UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA



DANIELLA MOTTA DA SILVA COUTINHO

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE APRIMORAMENTO DE IMAGENS EM DADOS DE SATÉLITE MULTIESPECTRAL E GEOFÍSICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA (DOT)

Niterói
Abril/2026

DANIELLA MOTTA DA SILVA COUTINHO

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE APRIMORAMENTO DE IMAGENS EM DADOS DE SATÉLITE MULTIESPECTRAL E GEOFÍSICOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Geologia e Geofísica.

Orientador
Prof. Dr. Leonardo Guimarães Miquelutti

Niterói
Abril/2026

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

M921a Motta Da Silva Coutinho, Daniella
Aplicação de técnicas de aprimoramento de imagens em dados de satélite multiespectral e geofísicos / Daniella Motta Da Silva Coutinho. - 2026.
84 f.

Orientador: Leonardo Guimarães Miquelutti.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Niterói, 2026.

1. Aprimoramento de imagens. 2. Python. 3. Dados multiespectrais. 4. Dados sísmicos. 5. Produção intelectual. I. Guimarães Miquelutti, Leonardo, orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências. III. Título.

CDD - XXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

DANIELLA MOTTA DA SILVA COUTINHO

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE APRIMORAMENTO DE IMAGENS EM DADOS DE SATÉLITE MULTIESPECTRAL E GEOFÍSICOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Geologia e Geofísica.

Aprovada em 30/Abril/2026 pela banca examinadora abaixo:

Prof. Dr. Leonardo Guimarães Miquelutti (Orientador)
UFF / DOT / GISIS

Prof. Dr. Luiz Alberto Santos
UFF / DOT / GISIS

Dra. Marcella Maria de Melo Cortez
PUC-RIO

Dr. Luiz F. S. Braga
Invision Geofísica / SBGf

Niterói
Abril/2026

Agradecimentos

Aos meus pais, Gustavo e Robecil, por serem minha família e me apoiarem sempre incondicionalmente, por todo cuidado, carinho e amor que me dão constantemente. Sou eternamente grata por ter vocês ao meu lado e porque vocês não me deixaram desistir, amo vocês!

Ao professor Leonardo Guimarães Miquelutti pela orientação que foi crucial para o desenvolvimento desta pesquisa, além de toda a ajuda e suporte oferecidos, muito obrigada!

Agradeço também aos meus amigos do GISIS por me acompanharem durante toda essa jornada, vocês foram muito importantes para que eu continuasse neste processo.

Ao Grupo de Imageamento e Inversão Sísmica (GISIS) e ao Professor Marco Cetale por me permitir fazer parte deste grupo, que me possibilitou a descoberta de caminhos que gostaria de seguir na minha carreira profissional.

Gostaria de agradecer pela bolsa de mestrado oferecida pela Fundação Euclides da Cunha (FEC) através do convênio entre UFF, FEC e Petrobras por meio do projeto ”Tectônica Cenozoica da Margem Continental do Sudeste do Brasil: padrões de deformação e controle na sedimentação”(ANP no. 22969-0).

Agradeço da mesma forma à Universidade Federal Fluminense, ao Programa de pós-graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra (DOT), ao Departamento de Geologia e Geofísica (GGO) e a todos os funcionários e professores do Instituto de Geociências da UFF.

Agradeço também aos membros da banca: Prof. Dr. Luiz Alberto, Dra. Marcella Cortez e Dr. Luiz Braga, pela disponibilidade e interesse em contribuir na banca do meu trabalho.

Resumo

MOTTA DA SILVA COUTINHO, Daniella. **Aplicação de técnicas de aprimoramento de imagens em dados de satélite multiespectral e geofísicos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense. Niterói, p. 83. 2026.

As técnicas de aprimoramento de imagens foram empregadas para produzir visualizações capazes de realçar características relevantes dos dados e apoiar a interpretação geológica em diferentes escalas e contextos geofísicos. Neste trabalho, três técnicas de realce foram reproduzidas e adaptadas, com implementação em linguagem de programação Python visando à reprodutibilidade dos procedimentos e à possibilidade de reaplicação em novos conjuntos de dados. O fluxo metodológico contemplou etapas de organização e pré-processamento dos dados, geração de produtos realçados e análise comparativa dos resultados obtidos. As técnicas foram aplicadas a dados multiespectrais, dados gravimétricos, magnetométricos, gammaespectrométricos e sísmicos, de modo a considerar as particularidades de resolução, ruído, contraste e resposta espectral/geométrica de cada um. Os resultados indicaram que as abordagens adotadas contribuíram para destacar feições e estruturas geológicas, melhorar a continuidade e a identificação de lineamentos e tendências, reduzir ambiguidades interpretativas e aumentar a legibilidade dos produtos finais. A aplicação integrada sobre diferentes tipos de dado mostrou-se útil para a correlação entre evidências, reforçando hipóteses interpretativas e fornecendo subsídios para a análise conjunta e o mapeamento de estruturas.

Palavras-chave: aprimoramento de imagens; reprodutibilidade; Python; dados multiespectrais; campo potencial; dados sísmicos; interpretação geológica.

Abstract

MOTTA DA SILVA COUTINHO, Daniella. **Application of image enhancement techniques to multispectral and geophysical satellite data**. Dissertation (Master of Science), Fluminense Federal University. Niterói, p. 83. 2026.

Image enhancement techniques were employed to produce visualizations capable of highlighting relevant data attributes and supporting geological interpretation across different scales and geophysical contexts. In this work, three enhancement techniques were reproduced and adapted, implemented in the Python programming language to ensure procedural reproducibility and enable reapplication to new datasets. The methodological workflow comprised data organization and preprocessing, the generation of enhanced products, and a comparative analysis of the results. The techniques were applied to multispectral, gravimetric, magnetic, gamma-ray spectrometric, and seismic data, accounting for the specific characteristics of each dataset in terms of resolution, noise, contrast, and spectral/geometric response. The results indicated that the adopted approaches contributed to emphasizing geological features and structures, improving the continuity and recognition of lineaments and trends, reducing interpretational ambiguities, and increasing the readability of the final products. The integrated application across different data types proved useful for correlating evidence, strengthening interpretive hypotheses, and supporting integrated analysis and structural mapping.

Keywords: image enhancement; reproducibility; Python; multispectral data; potential-field data; seismic data; geological interpretation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – A) Um *gather* sísmico 2D, um cubo sísmico 3D: B) um exemplo de uma aquisição terrestre, C) suas dimensões *inline*, *crossline* e Z, e D) a extração de seções 2D a partir de um volume sísmico 3D. (Sebai; Zouaoui; Ghorbel, 2024) 21
Figura 2 – Golfo de Suez, Egito. 22
Figura 3 – Processamento de imagens de satélite para geologia estrutural: (a) banda visível Landsat 321 RGB; (b) Landsat 321 RGB invertido; (c) imagem litológica Landsat 675–321 RGB; (d) mapa razão 6/8 de *wadis* Landsat (Laake *et al.*, 2011) 22
Figura 4 – Principais etapas do fluxo de trabalho: fatias de amplitude do cubo de entrada sísmica nos níveis (a) superior, (b) médio e (c) inferior, (d) imagem RGB bruta, (e) imagem RGB aprimorada , (f) banda de saturação da imagem HSV, (g) detecção de bordas da banda de saturação e (h) imagem SRGB. (Laake, 2015) 24
Figura 5 – Procedimento de produção do RRIM. A) Inclinação topográfica, B) Abertura (Op -On)/2 e C) RRIM para o Monte Ohmuro, Japão. Dados LIDAR em grade de 1 m. (Chiba; Kaneta; Suzuki, 2008) 26
Figura 6 – Máscaras de convolução do operador de Sobel utilizados para a detecção de bordas horizontais e verticais. (Li; Wang; Bai, 2024) . . 30
Figura 7 – Mapa estrutural simplificado do Estado do Rio de Janeiro, com as principais zonas de sutura e dobras regionais associadas a zonas de cisalhamento tardias.(Heilbron *et al.*, 2020) 33
Figura 8 – Mapa de localização da área de estudo no sudeste do Brasil, com destaque para o estado do Rio de Janeiro (em azul claro) e o município de Resende (estrela vermelha). A Bacia de Santos é delimitada em laranja, enquanto o polígono em verde representa o volume sísmico 3D – R0014 Santos (PSDM) utilizado neste trabalho. O mapa inserido no canto superior esquerdo mostra a localização regional da área de interesse no território brasileiro. 35
Figura 9 – Fluxo de processamento do *Red Relief Image Map* 41
Figura 10 – Comparação entre o processamento apresentado por (Laake *et al.*, 2011) (esquerda) e o processamento realizado neste trabalho (direita). A) corresponde ao dado em RGB; B) à composição das bandas 1–2–3 invertidas; C) imagem da diferença entre as composições 6–7–5 e 3–2–1; e, D) representa a razão entre as bandas 6 e 8. . . 47

Figura 11 – Área de estudo 47
Figura 12 – Fluxo de processamento da técnica *Structurally Enhanced RGB* . . 48
Figura 13 – Panorama das imagens RGB 321 com marcações de falhas e fraturas. 50
Figura 14 – Panorama das imagens RGB 123 com marcações de falhas e fraturas 51
Figura 15 – Panorama das imagens da diferença das bandas 675-321 com marcações de falhas e fraturas 52
Figura 16 – Panorama das imagens da razão entre as bandas 6 e 8, utilizando classificação e com marcações de falhas e fraturas 53
Figura 17 – Panorama das imagens da razão entre as bandas 6 e 8, utilizando *colormap* e com marcações de falhas e fraturas. 54
Figura 18 – A) *Time- Slice* índice 3700; B) Conversão para RGB com ajuste no contraste; C) Imagem RGB aprimorada, D) *Slice* em RRIM e E) *Slice* com a junção dos métodos RRIM e SRGB 56
Figura 19 – A) Dimensão *crossline* índice 8726 do cubo sísmico em escala de cinza; B) *Crossline* em escala de cor *seismic*; C) *Crossline* em SRGB; D) *Crossline* em RRIM e E) *Crossline* com a junção dos métodos RRIM e SRGB 57
Figura 20 – A) Dimensão *inline* índice 22400 do cubo sísmico ; B) *Inline* em RGB; C) *Inline* em SRGB; D) *Inline* em RRIM e E) *Inline* com a junção dos métodos RRIM e SRGB 58
Figura 21 – *Inline* em SRGB 59
Figura 22 – Comparação entre o Modelo Digital de Elevação e o produto RRIM gerado para a área de estudo, com o retângulo amarelo indicando a área de zoom da figura 23a. 61
Figura 23 – RRIM aplicado à um Modelo Digital de elevação da área de estudo . 61
Figura 24 – Área de estudo do dado Gravimétrico 64
Figura 25 – Comparação entre o dado gravimétrico (Anomalia Bouguer) e o produto RRIM gerado para a área de estudo. 64
Figura 26 – Área de estudo dos dados magnetométricos e gamaespectrométrico 65
Figura 27 – Comparação entre o dado magnetométrico e o produto RRIM gerado para a área de estudo. 66
Figura 28 – Comparação entre o dado gamaespectrométrico e o produto RRIM gerado para a área de estudo. 66
Figura 29 – Comparação entre o dado original e o RRIM aplicado em uma seção sísmica na dimensão *time-slice* 67
Figura 30 – Comparação entre o dado original e a junção do resultado do SRGB com RRIM em *time-slice* 68
Figura 31 – Comparação entre o dado original e a junção do resultado do SRGB com RRIM em *inline* 69

