




Avaliação de métodos de extração automática de lineamentos morfoestruturais e magnéticos a partir de imagens de sensores remotos e dados aerogeofísicos

Evaluation of automatic extraction methods for morphostructural and magnetic lineaments from remote sensor images and aerogeophysical data

Catherine Vargas Goulart¹ , Claudia Robbi Sluter¹ , Cláudio Wilson Mendes Júnior¹ 

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Avenida Bento Gonçalves, 9.500, Prédio 44202, setor 5, Campus do Vale, Agronomia, CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, BR (catherine.goulart@ufrgs.br; robbi.sluter@ufrgs.br; claudio.mendes@ufrgs.br)

Recebido em 16 de junho de 2021; aceito em 10 de maio de 2022

Resumo

As imagens de sensores remotos permitem visualizar toda a superfície do terreno e os elementos que o compõem. Entre as feições relacionadas a esses elementos, e visíveis nas imagens aéreas e orbitais, estão os lineamentos morfoestruturais, os quais registram na superfície a ocorrência de atividade tectônica. Em subsuperfície, essas feições geológicas podem estender-se até grandes profundidades crustais, sendo visíveis em dados magnéticos e, portanto, denominados de lineamentos magnéticos. A extração dos lineamentos morfoestruturais e magnéticos pode ser realizada de forma manual, semiautomática e automática, e a possibilidade de utilização de diversas fontes de dados e diferentes algoritmos computacionais, encontrada nos métodos automáticos, permite a identificação de elementos e formas distintas associados aos lineamentos, promovendo sua extração adequada. O objetivo deste trabalho foi a extração dos lineamentos morfoestruturais e magnéticos a partir de dados de sensores remotos e dados aerogeofísicos, de forma semelhante ao obtido pelos métodos manuais, por meio da testagem dos parâmetros presentes nos algoritmos de detecção de limites, por limiares e segmentação, e verificar a complementaridade da extração de lineamentos mapeados automaticamente nessas diferentes fontes de dados.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Magnetometria; Processamento digital de imagens; Lineamentos; Mapeamento automático.

Abstract

Remote sensing images allow viewing the entire terrain surface and the elements that compose it. Among the features related to these elements, and visible in aerial and orbital images, are the morphostructural lineaments, which register the occurrence of tectonic activity on the surface. In the subsurface, these geological features can extend to great crustal depths, being visible in magnetic data and, therefore, called magnetic lineaments. The extraction of morphostructural and magnetic lineaments can be performed manually, semiautomatically, and automatically, and the possibility of using different data sources and different computational algorithms found in automatic methods allows the identification of elements and distinct shapes associated with the lineaments, promoting their proper extraction. The objective of this work was to extract the morphostructural and magnetic lineaments from remote sensor data and aerogeophysical data, in a similar way to that obtained by manual methods, by testing the parameters present in the threshold detection algorithms, by thresholds and segmentation, and to verify the complementarity of the extraction of lineaments automatically mapped in these different data sets.

Keywords: Remote sensing; Magnetometry; Digital image processing; Lineaments; Automatic mapping.

INTRODUÇÃO

Lineamentos geológicos são feições lineares ou suavemente curvilíneas que se destacam dos padrões adjacentes no terreno (O'Leary et al., 1976), visíveis nas imagens aéreas e orbitais obtidas por sensores remotos. A ocorrência de feições estruturais na superfície do terreno fornece informações importantes sobre a dinâmica interna da Terra, responsável pelas atividades que moldam a superfície do relevo, contribuindo para a compreensão da evolução tectônica-estrutural dos terrenos. A análise e a interpretação dos padrões lineares relacionados às estruturas geológicas geradas tanto em superfície quanto em subsuperfície são consideradas essenciais na exploração dos diversos recursos naturais existentes no planeta (*e.g.*, minério, óleo e gás, e água subterrânea). Conhecidas como lineamentos, essas feições podem também auxiliar na avaliação da instabilidade da superfície terrestre, favorecendo a determinação de potenciais zonas de risco (Masoud e Koike, 2017). Entretanto, o mapeamento de lineamentos pode ser demorado e desafiador, principalmente em áreas com pouca exposição de afloramentos no terreno. Estruturas como falhas podem ser difíceis de mapear em campo em razão de sua extensão, que pode variar entre dezenas e centenas de quilômetros, das variações topográficas e da exposição parcial das rochas (Yeomans et al., 2019), que impedem a identificação de todos os lineamentos existentes em determinada área, em consequência da escala ampliada e da visão reduzida do mapeador (Bonetto et al., 2015).

Com os avanços nas técnicas de análise espacial e o desenvolvimento de algoritmos computacionais no processamento de imagens, a análise de lineamentos por meio de imagens de sensores remotos tornou-se usual, já que os lineamentos são as feições estruturais mais relevantes que aparecem nessas imagens (Koike et al., 1995). Desse modo, o sensoriamento remoto foi visto como uma alternativa eficaz na identificação dos lineamentos e na elaboração de mapas interpretativos abrangentes e confiáveis (Bonetto et al., 2015). Apesar de sua importância, os esforços dedicados às pesquisas para a detecção e o mapeamento de lineamentos são limitados e dependentes da observação de certos padrões e características lineares nas imagens (Kusky e El-Baz, 1998), e da interpretação visual de imagens filtradas (Rabie e Ammar, 1990; Rabeh e Miranda, 2008).

Os principais métodos de detecção e extração de lineamentos em imagens de sensores remotos são o manual (Jordan e Schott, 2005), o semiautomático (Lim et al., 2001; Jordan e Schott, 2005) e o automático (Masoud e Koike, 2011a; Saadi et al., 2011). Os métodos manual e semiautomático são aqueles altamente influenciados pela experiência do fotointérprete, enquanto o método automático depende do conteúdo da informação e dos limites predefinidos na imagem e, principalmente, da eficiência dos algoritmos utilizados (Casas et al., 2000; Ekelnigoda e Henkel, 2006; Hashim et al., 2013).

Feições lineares artificiais não relacionadas com lineamentos naturais, tais como limites de uso e cobertura do solo, estradas e ferrovias, tendem a ser detectadas erroneamente como lineamentos geológicos. A precisão da detecção de lineamentos a partir de imagens de satélite é fortemente condicionada pela resolução espacial e espectral, pelas condições de iluminação da cena e pelas características do sensor (Smith e Wise, 2007; Masoud e Koike, 2011a). A extração dos lineamentos não é eficaz em imagens com baixo contraste, quando os lineamentos estão orientados paralelamente à direção solar, ou seja, em áreas sombreadas nas imagens ópticas (Koike et al., 1995). Em compensação, os métodos de extração automática e semiautomática a partir da sobreposição de dados de imagens de satélite e Modelos Digitais de Elevação (MDE), baseados em técnicas de detecção de bordas, por meio da aplicação de filtros espaciais e morfológicos, detectam os *pixels* adjacentes pela mudança abrupta dos níveis de cinza ou valores digitais das imagens (Masoud e Koike, 2017). Em alguns casos, a frequência e a conectividade dos segmentos lineares são afetadas diretamente pela escolha dos parâmetros de detecção dos filtros aplicados e pela escala dos dados-fonte, produzindo resultados extrapolados (Argialas e Mavrantza, 2004). Portanto, a representação adequada de lineamentos regionais e tectonicamente significativos não ocorre da forma desejada (Masoud e Koike, 2017).

Métodos aerogeofísicos possibilitam a observação de feições em profundidade, como falhas, identificadas nos dados gravimétricos e potenciais do campo magnético, como descontinuidades e deslocamentos de corpos magnéticos ou não magnéticos (Middleton, 2015). O procedimento mais usual para o realce de lineamentos magnéticos é a utilização de uma variedade de filtros de aprimoramento de bordas derivativos (Fairhead e Williams, 2006; Pilkington e Keating, 2009), que são interpretados com base apenas na ligação de características estruturais. O uso combinado de diferentes filtragens permite que as bordas das anomalias sejam mapeadas de forma acurada, em que são produzidos picos das anomalias sobre as bordas dos corpos ou no centro da fonte anômala, que realçam as anomalias mais sutis, melhorando a resposta dos dados gravimétricos e magnéticos (Bello, 2014). Assim, recomenda-se a aplicação de filtros para auxiliar a interpretação de alinhamentos de contraste gravimétrico e magnetométrico (lineamentos geofísicos) (Alves, 2012), já que estes podem indicar contatos entre blocos tectônicos, por serem capazes de evidenciar feições por meio da variação na densidade de diferentes corpos rochosos (Reis, 2016). Entretanto, em razão das muitas definições matemáticas envolvidas, é necessário se atentar para o significado do resultado de cada filtro aplicado (Alves, 2012), que deve auxiliar, mas não substituir outros métodos de interpretação, pois não dispensa a análise do intérprete, tornando-se, assim, um processo subjetivo (Skeels, 1967).

Dessa forma, a utilização de camadas de dados de fontes distintas, que representam as diversas composições e

profundidades do relevo, especialmente quando integradas em diferentes escalas, proporcionam a detecção e a consequente representação dos lineamentos verdadeiros (Masoud e Koike, 2011b). Contudo, para realizar uma detecção e extração precisa de lineamentos é importante a seleção de fontes de dados adequadas, pois o mapeamento automático requer a compreensão da configuração complexa dos parâmetros a serem empregados (Masoud e Koike, 2017), no qual ajustes apropriados são essenciais para que os parâmetros adequados sejam utilizados em diferentes condições de iluminação e em terrenos distintos (Argialas e Mavrantza, 2004; Kocal et al., 2004). Logo, o uso de diferentes métodos de processamento digital de imagens obtidas por sensores ópticos, radar e aerogeofísicos, que detectam de forma distinta os diferentes aspectos e padrões do relevo, deve possibilitar a detecção e a extração das diversas características associadas aos diferentes tipos de lineamento existentes.

MATERIAIS E MÉTODOS

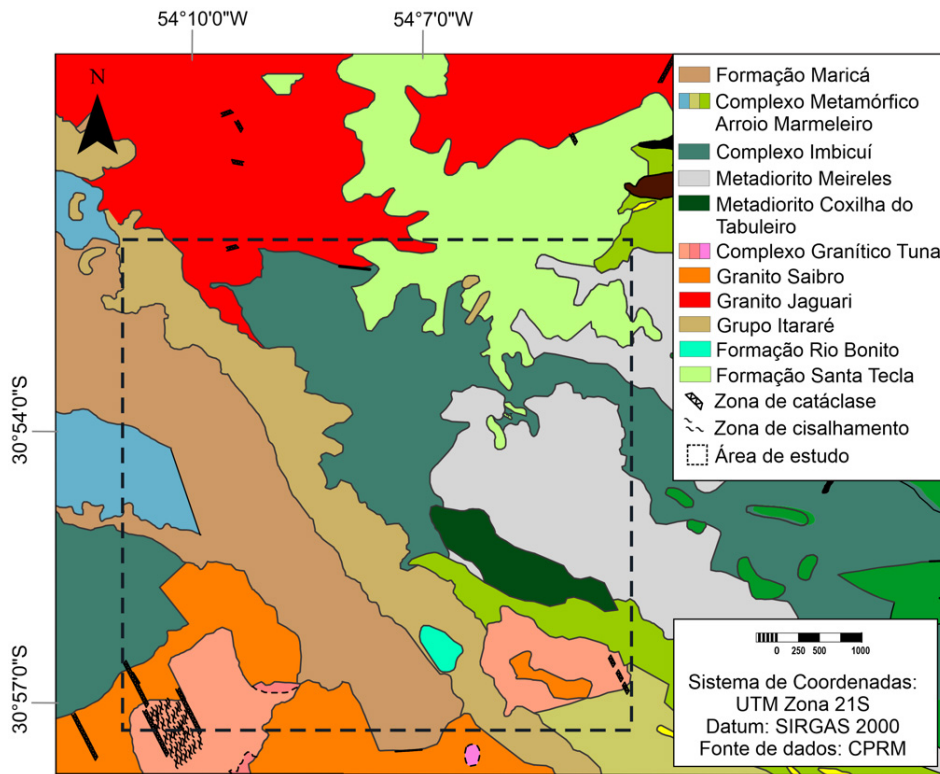
Área de estudo

A área de estudo localiza-se na região sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, nas proximidades das cidades de Lavras

do Sul, Dom Pedrito e São Gabriel, cujas principais vias de acesso são a BR-290, a RS-011 e a RS-156. Esta abrange uma porção da carta topográfica Coxilha do Tabuleiro (SH.21-Z-B-VI-4; MI-2994/4), produzida na escala 1:50.000 pela Diretoria do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG, 1980), com área de aproximadamente 9 km².

Essa região do Escudo Sul-riograndense (ESrg) compreende rochas cujas idades vão desde o Neoproterozoico até o período Terciário. A complexidade geológica atribui para essa área uma grande diversidade de formas de relevo e ocorrência de lineamentos geológicos com extensões e direções variadas. Entre os critérios de escolha da área de estudo está o volume de dados disponíveis, como os de cartas topográficas na escala 1:50.000 (DSG, 1980) e de mapas geológicos da região na escala 1:25.000 (Figura 1) (UFRGS, 2005).

Os dados referentes aos lineamentos morfoestruturais disponíveis para essa área (Figuras 2A e 2B) foram delimitados a partir da interpretação visual do MDE SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 30 m, de um modelo de sombreamento analítico derivado desse MDE, com azimute solar de 0°, elevação solar de 45° e exagero vertical de 3 vezes, e por meio da fotointerpretação de anaglifos na escala 1:60.000 (Goulart, 2017). Os lineamentos magnéticos foram identificados a partir da Primeira



Fonte: modificado de UFRGS (2005).

