

Universidade de Brasília
Instituto de Geociências

Victor Miranda Veloso

Caracterização Geofísica dos Complexos Americano do Brasil e Mangabal

Brasília
2023

Universidade de Brasília
Instituto de Geociências

Victor Miranda Veloso

Caracterização Geofísica dos Complexos Americano do Brasil e Mangabal

Trabalho apresentado ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília como requisito parcial e obrigatório para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Profa. Dra. Roberta Mary Vidotti

Brasília
2023

Victor Miranda Veloso

Caracterização Geofísica dos Complexos Americano do Brasil e Mangabal

Brasília, 21 de dezembro de 2023

Orientador: Profa. Dra. Roberta Mary
Vidotti

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Giuliano Sant'Anna Marotta

Profa. Dra. Maria Emília Schutesky

Resumo

A partir de levantamento de dados aeromagnetométricos, *gridding* e Análise de Sinais, foram detectadas anomalias magnéticas relativamente intensas próximas às localidades de Americano do Brasil e Sanclerlândia, chamados de Complexos Americano do Brasil e Mangabal, respectivamente. Fazem parte de um aglomerado de corpos do Neoproterozoico na Faixa Brasília, compostos principalmente por rochas máfico-ultramáficas, resultado de intrusões (Augustin *et al.* 2022). Quadrantes foram determinados para gerar modelagem 3D e seus vetores através do método de inversão, quadrante A (Americano do Brasil) e M (Mangabal). Em tais quadrantes também há partes de dois diques, chamados aqui de a-b e c-d. Nos modelos 3D dos quadrantes A e M, há corpos de diferentes volumes e profundidades. Os corpos da modelagem 3D são moldados utilizando isosuperfícies de susceptibilidades magnéticas que variam de um para o outro. Os dois quadrantes foram submetidos ao método de inversão para que fossem vistos os vetores em cada um de seus corpos. A partir dos resultados e interpretação, foi possível reafirmar informações sobre os Complexos e os diques em seus quadrantes. Além de obter informações pouco visíveis em superfície, como as características magnéticas dos diques ali presentes, e suas relações com os corpos ao redor.

Abstract

Using aeromagnetic data acquisition, gridding, and Signal Analysis, relatively intense magnetic anomalies were detected near the localities of Americano do Brasil and Sancerlândia, referred to as the Americano do Brasil and Mangabal Complexes, respectively. These complexes are part of a cluster of Neoproterozoic bodies in the Brasília Belt, primarily composed of mafic-ultramafic rocks, resulting from intrusions (Augustin *et al.* 2022). Quadrants, namely A (Americano do Brasil) and M (Mangabal), were determined for 3D modeling and vector analysis through the inversion method. Within these quadrants, there are also parts of two dikes, labeled as a-b and c-d. In the 3D models of quadrants A and M, bodies of varying volumes and depths were identified. The bodies in the 3D modeling are shaped using isosurfaces of magnetic susceptibilities that vary from one to another. Both quadrants underwent inversion to visualize vectors within each of their bodies. Based on the results and interpretation, it was possible to reaffirm information about the Complexes and the dikes in their respective quadrants. Additionally, obtaining previously unseen information on surface features, such as the magnetic characteristics of the dikes present, and their relationships with the surrounding bodies.

Lista de Figuras

1.1	Mapa de limites estaduais com a localização da área total de levantamento de dados, quadrantes definidos e principais localidades referentes aos Complexos Americano do Brasil (Americano do Brasil) e Mangabal (Sanclerlândia).	10
1.2	Mapa geológico simplificado, incluindo as intrusões máfico-ultramáficas do Arco Arenópolis: (1-2) Complexo Mangabal; (3) Complexo Americano do Brasil; (4) Água Fria; (5) Adelândia; (6) Fronteira Norte; (7) Córrego Seco; (8) Águas Claras; (9) Capelinha; (10-11) Taquaral; (12) Damolândia; (13) Santa Bárbara; (14) Goianira-Trindade; e (15) Palmeiras.	11
2.1	Imagens de <i>gridding</i> bi-direcional dos resultados de três correções dos dados do levantamento aeromagnetométrico da área total: (a) compensação magnética dinâmica; (b) correções de paralaxe e variação diurna; (c) e em relação ao campo magnético teórico (IGRF).	12
2.2	Mapa de Sinal Analítico de parte da área total. Contém dois quadrantes, e seus respectivos complexos, que demarcam as áreas utilizadas no método de inversão 3D, são eles: (A) Complexo Americano do Brasil; e (M) Complexo Mangabal. Há dois lineamentos: a-b e c-d, diques. Obtido a partir do Sinal Analítico do <i>grid</i> IGRF (Figura 2.1).	13
2.3	Etapas da utilização do método <i>Magnetization Vector Inversion</i> (MVI): fonte de dados teórica em forma cubo 3D, a 20 m de profundidade e vértices de 40 m, com vetores de magnetização no sentido leste-oeste (a); anomalia magnética gerada, vista em <i>grid</i> com células de vértices de 100 m, campo magnético aplicado com inclinação de 90° (b); inversão aplicada no <i>grid</i> , gerando vetores de direção semelhantes e de mesmo sentido leste-oeste (c).	16

3.1	(1) Quadrante Complexo Americano do Brasil e (2) seu modelo 3D demonstrando os corpos A1, A2 e A3, e partes dos diques a-b e c-d. Todos os corpos definidos, área e volume, por suas isosuperfícies correspondentes à susceptibilidade magnética, definida em escala de cores.	18
3.2	Parte do modelo Complexo Americano do Brasil destacando os corpos A1 e A2 partidos no sentido leste-oeste, mostrando todas suas isosuperfícies de diferentes susceptibilidades magnéticas, em escala de cores. A1 de maior volume e com um interior de maior susceptibilidade do que A2.	19
3.3	(1) Quadrante Complexo Mangabal e (2) seu modelo 3D. Contém os corpos M1, M2, o grupo M3, M4 e seguimentos do diques a-b (logo acima de M4) e c-d. Todos os corpos definidos, área e volume, por suas isosuperfícies correspondentes à susceptibilidade magnética, definida em escala de cores.	20
3.4	Partes do modelo 3D Complexo Mangabal a partir de diferentes pontos de observação. Visão dos corpos M1, M2, grupo M3, com seus respectivos azimutes e graus de inclinação em relação ao eixo Z: (1) 203° e 33°; (2) 72° e 13°. (3) Parte do mesmo modelo, mostrando o corpo M4 e os diques a-b e c-d, com ponto de observação de azimute e inclinação de 79° e 50°, respectivamente. Além da susceptibilidade magnética das isosuperfícies de todos os corpos (em 1, 2 e 3) em escala de cores.	21
3.5	Modelo 3D do quadrante Complexo Americano do Brasil (Figura 2.2). Podem ser vistos os corpos. Todos os corpos com vetores correspondentes à direção da magnetização e susceptibilidade magnética, definida na escala de cores de suas isosuperfícies.	23
3.6	Modelo 3D do quadrante Complexo Mangabal (Figura 2.2). Podem ser vistos os corpos M1, M2, M4, o grupo M3 e parte dos diques a-b e c-d. Todos os corpos com vetores correspondentes à direção da magnetização e susceptibilidade magnética, definida na escala de cores de suas isosuperfícies.	24

Sumário

1	Introdução	8
1.1	Contextualização	8
1.2	Objetivo	9
1.3	Localização	10
2	Metodologia	12
2.1	Processamento de Dados Aeromagnetométricos	12
2.2	Método de Inversão 3D	14
3	Resultados	17
3.1	Modelos 3D	17
3.1.1	Modelo Americano do Brasil	17
3.1.2	Modelo Mangabal	19
3.2	Vetores 3D	22
3.2.1	Vetores Americano do Brasil	22
3.2.2	Vetores Mangabal	23
4	Conclusão	26
	Referências	27

1 Introdução

1.1 Contextualização

Conhecido como o método geofísico mais antigo, a magnetometria trata basicamente da coleta de dados do campo magnético da Terra. É o principal método na pesquisa de minerais metálicos, mas também pode ser utilizado em outros levantamentos como, por exemplo, na busca por petróleo, na qual através da magnetometria é possível a identificação de estruturas como domos e falhas, que podem indicar a presença de suas jazidas (ALVES *et al.*, 2022, p. 18). Como descreve Telford *et al.* (1990, p. 67), o campo magnético terrestre é composto por: campo principal, de origem no núcleo externo; campo externo, gerado por correntes elétricas da ionosfera; e variações específicas no campo principal, causadas por anomalias magnéticas locais e próximas à superfície.