Figura 32 – Comparação entre o dado original e a junção do resultado do SRGB com RRIM em *crossline*. 70

Lista de tabelas

Tabela 1 – Bandas espectrais do sensor Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). 37

Lista de abreviaturas e siglas

GGO	Departamento de Geologia e Geofísica
GISIS	Grupo de Imageamento e Inversão Sísmica
GPS	*Global Positioning System*
HSV	*Hue Saturation Value*
IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica
IGRF	*International Geomagnetic Reference Field*
LiDAR	*Light Detection and Ranging*
MDE	Modelo Digital de Elevação
MRPS	Megassinforma do Rio Paraíba do Sul
MTD	*Mass Transport Deposits*
RGB	*Red Green Blue*
RRIM	*Red Relief Image Map*
SeRGB	*Structurally Enhanced RGB*
SPP	*São Paulo Plateau* / Planalto de São Paulo
SRGB	*Structured-Sharpened Continuous RGB*
UFF	Universidade Federal Fluminense
ZCPS	Zona de Cisalhamento do Paraíba do Sul

Lista de símbolos

Δ	Incremento/variação (ex.: Δx, Δy)
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
μ_r	Permeabilidade magnética relativa do meio
π	Constante pi (aparece em termos como 4π)
θ	Ângulo/gradiente de inclinação

Sumário

1 INTRODUÇÃO 14

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
2.1 Técnicas de Aprimoramento de imagem 18
2.2 Cubo Sísmico 19
2.3 *Structurally Enhanced Red-Green-Blue (seRGB)* 21
2.4 *Structured-Sharpened Continuous Red- Green- Blue (SRGB)* . . 23
2.5 *Red Relief Image Map (RRIM)* 25
2.6 Atributos em dados gravimétricos e magnetométricos 27

3 METODOLOGIA 32
3.1 Área de estudo 32
3.2 Técnicas de Aprimoramento de imagem 36
3.2.1 *Structurally Enhanced RGB* 36
3.2.2 *Structured-Sharpened Continuous RGB (SRGB)* 38
3.2.3 *Red Relief Image Map (RRIM)* 40

4 RESULTADOS 46
4.1 *Structurally Enhanced RGB* 46
4.2 *Structured-Sharpened Continuous RGB (SRGB)* 55
4.3 *Red Relief Image Map (RRIM)* 61
4.4 Junção do SRGB com RRIM 68

5 DISCUSSÕES 72

6 CONCLUSÃO 76

REFERÊNCIAS 78

APÊNDICES 82

APÊNDICE A – REPOSITÓRIO 83

1 Introdução

Na geofísica, o uso de imagens é um instrumento que serve como uma ferramenta que vai além da visualização dos dados utilizados, sendo também empregado nas interpretações e na tomada de decisões. Entretanto, a presença das imagens na geofísica é o resultado de um processo de evolução tecnológica, em que os dados numéricos se tornaram representações visuais.

Em retrospecto histórico, de acordo com Hoppin *et al.* (1978), no início da década de 1920, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto era utilizada para estudos geológicos, quando a interpretação visual de fotografias aéreas servia como base para observar e registrar padrões de relevo, estruturas e feições superficiais em escala regional; ou seja, era um período no qual o interesse pelo processamento digital de imagens começava a surgir.

Segundo McDowell *et al.* (2002), na área da geofísica, a exploração também surgiu no início da década de 1920, através dos métodos de prospecção elétrica pelos irmãos Conrad e Marcel Schlumberger, na França, e do método de refração sísmica nos campos petrolíferos recém-descobertos no Centro-Sul dos Estados Unidos. Com isso, na década seguinte, ganhou-se experiência com estes métodos e desenvolveram-se novas técnicas. Os autores declaram que

> As exigências da Segunda Guerra Mundial levaram à adaptação de muitos métodos geofísicos para uso na detecção de minas, submarinos e posições de fogo inimigas. Isso incentivou a pesquisa básica, o que levou a enormes avanços em eletrônica, conceitos de processamento de sinais e métodos computacionais. (McDowell *et al.*, 2002)

À medida que o processamento digital de imagens evoluiu e que a geofísica incorporou o uso de imagens e produtos derivados, como mapas, seções e volumes, como um meio de análise dos dados, torna-se importante explicitar o conceito de aprimoramento de imagens, que pode ser definido como:

> O aprimoramento de imagens consiste basicamente em melhorar a interpretabilidade ou percepção das informações presentes nas imagens para observadores humanos e fornecer uma entrada “melhor” para outras técnicas automatizadas de processamento de imagens.(Maini; Aggarwal, 2010)

Logo, as técnicas de aprimoramento constituem um conjunto de procedimentos aplicados com o objetivo de aumentar a qualidade e a interpretabilidade dos dados, por meio do realce de feições, padrões e atributos de interesse. Essas técnicas permitem evidenciar informações que, nos dados originais, podem estar sutis, mascaradas por ruído ou pouco diferenciadas em relação ao fundo. Na geofísica, cuja interpretação frequentemente depende da integração de diferentes tipos de dados e da correlação entre múltiplas evidências, um desafio recorrente é a ambiguidade inerente aos registros geofísicos. Essa ambiguidade pode decorrer de diversos fatores, incluindo a presença de ruídos, limitações de resolução, efeitos de aquisição e processamento, além de situações em que feições estruturais não se apresentam bem delimitadas. Nesse contexto, a aplicação de técnicas de aprimoramento pode representar um caminho metodológico relevante para reduzir incertezas, tornar padrões mais discerníveis e, consequentemente, apoiar interpretações mais robustas e consistentes.

A área de estudo desta pesquisa está situada, majoritariamente, no Estado do Rio de Janeiro, inserida no contexto da Faixa Ribeira, onde a evolução Neoproterozoica–Cambriana resultou em um arcabouço tectônico complexo, com empilhamento de terrenos, zonas de cisalhamento de escala regional e reativações que controlam a compartimentação estrutural e a distribuição de lineamentos (Heilbron *et al.*, 2020). Essa complexidade, somada à variabilidade litológica e ao grau de deformação, faz com que muitas feições de interesse sejam sutis ou apresentem expressão descontínua nos diferentes tipos de dados utilizados, exigindo abordagens que melhorem sua detectabilidade e comparação em múltiplas escalas.

Atualmente, há diversas técnicas de aprimoramento de imagens, cada uma com finalidades específicas. Entre elas, destaca-se a equalização de histograma, que ajusta o contraste a partir da redistribuição dos valores de intensidade dos pixels dentro da escala de cores utilizadas. Há também o corte de nível de cinza que, conforme Maini e Aggarwal (2010), pode ser empregado para enfatizar um intervalo de intensidades e atenuar os demais, ou ainda realçar determinados níveis de cinza, mantendo o restante inalterado, constituindo um procedimento equivalente à filtragem passa-banda. Outra abordagem é o *stretch* de contraste, que amplia a faixa dinâmica útil dos dados e realiza o corte dos valores extremos. Por fim, filtros no domínio espacial, como o passa-baixa, são amplamente utilizados para suavizar ruídos de alta frequência, entre outras possibilidades de filtragem.

Neste trabalho, utilizam-se três metodologias voltadas para o aprimoramento de imagens. As metodologias em questão são:

- *Structurally Enhanced RGB (seRGB)* (Laake *et al.*, 2011);
- *Structured-Sharpened Continuous (SRGB)* (Laake, 2015);
- *Red Relief Image Map (RRIM)* (Chiba; Kaneta; Suzuki, 2008).

O objetivo geral desta pesquisa é adaptar e implementar, na linguagem de programação Python, os métodos de aprimoramento de imagens mencionados anteriormente, de modo a produzir imagens realçadas que auxiliem na interpretação dos dados. Os objetivos específicos podem ser definidos como:

1. Implementar o método seRGB em uma área coberta pelos dados do sensor Landsat 7;
2. Adaptar e implementar os métodos SRGB e RRIM em um cubo sísmico offshore;
3. Aplicar o método RRIM em dados gravimétricos, magnetométricos e gamaespectrométricos;

Espera-se que a reprodução das técnicas de aprimoramento aplicadas aos dados geofísicos desta pesquisa proporcione realce e melhor qualidade visual dos atributos e das estruturas presentes, de modo a evidenciá-los e, consequentemente, apoiar a interpretação dos resultados. Além disso, a implementação dessas técnicas em Python busca torná-las reprodutíveis e acessíveis por meio de uma ferramenta de código aberto. A reprodutibilidade é um aspecto fundamental da pesquisa, pois permite sua validação, divulgação e expansão das técnicas propostas, além de favorecer o aperfeiçoamento dos procedimentos por outros pesquisadores.

A estrutura deste trabalho está organizada em capítulos, conforme descrito a seguir. No capítulo de **Revisão Bibliográfica**, apresentam-se os fundamentos teóricos que embasam a pesquisa, incluindo os conceitos centrais de aprimoramento de imagens e os métodos que orientam as análises realizadas. Em **Metodologia**, descrevem-se os dados utilizados e o fluxo de processamento adotado, detalhando, passo a passo, a implementação das técnicas de aprimoramento e os critérios

escolhidos para sua aplicação. No capítulo de **Resultados**, são apresentados os produtos gerados a partir da reprodução das técnicas, acompanhados de uma discussão crítica sobre o desempenho de cada abordagem, suas potencialidades e limitações, bem como os principais aspectos interpretativos observados. Por fim, em **Discussões** e **Conclusão**, sintetizam-se as contribuições do estudo, as considerações finais e as perspectivas para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Nesta seção, apresentam-se os principais conceitos que fundamentam esta pesquisa: técnicas de aprimoramento de imagens; cubo sísmico; os métodos *Structurally Enhanced Red-Green-Blue (seRGB)*, *Structured-Sharpened Continuous Red- Green- Blue (SRGB)* e *Red Relief Image Map (RRIM)*; e, por fim, o conceito de atributos aplicados a dados gravimétricos e magnetométricos.

2.1 Técnicas de Aprimoramento de imagem

As técnicas de aprimoramento de imagem constituem o eixo conceitual que orienta este trabalho, uma vez que é a partir delas que se estruturam a investigação proposta e sua respectiva fundamentação teórica. No âmbito das geociências, produtos de imagem são empregados em múltiplas escalas e contextos, desde imagens orbitais até seções e volumes sísmicos, desempenhando um papel central no suporte à interpretação, análises e tomadas de decisão. Ao realçar contrastes, atenuar ruídos e evidenciar padrões e descontinuidades, tais técnicas contribuem para a extração de informações e para a compreensão integrada de feições da superfície e da subsuperfície terrestres a partir dos dados disponíveis.

As técnicas de aprimoramento de imagem correspondem a um conjunto de procedimentos aplicados aos dados, visando aumentar sua qualidade interpretativa. Em essência, buscam realçar informações de interesse e facilitar a percepção das feições representadas. As técnicas modificam os atributos dos dados, de forma que os tornam mais adequados para a interpretação. Entretanto, elas não criarão novos dados, mas sim realçarão estruturas e destacarão feições que já estão presentes nesses dados aprimorados.