Figura 1. Mapa geológico da área de estudo.

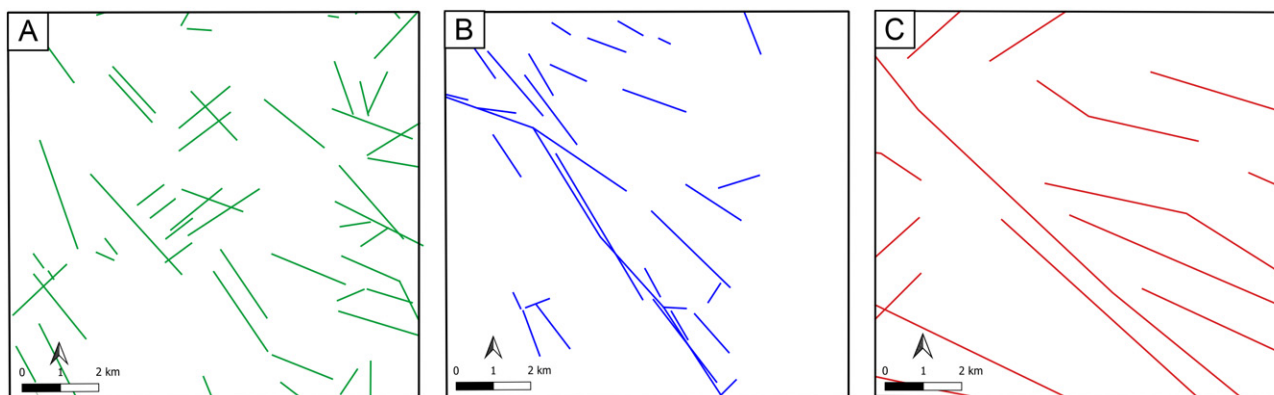


Figura 2. Lineamentos da área de estudo, extraídos manualmente. (A) Lineamentos mapeados por UFRGS (2005); (B) lineamentos mapeados por fotointerpretação do modelo de relevo sombreado de 30 m, com azimuth solar de 0° e elevação solar de 45° (Goulart, 2017); (C) lineamentos magnéticos extraídos a partir da Primeira Derivada Vertical (Goulart, 2017).

Derivada Vertical (1ª DV) (Figura 2C), gerada a partir dos dados do Campo Magnético Anômalo (CMA) disponíveis para a região. Nessa região, estão localizados lineamentos tectonicamente significativos, evidentes em qualquer imagem (CPRM, 2012), os quais são paralelos entre si e apresentam direção NW-SE, compondo a estrutura regional conhecida como Lineamento de Ibaré (LI), renomeada por Goulart (2017) como Zona de Falha Ibaré.

Processamento dos dados

O banco de dados espaciais da carta topográfica Coxilha do Tabuleiro, utilizados nesta pesquisa, abrange as cartas topográficas do mapeamento sistemático brasileiro na escala 1:50.000, disponíveis pela DSG, dados litológicos e estruturais na escala 1:25.000 e 1:60.000 (UFRGS, 2005; Goulart, 2017) e dados aerogeofísicos (Goulart, 2017). Também foram utilizados produtos de sensores remotos ópticos, como de reflectância superficial (modo multispectral) do sensor OLI (*Operational Land Image*) — Landsat 8, com 30 m de resolução espacial, disponibilizados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* — USGS), e imagens de radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* — SAR) da missão Sentinel-1, no modo de aquisição IW (*Interferometric Wide Swath Mode*), polarizadas nos modos *single* (VV) e *dual* (VH), com 20 m de resolução espacial, obtidas a partir do programa Copernicus (Agência Espacial Europeia — ESA).

Os dados de magnetometria foram derivados do Projeto de Levantamento Aerogeofísico do Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010), adquiridos a uma altura média de 100 m e com espaçamento de 500 m entre as linhas de voo. Esses dados apresentam as correções do erro da paralaxe, a remoção da variação diurna, o nivelamento e o micronivelamento dos perfis, e a remoção do *International Geomagnetic*

Reference Field (IGRF). O georreferenciamento foi realizado com o *software* QGIS, com o intuito de minimizar os erros de deslocamento das feições imageadas e referenciar os dados ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS, 2000), na projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), fuso 22, hemisfério Sul.

Imagens de sensores ópticos e radar

O processamento das imagens SAR polarizadas foi realizado no *software* SNAP, desenvolvido pela ESA, por meio da aplicação de diferentes filtros no domínio espacial. Primeiramente, foram importadas as imagens polarizadas e realizado o recorte das imagens, conforme os limites da área de interesse, armazenado em um arquivo em formato vetorial. Em sequência, foi elaborada uma cadeia de processamento a partir da ferramenta *Graph Builder*, na qual foram selecionados diferentes filtros para processar as duas imagens. Os filtros usados foram:

- Redução do ruído termal;
- Aplicação do arquivo de órbita;
- Remoção do ruído de borda;
- Calibração;
- Filtro *speckle*;
- Correção do terreno;
- Linear para dB.

Essas filtragens foram necessárias para atenuar ruídos e distorções das imagens, principalmente ruídos termais e de bordas, os quais degradam a qualidade visual, para fins de interpretação.

Os produtos de reflectância superficial do sensor OLI — Landsat 8 (bandas 1 a 7) foram processados no *software* QGIS 3.10.1, por meio da aplicação da ferramenta de Análise por Componentes Principais (PCA) (Hotelling, 1933).

Esse processamento foi realizado para obter a Primeira Componente Principal (1ª CP), que contém a maior variância dos dados originais da imagem multiespectral (cerca de 85% da variância total das sete bandas usadas) (Dinakar, 2005; Basavarajappa, 2015). A 1ª CP assemelha-se a uma imagem pancromática, com maior contraste e realce de bordas do que todas as imagens das bandas utilizadas, sendo assim mais adequada para a interpretação dos dados estruturais e geológicos (Prakesh e Mohan, 1986).

A partir dos dados de elevação do SRTM v.3, foram derivados oito modelos de relevo sombreado, pela ferramenta *shaded relief* do *software* QGIS, na qual foi aplicada a técnica de sombreado analítico do terreno com orientações solares distintas. Os modelos gerados apresentam um ângulo de elevação solar de 45°, que realça o relevo pela projeção de sombras, e simulações com direções azimutais solares de 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°.

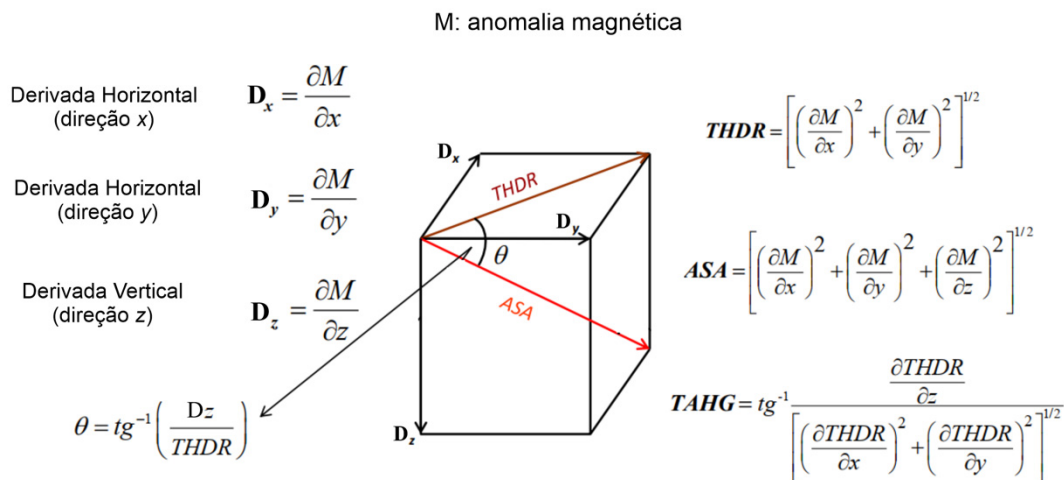
Dados aeromagnetométricos

O realce de feições como lineamentos magnéticos usualmente é realizado a partir de diferentes métodos de filtragem no domínio espacial, apresentados na Figura 3. Entre eles, nesta pesquisa foram utilizados os seguintes filtros: 1ºDV (Blakely, 1995); Derivada *Tilt* (TDR) (Miller e Singh, 1994); e Inclinação do Gradiente Horizontal Total (TAHG) (Ferreira et al., 2013; Bello, 2014), que são considerados produtos propícios para identificar estruturas e contatos entre domínios magnéticos (Reis, 2016).

Geralmente aplicada ao CMA, a DV amplifica em diferentes graus os componentes de alta frequência em determinado conjunto de dados (Naidu e Mathew, 1998), ou seja, realça as anomalias acentuando os gradientes das bordas dos corpos magnéticos rasos, causadas por fontes

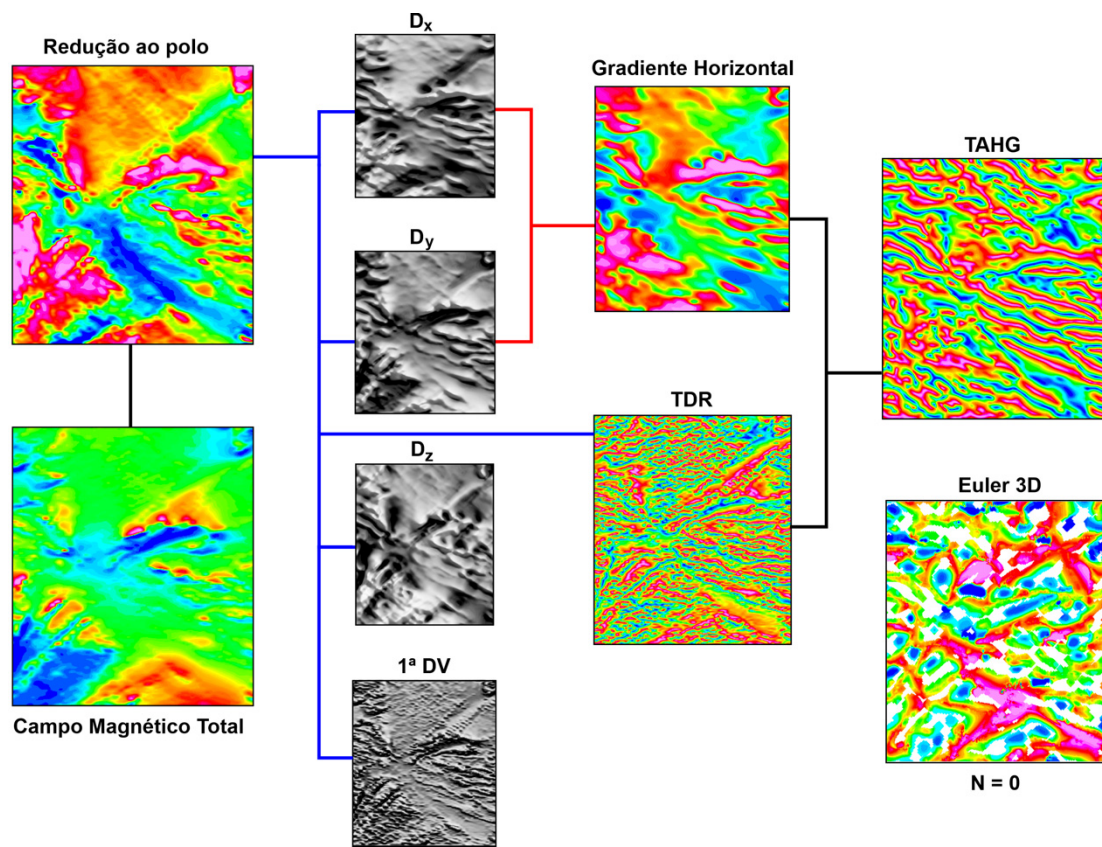
superficiais (Peters, 1949). A TDR (Miller e Singh, 1994; Verduzco et al., 2004; Alves, 2012) tem como vantagem a capacidade de normalizar uma imagem de campo magnético e separar o sinal de ruído, uma vez que o zero da TDR está próximo da borda da estrutura (Salem et al., 2007; Reis, 2016), o que pode representar um contato vertical entre fontes magnéticas anômalas reduzidas ao polo (Rajaram, 2009). Dessa forma., ela se comporta como um filtro de controle de ganho, na qual as amplitudes de saída tendem a ser equalizadas (Verduzco et al., 2004), retratando respostas de fontes mais profundas e fontes rasas de forma semelhante, sendo relativamente insensível à profundidade da fonte (Rajaram, 2009). A TAHG produz máxima amplitude da anomalia situada nas bordas do corpo, centralizando as máximas amplitudes sobre os limites das fontes. É considerado um método eficaz para interpretação qualitativa de mapas gravimétricos e magnetométricos, e uma de suas principais características é a equalização dos sinais provenientes de fontes rasas e profundas (Ferreira et al., 2013).

O processamento dos dados aeromagnetométricos (CPRM, 2010) foi realizado no *software* Oasis Montaj da plataforma Geosoft (Figura 4), no qual inicialmente foi feito o recorte da área de estudo no *grid* do CMA e gerada a redução ao polo. A partir das diferentes ferramentas de processamento do *software*, foram geradas, então, a 1ª DV, a TDR e a TAHG, que realçaram os lineamentos magnéticos. O mesmo *software* foi utilizado para a extração dos lineamentos magnéticos a partir das imagens filtradas, com o uso da ferramenta *CET Grid Analysis* com a qual os algoritmos de detecção de limites, como análise da textura, detecção da lineação e vetorização da lineação, foram aplicados. Depois de armazenados os resultados em estruturas de dados vetoriais, os azimutes de cada lineamento resultante das diferentes filtragens foram obtidos por meio da ferramenta *AzimuthFinder*, no *software*



THDR: Derivada Horizontal Total; ASA: Amplitude do Sinal Analítico; TAHG: Inclinação do Gradiente Horizontal Total.