Há décadas a forma mais comum de obtenção de dados geofísicos em grandes áreas é através do uso de aeronaves. Os levantamentos aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos utilizam sensores e equipamentos montados em aviões para coletar dados do subsolo e superfície terrestre. O projeto Atlas Aerogeofísico do Estado de Goiás descreve o início dos levantamentos aerogeofísicos no Brasil da seguinte forma:

Os primeiros levantamentos aerogeofísicos executados no Brasil, desde a década de 1950, foram patrocinados por instituições federais do governo brasileiro. [...] Entre 1971 e 2001, foram executados 48 projetos aerogeofísicos em diversas regiões do país, predominantemente magnetometria e gamaespectrometria. [...] A partir de 2004, iniciou-se uma nova fase nos aerolevantamentos geofísicos, na qual a maioria dos projetos de magnetometria e gamaespectrometria foram realizados com espaçamento de 500 m entre as linhas de voo, altura de voo de 100 m e direção das linhas de voo N-S. (ALVES *et al.*, 2022, p. 6)

Aeromagnetometria, em particular, possibilita a coleta eficiente de dados magnéticos sobre vastas áreas. A interpretação das anomalias magnéticas revela informações cruciais sobre o tamanho, distribuição e magnetização do subsolo, sendo essencial para conclusões geológicas e direcionamento de futuras investigações (SHEARER, 2005, p. 1). Anomalias são as principais fontes de informações para a prospecção magnética, se devem principalmente à presença de minerais magnéticos e magnetização remanente nas rochas (TELFORD *et al.*, 1990, p. 72-73).

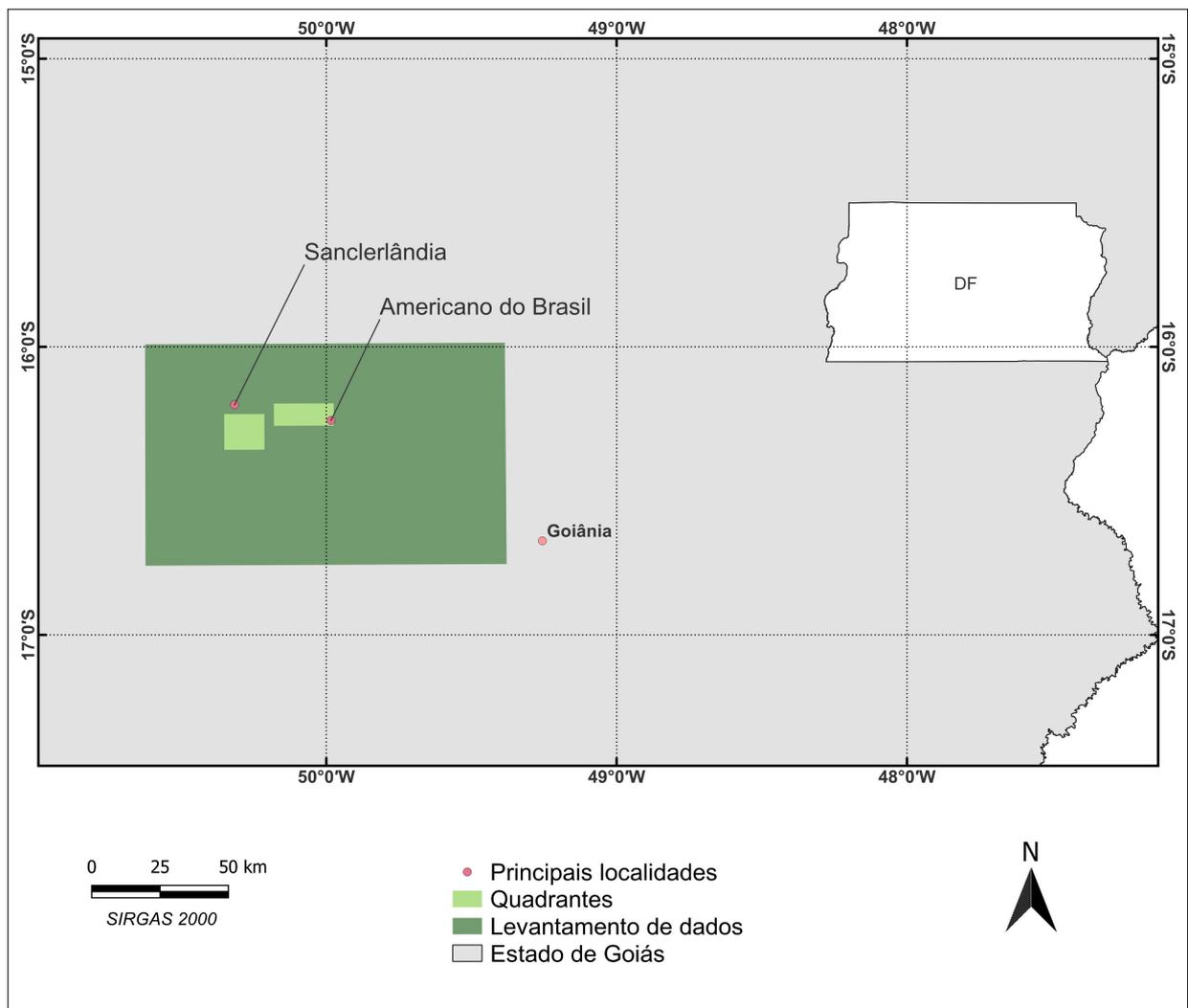
1.2 Objetivo

Vários corpos de rochas máfico-ultramáficas foram intrudidos no Arco Arenópolis e no Complexo Anápolis-Itauçu, próximo ao contato entre essas duas formações. As formações de corpos intrudidos, registradas no mapeamento geológico da UnB em 1969, são conhecidas atualmente como Complexo Americano do Brasil e Complexo Mangabal. Os dois complexos, assim como um dique máfico que corta a região, parecem ter conexão em profundidade, assim como este último está relacionado a diversas jazidas minerais. Este trabalho tem como objetivo analisar qualitativa e quantitativamente os dados de aeromagnetometria e, a partir da inversão 3D dos dados magnéticos, analisar a geometria desses corpos em profundidade e suas propriedades magnéticas.

1.3 Localização

Como visto na Figura 1.1, a área total do levantamento de dados tem formato retangular e localiza-se no estado de Goiás, a noroeste da cidade de Goiânia. As localidades Americano do Brasil e Sanclerlândia são referências, em se tratando de proximidade, em relação aos Complexos Americano do Brasil e Mangabal (Figura 1.2), respectivamente.

Figura 1.1 – Mapa de limites estaduais com a localização da área total de levantamento de dados, quadrantes definidos e principais localidades referentes aos Complexos Americano do Brasil (Americano do Brasil) e Mangabal (Sanclerlândia).

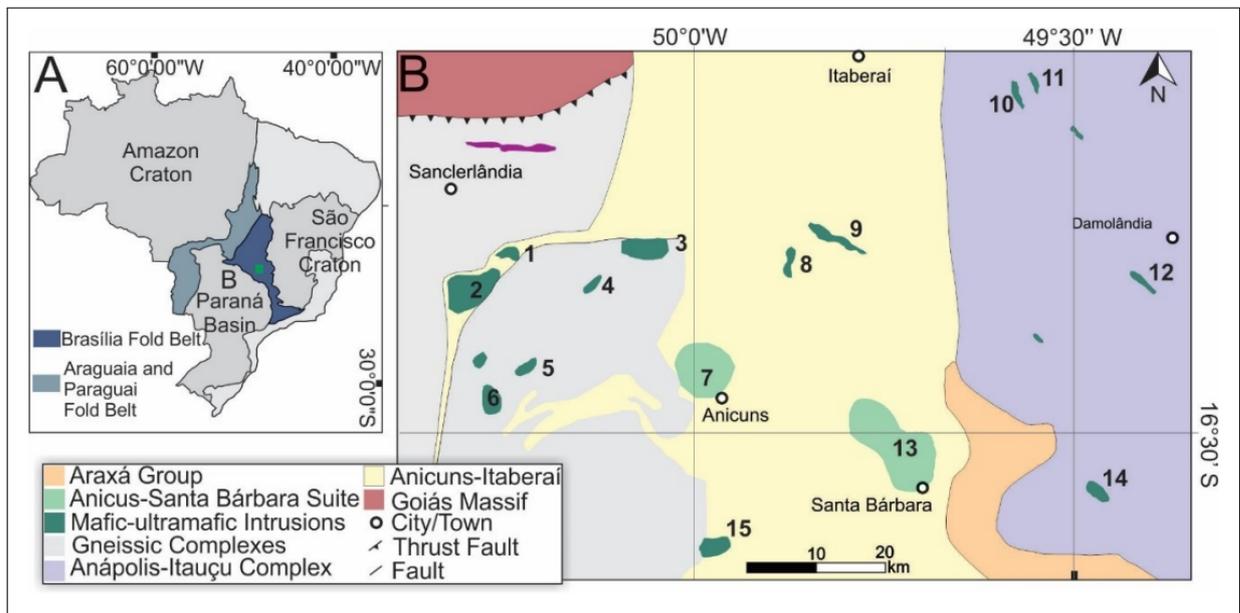


Fonte: Autoria própria. (IBGE e CPRM)