De acordo com Maini e Aggarwal (2010), as técnicas de aprimoramento de imagem podem ser classificadas em duas categorias principais: métodos no domínio espacial e métodos no domínio da frequência. Os autores distinguem essas abordagens da seguinte maneira:

> Nas técnicas do domínio espacial, lidamos diretamente com os pixels da imagem. Os valores dos pixels são manipulados para obter o aprimoramento desejado. Nos métodos do domínio da frequência, a imagem é primeiro transferida para o domínio da frequência. (Maini; Aggarwal, 2010)

No escopo desta pesquisa, a adaptação das técnicas de aprimoramento de imagem é realizada majoritariamente no domínio espacial, isto é, por meio de operações aplicadas diretamente aos valores das amostras e às relações de vizinhança. Essa opção favorece uma implementação mais direta e um controle mais intuitivo dos realces, permitindo ajustar aspectos como contraste local, nitidez e evidência de descontinuidades.

Ainda assim, o estudo também incorpora transformações geralmente associadas ao domínio da frequência, empregadas como o realce de bordas. Em conjunto, as adaptações propostas buscam acomodar dados de naturezas e escalas distintas, de modo a tornar possível a reprodução de realces equivalentes em diferentes tipos de produtos (por exemplo, imagens orbitais, dados potenciais e dados sísmicos), contribuindo para análises mais consistentes e comparáveis.

Conforme indicado na introdução desta pesquisa, há inúmeras técnicas de aprimoramento de imagens empregadas com finalidades variadas e em diferentes áreas de aplicação. Apesar dessa diversidade, tais técnicas compartilham um objetivo comum: melhorar a visualização dos dados para apoiar a interpretação e a compreensão do fenômeno investigado, além de reduzir ambiguidades que podem estar presentes em determinados produtos. Dessa forma, constituem ferramentas de suporte ao tratamento, à análise e à interpretação de imagens.

2.2 Cubo Sísmico

A incorporação de dados tridimensionais na interpretação sísmica não foi imediata. De acordo com Chopra e Marfurt (2012), embora os primeiros levantamentos sísmicos 3D tenham sido adquiridos em meados da década de 1970, durante a década de 1980, a maior parte das interpretações ainda se baseava em dados 2D.

Isso se explica pelo fato de que, naquele período, os dados 3D eram vistos

predominantemente como uma ferramenta de exploração e não como um recurso voltado à pesquisa, o que manteve a sísmica 2D como a alternativa mais utilizada. Ainda assim, a sísmica 2D apresentava limitações importantes: como os ambientes deposicionais, em geral, não possuem geometria bidimensional, o mapeamento de feições estratigráficas torna-se mais desafiador quando se dispõe apenas de dados 2D (Chopra; Marfurt, 2012).

Partindo disso, Chopra e Marfurt (2012) declara que

> Essas limitações levaram ao desenvolvimento e, por fim, à adoção quase generalizada de dados sísmicos 3D. A amostragem fina nas direções *inline* e *crossline* em volumes sísmicos 3D leva a imagens sísmicas 3D precisas durante o processamento, maior resolução geométrica e detalhes mais nítidos na distribuição espacial de litologias, porosidades e fluidos. Volumes 3D bem imageados podem ser usados para gerar seções geológicas verticais em qualquer direção. Os dados sísmicos 3D não apenas aprimoram a visualização estrutural, mas também permitem uma melhor interpretação estratigráfica. (Chopra; Marfurt, 2012)

Os dados sísmicos 3D são, em geral, disponibilizados na forma de um volume (ou cubo sísmico); isto é, um conjunto de traços organizado espacialmente que permite investigar a subsuperfície em três dimensões. Esse volume pode ser analisado a partir de diferentes seções: *inlines* e *crosslines*, que representam cortes verticais ortogonais entre si, e fatias em tempo ou profundidade, que correspondem a horizontes (cortes aproximadamente horizontais) ao longo do volume. Em conjunto, essas vistas facilitam a interpretação e o mapeamento de estruturas e feições estratigráficas no espaço tridimensional.

A Figura 1 ilustra o conceito de cubo sísmico 3D e evidencia sua diferença em relação a um dado sísmico 2D. Conforme descrito por Sebai, Zouaoui e Ghorbel (2024), esse tipo de dado pode ser representado no formato de um cubo (Figura 1-b), cujas dimensões estão diretamente associadas à geometria de aquisição sísmica. Na Figura 1-c, tais dimensões são usualmente denominadas *inline* (x), na direção da aquisição, e *crossline* (y), na direção perpendicular; a terceira dimensão corresponde à profundidade (z) ou, alternativamente, ao tempo duplo de percurso no caminho fonte–refletor.

Em suma, o cubo sísmico 3D constitui a base para uma análise mais completa da subsuperfície, pois integra a variação espacial nas direções *inline* e *crossline* e a dimensão vertical em tempo/profundidade, permitindo extrair seções em múltiplas

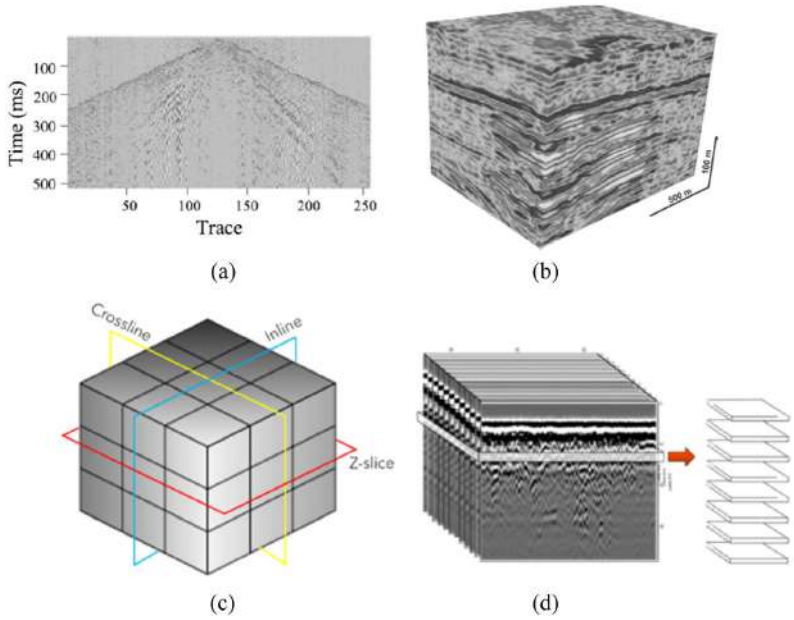


Figura 1 – A) Um *gather* sísmico 2D, um cubo sísmico 3D: B) um exemplo de uma aquisição terrestre, C) suas dimensões *inline*, *crossline* e Z, e D) a extração de seções 2D a partir de um volume sísmico 3D. (Sebai; Zouaoui; Ghorbel, 2024)

Nota: *Gather* é um conjunto de traços sísmicos agrupados por um critério comum.

orientações e mapear com maior confiabilidade estruturas e elementos estratigráficos. Essa organização volumétrica dos dados é fundamental para as técnicas de visualização e realce discutidas a seguir, principalmente porque permite ao interprete ter um parâmetro geral sobre os dados que estão sendo visualizados. Porém, o cubo sísmico 3D não excluí o uso da sísmica 2D, pois também é uma ferramenta fundamental para a análise e exploração dos dados sísmicos.

2.3 *Structurally Enhanced Red-Green-Blue (seRGB)*

O método *Structurally Enhanced RGB*, proposto por Laake *et al.* (2011), foi desenvolvido para o processamento e a interpretação de imagens de satélite, com o objetivo de aprimorar o contraste estrutural e facilitar o mapeamento geológico. No estudo em questão, os autores empregaram imagens do sensor Landsat 7 ETM+ e utilizaram a técnica para realçar feições geológicas, como descontinuidades e lineamentos, tornando-as mais evidentes na composição RGB e, assim, apoiando a interpretação visual e a extração de informações geológicas a partir dos dados orbitais.

O estudo concentra-se na região do Golfo de Suez (figura 2), no Egito, onde a

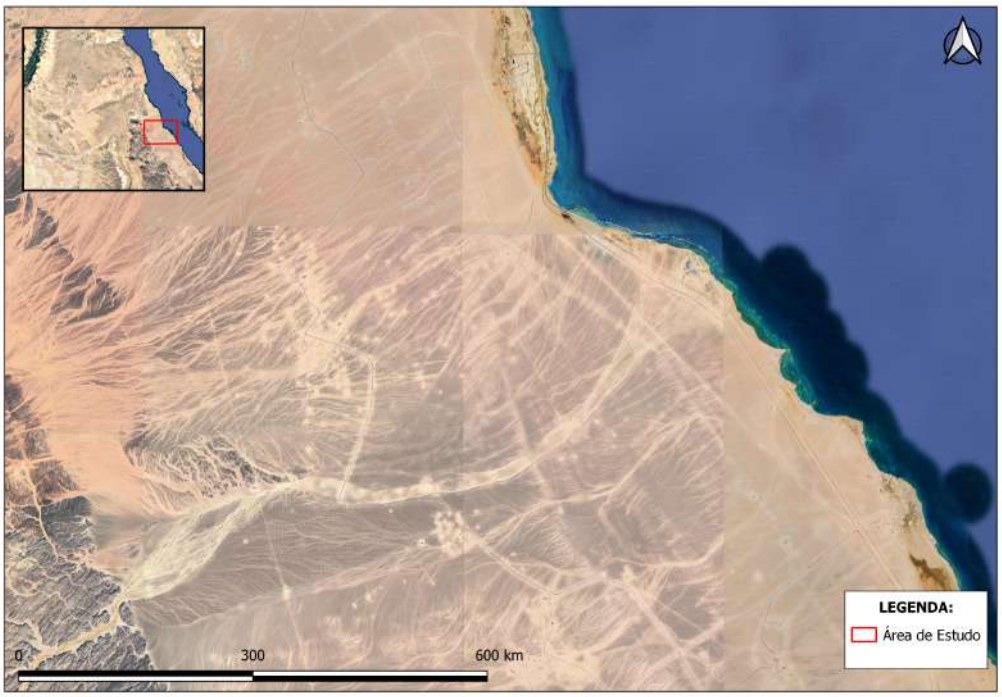


Figura 2 – Golfo de Suez, Egito.

técnica é explorada como suporte ao mapeamento de afloramentos e à identificação de lineamentos e falhas superficiais, contribuindo para uma caracterização geológica mais detalhada da área.