Figura 3. Equações matemáticas dos diferentes filtros aerogeofísicos.



1ª DV: Primeira Derivada Vertical; TDR: Derivada *Tilt*; TAHG: Inclinação do Gradiente Horizontal Total.

Figura 4. Processamento dos dados aeromagnetométricos no *software* Oasis Montaj, Geosoft.

ArcGis. Os dados tabelados dos azimutes foram importados para o *software* Stereo32, no qual, como resultado, foram gerados automaticamente os diagramas de roseta, contendo a frequência, o comprimento e a direção predominante de todas as feições extraídas.

Por ser uma técnica de mapeamento espacial de campos potenciais, a deconvolução de Euler 3D gerada no *software* Oasis Montaj foi aplicada como ferramenta quantitativa para estimar a posição horizontal e profundidades das fontes magnéticas presentes na área de estudo. Essa técnica possibilita identificar e caracterizar grandes variedades de estruturas geológicas a partir dos diferentes índices estruturais (Tabela 1), aliados às posições estimadas das anomalias (Thompson, 1982; Reid et al., 1990). O índice estrutural escolhido foi o de número zero ($N = 0$), já que identifica e caracteriza tanto os contatos quanto as falhas, feições estas que ocorrem em grandes profundidades da crosta, podendo estar associadas aos lineamentos magnéticos.

Algoritmo de detecção de limites

A extração dos lineamentos foi realizada no *software* Geomatica, a partir do módulo LINE (*Lineament Extraction*).

Tabela 1. Relação entre a ocorrência de estruturas geológicas e o índice estrutural da deconvolução de Euler 3D.

Estrutura geológica	Índice estrutural (N)
Contatos, falhas e foliações	0
Falhas	< 0,5
Diques e soleiras	1
Pipes verticais, corpos tabulares 2D	2
Intrusões, corpos esféricos 3D	3

O LINE é baseado no algoritmo de detecção automática de feições lineares a partir do uso de diferentes valores atribuídos aos parâmetros de detecção de limites (*edge detection*), de limiares (*thresholding*) e da extração de segmentos (*curve extraction*). Todos os parâmetros do LINE são descritos a seguir.

O parâmetro raio do filtro (*Filter Radius* — *RADI*) especifica o raio (em *pixels*) do filtro de detecção de limites e determina o menor nível de detalhe a ser detectado na imagem de entrada. A escolha por um alto valor desse parâmetro resultará em menor quantidade de ruídos e detalhes na detecção de borda (PCI Geomatics, 2016). Outro parâmetro é o limiar de gradiente de borda (*Edge Gradient Threshold*

— GTHR). Os valores desse limiar variam entre 0 e 255, sendo possível selecionar um valor que produza uma imagem de saída binária. Se os *pixels* da imagem deveriam estar conectados, mas se apresentam desconectados, recomenda-se diminuir o valor do GTHR. No entanto, se esses *pixels* se apresentam em grande quantidade e aparecem ruídos, o aumento do valor do GTHR auxilia na redução desses aspectos. É importante ter informações suficientes na imagem de bordas, pois o processo de extração de lineamentos posterior se baseia nessa imagem de bordas como dado de entrada.

A extração de curvas dos lineamentos é controlada no LINE também pelo Limiar de Ajuste de Linha (*Line Fitting Threshold* — FTHR), que define a tolerância de ajuste de segmentos de linha a um lineamento curvilíneo, sendo seu valor especificado em número de *pixels*. Normalmente, um valor de parâmetro de entrada entre 2 e 3 é adequado, pois valores mais baixos resultam em muitos segmentos de linha mais curtos, e valores maiores, no entanto, resultam em lineamentos mais longos e retilíneos. Outro parâmetro é o Limiar de Comprimento da Curva (*Curve Length Threshold* — LTHR), que especifica o comprimento mínimo de uma curva, em *pixels*, a ser considerado como linear. Já o Limiar de Diferença Angular (*Angular Difference Threshold* — ATHR) define o ângulo máximo, em graus, entre os segmentos. Se o ângulo exceder o máximo especificado, o vetor será segmentado em dois ou mais vetores. Esse ângulo também define o ângulo máximo entre dois vetores para que eles sejam vinculados. E o Limiar de Distância de Ligação (*Linking Distance Threshold* — DTHR), que especifica a distância máxima, em *pixels*, entre os pontos finais de dois vetores para que eles sejam vinculados.

Para uma extração acurada, porém similar aos lineamentos morfoestruturais e magnéticos extraídos por Goulart (2017), os algoritmos do módulo LINE foram testados a partir da atribuição de diversos valores aos diferentes parâmetros de detecção. Os testes dos parâmetros foram realizados nos modelos de relevo sombreado derivados dos dados SRTM, com azimute de 0, 45 e 315°. A escolha por esses modelos de sombreado analítico foi realizada com base nos resultados apresentados por Goulart (2017), que apontam para uma tendência estrutural na região com predomínio direcional NW-SE. Logo, o modelo com azimute solar de 0° foi o mesmo utilizado por essa autora, enquanto o modelo com azimute de 45° foi escolhido por ser perpendicular ao predomínio direcional dos lineamentos mapeados na região, garantindo o realce dessas feições com essa direção. O modelo com azimute de 315° é paralelo a esse predomínio, que pode favorecer a identificação dos lineamentos com direções distintas, não tendenciando o resultado.

Depois das testagens, em que foram atribuídas diversas combinações de valores aos parâmetros do módulo LINE, foi selecionado o conjunto de valores que resultaram na melhor detecção (maior precisão). Dessa forma, a extração

precisa dos lineamentos morfoestruturais foi condicionada às quebras positivas e negativas do terreno, associadas à atividade tectônica, representadas, respectivamente, por feições como cristas, escarpas, crateras, facetas triangulares, delineadas por *pixels* de tonalidade clara (quebras positivas, lineamentos positivos), e juntas, falhas, zonas de cisalhamento, vales retilíneos, os quais apareceram na imagem como *pixels* alinhados em tons escuros (Abdullah et al., 2009). Assim, esses parâmetros foram aplicados nos demais modelos de sombreado analítico. O mesmo foi realizado para os dados ópticos, radar e aeromagnetométricos, porém nestes o teste dos parâmetros foi realizado em todas as imagens.

A extração dos lineamentos morfoestruturais foi realizada a partir da importação no *software* Geomatica dos seguintes dados:

- 1ª CP derivada da imagem multiespectral do sensor OLI — Landsat 8;
- imagens SAR polarizadas filtradas (VV e VH) da missão Sentinel-1;
- oito modelos de relevo sombreado derivados da imagem SRTM.

E a extração dos lineamentos magnéticos foi realizada a partir dos dados da 1ª DV, da TDR e da TAHG. Dessa forma, para esses conjuntos de dados de superfície e subsuperfície, os diferentes parâmetros (RADI, GTHR, FTHR, LTHR, DTHR) foram ajustados. A análise e a interpretação quantitativa foram efetuadas por meio dos diagramas de roseta gerados no *software* Stereo32, os quais contêm informações sobre o predomínio direcional dos lineamentos extraídos referentes à cada imagem previamente gerada, assim como a relação de comprimento deles.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sensores ópticos e radar

A partir da realização dos testes dos parâmetros de detecção de limites do módulo LINE, foram escolhidos os conjuntos de valores de parâmetros que resultaram na extração mais acurada dos lineamentos da área de estudo. A partir desses, foram extraídos somente as feições lineares condicionadas a estruturas tectônicas, associadas em superfície às formas de relevo como cristas alinhadas, vales retilíneos, quebras de relevo e contatos litológicos, de forma precisa e contínua. Desse modo, mantém-se uma correlação similar aos lineamentos extraídos manualmente e representados em mapas geológicos. Os valores escolhidos para as imagens da 1ª CP, do SAR VH e VV são apresentados na Tabela 2.

A partir da 1ª CP (Figura 5A) foram extraídos automaticamente 131 lineamentos. Com predomínio evidente nos dois diagramas de roseta, os lineamentos extraídos a partir da 1ª CP apresentaram predomínio direcional NW-SE, correspondendo ao relatado por Goulart (2017). É notável que a maioria dos lineamentos extraídos nessa imagem está relacionado a uma mudança abrupta na tonalidade da imagem, ou seja, onde houve maior contraste tonal, mas também foram extraídos lineamentos associados a cristas e vales. Os maiores comprimentos de lineamentos ocorreram na direção NW-SE, acompanhando as feições mais expressivas mapeadas na região, que compõem a Zona de Falha de Ibaré (Goulart, 2017).

A partir da imagem SAR VH (Figura 5B) foram extraídos 212 lineamentos, que também estão associados à mudança abrupta na tonalidade do terreno nas imagens, porém a correlação desses com a ocorrência de cristas e vales foi maior do que a observada na 1ª CP. Com predomínio direcional NE-SW, a maior parte desses lineamentos, assim como aqueles com maiores extensões, não corresponderam com os fotointerpretados por Goulart (2017). No entanto, é possível observar nos diagramas de roseta de frequência e comprimento que ocorreu predomínio secundário com direção NW-SE, mostrando coerência com o resultado relatado por essa mesma autora.

A imagem SAR VV (Figura 5C) é visualmente semelhante à imagem SAR VH, porém foram reconhecidos mais elementos do relevo nessa primeira e, conseqüentemente, um número maior de lineamentos, em um total de 233. Com comprimentos similares aos extraídos na imagem SAR VH, as feições extraídas a partir da imagem VV também estão relacionadas com mudanças tonais, cristas e vales. Apresentaram dois predomínios direcionais primários, NNE-SSW e WNW-ESE, nos quais os maiores comprimentos estão associados à direção NNE-SSW; entretanto, outro conjunto de lineamentos com grandes comprimentos possuiu direção WNW-ESE, apresentando também correlação com Goulart (2017).

Tabela 2. Valores dos parâmetros do módulo LINE usados para a extração dos lineamentos nas imagens da Primeira Componente Principal e do radar de abertura sintética nos modos *dual* e *single*.

Teste de parâmetros: módulo LINE						
INPUT	RADI	GTHR	LTHR	FTHR	ATHR	DTHR
1ª CP	10	50	20	5	15	10
VH	20	100	50	10	30	20
VV	20	100	50	10	30	20

RADI: Filter Radius; GTHR: Edge Gradient Threshold; LTHR: Curve Length Threshold; FTHR: Line Fitting Error Threshold; ATHR: Angular Difference Threshold; DTHR: Linking Distance Threshold; 1ª CP: Primeira Componente Principal; VH: radar de abertura sintética no modo *dual*; VV: radar de abertura sintética no modo *single*.

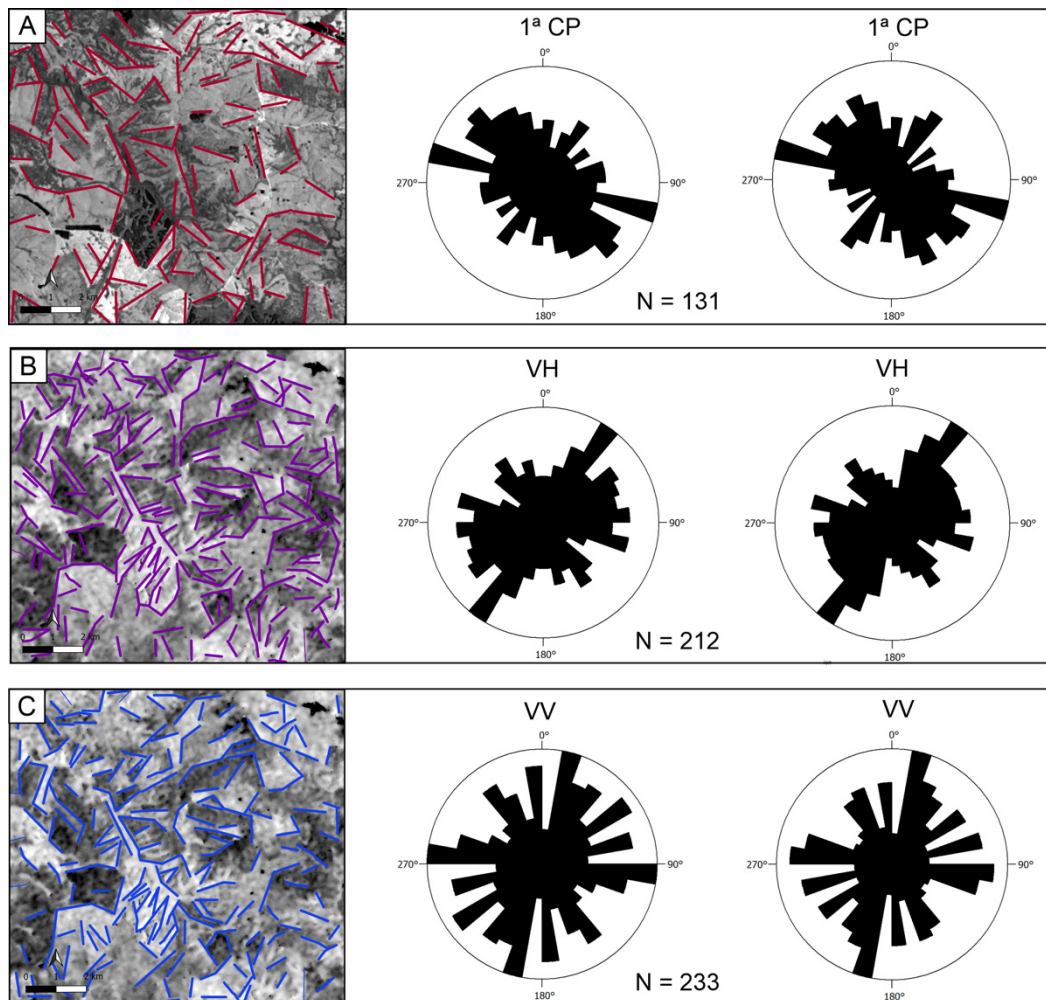
Os parâmetros escolhidos para a 1ª CP foram diferentes das imagens SAR, nos quais foi extraído um número menor de lineamentos. Apesar disso, foi com a imagem da 1ª CP que ocorreu a detecção dos lineamentos com predomínio direcional NW-SE, contendo as maiores extensões, de acordo com Goulart (2017). A imagem SAR VV, por extrair mais lineamentos e apresentar outro predomínio direcional na região, contribuiu para trazer mais informações sobre lineamentos dessa área. Logo, a 1ª CP e a SAR VV apresentaram resultados compatíveis com os de Goulart (2017), com caráter complementar.