A área está sobre o Arco Magmático de Arenópolis, que tem sido amplamente estudado para fins de exploração de cobre e ouro, o que a torna uma região estratégica para o desenvolvimento da indústria mineral de Goiás. O estado apresenta um enorme potencial para metais nobres e bases, devido à presença de importantes depósitos minerais, tais como ouro em Fazenda Nova, cobre e níquel em Americano do Brasil, e cobre em Bom Jardim. (SILVA, 2019, p. 14)

Tanto o Complexo Americano do Brasil quanto o Mangabal, fazem parte de um aglomerado de corpos do Neoproterozoico na Faixa Brasília. Augustin *et al.* (2022) descreve que o Complexo Americano do Brasil integra um conjunto de intrusões máfico-ultramáficas, intrudidas em gnaisses granodioríticos. O Complexo Mangabal também representa uma intrusão máfico-ultramáfica, como visto na Figura 1.2, parcialmente metamorfizada. (AUGUSTIN & GIUSTINA, 2019, p. 2)

Figura 1.2 – Mapa geológico simplificado, incluindo as intrusões máfico-ultramáficas do Arco Arenópolis: (1-2) Complexo Mangabal; (3) Complexo Americano do Brasil; (4) Água Fria; (5) Adelândia; (6) Fronteira Norte; (7) Córrego Seco; (8) Águas Claras; (9) Capelinha; (10-11) Taquaral; (12) Damolândia; (13) Santa Bárbara; (14) Goianira-Trindade; e (15) Palmeiras.



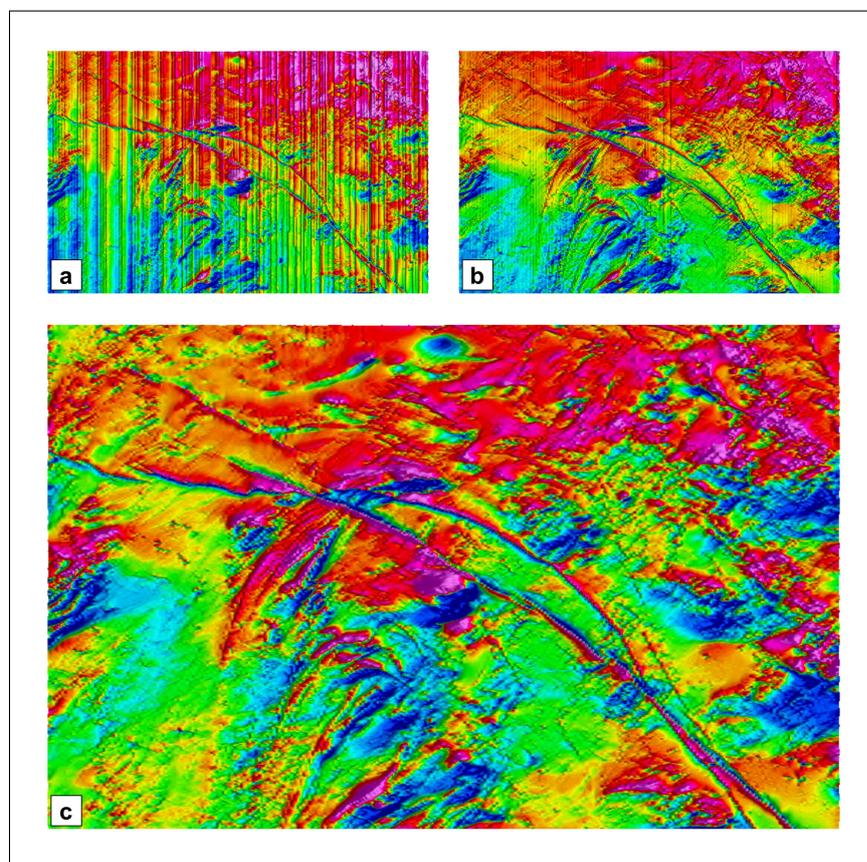
Fonte: AUGUSTIN *et al.*, 2022, p. 2.

2 Metodologia

2.1 Processamento de Dados Aeromagnetométricos

Os dados do método de aeromagnetometria foram processados utilizando o programa Oasis Montaj - Geosoft. O levantamento de dados aeromagnetométricos implicou na utilização do método de *gridding* bi-direcional com células de vértices de 125 metros. As imagens na Figura 2.1 mostram as anomalias magnéticas na área total, e resultados de três das etapas de correção: da compensação magnética dinâmica; da correção de paralaxe (distância entre GPS e sensor) e de variação diurna; e da correção em relação ao campo magnético teórico (IGRF). Após as correções, o que fica evidente nas imagens da Figura 2.1 é a remoção dos ruídos em relação as linhas de voo.

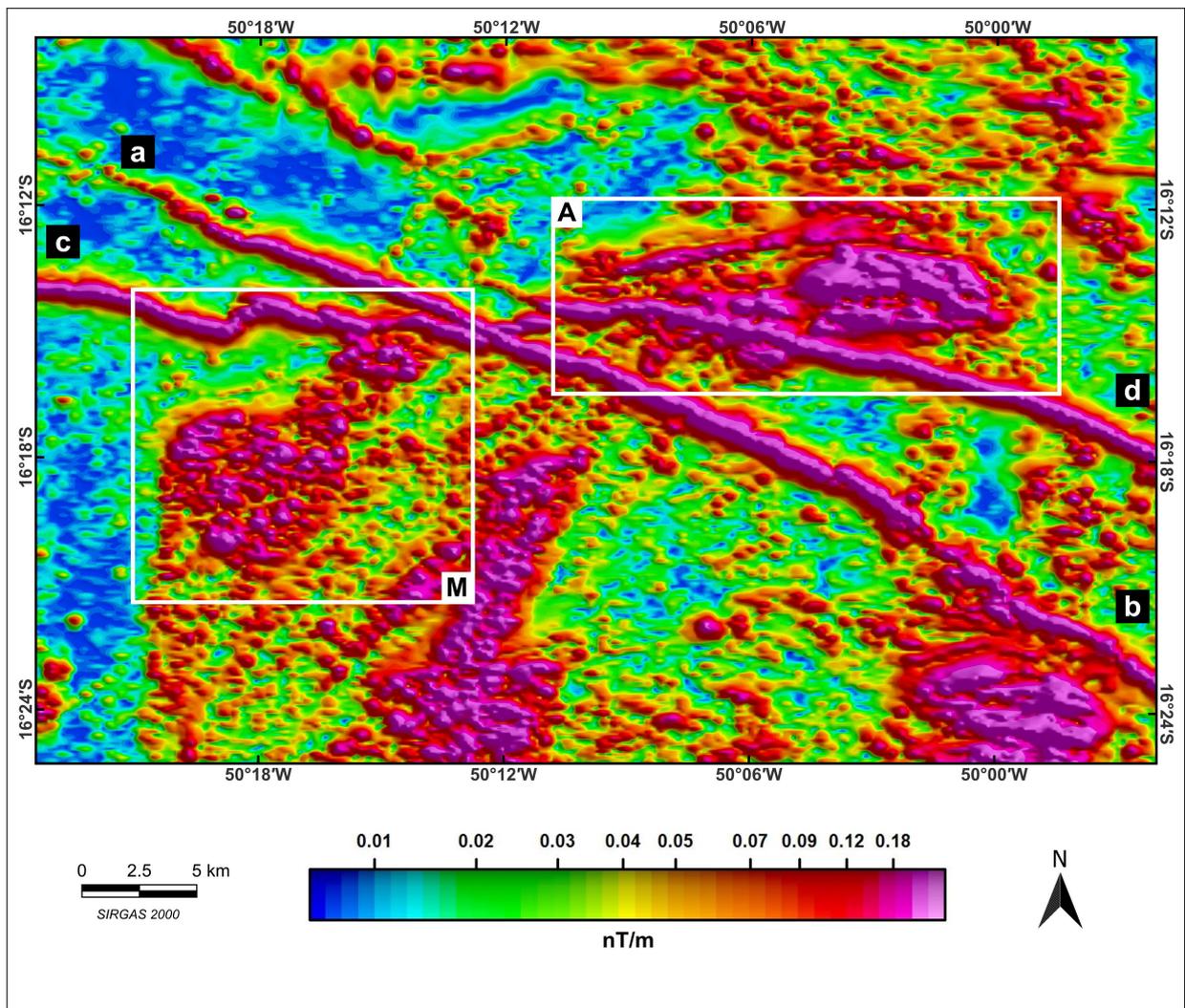
Figura 2.1 – Imagens de *gridding* bi-direcional dos resultados de três correções dos dados do levantamento aeromagnetométrico da área total: (a) compensação magnética dinâmica; (b) correções de paralaxe e variação diurna; (c) e em relação ao campo magnético teórico (IGRF).