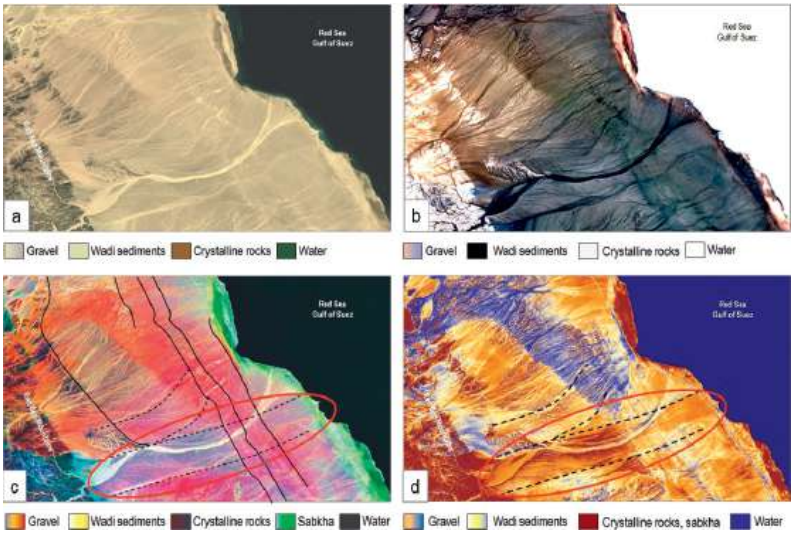


Figura 3 – Processamento de imagens de satélite para geologia estrutural: (a) banda visível Landsat 321 RGB; (b) Landsat 321 RGB invertido; (c) imagem litológica Landsat 675–321 RGB; (d) mapa razão 6/8 de *wadis* Landsat (Laake *et al.*, 2011)

A figura 3 sintetiza as principais etapas de processamento empregadas na técnica, evidenciando como diferentes combinações, razões e realces das bandas do sensor Landsat são utilizadas para produzir uma composição voltada à interpretação geológica

de estruturas. Em Laake *et al.* (2011), os autores aplicam esse fluxo de processamento às imagens do Landsat 7 ETM+ com o objetivo de discriminar unidades litológicas e reconhecer depósitos associados a *wadis* (canais intermitentes e seus depósitos sedimentares), além de realçar padrões estruturais na paisagem.

Ao analisar os resultados obtidos pela técnica, observa-se que a comparação entre a composição RGB original (figura 3-A), o produto voltado à discriminação litológica (figura 3-C) e o mapeamento dos depósitos sedimentares associados a *wadis* (figura 3-D) evidencia ganhos interpretativos relevantes. Em particular, os realces aplicados às bandas e às razões espectrais aumentam o contraste entre unidades e tornam mais nítidos limites e padrões espaciais que, na imagem RGB, aparecem de forma pouco definida. Dessa forma, os resultados do processamento mostraram-se eficazes em destacar variações litológicas e feições associadas aos *wadis* que não eram claramente reconhecíveis apenas com a composição RGB.

Esses produtos reforçam o potencial do *Structurally Enhanced RGB* como uma etapa de pré-interpretação, capaz de direcionar o mapeamento geológico e estrutural em imagens de satélite, reduzindo ambiguidades e aumentando a confiabilidade das interpretações quando comparadas ao uso exclusivo de composições RGB convencionais.

2.4 *Structured-Sharpened Continuous Red- Green- Blue (SRGB)*

Em contraste com a técnica apresentada na Seção 2.3, desenvolvida para imagens de satélite, o *Structured-Sharpened Continuous RGB* (SRGB) constitui uma metodologia voltada para a interpretação de dados sísmicos. O procedimento parte de um cubo sísmico e utiliza atributos extraídos do volume para construir uma composição RGB contínua, que é combinada para formar uma imagem RGB aprimorada, voltada a realçar padrões e descontinuidades de interesse interpretativo.

Em sua pesquisa, Laake (2015) define este método como:

> Uma inovação na visualização de dados, que utiliza a renderização simultânea de múltiplas camadas de dados em cores RGB contínuas para destacar heterogeneidades geofísicas representativas de

> características geológicas. O método foi adaptado a partir do processamento de imagens multiespectrais de satélite para geologia. (Laake, 2015)

Além disso, Laake (2015) ressalta que a aplicação do método SRGB a volumes sísmicos pode melhorar a representação e a visualização de características geológicas de interesse interpretativo. Ao integrar diferentes atributos em uma composição RGB contínua e aplicar realces estruturais, o SRGB tende a aumentar o contraste e a continuidade espacial de feições, tornando-as mais distinguíveis no volume. Entre os alvos citados pelos autores estão falhas, canais e corpos salinos, que podem ser melhor delineados e acompanhados lateralmente quando comparados à inspeção direta dos dados sísmicos ou de atributos isolados.

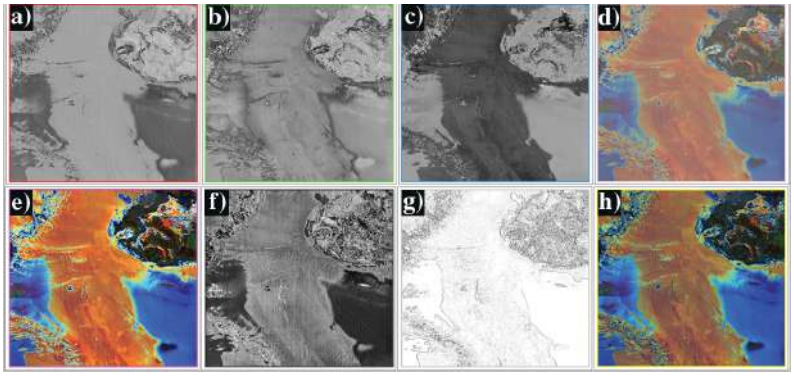


Figura 4 – Principais etapas do fluxo de trabalho: fatias de amplitude do cubo de entrada sísmica nos níveis (a) superior, (b) médio e (c) inferior, (d) imagem RGB bruta, (e) imagem RGB aprimorada , (f) banda de saturação da imagem HSV, (g) detecção de bordas da banda de saturação e (h) imagem SRGB. (Laake, 2015)

A figura 4 é um exemplo do fluxo de trabalho para desenvolver a técnica *Structured-Sharpened Continuous RGB* em um volume sísmico, onde se utiliza o atributo de amplitude que foi extraído de seus dados para realizar as etapas de processamento e, ao final, o produto obtido é uma imagem aprimorada que consegue destacar as feições presentes nos dados.

O método SRGB, além de sua função de auxiliar na interpretação geológica, também possui três principais aplicações a serem exploradas. Como descrito em Laake (2015), podemos listar as três aplicações como:

- Exploração de dados;
- Extração de características;

- Validação da interpretação;

Em síntese, o SRGB se destaca por integrar múltiplos atributos sísmicos em uma única visualização colorida e estruturalmente realçada, reduzindo a dependência de inspeções separadas de dezenas de volumes e mapas de atributos. Ao concentrar informações espectrais (cor), texturais (saturação) e estruturais (realce de bordas) em um produto único, a metodologia favorece uma interpretação mais rápida e consistente, sobretudo na detecção de descontinuidades e na delimitação de geometrias complexas. Assim, o SRGB pode ser entendido como uma ferramenta de apoio à interpretação e à validação de hipóteses geológicas, servindo como ponte entre a exploração qualitativa do volume e etapas subsequentes de mapeamento e integração com outros dados.

2.5 *Red Relief Image Map (RRIM)*

O método *Red Relief Image Map*, ou RRIM, é um método que foi desenvolvido para visualizar mudanças na superfície terrestre a partir de dados derivados de LiDAR *(Light Detection and Ranging)*[1] porém, ele também é adequado para o Modelo digital de Elevação [2] (Chiba; Kaneta; Suzuki, 2008)..

De acordo com Chiba, Kaneta e Suzuki (2008), Yokoyama Ryzo; Shirasawa (2002), o conceito básico do RRIM consiste na combinação (por meio da multiplicação) de três camadas que descrevem elementos do relevo: a inclinação topográfica e as medidas de aberturas positivas e negativas. Enquanto a inclinação sintetiza a variação de declividade, as aberturas expressam a geometria local da superfície a partir de diferentes perspectivas: a abertura negativa está associada a porções côncavas do terreno, ao passo que a abertura positiva está associada a porções convexas. A integração dessas camadas tende a aumentar o contraste de feições sutis, favorecendo a identificação de bordas, cristas, depressões e lineamentos, inclusive em áreas onde as variações altimétricas são pouco pronunciadas. Quanto à visualização, o produto final é comumente apresentado em uma escala cromática que parte do branco e incorpora tons de cinza e, principalmente, de vermelho; segundo Chiba, Kaneta e

[1] É um sensor remoto ativo a bordo de plataformas (tripuladas ou não tripuladas) e um método direto de captura de dados; o mesmo possui sua própria fonte de energia, neste caso, uma fonte de luz, o laser (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), s.d.).

[2] Dado tridimensional que representa a superfície terrestre.

Suzuki (2008), de modo geral, as áreas mais claras representam superfícies convexas, enquanto as áreas mais escuras representam superfícies côncavas.

A figura 5 ilustra etapas do processo de geração de uma imagem a partir da técnica RRIM. Na figura 5-A apresenta-se a inclinação topográfica; na figura 5-B, o cálculo da abertura topográfica; e, na figura 5-C, o produto final com o RRIM aplicado. No exemplo apresentado por Chiba, Kaneta e Suzuki (2008), a área de estudo corresponde ao Monte Ohmuro, no Japão, com base em dados LiDAR.

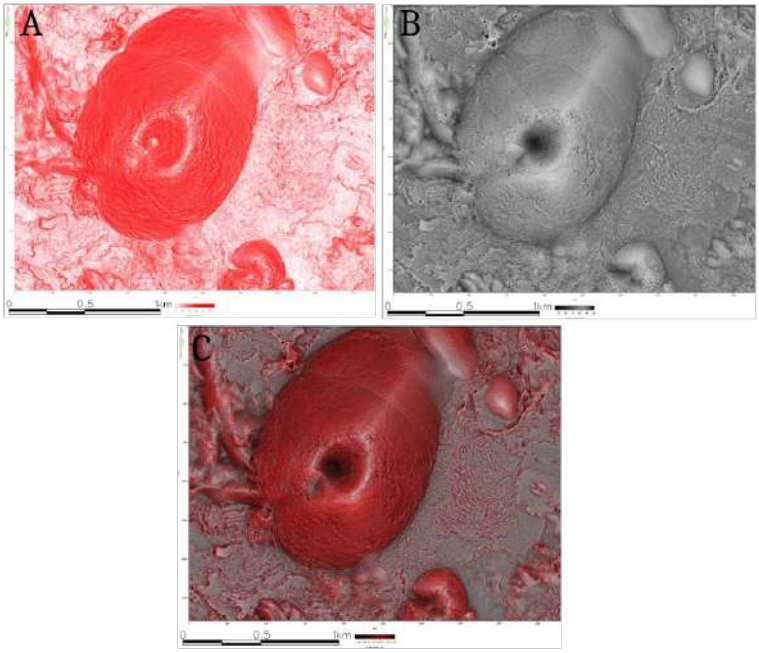


Figura 5 – Procedimento de produção do RRIM. A) Inclinação topográfica, B) Abertura (Op -On)/2 e C) RRIM para o Monte Ohmuro, Japão. Dados LIDAR em grade de 1 m. (Chiba; Kaneta; Suzuki, 2008)

O *Red Relief Image Map (RRIM)* é uma técnica eficaz para evidenciar concavidades e convexidades, realçando feições e estruturas presentes em dados topográficos e facilitando a interpretação de padrões morfológicos que podem ser pouco perceptíveis em representações tradicionais. Ao enfatizar contrastes locais associados à geometria do relevo, o método contribui para a identificação de lineamentos, bordas e descontinuidades, além de apoiar análises em diferentes escalas. No entanto, visando ampliar o potencial de realce e avaliar sua aplicabilidade, nesta pesquisa, o método não foi restrito a um Modelo Digital de Elevação (MDE); ele foi adaptado para ser empregado também em dados sísmicos, gravimétricos, magnetométricos e gamaespectrométricos, permitindo explorar até que ponto a metodologia consegue destacar tendências, estruturas e variações espaciais nesses

domínios, bem como reconhecer suas limitações e condições de uso.

