magnéticas, enquanto os modelos subsequentes incorporaram refinamentos, como remagnetização, desmagnetização e valores modificados de declinação. Esses refinamentos visavam simular processos geológicos como subducção, remobilização e paleomovimento. No entanto, não foram identificadas diferenças significativas entre os resultados de anomalia do campo total e cada componente do campo magnético calculado para cada modelo.

Os dados do EMAG2, juntamente com os dados satelitais da missão Swarm e as ferramentas computacionais do projeto Fatiando a Terra, foram utilizados para analisar as anomalias magnéticas a partir da aplicação da técnica da camada de fontes equivalentes. Os resultados revelaram a continuidade de anomalias nas áreas marinhas entre a Placa de Nazca e a Placa Sul-Americana, sugerindo a influência do sinal da placa subduzida sobre a anomalia de campo total.

A avaliação das anomalias magnéticas na região de Aconcagua foi limitada devido à escassez de dados, tanto nas anomalias do EMAG2, em uma considerável porção da parcela continental, quanto na baixa cobertura dos dados da missão Swarm. A resolução dessa limitação poderia ser alcançada por meio da inclusão de informações suplementares provenientes de satélites como Challenging Minisatellite Payload (CHAMP), Magsat e Ørsted. No entanto, a análise desses dados não foi realizada devido à complexidade técnica envolvida e ao extenso tempo necessário para tal análise.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M. et al. Geometry and brittle deformation of the subducting nazca plate, central chile and argentina. *Geophysical Journal International*, Oxford University Press (OUP), v. 171, n. 1, p. 419–434, out. 2007. ISSN 1365-246X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03483.x>.
- BLAKELY, R. J. *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge university press, 1996. 179 p.
- CAHILL, T.; ISACKS, B. L. Seismicity and shape of the subducted nazca plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Wiley Online Library, v. 97, n. B12, p. 17503–17529, 1992.
- CORREA, R. T.; VIDOTTI, R. M.; OKSUM, E. Curie surface of borborema province, brazil. *Tectonophysics*, v. 679, p. 73–87, 2016. ISSN 0040-1951. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195116301020>.
- DUNLOP, D. J.; KLETETSCHKA, G. Multidomain hematite: a source of planetary magnetic anomalies? *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 28, n. 17, p. 3345–3348, 2001.
- FERRÉ, E. C. et al. Magnetic sources in the earth's mantle. *Nat Rev Earth Environ*, n. 2, p. 59–69, 1 2021.
- FROST, B. R.; SHIVE, P. N. Magnetic mineralogy of the lower continental crust. *Journal of Geophysical Research*, v. 91, p. 6513–6521, 5 1986.
- GEE, J.; KENT, D. Source of oceanic magnetic anomalies and the geomagnetic polarity timescale. In: \_\_\_\_\_. *Treatise on Geophysics*. Elsevier, 2007. p. 455–507. ISBN 9780444527486. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00097-3>.
- GEIGER, C. A. *Solid solutions in silicate and oxide systems*. The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 2001. 349-383 p.
- GUTSCHER, M.-A. Andean subduction styles and their effect on thermal structure and interplate coupling. *Journal of South American Earth Sciences*, Elsevier, v. 15, n. 1, p. 3–10, 2002.
- GUTSCHER, M.-A. et al. Geodynamics of flat subduction: Seismicity and tomographic constraints from the andean margin. *Tectonics*, Wiley Online Library, v. 19, n. 5, p. 814–833, 2000.
- HANSEN, R. O.; MIYAZAKI, Y. Continuation of potential fields between arbitrary surfaces. *GEOPHYSICS*, Society of Exploration Geophysicists, v. 49, n. 6, p. 787–795, jun. 1984. ISSN 1942-2156. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1190/1.1441707>.