Fonte: Autoria própria.

Utilizando como referência o mapa da Figura 1.2, com o Complexo Americano do Brasil e o Mangabal — os dois complexos a serem analisados utilizando o método de inversão 3D — e os resultados da aplicação do método Sinal Analítico da área total de levantamento de dados, foi definida uma área menor e mais específica a ser estudada em relação aos dois complexos, a área do mapa da Figura 2.2.

Figura 2.2 – Mapa de Sinal Analítico de parte da área total. Contém dois quadrantes, e seus respectivos complexos, que demarcam as áreas utilizadas no método de inversão 3D, são eles: (A) Complexo Americano do Brasil; e (M) Complexo Mangabal. Há dois lineamentos: a-b e c-d, diques. Obtido a partir do Sinal Analítico do *grid* IGRF (Figura 2.1).



Fonte: Autoria própria.

Como visto no mapa da Figura 2.2, também foram definidos dois quadrantes, 1 e 2, delimitando as áreas onde se encontram as formas com maior amplitude de Sinal Analítico (nT/m), em relação às localizações dos complexos a serem estudados na área (Figura 1.2). Os quadrantes A e M representam áreas de 1637,344 km² e 1561,696 km², respectivamente. São notáveis, no mapa da Figura 2.2, os diques a-b e c-d. O Complexo Americano do Brasil é cortado pelo dique c-d, o Complexo Mangabal pelo dique a-b, e os diques se interceptam de forma que o dique a-b corta c-d.

Embora tenham uma forte assinatura magnética e por isso possam ser facilmente identificados em mapas geofísicos, os diques raramente aparecem em mapas geológicos de escala regional, devido à escassez de afloramentos e à elevada intemperização. Esses diques estão diretamente associados ao Lineamento Azimute 125°, que é uma importante feição estrutural que se estende por 1800 km, desde Minas Gerais até Rondônia, e estão dimensionalmente relacionados à diversas jazidas minerais com importantes elementos terras raras (ROCHA *at al.*, 2014, p. 273-278).

2.2 Método de Inversão 3D

A interpretação de anomalias magnéticas é um desafio complexo devido à sobreposição de diversas fontes magnéticas, interferência de ruídos geológicos e antropogênicos, além de erros de aquisição e posicionamento. A magnetização total de um material é a soma vetorial de duas componentes: magnetização induzida, constante na direção sob certos pressupostos; e magnetização remanente, variável espacialmente devido a processos como alteração química, resfriamento térmico ou metamorfismo de contato. Esta última, caracterizada como a "memória magnética" do material, registra a orientação do campo magnético na época da deposição ou formação. A variação global do campo magnético, sujeita a mudanças seculares, contribui para a incerteza da direção da magnetização remanente. Tal presença pode comprometer a interpretação quantitativa de dados magnéticos, introduzindo distorções ou deslocamentos laterais nas anomalias magnéticas em relação à fonte subsuperficial (SHEARER, 2005, p. 1).

O método chamado de MVI (*Magnetization Vector Inversion*) exemplifica como podem ser vistos os vetores de magnetização, de corpos em subsuperfície, de forma precisa. Como no exemplo da Figura 2.3, onde, a partir de dados artificiais, é possível notar que o método de inversão é eficaz e pode ser utilizado para visualizar vetores de magnetização em corpos de subsuperfície.

Utilizando como referência para análise de propriedades magnéticas da Terra a magnetização volumétrica da Terra de Telford *et al.* (1990), expressa na Equação (2.1) como $M(r)$, Ellis *et al.* (2012) propõem que em magnetostática um campo magnético B no ponto r_j , resultante de um volume V contendo magnetização $M(r)$, é representado como

$$B(r_j) = \nabla \int_V M(r) \cdot \nabla \frac{1}{|r - r_j|} dr^3 \quad (2.1)$$

que demonstra claramente que $M(r)$ é o parâmetro natural para o método de inversão em relação a campos magnéticos estáticos.

Se o volume V for a junção de vários outros volumes menores, ou seja, N sub-volumes v_k , cada um deles com sua constante magnetização m_k , então

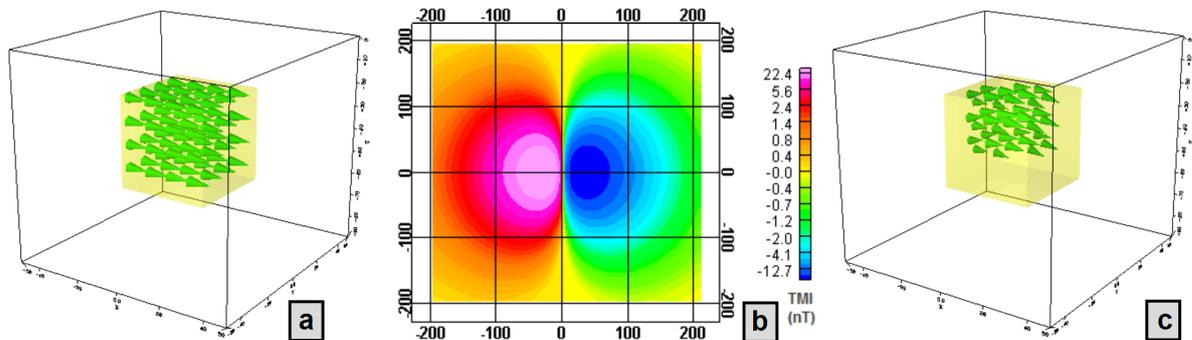
$$B_\beta(r_j) = \sum_{k,\alpha}^{N,3} m_{k,\alpha} \int_{v_k} \partial_\alpha \partial_\beta \frac{1}{|r - r_j|} dr^3 \quad (2.2)$$

é a forma da Equação (2.1) para representar que quando se tem um conjunto de fontes m_k ($k = 1, \dots, N$), a anomalia magnética B_j pode ser prevista nos pontos r_j ($j = 1, \dots, M$).

Na Equação (2.2), para uma livre escolha do sistema de coordenadas, α foi o índice utilizado, considerando assim β como perpendicular a α (ELLIS *et al.*, 2012).

Observando a Figura 2.3 na comparação de sentido e direção dos vetores a e b, após a aplicação do método MVI, é possível observar no cubo em c vetores semelhantes aos do cubo em a, com considerável desvio em relação à direção de tais vetores, porém, sentidos iguais.

Figura 2.3 – Etapas da utilização do método *Magnetization Vector Inversion* (MVI): fonte de dados teórica em forma cubo 3D, a 20 m de profundidade e vértices de 40 m, com vetores de magnetização no sentido leste-oeste (a); anomalia magnética gerada, vista em *grid* com células de vértices de 100 m, campo magnético aplicado com inclinação de 90° (b); inversão aplicada no *grid*, gerando vetores de direção semelhantes e de mesmo sentido leste-oeste (c).



Fonte: Adaptada de ELLIS *et al.*, 2012, p. 2.