Desse modo, a utilização de diferentes fontes de dados contribuiu para a obtenção de maiores informações sobre os lineamentos, cujos diferentes resultados abordam de forma distinta os aspectos e as características do alvo de interesse. Quando analisadas em conjunto, essas informações podem ser complementares, sendo capazes de elucidar questões que com um único conjunto de dados de uma fonte não seria possível. Portanto, com maior quantidade de informações distintas, foi possível fazer uma interpretação mais apropriada, acurada e precisa a partir do uso combinado dos diferentes resultados obtidos a partir de fontes de dados distintas, em que cada fonte de dados é capaz de fornecer uma perspectiva diferente do alvo, proporcionando uma interpretação consistente e abrangente.

Para os modelos de relevo sombreado, após a realização de testes de valores dos parâmetros de entrada no módulo LINE, foi selecionado um único conjunto de valores que possibilitou extrair de forma mais precisa os lineamentos associados a formas do relevo, como cristas alinhadas, vales retilíneos, quebras de relevo e facetas triangulares, respeitando a conectividade dessas feições, semelhante àquelas extraídas por métodos manuais. Assim, os mesmos valores foram replicados em todos esses modelos. Os valores dos parâmetros utilizados nesse processamento estão descritos na Tabela 3.

Os lineamentos extraídos são feições que apresentaram correlação direta com a ocorrência de formas do relevo, como cristas e vales. Para ilustrar as feições extraídas e os predomínios direcionais correspondentes a essas, foram geradas as Figuras 6, 7 e 8, respectivamente. Os modelos de relevo sombreado com azimute solar de 0 e 180° (Figuras 6A e 6C) realçaram as feições, porém estas apresentaram variações direcionais contendo dois predomínios direcionais diferentes nas duas imagens. Os lineamentos extraídos a partir do modelo de azimute solar de 0° (Figura 6A) foram iguais a 178, com predomínio direcional primário de ENE-WSW e secundário de WNW-ESE, e os lineamentos mais extensos apresentaram tendência WNW-ESE (Figura 8A).

Nos modelos de relevo sombreado com azimute solar de 45 e 225° (Figuras 6B e 6D), foi constatado o predomínio direcional NW-SE, tal como apontado por Goulart (2017), porque esses iluminam o terreno de forma perpendicular à



1ª CP: Primeira Componente Principal; VH: modo *dual* do radar de abertura sintética; VV: modo *single* do radar de abertura sintética.

Figura 5. Lineamentos extraídos automaticamente pelo módulo LINE, do *software* Geomatica, com os respectivos diagramas de roseta da frequência e do comprimento com o predomínio direcional, obtidos a partir das seguintes imagens: (A) Primeira Componente Principal; (B) radar de abertura sintética com polarização *dual*; (C) radar de abertura sintética com polarização *single*.

tendência direcional dos lineamentos na região, favorecendo a identificação dessas feições.

No modelo com azimute de 45°, foi extraído um total de 150 lineamentos. Entre esses, os com maior extensão apresentaram predomínio direcional WNW-ESE (Figura 8B). Já a partir do modelo com azimute de 225° (Figura 6D) foram extraídos 192 lineamentos, dos quais os com maior extensão possuíam o mesmo predomínio direcional que os demais: NW-SE. (Figura 8F).

Os modelos de relevo sombreado com azimute solar de 90 e 270° (Figuras 7A e 7C) também realçaram os lineamentos, porém, no azimute 90°, na zona de sombra visível na parte central desse modelo sombreado, nenhum lineamento foi mapeado. No entanto, isso não comprometeu a extração,

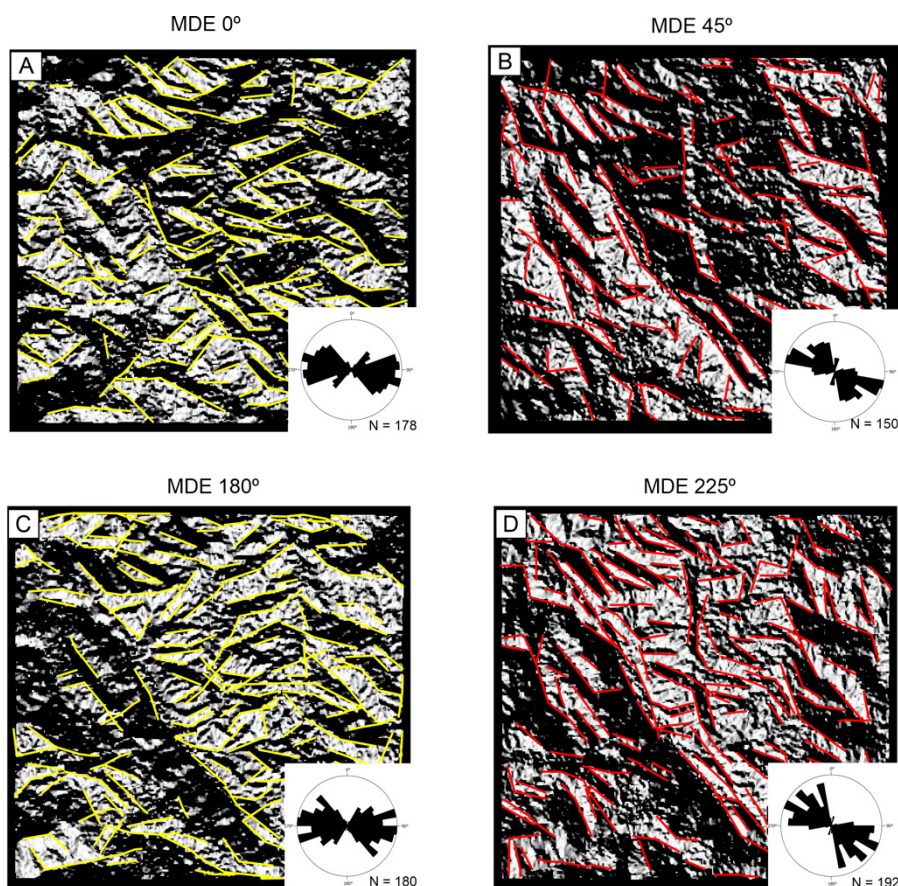
Tabela 3. Valores dos parâmetros do módulo LINE usados para a extração dos lineamentos nos oito modelos de relevo sombreado derivados do Modelo Digital de Elevação SRTM.

Teste de parâmetros: módulo LINE

INPUT	RADI	GTHR	LTHR	FTHR	ATHR	DTHR
MDT	10	50	30	2	15	20

RADI: Filter Radius; GTHR: Edge Gradient Threshold; LTHR: Curve Length Threshold; FTHR: Line Fitting Error Threshold; ATHR: Angular Difference Threshold; DTHR: Linking Distance Threshold; MDT: Modelo Digital de Elevação.

que totalizou 221 lineamentos. Nesse modelo, a maioria das feições teve direção NNW-SSE, ocorrendo igualmente para as que apresentam os maiores comprimentos (Figura 8C). No modelo com azimute de 270° (Figura 7C), foi detectado



MDE: Modelos Digitais de Elevação.

Figura 6. Modelos de relevo sombreado, com 30 m de resolução espacial, obtidos por azimutes solares 0°, 45°, 180° e 225°, contendo os lineamentos morfoestruturais extraídos a partir do módulo LINE do *software* Geomatica e os respectivos diagramas de roseta referentes às frequências.

um total de 174 lineamentos, dos quais grande parte apresentou orientação próxima a N-S, incluindo as feições mais extensas.

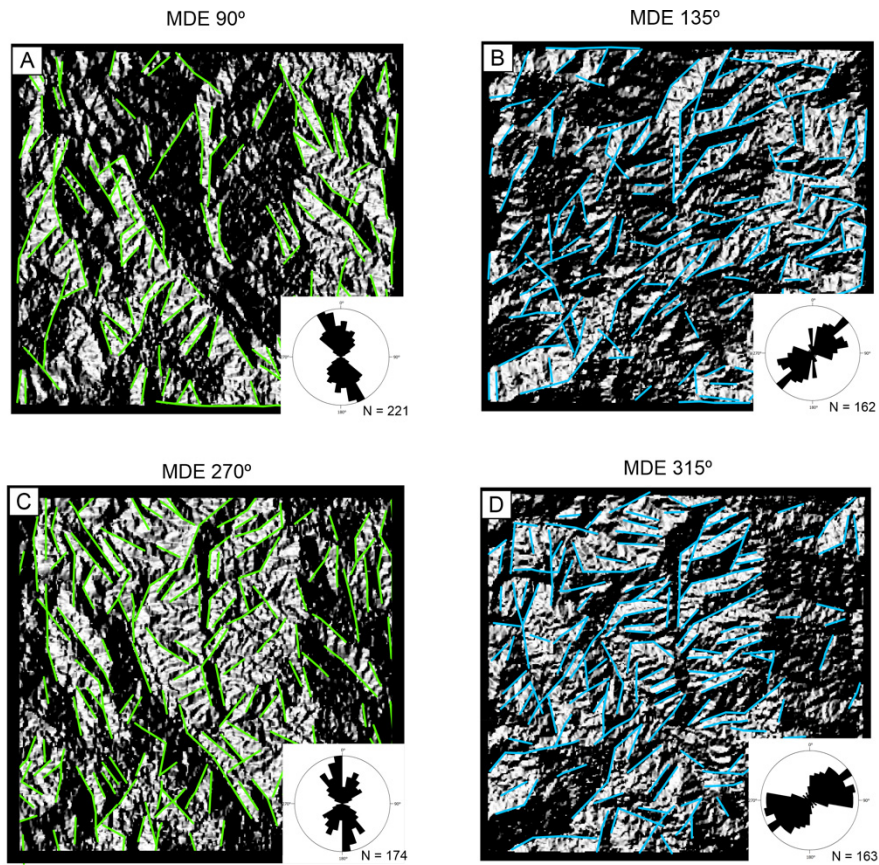
O modelo de relevo sombreado com azimute solar de 135° (Figura 7B) apresentou feições mais curvilíneas quando comparado com os demais modelos. Nele, foram extraídos 162 lineamentos, sendo a maior parte de predomínio direcional NE-SW e, minoritariamente, de NW-SE. Os lineamentos com comprimento maior apresentam predomínio direcional de ENE-WSW, porém alguns dos lineamentos considerados curtos apresentam predomínio direcional NW-SE (Figura 8D). O modelo com azimute solar de 315° (Figura 7D) apresentou frequência com alta taxa de distribuição e maior quantidade de lineamentos considerados extensos. Foram identificados 163 lineamentos, os quais também apresentaram predomínio direcional NE-SW; entretanto, os lineamentos com maiores extensões tiveram duas direções preferenciais: NE-SW e NW-SE (Figura 8H).

Logo, em todos os modelos de relevo sombreado foram observados lineamentos com direção NW-SE. Os modelos

dos quais foram extraídos os lineamentos com predomínio direcional de NW-SE foram 0, 45 e 225°. Nesses, os lineamentos mais expressivos também apresentaram o mesmo predomínio. Já os modelos com azimutes solares de 90, 180 e 270° tiveram predomínio próximo à direção esperada, principalmente no modelo com 180°, em que os lineamentos mais extensos possuíram direção NW-SE. Diferindo dos demais, os modelos com azimutes solares de 135 e 315° resultaram em lineamentos com predomínio direcional oposto ao esperado, que ocorre porque esses azimutes são paralelos à tendência estrutural regional, evidenciando assim feições com direção NE-SW. Porém, mesmo que em pequena quantidade e nas feições menores, nesses modelos de relevo sombreado também foram observadas tendências à direção NW-SE.