2.6 Atributos em dados gravimétricos e magnetométricos

Para introduzir os atributos aplicados a dados gravimétricos e magnetométricos, é necessário, antes, compreender os princípios desses métodos e a natureza das informações que eles fornecem.

Segundo Kearey, Brooks e Hill (2002), a pesquisa gravimétrica é responsável por investigar a geologia subterrânea com base nas variações do campo gravitacional da Terra resultantes das diferenças de densidade entre as rochas subterrâneas. Conceitualmente,

> É a ideia de um corpo causador, que é uma unidade rochosa com densidade diferente da que a rodeia. Um corpo causador representa uma zona subterrânea de massa anômala e causa uma perturbação localizada no campo gravitacional, conhecida como anomalia gravitacional. (Kearey; Brooks; Hill, 2002)

A teoria básica deste método baseia-se na Lei da Gravitação de Newton (Kearey; Brooks; Hill, 2002), que é dada pela equação 2.1

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \tag{2.1}$$

onde F representa a força gravitacional (em Newtons), G é a constante gravitacional universal ($6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}}$), m_1 e m_2 são as massas dos corpos (em kg) e r é a distância entre seus centros de massa (em metros). Embora essa formulação seja fundamental para descrever a atração gravitacional, na gravimetria aplicada não se mede diretamente F; o que se observa em campo é o efeito resultante dessa atração na forma de aceleração gravitacional.

Nesse contexto, um parâmetro central é a aceleração da gravidade, expressa (para uma Terra idealizada) pela equação 2.2

$$g = \frac{GM}{R^2} \tag{2.2}$$

em que g é a aceleração da gravidade, G é a constante gravitacional, M é a massa do planeta e R é a distância ao centro. Essa relação evidencia que g diminui

com o aumento de R (por exemplo, com a altitude) e, sobretudo, fornece a base conceitual para interpretar variações espaciais de g como reflexo de heterogeneidades de massa/densidade no interior da Terra. Assim, na prática, a gravimetria trabalha com anomalias de gravidade (diferença entre o valor observado e um modelo de referência), após correções como latitude, altitude e do efeito da massa topográfica, de modo a evidenciar variações de densidade de subsuperfície.

De forma análoga à gravimetria, a magnetometria investiga variações espaciais de um campo potencial, de acordo com Kearey, Brooks e Hill (2002)

> O objetivo de um levantamento magnético é investigar a geologia subterrânea com base nas anomalias do campo magnético da Terra resultantes das propriedades magnéticas das rochas subjacentes. Embora a maioria dos minerais formadores de rochas sejam efetivamente não magnéticos, certos tipos de rochas contêm minerais magnéticos suficientes para produzir anomalias magnéticas significativas. Da mesma forma, objetos ferrosos artificiais também geram anomalias magnéticas. A pesquisa magnética tem, portanto, uma ampla gama de aplicações, desde pesquisas de engenharia ou arqueológicas em pequena escala para detectar objetos metálicos enterrados, até pesquisas em grande escala realizadas para investigar a estrutura geológica regional. (Kearey; Brooks; Hill, 2002).

Os dados magnetométricos são obtidos a partir da medição da intensidade do campo magnético (ou de seus componentes) com magnetômetros instalados em plataformas terrestres, aéreas ou marinhas.

De acordo com Kearey, Brooks e Hill (2002), o campo magnético é gerado através de um polo magnético que é descrito a partir das leis fundamentais do magnetismo, que são dadas pela equação 2.3

$$F = \frac{\mu_0 m_1 m_2}{4\pi\mu_r r^2} \tag{2.3}$$

onde F representa a força entre dois polos magnéticos de intensidades $m1$ e $m2$, que são separados por uma distância r. Já a permeabilidade do vácuo é representada por μ_0 e μ_r representa a permeabilidade magnética relativa do meio. Essa força se torna atrativa se os polos tiverem sinais diferentes e repulsiva se os sinais forem iguais.

Além das leis fundamentais do magnetismo, Kearey, Brooks e Hill (2002) descreve outras duas leis que são fundamentais para os levantamentos magnéticos: o campo magnético B e o potencial magnético V. O campo magnético B é descrito pela equação

2.4

$$B = \frac{\mu_0 m}{4\pi\mu_r r^2} \tag{2.4}$$

onde o B é gerado por um único polo magnético de intensidade m e a uma distância r. Para além disso, o campo magnético também pode ser expresso através da 2.5, representando o potencial magnético V que descreve a distribuição do campo no espaço.

$$V = \frac{\mu_0 m}{4\pi\mu_r r} \tag{2.5}$$

Para apoiar a interpretação dessas anomalias e tornar mais evidentes feições sutis, é comum aplicar transformações e realces aos dados magnetométricos, gerando atributos que enfatizam diferentes aspectos do sinal (por exemplo, variações laterais, bordas de corpos e tendências estruturais). Dessa forma, assim como em dados gravimétricos, o uso de atributos em magnetometria permite extrair informações adicionais do campo observado e facilitar a correlação com estruturas e unidades geológicas de interesse.

Em dados potenciais (gravimetria e magnetometria), o termo *atributos* refere-se a transformações e medidas derivadas calculadas a partir do campo observado, com o objetivo de realçar padrões e facilitar a interpretação geológica. Para essas transformações, existem diversos atributos que podem ser utilizados para fornecer a visualização de características geológicas e geofísicas específicas dentro dos dados observados. Os principais atributos que aparecem nas técnicas utilizadas nesta pesquisa são a detecção de bordas e as derivadas (primeira e segunda ordens, mista e parcial).

Segundo Bhardwaj e Mittal (2012), a detecção de bordas é uma técnica que pode ser definida como

> Uma operação de baixo nível [3] usada em aplicações de processamento de imagens e visão computacional. O principal objetivo da detecção de bordas é localizar e identificar descontinuidades acentuadas em uma imagem. Essas descontinuidades são causadas por mudanças abruptas na intensidade dos pixels, que caracterizam os limites dos objetos em uma cena. As bordas definem os limites entre diferentes regiões da imagem. Esses limites são usados para identificar objetos para fins de segmentação e correspondência. (Bhardwaj; Mittal, 2012)

[3] Representa uma operação que atua diretamente nos valores dos pixels das imagens, porém, sem interpretar o significado do que é representado nela.

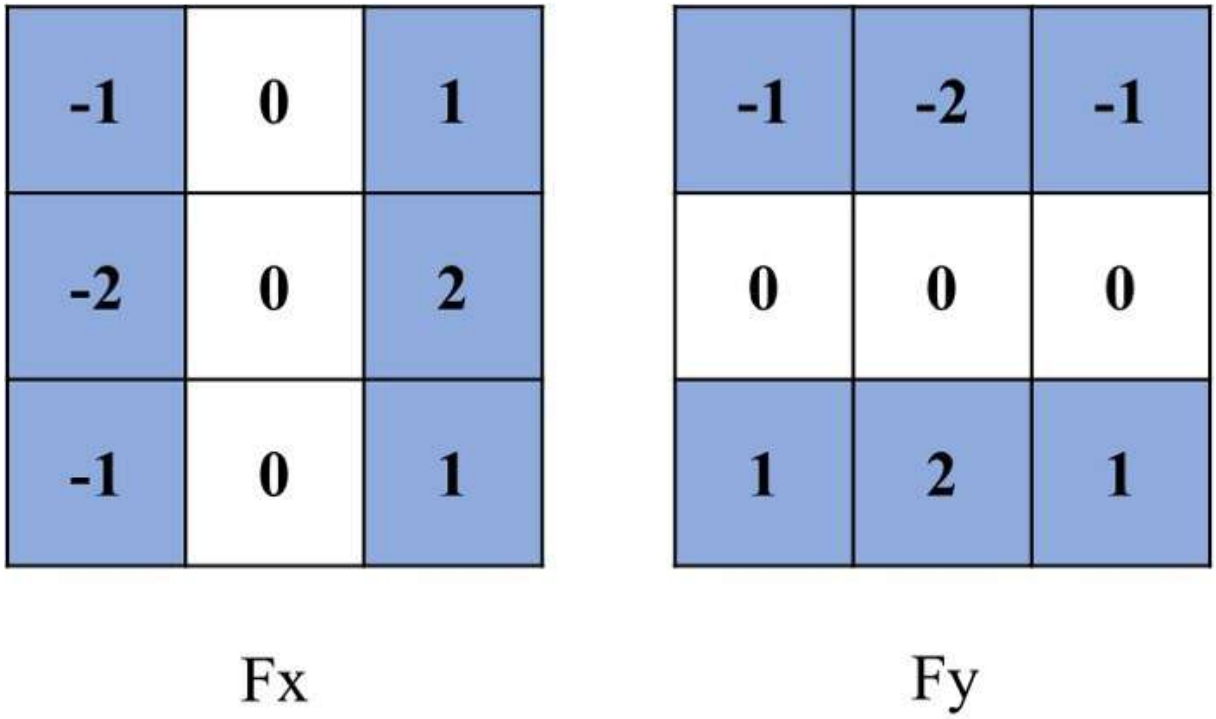


Figura 6 – Máscaras de convolução do operador de Sobel utilizados para a detecção de bordas horizontais e verticais. (Li; Wang; Bai, 2024)

Além disso, vários tipos de operações estão disponíveis na detecção de bordas; isso inclui, segundo Bhardwaj e Mittal (2012), a derivada de primeira ordem, para gerar uma imagem gradiente em que as bordas são detectadas por um limiar. Também existem derivadas de segunda ordem, que são baseadas na extração de pontos de cruzamento zero, que indicam a presença de máximos na imagem. Esse tipo de processamento, amplamente empregado em geologia e geofísica, é útil para realçar feições presentes nos dados observados, pois enfatiza descontinuidades e limites associados a bordas. Como diferentes operadores de detecção de bordas respondem de maneiras distintas às variações do sinal, nesta pesquisa, adotou-se o filtro de Sobel.

“ O operador Sobel é um operador de borda derivado de uma derivada de primeira ordem típico, também conhecido como operador de borda gradiente.”(Tian *et al.*, 2021).