- HUENE, R. V. et al. Tectonic control of the subducting Juan Fernández ridge on the Andean margin near Valparaíso, Chile. *Tectonics*, Wiley Online Library, v. 16, n. 3, p. 474–488, 1997.
- IDÁRRAGA-GARCÍA, J.; VARGAS, C. A. Depth to the bottom of magnetic layer in South America and its relationship to Curie isotherm, Moho depth and seismicity behavior. *Geodesy and Geodynamics*, Elsevier, v. 9, n. 1, p. 93–107, 2018.
- JORDÁN, T. E. et al. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca Plate. *Geological Society of America Bulletin*, Geological Society of America, v. 94, n. 3, p. 341–361, 1983.
- KENDRICK, E. et al. The Nazca–South America Euler vector and its rate of change. *Journal of South American Earth Sciences*, Elsevier, v. 16, n. 2, p. 125–131, 2003.
- KLEIN, F. et al. Magnetite in seafloor serpentinite—some like it hot. *Geology*, Geological Society of America, v. 42, n. 2, p. 135–138, 2014.
- KUPENKO, I. et al. Magnetism in cold subducting slabs at mantle transition zone depths. *Nature*, Nature Publishing Group UK London, v. 570, n. 7759, p. 102–106, 2019.
- LÉCUYER, C.; RICARD, Y. Long-term fluxes and budget of ferric iron: implication for the redox states of the Earth's mantle and atmosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, Elsevier, v. 165, n. 2, p. 197–211, 1999.
- MAUS, S. et al. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth magnetic anomaly grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Wiley Online Library, v. 10, n. 8, 2009.
- MCENROE, S. A. et al. What is magnetic in the lower crust? *Earth and Planetary Science Letters*, Elsevier, v. 226, n. 1-2, p. 175–192, 2004.
- MCENROE, S. A. et al. Magnetism at depth: A view from an ancient continental subduction and collision zone. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 19, n. 4, p. 1123–1147, 2018. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2017GC007344>.
- MEIJDE, M. Van der; JULIÀ, J.; ASSUMPÇÃO, M. Gravity derived Moho for South America. *Tectonophysics*, Elsevier, v. 609, p. 456–467, 2013.
- MÜLLER, R. D. et al. A global plate model including lithospheric deformation along major rifts and orogens since the Triassic. *Tectonics*, American Geophysical Union (AGU), v. 38, n. 6, p. 1884–1907, jun. 2019. ISSN 1944-9194. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/2018TC005462>.
- MÜLLER, R. D. et al. Digital isochrons of the world's ocean floor. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 102, n. B2, p. 3211–3214, 1997. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96JB01781>.
- PARDO, M. et al. Flat-slab to steep subduction transition zone in central Chile–western Argentina: body waves tomography and state of stress. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*. 2004. v. 2004, p. S51B–0164.

- REIS, A. L. A. dos. Desenvolvimentos teóricos da camada equivalente e suas aplicações a dados magnéticos. 2020.
- ROBINSON, P. et al. Lamellar magnetism in the haematite-ilmenite series as an explanation for strong remanent magnetization. *Nature*, Nature Publishing Group UK London, v. 418, n. 6897, p. 517–520, 2002.
- SETON, M. et al. A global data set of present-day oceanic crustal age and seafloor spreading parameters. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, American Geophysical Union (AGU), v. 21, n. 10, out. 2020. ISSN 1525-2027. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/2020GC009214>.
- SOLER, S. R.; UIEDA, L. Gradient-boosted equivalent sources. *Geophysical Journal International*, Oxford University Press (OUP), v. 227, n. 3, p. 1768–1783, ago. 2021. ISSN 1365-246X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggab297>.
- UENVER-THIELE, L. et al. Phase relations of fe-mg spinels including new high-pressure post-spinel phases and implications for natural samples. *American Mineralogist*, Mineralogical Society of America, v. 102, n. 10, p. 2054–2064, 2017.
- UIEDA, L. Verde: Processing and gridding spatial data using Green's functions. *Journal of Open Source Software*, v. 3, n. 29, p. 957, 2018. ISSN 2475-9066.
- UIEDA Leonardo; JR Vanderlei C. Oliveira; BARBOSA Valéria C. F. Modeling the Earth with Fatiando a Terra. In: WALT Stéfan van der; MILLMAN Jarrod; HUFF Katy (Ed.). *Proceedings of the 12th Python in Science Conference*. 2013. p. 92 – 98.
- WALKER, J. et al. The Geological Society of America Geologic Time Scale. *GSA Bulletin*, v. 125, n. 3-4, p. 259–272, 03 2013. ISSN 0016-7606. Disponível em: <https://doi.org/10.1130/B30712.1>.
- WANG, C.-F. L. . Y. L. . J. A global reference model of curie-point depths based on emag2. *Scientific Reports*, n. 7, p. 2045–2322, 3 2017.
- WASILEWSKI, P. J.; MAYHEW, M. A. The moho as a magnetic boundary revisited. *Geophysical Research Letters*, v. 19, n. 22, p. 2259–2262, 11 1992.
- ZIEMNIAK, S. E.; CASTELLI, R. A. Immiscibility in the fe<sub>3</sub>o<sub>4</sub>-fecn<sub>2</sub>o<sub>4</sub> spinel binary. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, v. 64, n. 11, p. 2081–2091, 2003. ISSN 0022-3697. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022369703002373>.