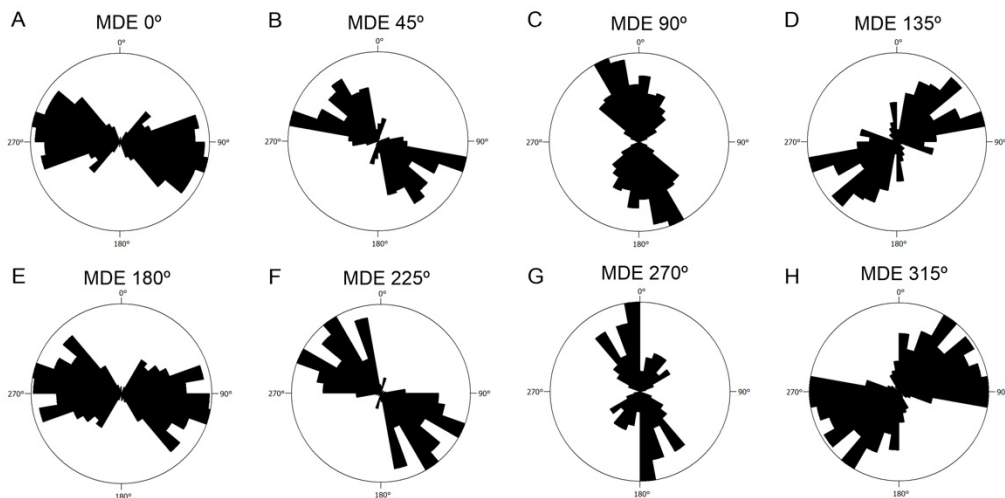
Magnetometria

Apesar de fornecer uma resposta visual similar à 1ª DV (Figura 9A), a TDR (Figura 9B) não é considerada



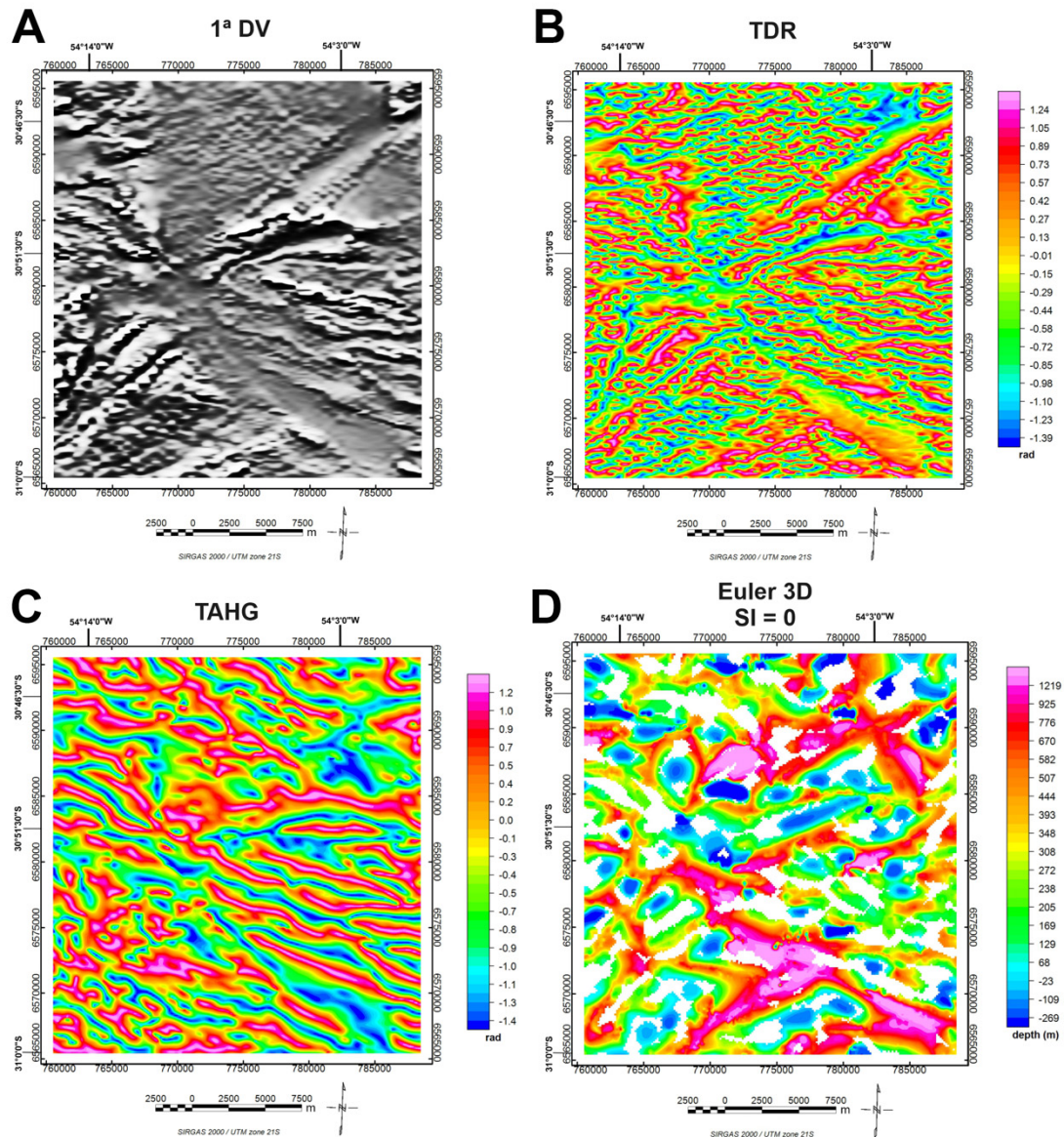
MDE: Modelos Digitais de Elevação.

Figura 7. Modelos de relevo sombreado, com 30 m de resolução espacial, obtidos por azimutes solares 90°, 135°, 270° e 315°, contendo os lineamentos morfoestruturais extraídos a partir do módulo LINE do *software* Geomatica e os respectivos diagramas de roseta referentes às frequências.



MDE: Modelos Digitais de Elevação.

Figura 8. Diagramas de roseta dos comprimentos e o predomínio direcional dos lineamentos extraídos dos modelos de relevo sombreado.



1ª DV: Primeira Derivada Vertical; TDR: Derivada *Tilt*; TAHG: Inclinação do Gradiente Horizontal Total.

Figura 9. Produtos aeromagnetométricos gerados para a área de estudo: (A) Primeira Derivada Vertical; (B) Derivada *Tilt*; (C) Inclinação do Gradiente Horizontal Total; (D) Deconvolução de Euler 3D.

um filtro de destaque de bordas, por posicionar o pico máximo no centro da fonte anômala. Esse filtro privilegia a continuidade das anomalias, retratando as respostas de fontes rasas e fontes profundas de forma semelhante, realçando os contatos das fontes com densidades distintas. Diferentemente da TDR, a TAHG (Figura 9C) centraliza a amplitude máxima da anomalia nas bordas do corpo, realçando o limite entre as fontes, além de equalizar os sinais provenientes de fontes rasas e profundas, auxiliando na interpretação qualitativa de mapas magnetométricos.

Outros resultados foram obtidos por meio da deconvolução de Euler (Figura 9D), no qual foi possível visualizar a relação das anomalias com a profundidade, permitindo correlacionar essas com os centros e as bordas mapeadas nas filtragens, além de verificar a existência de possíveis contatos entre blocos tectônicos, marcados pela presença de feições com profundidades até o embasamento rochoso.

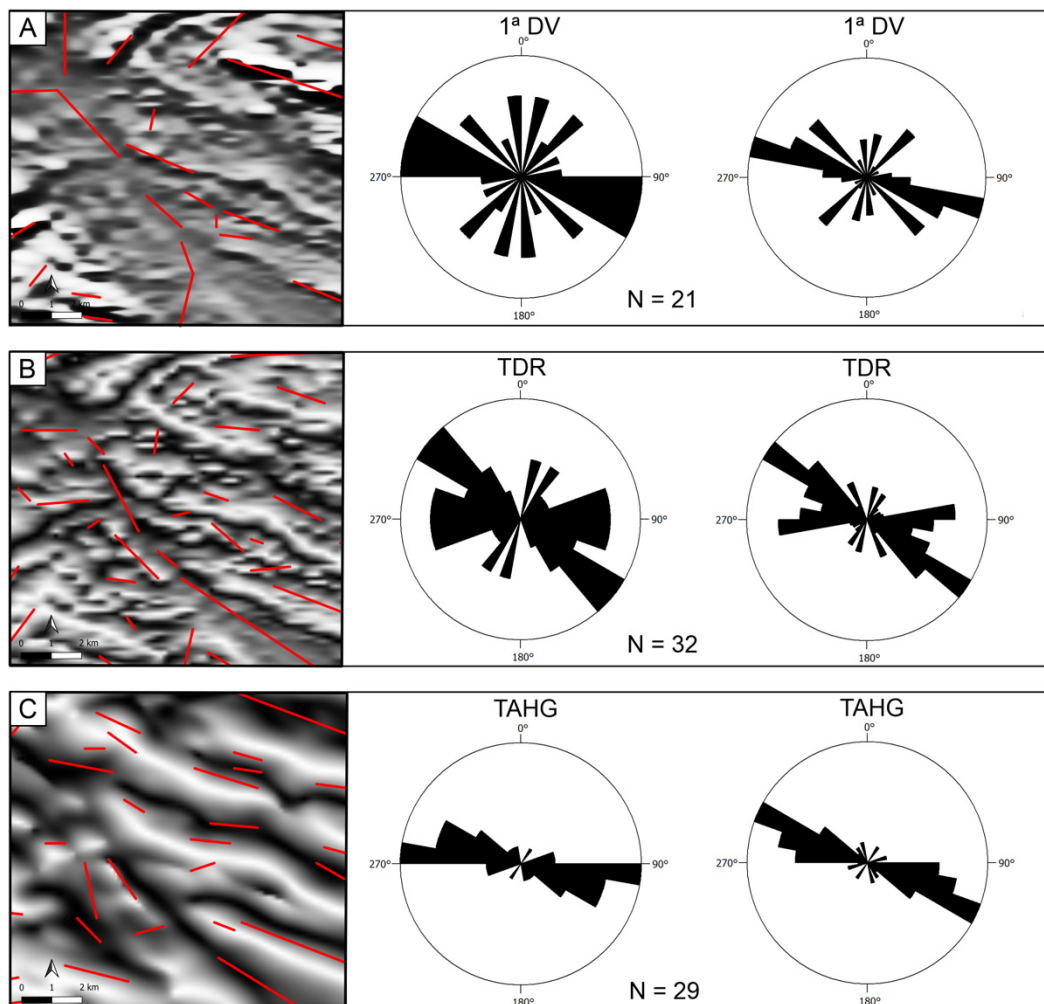
Resultantes do processamento no *software* Oasis Montaj, as imagens presentes na Figura 10 apresentaram os lineamentos extraídos a partir do algoritmo de detecção de limites. Os lineamentos extraídos a partir da 1ª DV não abrangeram

todas as anomalias magnéticas visíveis na imagem; assim, várias feições não foram mapeadas. Totalizando apenas 21 lineamentos, esses apresentaram predomínio direcional NW-SE, incluindo os de maior comprimento.

Os lineamentos extraídos por meio da TDR abrangem uma área maior na imagem, totalizando 32 feições extraídas. Porém, nem todas as anomalias foram mapeadas. Os lineamentos apresentaram predomínio direcional NW-SE, nos quais os maiores comprimentos contêm essa direção. Na TAHG, foram extraídas feições mais contínuas, entretanto com frequência um pouco menor quando comparada à TDR, totalizando 29 lineamentos magnéticos. Os lineamentos extraídos tiveram predomínio direcional WNW-ESE, porém os mais expressivos apresentaram predomínio direcional NW-SE.

A partir da realização dos testes dos parâmetros de detecção de limites do módulo LINE para os mapas aerogeofísicos, foi escolhido um conjunto de valores para os parâmetros que melhor se adequou à extração acurada dos lineamentos magnéticos, nos quais as feições extraídas foram aquelas que contornaram as bordas e os picos dos corpos anômalos correspondentes a contatos litológicos e estruturas profundas, que podem caracterizar suturas entre terrenos geológicos. Os valores escolhidos são apresentados na Tabela 4.

Por meio do LINE, os lineamentos magnéticos extraídos a partir dessas mesmas imagens apresentaram aumento significativo da frequência (Figura 11). Na 1ª DV, foram extraídos lineamentos com diversos comprimentos abrangendo toda a imagem, e apenas poucos não foram mapeados, totalizando 117 lineamentos magnéticos extraídos.



1ª DV: Primeira Derivada Vertical; TDR: Derivada *Tilt*; TAHG: Inclinação do Gradiente Horizontal Total.

Figura 10. Lineamentos extraídos automaticamente a partir do algoritmo de detecção de bordas, no *software* Oasis Montaj, com os respectivos diagramas de roseta da frequência e do comprimento com o predomínio direcional, obtidos a partir das seguintes imagens: (A) Primeira Derivada Vertical sombreada; (B) Derivada *Tilt* sombreada; (C) Inclinação do Gradiente Horizontal Total sombreada.

Entre estes, a maioria apresentou predomínio direcional de WNW-ESE, incluindo os com maiores comprimentos nesse predomínio.

Tabela 4. Valores dos parâmetros do módulo LINE escolhidos para a extração dos lineamentos nas imagens da Primeira Derivada Vertical, da Derivada *Tilt* e da Inclinação do Gradiente Horizontal Total.