De acordo com Tian *et al.* (2021), o operador Sobel $S(i, j)$ utiliza a equação 2.6

para calcular o gradiente da imagem.

$$
\begin{aligned}
S(i,j) &= |G_x| + |G_y| \\
G_x &= [\, f(i+1,j-1) + 2f(i+1,j) + f(i+1,j+1) \,] \\
&\quad - [\, f(i-1,j-1) + 2f(i-1,j) + f(i-1,j+1) \,] \\
G_y &= [\, f(i-1,j+1) + 2f(i,j+1) + f(i+1,j+1) \,] \\
&\quad - [\, f(i-1,j-1) + 2f(i,j-1) + f(i+1,j-1) \,]
\end{aligned}
\tag{2.6}
$$

A equação 2.6 descreve o operador de Sobel para estimar o gradiente no pixel (ou célula) central (i, j) a partir de seus 8 vizinhos. Conforme discutido por Tian *et al.* (2021), ao usar os pixels ao redor para estimar o gradiente do pixel central, o Sobel (figura 6) atribui pesos 2 e -2 a posições específicas da vizinhança, de modo a diferenciar a influência de amostras a diferentes distâncias do centro; com isso, o contorno das bordas tende a ficar mais pronunciado e a detecção/posicionamento torna-se mais preciso. Na Eq. 2.6, G_x e G_y são aproximações das componentes do gradiente nas direções x e y, obtidas como a diferença entre somas ponderadas de valores f em lados opostos do ponto central; a magnitude do gradiente é, então, aproximada por $S(i,j) = |G_x| + |G_y|$. Após o cálculo de $S(i,j)$, a identificação de bordas pode ser feita por limiarização: se $S(i,j)$ excede um valor de limiar, o ponto é classificado como borda, sendo esse limiar definido pelo usuário ou, alternativamente, pela média dos valores de intensidade da imagem (Tian *et al.*, 2021). Por fim, Tian *et al.* (2021) ressalta que, embora o Sobel seja rápido e eficaz em imagens sem ruído, em dados ruidosos, ele pode marcar pontos de ruído como bordas, reduzindo a acurácia e aumentando a taxa de erro.

Nesse contexto, destacam-se as derivadas de primeira e de segunda ordem do campo potencial, que representam, respectivamente, a taxa de variação espacial do sinal e a variação dessa taxa, sendo frequentemente empregadas para realçar bordas, lineamentos e feições mais rasas. Essas derivadas podem ser calculadas como derivadas parciais em relação às direções horizontais ($\partial/\partial x$ e $\partial/\partial y$) e/ou à direção vertical ($\partial/\partial z$), bem como na forma de derivadas mistas, quando envolvem mais de uma direção (por exemplo, $\partial^2/(\partial x\,\partial y)$). Nesta revisão, essas operações são apresentadas de forma conceitual como atributos de realce e interpretação; na Seção de Metodologia, os procedimentos de cálculo, as escolhas de implementação e os produtos derivados adotados serão discutidos com maior detalhe.

3 Metodologia

Neste trabalho, são empregadas três metodologias de aprimoramento de imagens, selecionadas de acordo com o tipo de dado analisado e com o objetivo de maximizar o realce de feições relevantes à interpretação. A primeira é a *Structurally Enhanced RGB (seRGB)*, proposta por Laake *et al.* (2011), aplicada a imagens de satélite, com foco no destaque de padrões estruturais e lineamentos. A segunda é *Structured-Sharpened Continuous (SRGB)*, apresentada por Laake (2015), direcionada a dados sísmicos, visando aumentar o contraste e a continuidade visual de descontinuidades e heterogeneidades. Por fim, utiliza-se o *Red Relief Image Map (RRIM)* de Chiba, Kaneta e Suzuki (2008), originalmente desenvolvido para dados LiDAR e, posteriormente, Modelos Digitais de Elevação, mas aqui estendido e aplicado também a dados potenciais e sísmicos, utilizando informações referentes à área de estudo, a fim de avaliar seu desempenho no realce de estruturas e tendências espaciais em diferentes domínios.

3.1 Área de estudo

A margem continental sudeste brasileira está associada ao processo de ruptura do Gondwana e à abertura do Oceano Atlântico Sul no Cretáceo Inferior. No quadro evolutivo sintetizado por Martins (2016), a fragmentação iniciada no Triássico culmina, ao final do Jurássico, na separação progressiva entre América do Sul e África e na instalação do sistema de riftes do Atlântico Sul, com início em torno de 150 Ma e propagação para norte. Nessa evolução, o rifteamento pode ser entendido em dois ciclos principais (Evento Sul-Atlantiano Precoce e Evento Sul-Atlantiano), acompanhados por transição de deformação dúctil para rúptil e aumento de subsidência (Conceição; Zalán; Wolff, 1988). O estágio final (*breakup*) marca a ruptura continental e o início da formação de crosta oceânica; no Atlântico Sul, a abertura também é descrita como diacrônica, com destaque para o segmento central (entre as Zonas de Fratura Rio Grande e Ascension), onde se registra a deposição evaporítica aptiana e o início da expansão oceânica próximo à transição Aptiano–Albiano (~112 Ma), além de evidências compatíveis com afinidade *magma-pobre* (Blaich;

Faleide; Tsikalas, 2011).

No continente, a área de interesse inclui o estado do Rio de Janeiro, inserido no contexto da Província Mantiqueira (Almeida *et al.*, 1981) e do cinturão neoproterozoico da Faixa Ribeira, de direção NE, desenvolvido durante episódios de convergência da Orogenia Brasiliana–Panafricana (Heilbron; Eirado; Almeida, 2016). No segmento fluminense, a compartimentação tectônica é descrita em termos de terrenos tectonoestratigráficos separados por empurrões e por zonas de cisalhamento subverticais, destacando-se quatro domínios principais (Ocidental, Central, Oriental e Cabo Frio) (Heilbron; Eirado; Almeida, 2016). Esse arcabouço fornece o pano de fundo estrutural sobre o qual se implantaram e foram controladas bacias e feições associadas, tanto em ambiente continental quanto em ambiente *offshore*.

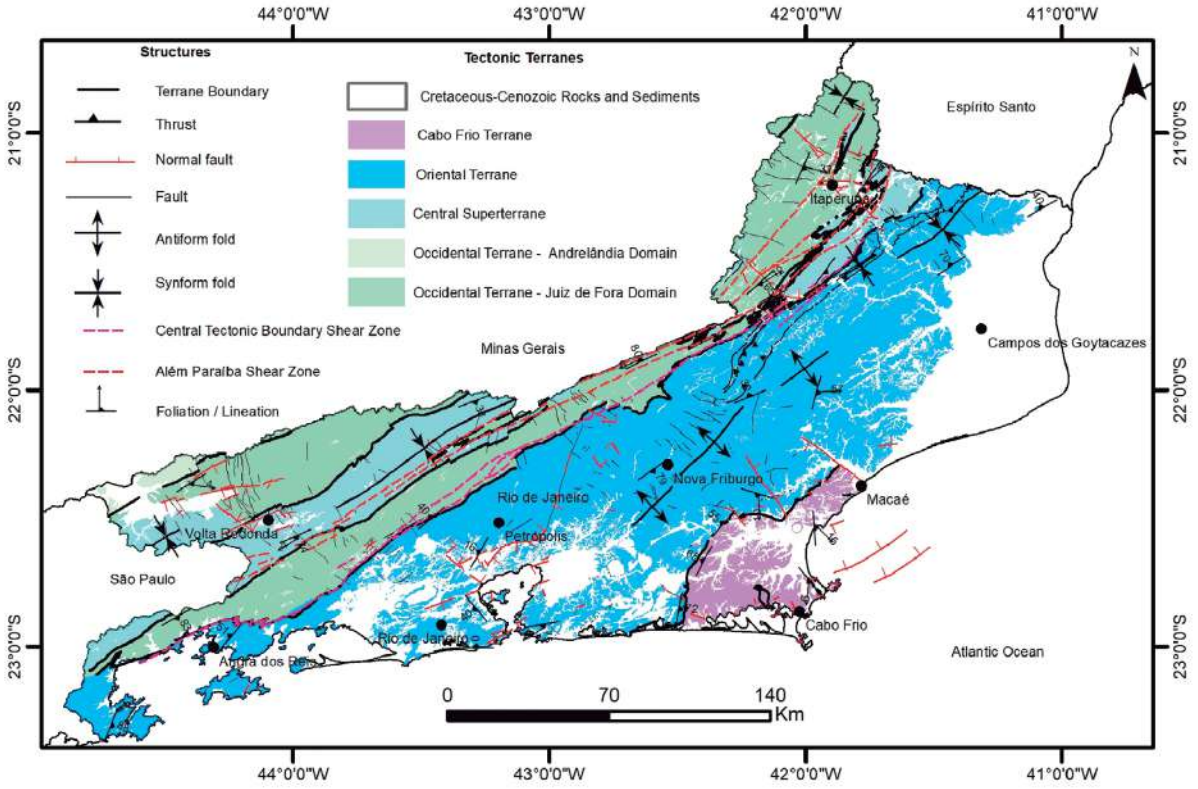


Figura 7 – Mapa estrutural simplificado do Estado do Rio de Janeiro, com as principais zonas de sutura e dobras regionais associadas a zonas de cisalhamento tardias.(Heilbron *et al.*, 2020)

No segmento fluminense da Faixa Ribeira, o arcabouço é comumente compartimentado em quatro terrenos (Ocidental, Central/Paraíba do Sul–Embú, Oriental e Cabo Frio) conforme a figura 7, separados principalmente por empurrões e zonas de cisalhamento dúcteis que controlam o empilhamento crustal e a justaposição de unidades com histórias distintas (Heilbron; Eirado; Almeida, 2016). Em síntese, o

Terreno Ocidental corresponde à margem passiva retrabalhada do Cráton São Francisco, com metassedimentos de alto grau e sistemas de empurrão associados (Andrelândia e Juiz de Fora); o Terreno Central reúne unidades menores (p.ex., Paraíba do Sul–Embú e Domínio Cambuci) relacionadas a um arco magmático continental interno; o Terreno Oriental representa um sistema de arco magmático externo, incluindo ortognaisses do Complexo Rio Negro e granitóides sin- a pós-colisionais; e o Terreno Cabo Frio, interpretado como a ponta do Cráton de Angola, foi acoplado tardiamente durante a colisão Cambro–Ordoviciana, exibindo estruturas de empurrão e intensa reativação deformacional (Eirado; Heilbron; Almeida, 2006; Furtado, 2015; Heilbron *et al.*, 2020).

A partir desse enquadramento regional, este trabalho concentra-se em duas áreas complementares para a comparação dos procedimentos metodológicos: o município de Resende, no sudoeste do estado do Rio de Janeiro, e a Bacia de Santos, onde se insere o volume sísmico 3D utilizado (Figura 8).

A Bacia de Resende situa-se no extremo oeste fluminense, entre Engenheiro Passos e Quatis (Brêda, 2010), constituindo um segmento do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil, proposto por (Riccomini, 1990). Segundo Ramos, Mello e Sanson (2006), trata-se de uma bacia alongada em ENE–WS, com eixo aproximado N75E e cerca de 47 km de comprimento, cuja sedimentação é formalmente subdividida nas formações Resende e Floriano. No contexto estrutural, a bacia encontra-se no segmento central da Faixa Ribeira e apresenta forte controle tectônico ao longo da borda norte, com falhas ENE–WSW; as maiores espessuras do pacote sedimentar ocorrem adjacentes a esse setor, associado à borda ativa do hemi-*graben*, e a evolução extensional durante o Eoceno favoreceu o desenvolvimento de leques aluviais ao longo dessa borda, incorporados à Formação Resende (Ramos; Mello; Sanson, 2005).