Os dados do campo magnético são muito importantes na exploração geofísica, e a inversão tridimensional de voxels é uma ferramenta comum para interpretar esses dados. Em muitas inversões baseadas em voxels, a suposição predominante é que a resposta magnética é exclusivamente devida à indução magnética. No entanto, estudos revelaram que a magnetização remanente é mais predominante do que estimava-se. A experiência em projetos de exploração mineral indica que a presença de magnetização não induzida é a regra, não a exceção, na exploração de metais base (ELLIS *et al.*, 2012, p. 1).

3 Resultados

3.1 Modelos 3D

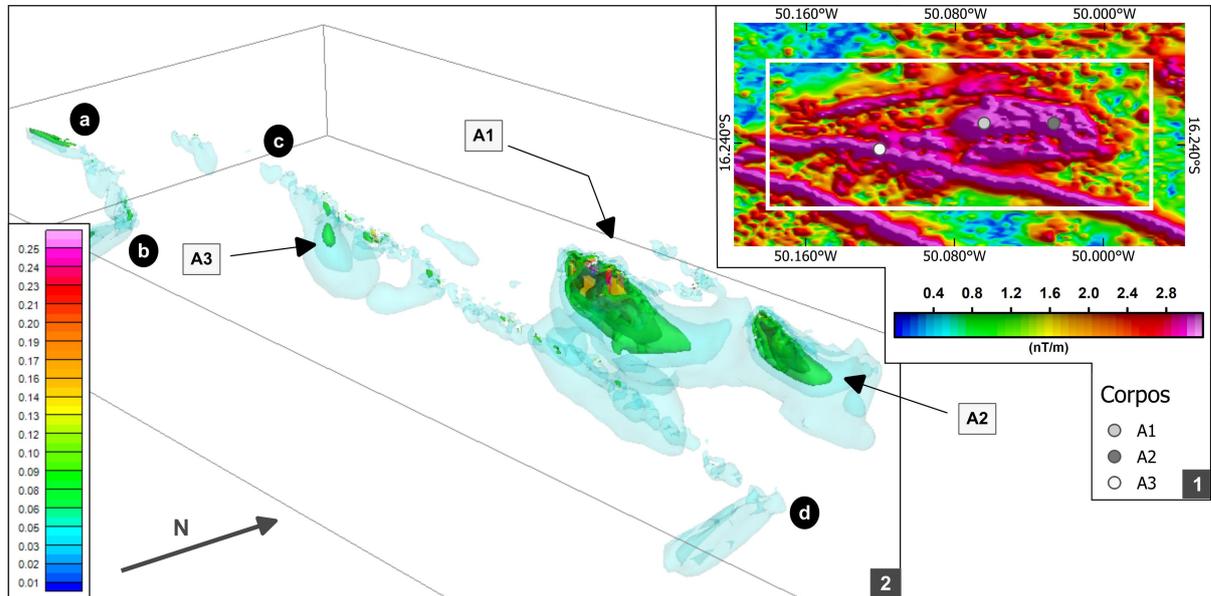
Os modelos 3D são compostos por formas baseadas em isosuperfícies, tais isosuperfícies são definidas por diferentes cores em relação à diferentes valores de susceptibilidade magnética. A partir dos *grids* foram gerados modelos 3D, evidenciando os corpos das intrusões máfico-ultramáficas do Complexo Americano do Brasil (Figura 3.1) e Complexo Mangabal (Figura 3.3). Esses corpos já eram esperados, baseado nos estudos de Augustin *et al.* (2022), que os evidencia claramente através do mapa na Figura 1.2, e Augustin e Giustina (2019), que esclarece o Complexo Mangabal.

3.1.1 Modelo Americano do Brasil

As formas 3D do modelo do Complexo Americano do Brasil (Figura 3.1) mostram três corpos, A1, A2 e A3, além de seguimentos dos diques a-b e c-d. Esses corpos foram definidos a partir dos valores da susceptibilidade magnética em suas isosuperfícies, sendo consideradas corpos, todas as formas com isosuperfícies a partir de 0,0671.

Duas formas lineares 3D aparecem no modelo Americano do Brasil, representando os diques a-b e c-d (Figura 2.2), porém, a única das formas lineares que se encaixou no padrão que foi adotado para definir corpos notáveis, foi a do dique c-d. O dique c-d apresenta um corpo achatado e aparentemente fragmentado, com isosuperfícies chegando a valores de susceptibilidade de até 0,157.

Figura 3.1 – (1) Quadrante Complexo Americano do Brasil e (2) seu modelo 3D demonstrando os corpos A1, A2 e A3, e partes dos diques a-b e c-d. Todos os corpos definidos, área e volume, por suas isosuperfícies correspondentes à susceptibilidade magnética, definida em escala de cores.

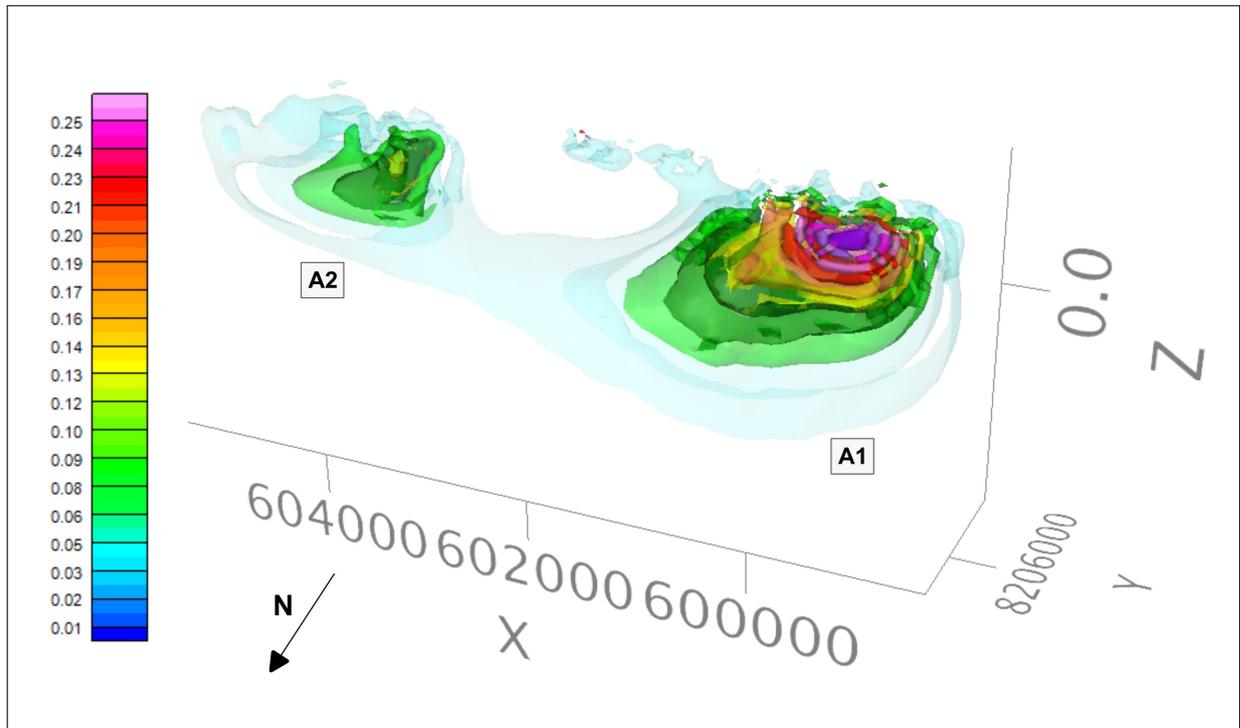


Fonte: Autoria própria.

O corpo A3 está localizado a oeste de A1 e A2 (Figura 3.1), e está aproximadamente entre 560 m e -340 m, em relação ao nível do mar. Esse corpo, diferente dos outros dois a leste, é menos volumoso e tem apenas uma isosuperfície, com susceptibilidade magnética entre 0,0671 e 0,0895. Seu formato é ovalar pouco achatado, localizado logo abaixo do dique c-d.

A1 é um corpo com formato de meia circunferência achatada, posicionado verticalmente em relação à base, sentido leste-oeste. É o mais volumoso e com base mais profunda em relação ao nível do mar, chegando a -960 m, enquanto seu topo está por volta de 630 m. O corpo A2 aparenta formato praticamente igual ao de A1. Na Figura 3.2 nota-se que ambos os corpos tem aumento da susceptibilidade de suas isosuperfícies conforme mais internas elas estão, chegando até 0,2684 em A1 e 0,179 em A2. A base de A2 é menos profunda do que a de A1, 210 m em relação ao nível do mar, porém seu topo está a 720 m, relativamente próximo ao topo de A1 (630 m).