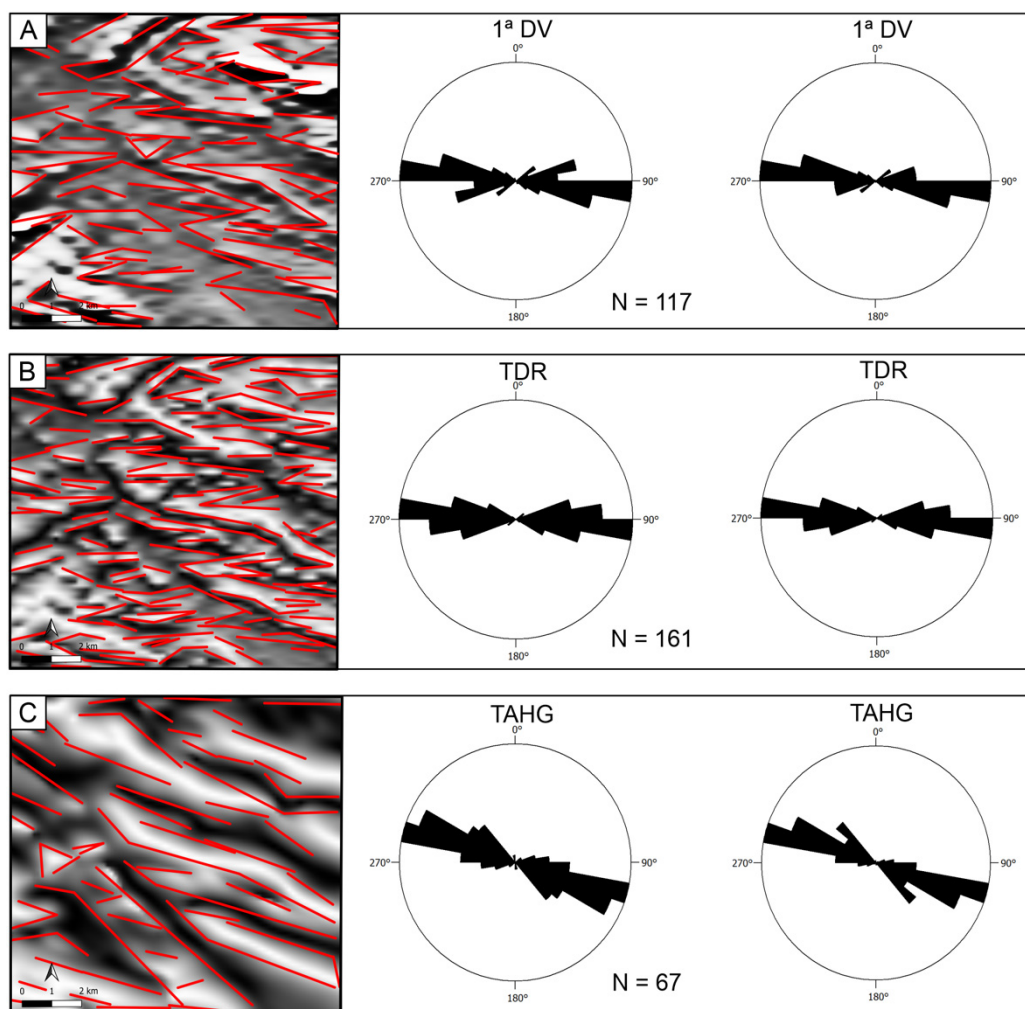
Teste de parâmetros: módulo LINE						
INPUT	RADI	GTHR	LTHR	FTHR	ATHR	DTHR
1ª DV	30	100	100	50	15	10
TDR	20	50	100	20	15	10
TAHG	30	100	100	50	15	10

RADI: Filter Radius; GTHR: Edge Gradient Threshold; LTHR: Curve Length Threshold; FTHR: Line Fitting Error Threshold; ATHR: Angular Difference Threshold; DTHR: Linking Distance Threshold; 1ª DV: Primeira Derivada Vertical; TDR: Derivada *Tilt*; TAHG: Inclinação do Gradiente Horizontal Total.

Apesar de a TDR ser visualmente próxima à 1ª DV, por destacar igualmente fontes profundas e rasas, realçou um número maior de anomalias e, conseqüentemente, um número maior de lineamentos foi extraído, totalizando 161. Esses também apresentaram predomínio direcional de WNW-ESE, englobando, nessa direção, os lineamentos mais longos.

Visualmente diferentes dos lineamentos da 1ª DV e da TDR, os lineamentos extraídos a partir da TAHG foram contínuos e extensos, mapeando melhor as bordas das anomalias. A TAHG apresentou menor frequência quando comparada com os outros filtros, totalizando 67 lineamentos magnéticos extraídos. Entretanto, o predomínio direcional da maioria dos lineamentos, incluindo os mais extensos, é NW-SE.

Logo, apesar de apresentarem valores de parâmetros próximos ou iguais, os lineamentos magnéticos extraídos em cada imagem apresentam frequências e direções variadas,



1ª DV: Primeira Derivada Vertical; TDR: Derivada *Tilt*; TAHG: Inclinação do Gradiente Horizontal Total.

Figura 11. Lineamentos extraídos automaticamente pelo módulo LINE, do software Geomatica, com os respectivos diagramas de roseta da frequência e do comprimento com o predomínio direcional, obtidos a partir das seguintes imagens: (A) Primeira Derivada Vertical sombreada; (B) Derivada *Tilt* sombreada; (C) Inclinação do Gradiente Horizontal Total sombreada.

e diferentes dos lineamentos de superfície. Nos mapas geofísicos, os lineamentos não apresentam muitas variações direcionais, ocorrendo em todos o predomínio direcional NW-SE, apresentado por Goulart (2017). Contudo, mesmo havendo um grande conjunto de estruturas contendo direções distintas, os dados aerogeofísicos mostraram que a tendência estrutural na região da área de estudo foi de NW-SE, marcada principalmente por lineamentos mais expressivos que abrangem maiores profundidades.

DISCUSSÃO

É notável a diferença dos lineamentos extraídos a partir dos diferentes dados utilizados neste estudo. Isso ocorreu em razão das características específicas de cada conjunto

de dados, que retratou de formas diferentes os aspectos do terreno, influenciando, conseqüentemente, na escolha dos valores dos parâmetros para cada imagem utilizada no módulo LINE. Assim, os valores dos parâmetros de detecção de limites foram ajustados de acordo com cada imagem e tipo de dados.

Nas imagens ópticas e SAR, os valores selecionados para cada parâmetro foram diferentes para a imagem da 1ª CP e as imagens VV e VH, respectivamente, mesmo essas sendo visivelmente semelhantes, por realçar os limites tonais presentes na imagem. Para VV e VH, os parâmetros foram os mesmos, por serem imagens com características similares, obtidas pelo mesmo sensor, e por representarem o relevo de forma semelhante. Porém, com relação ao esperado para a área de estudo, conforme Goulart (2017) (Figura 12A), a diferença de polarização dessas imagens resultou em

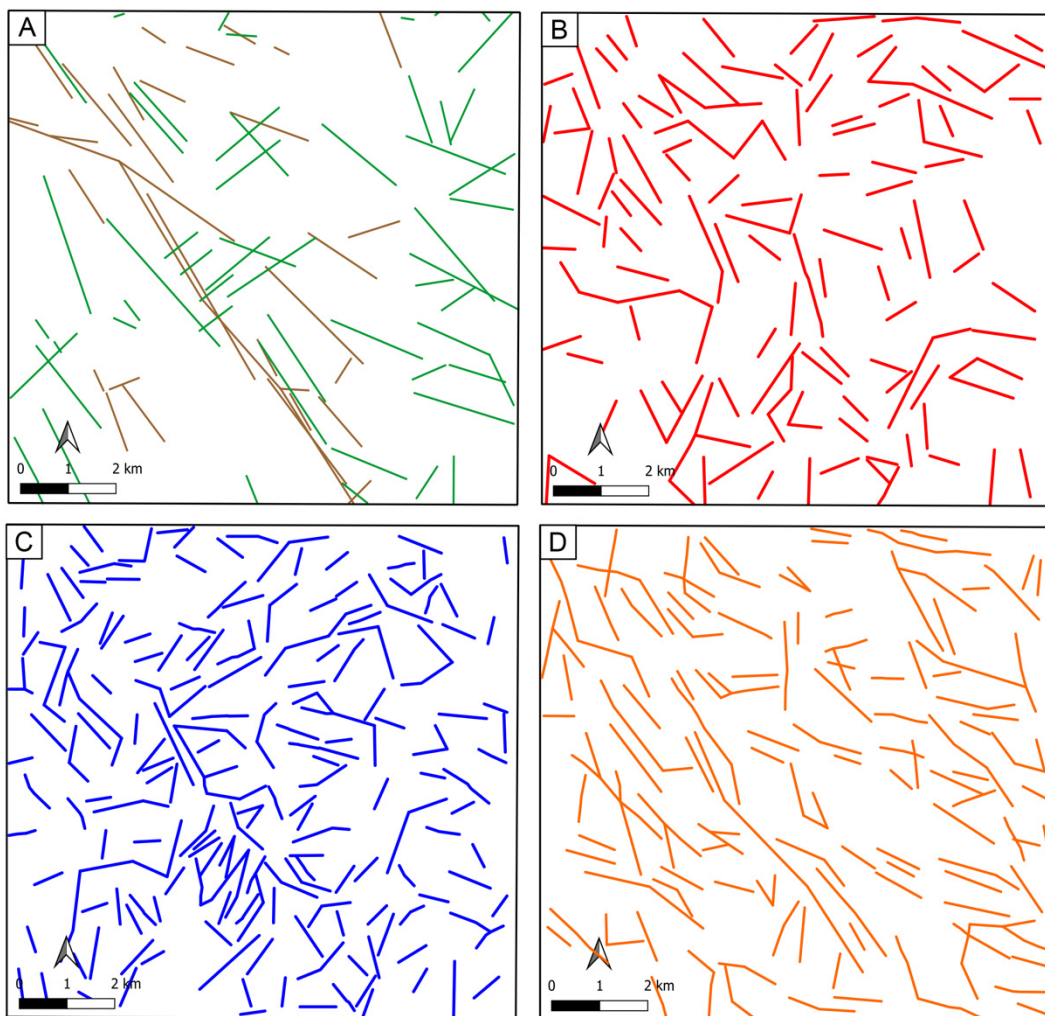


Figura 12. Lineamentos morfoestruturais detectados na área de estudo. (A) Em verde, estão representados os lineamentos mapeados por UFRGS (2005), e em marrom, os mapeados por Goulart (2017); (B) lineamentos extraídos a partir da Primeira Componente Principal; (C) lineamentos extraídos a partir da imagem do radar de abertura sintética no modo *single*; (D) lineamentos extraídos a partir do modelo de relevo sombreado com azimute solar de 45°.

uma frequência maior de lineamentos na imagem da VV (Figura 12C), na qual as feições extraídas com maiores comprimentos tiveram predomínio direcional NW-SE.

Apesar de também destacar diferenças tonais, a 1ª CP (Figura 12B) detectou uma quantidade menor de lineamentos quando comparada com as imagens SAR polarizadas, porém mais contínuos. Essa condição está relacionada diretamente com os valores dos parâmetros escolhidos para essas imagens: para a 1ª CP, o parâmetro *Filter Radius* foi menor que o adotado para as imagens SAR. Com grande aumento do valor, os lineamentos detectados a partir da 1ª CP eram errôneos, ou seja, não delimitaram de forma precisa as cristas, os vales e as quebras do relevo, e apresentaram-se em grandes quantidades, sendo assim excessivos, prejudicando a visualização do terreno e logo se tornando uma escolha inadequada. Entretanto, o aumento desse parâmetro nas imagens SAR contribuiu para uma detecção mais abrangente, em que os lineamentos foram extraídos de forma precisa por toda a área de estudo.

Comparados com as imagens SAR, os valores dos parâmetros para a extração dos lineamentos a partir da 1ª CP foram menores, em razão das diferentes características entre essas imagens e de como representam o terreno da área de estudo. Por exemplo, por terem alto índice de ruídos, as imagens SAR necessitaram de alto valor atribuído ao parâmetro *Edge Gradient Threshold*, o que não foi necessário para a 1ª CP. Logo, os parâmetros adequados para uma imagem não necessariamente foram adequados para outra; mesmo se possuírem características específicas muito próximas, o resultado para a extração dos lineamentos pode ser distinto.

O mesmo ocorreu entre as imagens radar, observadas nos resultados obtidos a partir das imagens SAR e nos modelos de relevo sombreado. O conjunto de parâmetros adotados para a extração dos lineamentos nas imagens SAR VV e VH, quando comparado com os modelos de sombreado analíticos gerados a partir de dados SRTM v.3, foi distinto. O que exemplifica novamente a questão da percepção do relevo em cada tipo de dado. Nas imagens SAR, muitos dos lineamentos extraídos estão relacionados com limites tonais na imagem, que podem ser mudanças na umidade do solo, zonas de cultivo e contatos litológicos. Também foram extraídos lineamentos associados a cristas e vales, porém com menor frequência que os lineamentos extraídos nos modelos de relevo sombreado.

Os modelos de relevo sombreado possibilitaram a percepção do terreno em vários ângulos a partir da atribuição de diferentes azimutes de iluminação, abrangendo todo o terreno e permitindo, assim, realçar os diversos elementos do relevo, corroborando para as altas frequências de detecção dos lineamentos. Portanto, a utilização de diferentes azimutes foi importante para realçar os lineamentos em toda a área da imagem. Porém, com a desvantagem de que não se sabe quais lineamentos presentes nessas imagens estão

associados aos limites tonais, já que as mudanças de tonalidade observadas nesses modelos estavam relacionadas ao sombreado do terreno e não à composição do solo e ao tipo de rocha que compõe o terreno.

Diferentemente das outras imagens, a maioria dos modelos de relevo sombreado realçou uma extensa feição presente na parte central da imagem com direção NW-SE, que dependendo do azimute de iluminação, apareceu como crista ou vale. Essa feição é um dos limites da Zona de Falha Ibaré, uma feição estrutural de escala regional presente na área de estudo, redefinida por Goulart (2017). Por ter direção NW-SE, ela não apareceu com grande destaque nos modelos de relevo sombreado com azimutes solares de 135 e 315°, paralelos a ela.