A Bacia de Santos, por sua vez, localiza-se na margem sudeste do Brasil (*offshore* dos estados do Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro) e é delimitada, em linhas gerais, pelo Alto de Florianópolis/Cordilheira de São Paulo (ao sul) e pelo Alto de Cabo Frio (ao norte) (Hercos; Schreiner; Ferreira, 2023). Com área aproximada de 350.000 km^2, destaca-se como principal polo de produção de hidrocarbonetos do Brasil e, do ponto de vista geológico, é ressaltada pela inexistência de porção emersa e pela ocorrência de magmatismo formador do embasamento (Souza; Sgarbi, 2019). O embasamento inclui granitos e gnaisses pré-cambrianos do Complexo Costeiro e metassedimentos

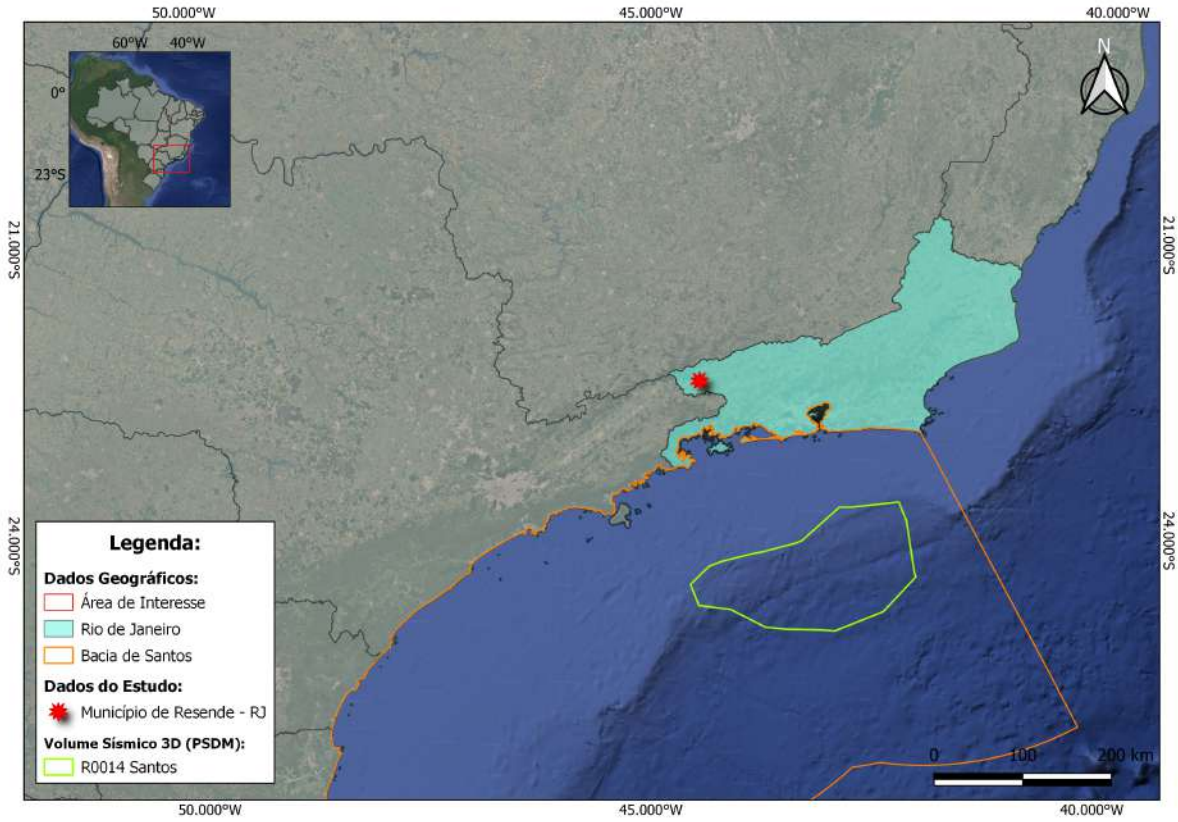


Figura 8 – Mapa de localização da área de estudo no sudeste do Brasil, com destaque para o estado do Rio de Janeiro (em azul claro) e o município de Resende (estrela vermelha). A Bacia de Santos é delimitada em laranja, enquanto o polígono em verde representa o volume sísmico 3D – R0014 Santos (PSDM) utilizado neste trabalho. O mapa inserido no canto superior esquerdo mostra a localização regional da área de interesse no território brasileiro.

da Faixa Ribeira; nesse arcabouço, a charneira de Santos separa mergulhos mais suaves a oeste e mais acentuados a leste, e a sedimentação cretácica ocorre apenas costa afora dessa feição (Moreira *et al.*, 2007). Acima do embasamento, a seção sedimentar registra as sequências *rifte*, pós-*rifte* e *drifte* (Hercos; Schreiner; Ferreira, 2023), cuja interpretação em subsuperfície, assim como o mapeamento de feições sutis em diferentes tipos de dados, depende de procedimentos de realce e visualização; por isso, os itens a seguir apresentam as técnicas de aprimoramento de imagem aplicadas neste trabalho.

3.2 Técnicas de Aprimoramento de imagem

3.2.1 *Structurally Enhanced RGB*

O método *Structurally Enhanced RGB* (seRGB), que foi proposto em Laake *et al.* (2011), foi desenvolvido e aplicado em dados de sensoriamento remoto orbitais com o objetivo de aumentar a discriminação visual de padrões estruturais (por exemplo, lineamentos, zonas de fratura, contatos litológicos e limites de unidades) a partir da combinação de composições espectrais e operações aritméticas entre bandas.

O sensoriamento remoto é uma tecnologia que se baseia na aquisição de informações de objetos ou áreas da superficie terrestre sem contato direto, por meio de sensores que medem a radiação eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos. No sensoriamento remoto passivo, a principal fonte de energia é o Sol: sua radiação incide sobre a superfície, interage com os materiais e parte dessa energia é refletida e registrada pelo sensor. Segundo Xie, Sha e Yu (2008), o sensor de sensoriamento remoto é um dispositivo que captura dados de um objeto ou cena à distância, possuindo suas próprias características. Nesta pesquisa, o sensor utilizado é o Landsat 7 ETM +, que fornece imagens com um registro quase contínuo da superfície terrestre global (Xie; Sha; Yu, 2008). O sensor utilizado possui uma média resolução espacial de 30 metros para bandas multiespectrais e 60 metros para a banda de infravermelho termal.

De acordo com Almalki *et al.* (2022), a resolução espectral refere-se ao nível de detalhe em comprimento de onda [1] dentro de uma banda, onde cada banda espectral detecta de forma única uma determinada característica da superfície terrestre ao focalizar o espectro eletromagnético em um intervalo específico. A maioria dos sensores multiespectrais de satélite, incluindo o Landsat 7 ETM+, inclui a banda pancromática, bandas de cor vísivel (azul, verde, vermelho) e as bandas do infravermelho.

A tabela 1 apresenta o nome do sensor, suas bandas espectrais, a resolução espectral e a resolução espacial. Cada uma das bandas espectrais do sensor Landsat 7 ETM + tem suas principais aplicações. De acordo com U.S. Geological Survey (2025), a Banda Azul (B1) é útil para mapeamento batimétrico, distinguindo solo de vegetação

[1] Posição da radiação no espectro eletromagnético

Tabela 1 – Bandas espectrais do sensor Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus).

Sensor	**Bandas Espectrais**	**Resolução Espectral**
Landsat 7 ETM+	(B1) Azul	0.45 – 0.515 μm
	(B2) Verde	0.525 – 0.605 μm
	(B3) Vermelho	0.63 – 0.69 μm
	(B4) Infravermelho Próximo	0.76 – 0.90 μm
	(B5) Infravermelho Médio	1.55 – 1.75 μm
	(B6) Infravermelho Termal	10.4 – 12.5 μm
	(B7) Infravermelho Médio	2.09 – 2.35 μm
	(B8) Pancromático	0.52 – 0.90 μm

decídua e coníferas; a Banda Verde (B2) enfatiza o pico da vegetação, o que é útil para avaliar o vigor da planta; a Banda vermelha (B3) discrimina encostas com vegetação; a Banda Infravermelho próximo (B4) enfatiza o conteúdo de biomassa e linhas costeiras; a Banda Infravermelho Médio (B5) discrimina o teor de umidade do solo e da vegetação; a Banda Termal (B6) é utilizada para mapeamento térmico e estimativa da umidade do solo; o Infravermelho Médio (B7) é útil para rochas alteradas hidrotermicamente associadas a depósitos minerais; e a Banda Pancromática (B8) fornece imagens com 15 metros de resolução espacial.

Ao combinar essas bandas espectrais, é possível obter diversas imagens que destacam feições diferentes nos dados. Essas combinações, conhecidas como composições coloridas (ou composições de bandas), consistem em atribuir três bandas a cada canal de cor (R, G e B) para construir uma imagem RGB. Dependendo do intervalo espectral escolhido, a composição pode representar uma cena em cores naturais (quando se utilizam bandas do visível) ou em cores falsas (quando se incluem bandas do infravermelho ou termal), permitindo realçar alvos e processos específicos. Geralmente, a escolha da composição é feita de acordo com o objetivo interpretativo, buscando maximizar o contraste entre as feições de interesse.

No estudo original, as imagens foram obtidas pelo sensor Landsat 7 ETM +, e a técnica foi empregada para evidenciar feições geológicas nas imagens que podem se apresentar de forma sutil em composições RGB convencionais, seja por baixa variação de cor, por sombreamento topográfico ou por interferência de cobertura superficial. Em termos gerais, a metodologia parte de uma composição no visível (RGB 321) como referência e incorpora informações do infravermelho e do termal (comportamentos

distintos de materiais e condições superficiais), além de um componente de maior resolução espacial (banda pancromática). As etapas principais que constituem esta metodologia são:

1. Carregar a imagem da área de interesse do produto Landsat 7 ETM +;
2. Organizar as bandas para a composição RGB 321, que são as bandas que representam o vermelho (R), o verde (G) e o azul (B), nesta ordem;
3. Criar uma composição a partir das bandas 123 (BGR), que são as bandas na ordem azul (B), verde (G) e vermelho (R);
4. Gerar a imagem da diferença das composições 675 - 321, onde a banda 6 representa a banda termal, a 7 o infravermelho médio, 5 infravermelho de onda curta, 3 o vermelho, 2 o verde e 1 o azul;
5. Obter a razão das bandas 6/8, com a banda 6 sendo a banda termal e a 8 a banda pancromática.

Essa técnica foi aplicada exclusivamente às imagens orbitais, pois depende da manipulação de bandas espectrais para gerar as composições. Assim, sua adaptação a outros tipos de dados não seria adequada e tenderia a produzir resultados pouco confiáveis. Sua implementação segue, sempre que possível, as orientações de (Laake *et al.*, 2011) para a geração da imagem estruturalmente aprimorada.