Figura 3.2 – Parte do modelo Complexo Americano do Brasil destacando os corpos A1 e A2 partidos no sentido leste-oeste, mostrando todas suas isosuperfícies de diferentes susceptibilidades magnéticas, em escala de cores. A1 de maior volume e com um interior de maior susceptibilidade do que A2.

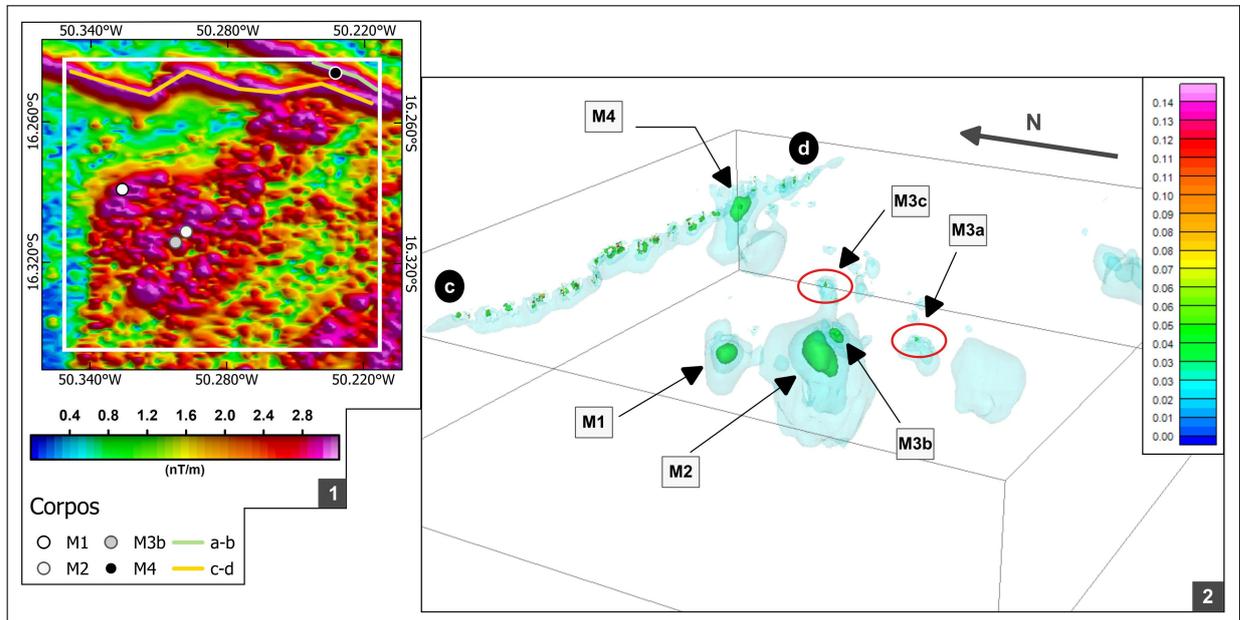


Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Modelo Mangabal

No modelo do Complexo Mangabal (Figura 3.3), foram consideradas corpos todas as formas 3D com isosuperfície de susceptibilidade magnética a partir de 0,0119 que tivessem outras isosuperfícies com susceptibilidade crescente, partindo de 0,0358, em direção ao seu interior. Foram observados três principais corpos, M1, M2 e M4, e um grupo M3 de pequenos corpos, chamados de M3a, M3b e M3c. Também estão presentes partes dos diques a-b e c-d.

Figura 3.3 – (1) Quadrante Complexo Mangabal e (2) seu modelo 3D. Contém os corpos M1, M2, o grupo M3, M4 e seguimentos do diques a-b (logo acima de M4) e c-d. Todos os corpos definidos, área e volume, por suas isosuperfícies correspondentes à susceptibilidade magnética, definida em escala de cores.

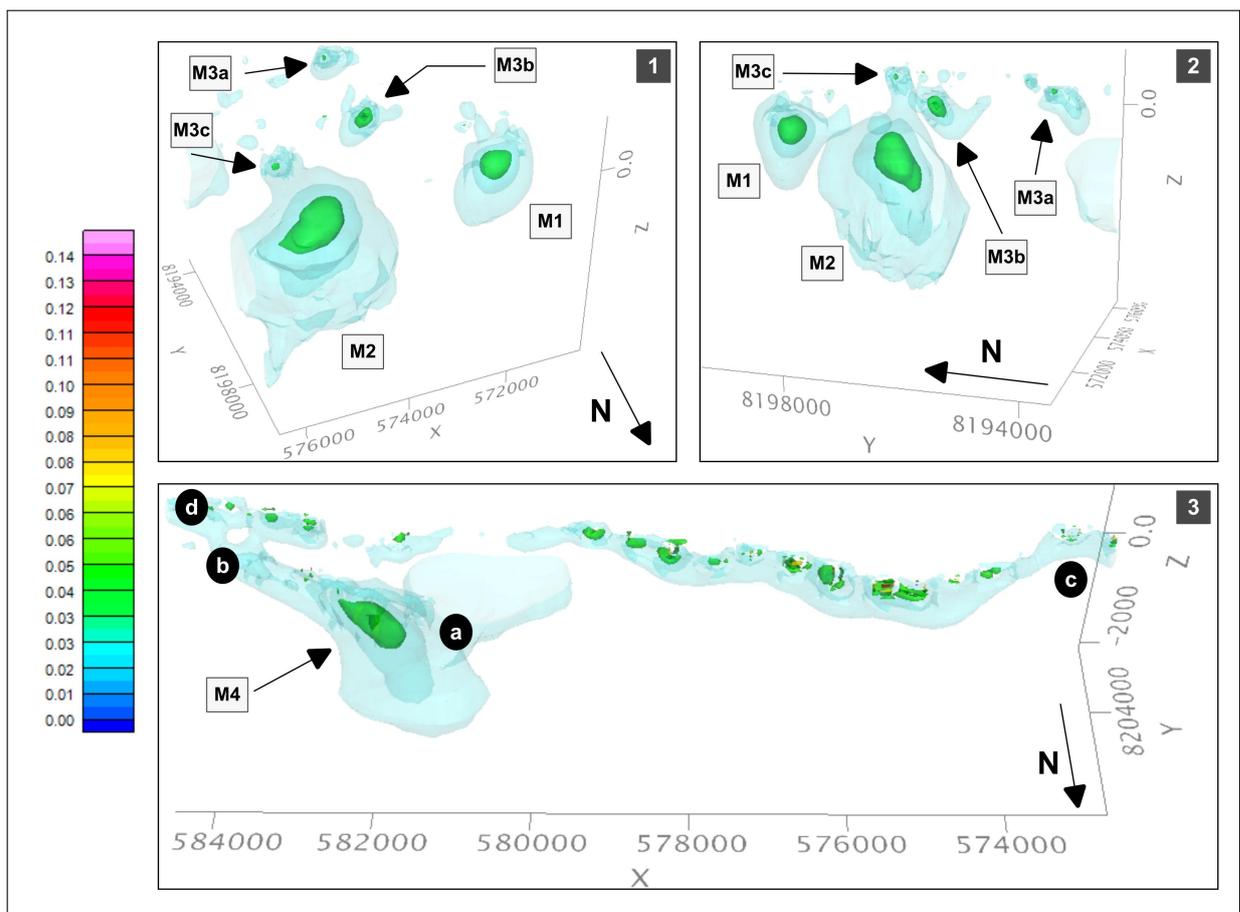


Fonte: Autoria própria.

O corpo M1 (Figuras 3.4.1 e 3.4.2) tem formato arredondado irregular. Em relação ao nível do mar, o topo do corpo M1 está a aproximadamente 145 m, e sua base a -350 m. Em seu interior não há isosuperfícies de susceptibilidade maior que 0,0477. Assim como M1, M2 tem formato arredondado irregular e as mesmas características em relação a susceptibilidade magnética. A partir das Figuras 3.4.1 e 3.4.2, nota-se que é o corpo de maior volume e profundidade entre os três, entre -520 m e -1690 m, em relação ao nível do mar.