Quando comparados com os resultados obtidos por meio da 1ª CP, da VH e da VV, os modelos de relevo sombreado se mostram superiores por apresentarem o relevo de forma tridimensional, realçando os elementos do terreno, e pela alta precisão na extração dos lineamentos, resultando em altas frequências de feições, acompanhando bem as formas do relevo como cristas e vales. Em destaque entre os modelos de relevo sombreado, no modelo com azimute solar de 90°, foram identificadas as maiores quantidades de lineamentos, mesmo havendo áreas não mapeadas na imagem. Essa identificação pode estar relacionada ao posicionamento da iluminação gerada a partir desse azimute solar, que sombreia o terreno de forma praticamente perpendicular à tendência regional NW-SE. Essa diferença mínima em graus contribuiu para o realce de mais elementos do relevo e, conseqüentemente, para o aumento da quantidade de feições extraídas associadas a eles. Nos modelos com azimute solar de 45° (Figura 12D) e 225°, foi observada a maior frequência de lineamentos com predomínio direcional NW-SE, incluindo os mais extensos. Logo, cada modelo mapeou lineamentos de acordo com o posicionamento do sombreado no terreno, o qual diferiu em cada modelo, sendo a elaboração de todos necessária para a realização de uma avaliação e interpretação acuradas do relevo da área de estudo.

Como a função LINE utiliza diferentes parâmetros para a detecção de limites e possibilita a modificação de seus valores, esse algoritmo permitiu o mapeamento das bordas dos corpos anômalos representados nos mapas aerogeofísicos. Entretanto, os valores escolhidos para os parâmetros utilizados na extração dos lineamentos morfoestruturais por meio da 1ª CP, da SAR VV e da SAR VH, e dos modelos de relevo sombreado, não apresentaram bons resultados quando aplicados nas imagens aeromagnetométricas filtradas. As anomalias em destaque na 1ª DV, na TDR e na TAHG são feições contínuas com limites sinuosos, o que dificulta a detecção dos lineamentos principalmente como feições lineares retilíneas, igualmente observados nas imagens ópticas e radar.

Logo, nessas imagens, foi atribuído um alto valor para o parâmetro *Line Fitting Error*, para que a extração dos limites e picos centrais das anomalias apresentasse uma geometria linear retilínea, semelhante aos lineamentos morfoestruturais.

Portanto, foram escolhidos outros valores para os parâmetros do módulo LINE, que extraíssem de forma satisfatória os lineamentos magnéticos. O novo conjunto de valores extraiu grandes quantidades de lineamentos respeitando os limites de cada anomalia e contendo boa conectividade, abrangendo adequadamente as imagens (Figura 13). Coincidentemente, os valores escolhidos para a 1ª DV e a TAHG (Figuras 13B e 13D) foram os mesmos, porém os resultados foram visivelmente distintos, marcados pela diferença entre as frequências e os comprimentos. A TDR foi a responsável pela maior frequência, seguida pela 1ª DV, e ambas apresentaram predomínio direcional WNW-ESE,

sendo detectados, a partir da 1ª DV, os lineamentos mais curtos. Quando comparados com os lineamentos magnéticos extraídos por Goulart (2017), a TAHG (Figura 13D) foi a que apresentou a melhor correlação. Apesar da baixa frequência, os lineamentos extraídos são contínuos e contêm predomínio direcional NW-SE, abrangendo neste os maiores comprimentos.

O mapa da deconvolução de Euler mostrou uma extensa região que atingiu grandes profundidades com a mesma orientação (NW-SE) dos lineamentos extraídos, visível também nos mapas da 1ª DV e da TDR. Essa zona profunda provavelmente foi responsável pela origem dos lineamentos magnéticos e morfoestruturais decorrentes na região, pois, a partir dos períodos de reativação crustal, foram geradas novas estruturas tanto em superfície quanto em subsuperfície, aumentando a frequência dessas feições na direção NW-SE. Na direção SE-NW, também ocorreram regiões

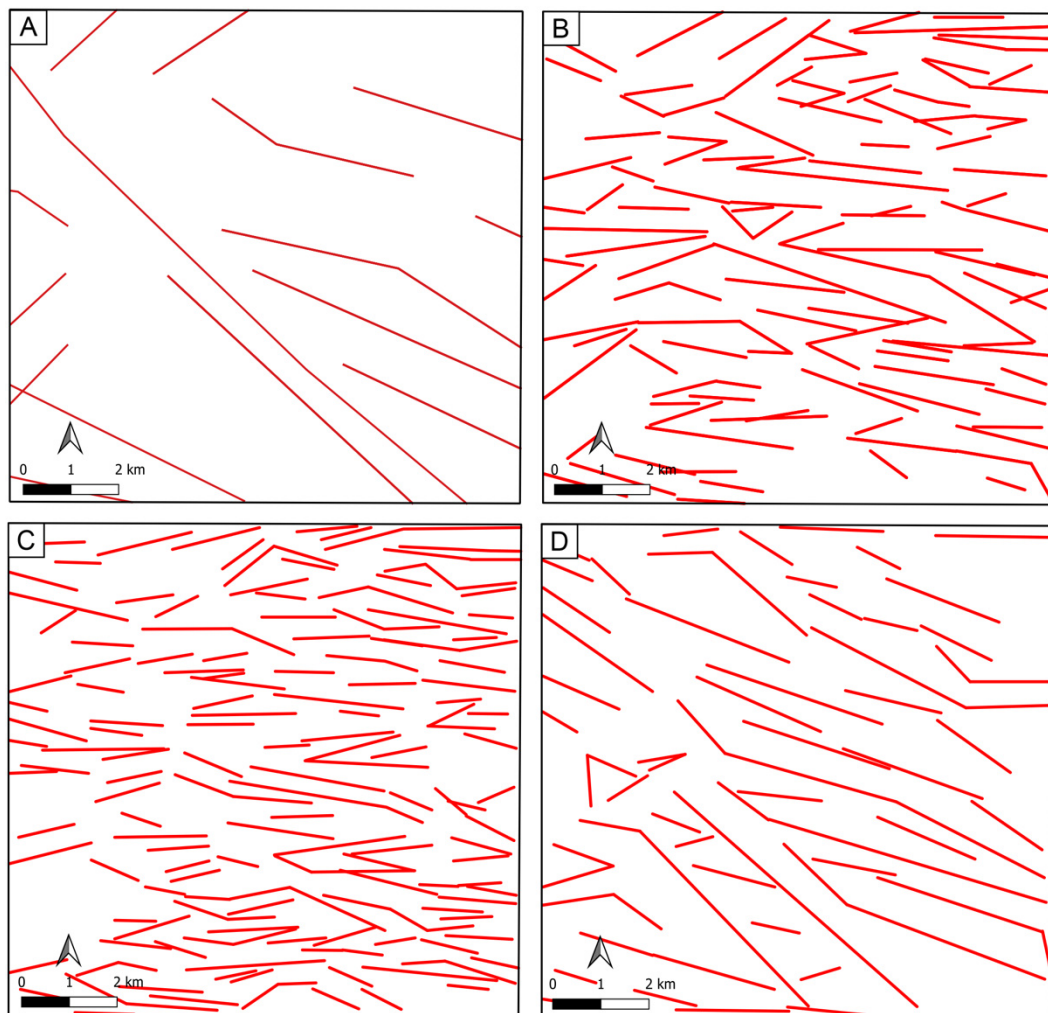


Figura 13. Lineamentos magnéticos detectados na área de estudo. (A) Lineamentos extraídos manualmente a partir da Primeira Derivada Vertical por Goulart (2017); lineamentos extraídos automaticamente no *software* Geomatica – Módulo LINE: (B) a partir da Primeira Derivada Vertical; (C) da Derivada *Tilt*; (D) da Inclinação do Gradiente Horizontal Total.

menores contendo profundidade elevada, possivelmente responsáveis pela origem de parte das feições mapeadas com essa direção, tanto nos dados de superfície quanto de sub-superfície. Nos diagramas de roseta, foi possível observar essas direções dos lineamentos extraídos, mostrando essas direções relacionadas às áreas com grandes profundidades, sendo as maiores frequências e comprimentos associados à direção NW-SE.

Diferentemente do módulo LINE, o algoritmo do *software* Oasis Montaj, durante as etapas de processamento para a extração dos lineamentos magnéticos, gerou imagens derivadas dos mapas de filtragem utilizados. Essas novas imagens representaram as feições previamente realçadas, porém de forma mais detalhada, nas quais os lineamentos são relacionados diretamente com a parte central das anomalias, priorizando a extração dos lineamentos associados aos picos máximos delas. Dessa forma, o algoritmo deixou de mapear outras feições que não apresentaram esse pico, mesmo sendo destacadas nessas imagens, reduzindo o número de feições extraídas.

Apesar de visualmente parecidas, a 1ª DV realçou as feições mais expressivas, com maiores extensões e profundidades, como estruturas de escala regional. A TDR refinou a filtragem realizada pela 1ª DV, realçando da mesma forma lineamentos menores e maiores, já que é um filtro que realçou igualmente anomalias de baixa e alta frequência, destacando, assim, maior número de feições e, conseqüentemente, apresentando maior frequência. Ainda, a TDR apresentou maior variação no comprimento e, nela, foram detectados lineamentos não obtidos na 1ª DV, e vice-versa.

Mesmo encontrando-se entre as melhores filtragens para a detecção de estruturas geológicas (Ferreira et al., 2013), os lineamentos magnéticos extraídos a partir da TAHG no Oasis Montaj apresentaram menor frequência quando comparados com a TDR. Isso ocorreu porque a TAHG realçou somente o centro das anomalias, o que diminuiu a conectividade entre elas quando foram geradas as imagens derivadas, diferentemente da TDR, que realçou as bordas, favorecendo essa conectividade. Apesar de os lineamentos terem sido extraídos pelo algoritmo justamente pelo pico central máximo das anomalias, na TAHG, essas não apresentaram conectividade suficiente para que o algoritmo as interpretasse como lineamentos, reduzindo assim sua frequência. Esse problema talvez seja solucionado ajustando o tamanho da janela de detecção no momento do processamento, porém, nesta pesquisa, foram utilizados os valores *default* do programa. Contudo, entre a 1ª DV, a TDR e a TAHG (Figura 14), o resultado obtido a partir do Oasis Montaj foram os lineamentos extraídos a partir da TDR (Figura 14C), que melhor se aproximaram das informações já interpretadas na área de estudo.

As similaridades observadas entre os lineamentos magnéticos identificados por Goulart (2017) e os lineamentos extraídos por meio das imagens filtradas no Oasis Montaj estão relacionadas ao predomínio direcional das feições extraídas: todas apresentaram tendência para NW-SE. Com relação à frequência e ao comprimento, os lineamentos extraídos a partir das três imagens filtradas deixaram a desejar, apresentando baixa frequência e pouca conectividade. Já os lineamentos de Goulart (2017) foram extensos, apresentaram boa conectividade e frequência moderada, mas favoreceram o predomínio direcional NW-SE, que abrangeu os lineamentos mais expressivos presentes na área de estudo.

Logo, derivados a partir do mesmo conjunto de dados, os mapas da 1ª DV, da TDR e da TAHG apresentaram resultados distintos quando analisados por algoritmos diferentes de detecção de limites. Os lineamentos magnéticos extraídos a partir do *software* Oasis Montaj apresentam frequência e conectividade consideradas baixas quando comparados com os lineamentos extraídos pelo módulo LINE do *software* Geomatica. Sendo assim, os lineamentos magnéticos extraídos pelo módulo LINE apresentam maior correlação com os lineamentos magnéticos extraídos de forma manual (Goulart, 2017).

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou métodos para a extração acurada de lineamentos morfoestruturais e magnéticos, a partir de produtos de sensores remotos e dados aerogeofísicos, por meio de métodos automáticos que utilizam algoritmos de detecção de limites implementados no módulo LINE do *software* Geomatica e a partir do *software* Oasis Montaj. Os resultados dos diferentes dados, como sensor OLI — Landsat 8, SAR e magnetométricos, mostraram quais imagens possibilitam obter a melhor extração de lineamentos. Dessa forma, promoveu-se a comparação dos resultados alcançados com informações prévias, existentes da área de estudo, a fim de verificar e validar a precisão das feições geológicas extraídas.

Entre os dados ópticos e radar utilizados, os lineamentos morfoestruturais extraídos pelo módulo LINE foram detectados com maior êxito por meio dos modelos de relevo sombreado, principalmente naqueles com azimute solar perpendicular ao predomínio direcional das principais feições presentes na área. Porém, como nesses modelos não foi possível reconhecer quais lineamentos estavam associados às mudanças tonais do terreno relacionadas aos contatos litológicos em terrenos planos, o ideal foi utilizar uma imagem que realçasse essas características. Nesse caso, a 1ª CP e a SAR VH complementaram de forma adequada os lineamentos não mapeados nos modelos de relevo sombreado.