Dentro do grupo M3 há três pequenos corpos, M3a, M3b e M3c (Figura 3.3). O corpo M3c é o menor, como visto na Figura 3.4.1, está mais próximo do corpo M2 e conectado com o mesmo através de uma isosuperfície de susceptibilidade entre 0,0119 e 0,0238, uma exceção aos outros. M3b é o único, em relação aos outros de seu grupo, que apresenta uma isosuperfície mais interna com susceptibilidade maior (Figura 3.4.2), entre 0,0477 e 0,0596. Tal isosuperfície é inclusive mais volumosa do que as mais externas de M3a e M3c. Os três corpos do grupo M3 estão entre 620 m e -40 m, aproximadamente, em relação ao nível do mar.

Figura 3.4 – Partes do modelo 3D Complexo Mangabal a partir de diferentes pontos de observação. Visão dos corpos M1, M2, grupo M3, com seus respectivos azimutes e graus de inclinação em relação ao eixo Z: (1) 203° e 33°; (2) 72° e 13°. (3) Parte do mesmo modelo, mostrando o corpo M4 e os diques a-b e c-d, com ponto de observação de azimuth e inclinação de 79° e 50°, respectivamente. Além da susceptibilidade magnética das isosuperfícies de todos os corpos (em 1, 2 e 3) em escala de cores.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 3.4.3, a nordeste de M1, M2 e do grupo M3, está o corpo M4, que tem forma elipsoidal achatada e está relativamente distante de M1, M2 e M3. M4 tem características muito parecidas com as do dique a-b, que tem corpos fragmentados logo acima de M4, isso sugere que M4 é um corpo que pode fazer parte do dique a-b, porém é muito maior que os outros corpos do dique. O dique c-d é a única grande forma 3D do Complexo Mangabal a ter isosuperfícies de susceptibilidade maior que 0,0596. Os corpos que formam o dique c-d aparentam ser fragmentados, e como visto no artigo de Moreas Rocha *at al.* (2014, p. 279), os diques dessa região estão próximos aos Complexos Americano do Brasil e Mangabal, e estão se cruzando, o que pode esclarecer o fato de que c-d tem um desvio visto na modelagem 3D, porém mantém sua direção e sentido.

3.2 Vetores 3D

Os vetores nos modelos 3D são resultado da associação entre a susceptibilidade magnética dos corpos e a orientação da magnetização dos mesmos. A escala de cores nos vetores serve como parâmetro para analisar a susceptibilidade daquele ponto na isosuperfície, tornando assim possível entender a que isosuperfície o vetor específico está se referindo. A grande vantagem dos vetores 3D é permitir uma análise mais precisa da relação entre corpos próximos, visualizando-os de um outro ponto de vista através do eixo Z.

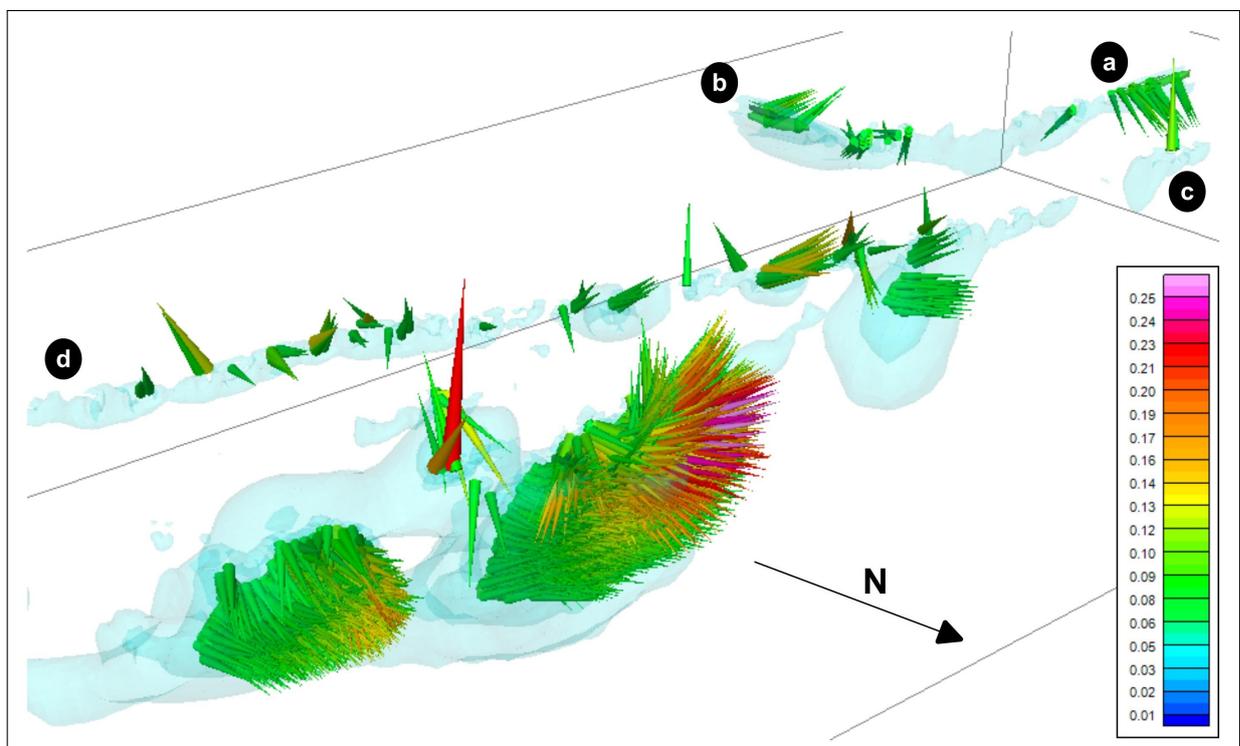
3.2.1 Vetores Americano do Brasil

Os principais corpos do modelo 3D do Complexo Americano do Brasil, A1, A2, A3, c-d e a-b (Figura 3.1), aparecem na Figura 3.5 com vetores bem definidos, de no mínimo 0,0671 de susceptibilidade. Nas isosuperfícies mais externas, com susceptibilidade entre 0,0671 e 0,134, os vetores de A1 e A2 tem orientações semelhantes, entre -5° e 66° em relação ao eixo Z, e azimutes entre 153° e 207° (Figura 3.5).

Os vetores das isosuperfícies de posição intermediária de A1, com susceptibilidade entre 0,134 e 0,179, tem inclinações que vão de -19° a 56° , e azimutes de 164° até 232° . O corpo A2 tem em seu interior vetores com orientações, e susceptibilidades, semelhantes aos vetores das isosuperfícies intermediárias de A1.

A1 tem em seu interior isosuperfícies com vetores de susceptibilidade entre 0,179 e 0,2684, que não são vistos em nenhum dos outros corpos do modelo. Como visto na Figura 3.5c, esses vetores tem inclinações entre -10° e 50° em relação ao eixo Z, e azimutes entre 167° a 185° . Diferente de A1, em A2 não são vistos vetores correspondentes à isosuperfícies de susceptibilidade magnética maior que 0,179 (Figura 3.5).

Figura 3.5 – Modelo 3D do quadrante Complexo Americano do Brasil (Figura 2.2). Podem ser vistos os corpos. Todos os corpos com vetores correspondentes à direção da magnetização e susceptibilidade magnética, definida na escala de cores de suas isosuperfícies.



Fonte: Autoria própria.

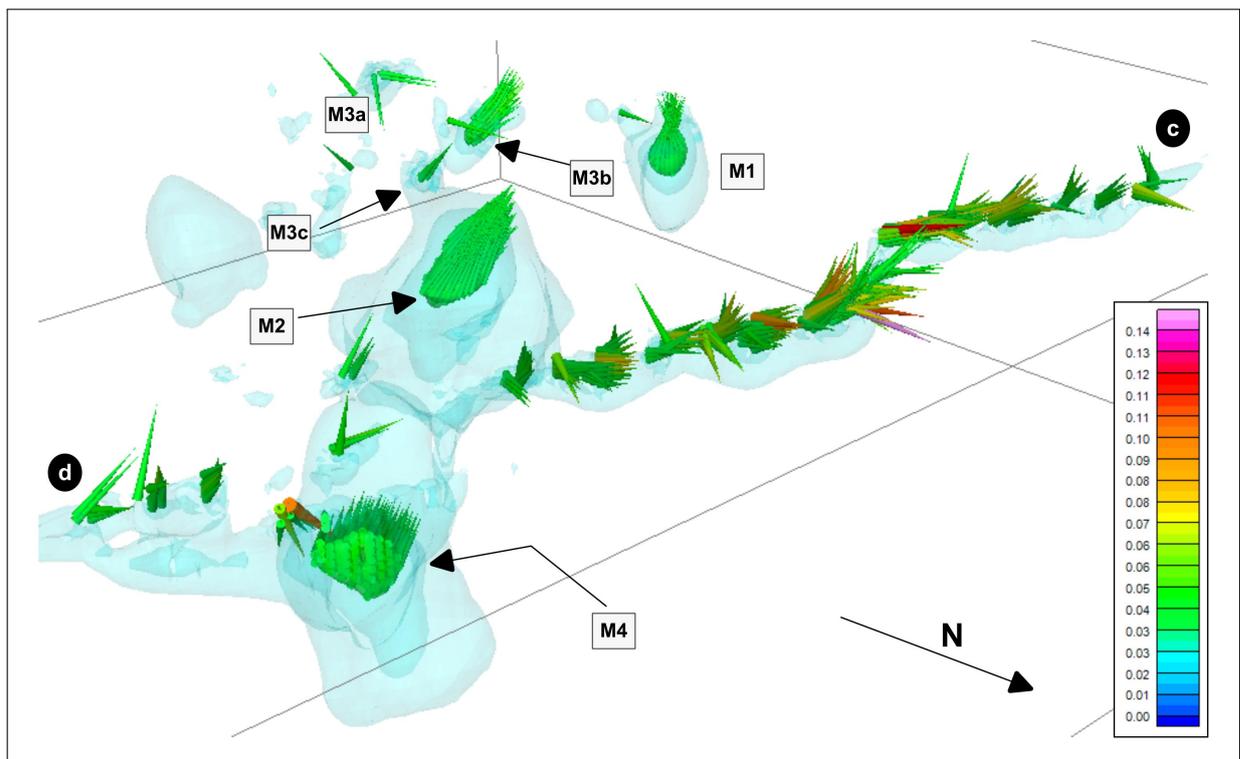
3.2.2 Vetores Mangabal

Os vetores do quadrante Complexo Mangabal não são tão bem definidos quanto os do Complexo Americano do Brasil, porém deixam claras as possíveis relações entre os corpos do próprio quadrante. Na modelagem 3D do Complexo Mangabal (Figura 3.3) os corpos M1, M2 e o grupo M3 estão próximos, e tem isosuperfícies com susceptibilidade magnética semelhantes, entre 0,0358 e 0,0596. Na Figura 3.6 Quando são observados os vetores de tais corpos, nota-se que não há tanta semelhança entre eles quanto em relação às suas profundidades e isosuperfícies. Apesar de pouca precisão em relação a quantidade

de vetores observados, o grupo M3 não apresenta, em nenhum de seus corpos, vetores de direção e sentido semelhantes. M3b tem inclinação entre 22° e 50° , e azimute de 102° , enquanto M3a tem inclinação de 41° e M3c entre -18° e -77° . M3a e M3c tem azimutes de 140° e 186° , respectivamente, ou seja, nenhuma semelhança entre si e tão pouco com M3b. O que pode sugerir que, apesar de terem profundidades muito parecidas e estarem próximos, talvez não façam parte de um grupo relacionado à suas características.

O corpo M1 tem vetores com inclinações de aproximadamente 77° e azimutes entre 175° e 285° . Apesar de seus vetores estarem bem alocados e numa quantidade razoável, seus azimutes variam muito, diferente de suas inclinações, que estão todas próximas. Já M2 tem vetores de azimutes próximos a 156° , bem definidos, e inclinações entre 43° e 63° .

Figura 3.6 – Modelo 3D do quadrante Complexo Mangabal (Figura 2.2). Podem ser vistos os corpos M1, M2, M4, o grupo M3 e parte dos diques a-b e c-d. Todos os corpos com vetores correspondentes à direção da magnetização e susceptibilidade magnética, definida na escala de cores de suas isosuperfícies.



Fonte: Autoria própria.

Com inclinações entre -5° e 10° , e azimutes entre 44° e 58° , os vetores do corpo M4 aparecem em boa quantidade e nenhum outro vetor com consideráveis diferenças. Esse corpo está próximo do dique c-d, um pouco abaixo, porém com vetores totalmente

opostos aos do dique. Os vetores do dique c-d estão entre 3° e 60° de inclinação, e azimutes de 196° a 208° . Esses valores não correspondem aos do corpo M4, que além do dique c-d, também está próximo do dique a-b que aparece de forma pouco destacada no quadrante Complexo Americano do Brasil. Quando comparados aos vetores do dique a-b (Figura 3.5), os vetores de M4 demonstram semelhança em relação à seus azimutes, com média de 50° , e suas profundidades médias, em torno de -400 m em relação ao nível do mar. Apenas suas inclinações não são tão semelhantes.

4 Conclusão

Os resultados da modelagem e vetores 3D, deixam clara a relação entre os corpos M4 e o dique a-b. Devido suas características muito semelhantes tanto em relação à suas geometrias e profundidades, quanto aos seus vetores e isosuperfícies, por isso fazem parte da mesma formação. Uma resposta é sobre o quão parecidos podem ser os diques a-b e c-d. Nesse estudo, concluiu-se que tais diques não tem semelhança quanto à suas características magnéticas. Além de terem vetores muito diferentes, o dique a-b demonstrou ser menos susceptível magneticamente do que c-b, indicando que foram formados em diferentes momentos, ou seja, têm magnetismos remanentes distintos. Os corpos com vetores mais intensos correspondem aos dos mesmos complexos mostrados por Augustin *et al.* (2022, p. 2). O mapa mostra que as formações rochosas dos Complexos Americano do Brasil e Mangabal, são intrusões de rochas máficas e ultra-máficas, deixando claro os resultados do método de inversão.

Todos os resultados das modelagens 3D e seus vetores podem ser utilizados como base para pesquisas em relação à formas e suas características de magnetização. Além de uma possível, e até fundamental, importância quanto à extração de minerais em regiões próximas aos Complexos ainda não exploradas. Fornecendo dados sobre profundidades, volumes e tipos de minerais dos corpos na subsuperfície. Além de uma forma de visualizar diques próximos, dificilmente vistos em afloramentos da região, a-b e c-d, que demonstram ser também fonte de recursos minerais.

Através dos resultados desse trabalho, os Complexos Americano do Brasil e Mangabal podem ser, de fato, considerados fonte de minerais ferruginosos e magnéticos.

Referências

- ALVES, F. M.; SILVA, É. R.; SILVA, A. B. Atlas Aerogeofísico do Estado de Goiás: Levantamentos Geológicos e Integração Geológica Regional. **Repositório Institucional de Geociências - CPRM**. Goiânia, 2022.
- AUGUSTIN, C. T. *et al.* Petrological and geochemical characteristics of the mafic-ultramafic Americano do Brasil Complex. **Ore Geology Reviews**. v. 150, 2022.
- AUGUSTIN, Cláudia Tharis; GIUSTINA, Maria Emília Schutesky Della. Geology and metamorphism of the neoproterozoic Mangabal Complex: An example of Nisingle bondCu-PGE mineralized intrusion in the Goiás Magmatic Arc, central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. v. 90, p. 504-519, 2019.
- ELLIS, R. G.; de WET, B.; MACLEOD, I. N. Inversion of Magnetic Data from Remanent and Induced Sources. **22nd International Geophysical Conference and Exhibition**. Brisbane, Australia, Fev. 2012.
- ROCHA, L. G. de M.; PIRES, A. C. B.; CARMELO, A. C.; de ARAÚJO FILHO, J. O. Geophysical characterization of the Azimuth 125° lineament with aeromagnetic data: Contributions to the geology of central Brazil. **Precambrian Research**. v. 249, p. 273-287, 2014.
- SILVA, Éderson Ribeiro. **CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA DE ESTRUTURAS ASSO-CIADAS ÀS MINERALIZAÇÕES DE COBRE E OURO NO ARCO MAGMÁTICO DE ARENOPÓLIS – GOIÁS - BRASIL**. 2021. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- SHEARER, S. E. **THREE-DIMENSIONAL INVERSION OF MAGNETIC DATA IN THE PRESENCE OF REMANENT MAGNETIZATION**. Tese (Mestrado) – Colorado School of Mines, Center for Gravity, Electrical & Magnetic Studies – Golden, Colorado, Mar. 2005.
- TELFORD, W. M.; SHERIFF, R. E.; GELDART, L. P. **Applied Geophysics**. 2ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.