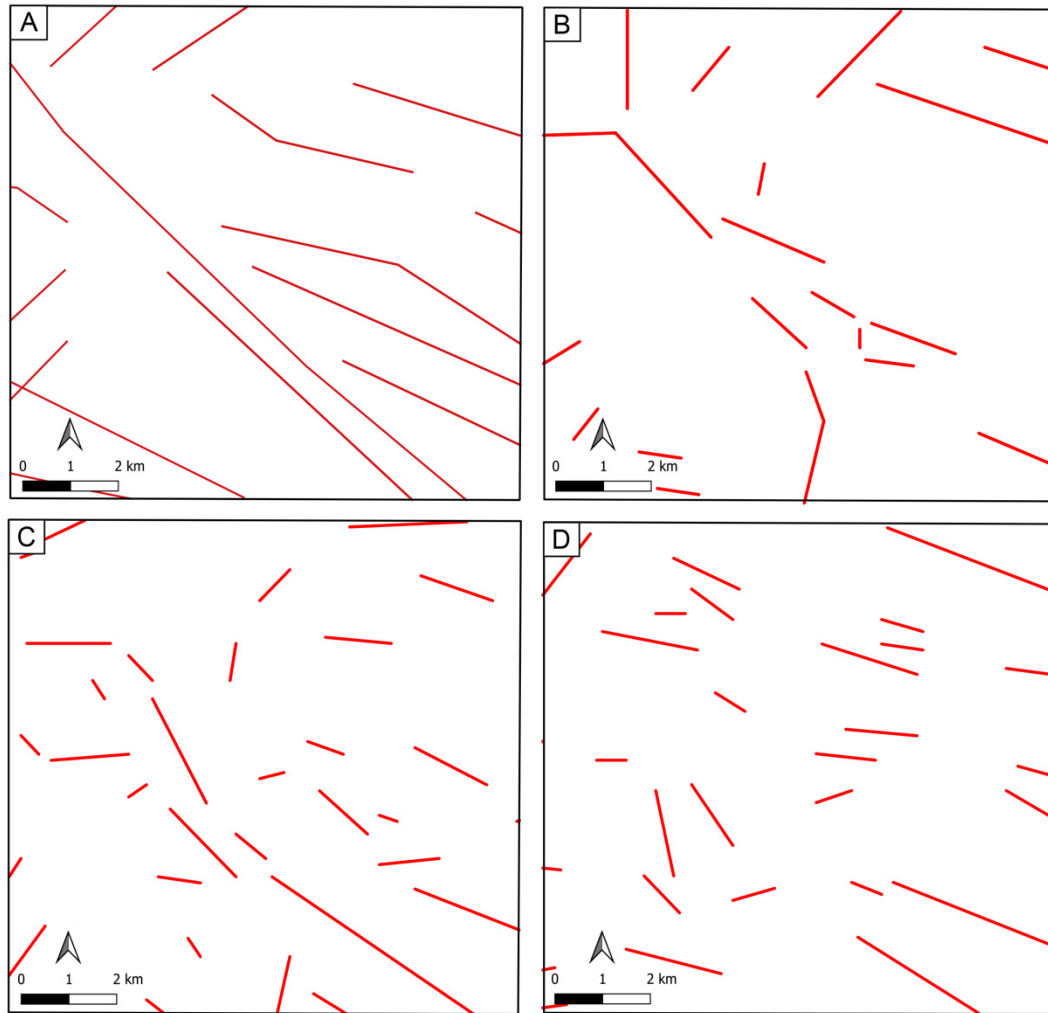


Figura 14. Lineamentos magnéticos detectados na área de estudo. (A) Lineamentos extraídos manualmente a partir da Primeira Derivada Vertical por Goulart (2017); lineamentos extraídos automaticamente no *software* Oasis Montaj: (B) a partir da Primeira Derivada Vertical; (C) da Derivada *Tilt*; (D) da Inclinação do Gradiente Horizontal Total.

A extração dos lineamentos magnéticos foi realizada adequadamente no *software* Oasis Montaj a partir da TDR. Entretanto, a extração desses lineamentos, com maior precisão e proximidade da extração manual apresentada por Goulart (2017), foi alcançada por meio do módulo LINE a partir da TAHG, mesmo essa não sendo um *software* de análise de dados geofísicos.

Logo, para uma boa interpretação e avaliação dos resultados, é essencial a utilização de dados multifontes, principalmente dados de superfície e subsuperfície, que contribuíram para a detecção dos lineamentos que, em conjunto com a realização de ajustes nos valores dos parâmetros de detecção do módulo LINE do Geomatica, permitiram realizar uma extração precisa dos lineamentos morfoestruturais e magnéticos de forma mais aproximada aos representados nos mapas geológicos e geofísicos obtidos por fotointerpretação e levantamentos de campo.

REFERÊNCIAS

- Alves, L. S. (2012). *Estudo da margem continental ibérica ocidental com base em dados gravimétricos e magnetométricos regionais*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.btdt.uerj.br/handle/1/7089>. Acesso em: 8 maio 2021.
- Argialas, P., Mavrantza, O. D. (2004). Comparison of edge detection and Hough transform techniques for the extraction of geologic features. *XXth ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey. Proceedings of the geo-imagery bridging continents.
- Basavarajappa, H. T., Jeevan, L., Rajendran, S., Manjunatha, M. C. (2015). Discrimination of Banded Magnetite Quartzite (BMQ) deposits and associated lithology of parts of Chikkanayakanahalli Schist Belt of Dharwar Craton, Karnataka,

- India using Remote Sensing Technique. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 4(1), 1033-1044. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.97>
- Bello, A. M. (2014). *Avaliações comparativas de filtros espaciais para mapeamento de contatos geológicos com contrastes de densidades e suscetibilidades magnéticas*. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). Niterói: Universidade Federal Fluminense. Disponível em: <http://www.geofisica.uff.br/projeto-final?page=11>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- Blakely, R. J. (1995). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Londres: Cambridge University Press, 464 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511549816>
- Bonetto, S., Facello, A., Ferrero, M. A., Umili, G. (2015). A tool for semi-automatic linear feature detection based on MDE. *Computers and Geosciences*, 75, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.10.005>
- Casas, A. M., Cortés, A. L., Maestro, A., Soriano, M. A., Riaguas, A., Bernal, J. (2000). LINDENS: a program for lineament length and density analysis. *Computers & Geosciences*, 26(9-10), 1011-1022. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00017-0](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00017-0)
- Dinakar, S. (2005). *Geological, geomorphological and land use/land cover studied using Remote Sensing and GIS around Kollegal Shear Zone, South India*. Thesis. Karnatka, India: University of Mysore.
- Diretoria do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG). (1980). *Levantamento topográfico da carta Coxilha do Tabuleiro - SH.21-Z-B-VI-4; MI-2994/4*. Escala 1:50.000. Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Ekneligoda, T. C., Henkel, H. (2006). The spacing calculator software-a visual basic program to calculate spatial properties of lineaments. *Computers & Geosciences*, 32(4), 542-553. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.08.007>
- Fairhead, J. D., Williams, S. E. (2006). Evaluating normalized magnetic derivatives for structural mapping. *SEG Technical Program Expanded Abstracts* 01/2006, 25(1), 845-849. <https://doi.org/10.1190/1.2370388>
- Ferreira, F. J. F., Souza, J., Bongioiolo, A. B. S., Castro, L. G. (2013). Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using tilt angle. *Geophysics*, 78(3), J33-J41. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0441.1>
- Geosoft. (2008). *Oasis Montaj*: Release 8.1. Toronto: Geosoft Inc.
- Goulart, C. V. (2017). *Integração de dados de sensoriamento remoto, aerogeofísicos e geológicos na delimitação do lineamento de Ibaré, RS*. Trabalho de conclusão de curso (monografia). Porto Alegre: IGEO/UFRGS. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/172274>. Acesso em: 10 fev. 2021.
- Hashim, M., Ahamad, S., Johari, M. A. M., Pour, A. B. (2013). Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM_p) imagery. *Advances in Space Research*, 51(5), 874-890. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.10.004>
- Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, 24(6), 417-441. <https://doi.org/10.1037/h0071325>
- Jordan, G., Schott, B. (2005) Application of wavelet analysis to the study of spatial pattern of morphotectonic lineaments in digital terrain models. A case study. *Remote Sensing of Environment*, 94(1), 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.013>
- Kocal, A., Duzgun, H. S., Karpuz, C. (2004). Discontinuity mapping with automatic lineament extraction from high resolution satellite imagery. *Proceedings of the XXth ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey.
- Koike, K., Nagano, S., Ohmi, M. (1995). Lineament analysis of satellite images using a Segment Tracing Algorithm (STA). *Computers and Geosciences*, 21(9), 1091-1104. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(95\)00042-7](https://doi.org/10.1016/0098-3004(95)00042-7)
- Kusky, T., El-Baz, F. (1998). Structural and tectonic evolution of the Sinai Peninsula, using Landsat data: Implications for groundwater exploration. Egypt. *Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 1, 69-100.
- Lim, C. S., Ibrahim, K., Tjia, H. D. (2001). Radiometric and geometric information content of Tiung Sat-ILMSEIS data. In: Othman, M., Arshad, A. S. (Eds.). *TiungSAT-1: from inception to inauguration*. Shah Alam: Astronautic Technology SDN BHD, p. 169-184.
- Masoud, A., Koike, K. (2011a). Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from SRTM DEM and remotely-sensed geophysical data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(6), 818-832. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.08.003>
- Masoud, A., Koike, K. (2011b). Morphotectonics inferred from the analysis of topographic lineaments auto-detected from DEMs: Application and validation for the Sinai Peninsula, Egypt. *Tectonophysics*, 510(3-4), 291-308. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.07.010>

- Masoud, A., Koike, K. (2017). Applicability of computer-aided comprehensive tool (LINDA: LINEament Detection and Analysis) and shaded digital elevation model for characterizing and interpreting morphotectonic features from lineaments. *Computers & Geosciences*, 106, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.06.006>
- Middleton, M., Schnur, T., Sorjonen-Ward, P., Hyvönen, E. (2015). Geological lineament interpretation using the Object-Based Image Analysis approach: results of semi-automated analyses versus visual interpretation. *Geological Survey of Finland*, 57, 135-154. Disponível em: https://tupa.gtk.fi/julkaisu/specialpaper/sp_057_pages_135_154.pdf. Acesso em: 16 maio 2022.
- Miller, H. G., Singh, V. (1994). Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32(2-3), 213-217. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1)
- Naidu, P. S., Mathew, M. P. (1998). *Analysis of geophysical potential fields: a digital signal processing approach*. Estados Unidos: Elsevier, 297 p. v. 5.
- O’Leary, D. W., Friedman, J. D., Pohn, H. A. (1976). Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, 87(10), 1463-1469. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1976\)87<1463:LLLS PN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1976)87<1463:LLLS PN>2.0.CO;2)
- PCI Geomatics. (2016). *Geomatica Trening Guide*. Geomatica I, Curse guide. Version 0.1. PCI Allstate Parkway, Suite 501. Markham, Ontario: Geomatics Enterprises Inc. 90.
- Peters, L. J. (1949). The direct approach to magnetic interpretation and its practical application. *Geophysics*, 14(3), 290-320. <https://doi.org/10.1190/1.1437537>
- Pilkington, M., Keating, P. (2009). The utility of potential field enhancements for remote predictive mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 35(S1), S1-S11. <https://doi.org/10.5589/m09-021>
- Prakesh, R. S., Mohan, R. (1986). Hydromorph geological mapping of Panwari area, Hamirpur district, Uttar Pradesh using satellite data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 24(2), 97-103.
- Rabeh, T., Miranda, M. (2008). A tectonic model of the Sinai Peninsula based on magnetic data. *Journal of Geophysics and Engineering*, 5(4), 469-479. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/5/4/010>
- Rabie, S. I., Ammar, A. A. (1990). Pattern of the main tectonic trends from remote geophysics, geological structures and satellite imagery, Central Eastern Desert, Egypt. *International Journal of Remote Sensing*, 11(4), 669-683. <https://doi.org/10.1080/01431169008955049>
- Rajaram, M. (2009). What’s new in interpretation of magnetic data? *Geohorizons*, 50, 50-51. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.565.326&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 16 maio 2022.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millet, A. J., Somerton, I. W. (1990). Magnetic Interpretation in three dimensions using Euler Deconvolution. *Geophysics*, 55(1), 80-91. <https://doi.org/10.1190/1.1442774>
- Reis, L. K. O. (2016). *Arcabouço tectônico da Porção Centro-Norte da Faixa Brasília com base em dados magnéticos e gravimétricos*. Dissertação (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. <https://doi.org/10.26512/2016.09.D.22620>
- Saadi, N. M., Zaher, M. A., El-Baz, F., Watanabe, K. (2011). Integrated remote sensing data utilization for investigating structural and tectonic history of the Ghadames Basin, Libya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(5), 778-791. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.05.016>
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Ravat, D., Smith, R. (2007). Tilt-depth method: A simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. *The Leading Edge*, 26(12), 1502-1505. <https://doi.org/10.1190/1.2821934>
- Serviço Geológico do Brasil (CPRM). (2010). *Projeto aerogeofísico escudo do Rio Grande do Sul: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos*. Lasa Prospecções. v. 1. 260 p.
- Serviço Geológico do Brasil (CPRM). (2012). *Geologia e recursos minerais da Folha Lagoa da Meia Lua - SH. 21-Z-B-VI. Escala 1:100.000, estado do Rio Grande do Sul / Jorge Henrique Laux*. Porto Alegre: Programa Geologia do Brasil. 255 p.
- Skeels, D. C. (1967). What is residual gravity? *Geophysics*, 32(5), 872-876. <https://doi.org/10.1190/1.1439896>
- Smith, M. J., Wise, S. M. (2007). Problems of basin mapping linear landforms from satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9(1), 65-78. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.07.002>

Thompson, D. T. (1982). EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47(1), 31-37. <https://doi.org/10.1190/1.1441278>

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). (2005). *Mapeamento geológico de parte da Folha Coxilha do Tabuleiro SH.21-Z-B-VI-4 (MI - 2994/4), 1:25.000, RS*. Porto Alegre. Nota Explicativa, 2 mapas. Porto Alegre: Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Verduzco, B., Fairhead, C., Green, C., Mackenzie, C. (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23(2), 116-119. <https://doi.org/10.1190/1.1651454>

Yeomans, C. M., Middleton, M., Shail, R. K., Grebby, S., Lusty, P. A. J. (2019). Integrated Object-Based Image Analysis for semi-automated geological lineament detection in southwest England. *Computers and Geosciences*, 123, 137-148. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.11.005>