3.2.2 *Structured-Sharpened Continuous RGB (SRGB)*

O segundo método empregado foi o *Structured-Sharpened Continuous RGB* (SRGB). Conforme descrito por Laake (2015), trata-se de uma abordagem concebida para realçar padrões estruturais em volumes sísmicos por meio da integração contínua de múltiplos atributos, como frequência instantânea, amplitude, curvatura e coerência em uma única composição colorida. De modo geral, o procedimento combina uma codificação em RGB com etapas de aprimoramento de contraste e extração de informações estruturais (via conversão para HSV e realce de bordas), resultando em uma imagem final mais nítida e interpretável. As principais etapas do método SRGB, exemplificadas na figura 4, são:

1. Carregamento de dados sísmicos, onde são adquiridas três fatias adjacentes de profundidade dos dados de amplitude sísmica que são carregadas em um cubo, no qual atribuimos um componente de cor para cada fatia, sendo: vermelho (n - 1), verde (n) e azul (n + 1);

2. Projeção em RGB, onde cada fatia é considerada uma das 3 bandas RGB (vermelho, verde e azul) para gerar a composição final;

3. Ajustes no contraste: aprimoramento do contraste da imagem RGB para revelar mais características dos dados;

4. Conversão de RGB para HSV, etapa em que a imagem RGB é convertida para a representação de cor em HSV *(hue, saturation and value)*. Segundo Loesdau, Chabrier e Gabillon (2014), as cores HSV são baseadas nos parâmetros Matiz(*Hue*), Saturação (*Saturation*) e Valor (*Value*), que correspondem à diferenciação humana entre as cores, separando as informações cromáticas (Matiz e Saturação) das acromáticas (Valor), permitindo tratar as informações de cor de forma independente das informações de Valor;

5. A extração do componente saturação, através da imagem HSV, extrai o componente saturação (S) que representa as estruturas geológicas;

6. Detecção de bordas, etapa em que usamos o filtro Sobel para detectar as bordas da imagem e identificar os limites das estruturas geológicas;

7. Geração da imagem RGB, etapa em que combinamos a imagem RGB aprimorada com o contraste e a renderização em escala de cinza, que é o produto da detecção de bordas e forma a imagem SRGB.

Nesta pesquisa, assim como na metodologia anterior, o procedimento foi aplicado diretamente ao seu dado de origem, isto é, nos dados sísmicos. Para tal, utilizou-se um cubo sísmico, a partir do qual foram identificadas suas dimensões e, em seguida, as etapas do método foram replicadas sistematicamente ao longo de todas as direções de interpretação: *inline*, *crossline* e *slices*. Escolhemos um conjunto de dados *offshore* , [2] localizado na região Sudeste do Brasil, por apresentar maior proximidade geográfica com a área de estudo e, portanto, melhor aderência ao contexto desta pesquisa.

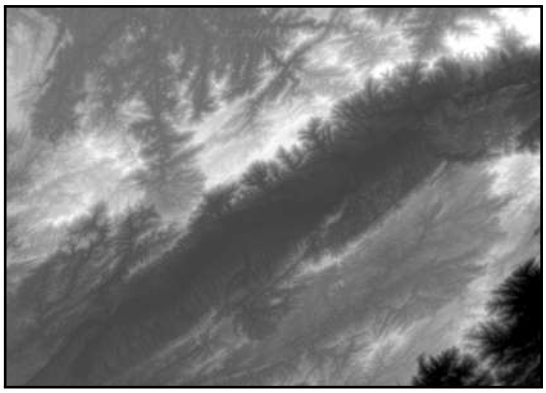
[2] dados registrados e adquiridos em ambientes marinhos, utilizados para investigar a geologia do fundo oceânico,

3.2.3 *Red Relief Image Map (RRIM)*

Por fim, o terceiro método implementado nesta pesquisa é o *Red Relief Image Map* (RRIM), empregado para realçar e interpretar a morfologia da superfície terrestre a partir do cálculo conjunto da abertura topográfica e da inclinação, adaptando os algoritmos de Susurrant (2026) e Robert (2021). Esse procedimento evidencia, de forma mais nítida, regiões de concavidade e convexidade do relevo, favorecendo a identificação de variações topográficas sutis e contribuindo para uma leitura mais consistente da geometria do terreno. Para a sua construção, utiliza-se um Modelo Digital de Elevação (MDE), do qual são derivadas a inclinação e a abertura, resultando na geração da imagem RRIM (Yokoyama Ryzo; Shirasawa, 2002).

Esta metodologia aplica-se tanto a dados topográficos quanto ao Modelo Digital de Elevação, como a dados potenciais, como os magnetométricos, gravimétricos e gamaespectrométricos, que também foram reproduzidos na sísmica. Em ambos os casos, os procedimentos adotados são os mesmos, consistindo em:

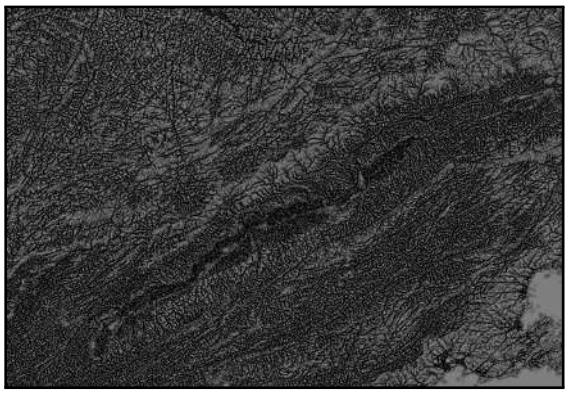
1. Leitura e validação dos dados de entrada, com verificação das dimensões da malha, da resolução espacial e do intervalo de altitudes (ou amplitudes), assegurando a consistência do conjunto de dados;
2. Cálculo da inclinação do terreno a partir das derivadas nas direções x e y (gradientes), obtendo-se o módulo do gradiente e convertendo-o posteriormente para valores em graus;
3. Cálculo da abertura topográfica (*Openness*), no qual, para cada ponto, a variação do relevo é avaliada em oito direções ao redor do *pixel* em função da distância, caracterizando a geometria local da superfície;
4. Determinação dos ângulos máximos e mínimos de visibilidade do terreno a partir dessas variações, os quais representam, respectivamente, as componentes de abertura positiva e negativa;
5. Geração da imagem RRIM, etapa em que os valores de inclinação e de abertura são utilizados como índices no mapa de cores; ao combinar esses atributos, atribui-se uma cor a cada *pixel*, produzindo a imagem final.



(a) Modelo Digital de Elevação



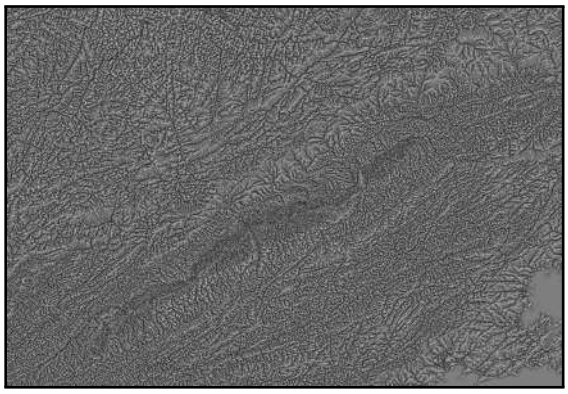
(b) Inclinação do MDE



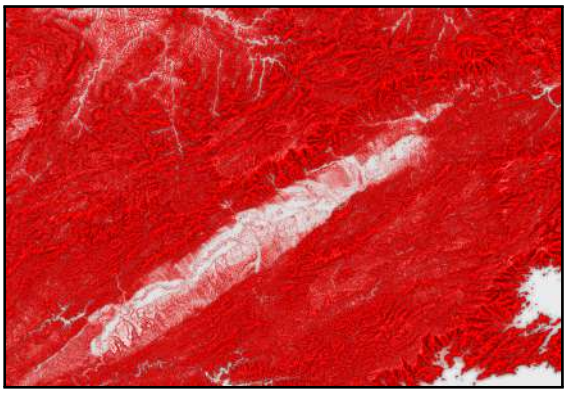
(c) Abertura Positiva do MDE



(d) Abertura Negativa do MDE



(e) Produto da equação $(Op - On)/2$



(f) Resultado do RRIM

Figura 9 – Fluxo de processamento do *Red Relief Image Map*

A Figura 9 apresenta as principais etapas para a geração do RRIM na área de estudo da pesquisa. Como exemplo, a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), têm-se: (a) O Modelo Digital de Elevação, (b) o resultado do cálculo da inclinação; (c) a abertura topográfica positiva; (d) a abertura topográfica negativa; (e) o resultado da aplicação da equação $(Op - On)/2$ e (f) o resultado do RRIM.

Para viabilizar a aplicação da metodologia a dados sísmicos, foi necessária a adaptação da técnica por meio do emprego de atributos sísmicos, de modo a garantir

resultados representativos nesse domínio. Logo, as etapas de processamento que foram realizadas para o MDE e para os dados potenciais (gravimétricos, magnetométricos e gamaespectrométricos) não são iguais às que foram realizadas para a sísmica. Nessa adaptação, os atributos de curvatura e inclinação foram adotados como os principais descritores, sendo integrados às demais etapas do fluxo metodológico proposto por (Chiba; Kaneta; Suzuki, 2008) e (Yokoyama Ryzo; Shirasawa, 2002).

> "A curvatura pode ser definida como o inverso do raio de um círculo tangente à curva em um dado ponto. Assim, quanto mais acentuada for a curvatura da linha, maior será seu valor; para uma reta, a curvatura é nula. Do ponto de vista matemático, a curvatura pode ser expressa por uma derivada de segunda ordem da curva."(Chopra; Marfurt, 2007).

Para a adaptação, foram utilizadas derivadas de primeira ordem na equação 3.1 e equação 3.2, onde medimos a taxa de variação da amplitude sísmica para as direções x e y:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{z(x + \Delta x, y) - z(x, y)}{\Delta x}, \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{z(x, y + \Delta y) - z(x, y)}{\Delta y}, \tag{3.2}$$

Onde para as equações 3.1 e 3.2, o x é a coordenada na direção horizontal, y é a coordenada na direção vertical, z valor da amplitude do dado no ponto (x,y), Δx é o espaçamento entre pontos na direção x e Δy é o espaçamento entre os pontos na direção y.

Além da primeira derivada, foi utilizada a derivada de segunda ordem para medir a mudança na curvatura da superfície para as direções x com a equação 3.3.

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right), \tag{3.3}$$

onde $\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$ representa a segunda derivada parcial de z em relação a x, que resume o comportamento da curvatura na direção x e $\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)$ representa a derivada da taxa de variação, indicando como essa variação muda no eixo x, que representa a curvatura na direção horizontal.

Para y com a equação 3.4,

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right), \tag{3.4}$$

onde $\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$ é a segunda derivada parcial de z em relação a y, que representa a curvatura de uma forma compacta, e $\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)$ é a derivada da taxa de variação ao longo de y, que indica a curvatura na direção vertical.

E para xy com a equação 3.5,

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right), \tag{3.5}$$

onde $\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$ é a segunda derivada mista de z, representando a interação entre as mudanças nas direções x e y e $\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)$ é a derivada dessa taxa de variação na direção y, onde indica como a variação de z em x muda ao longo de y.

Por fim, para estimar as curvaturas mínima e máxima locais dos dados, utiliza-se a matriz Hessiana, definida como uma matriz quadrada formada pelas derivadas parciais de segunda ordem de uma função escalar, a qual descreve a curvatura local de uma função de várias variáveis (D'Urso *et al.*, 2017). A partir de seus elementos, calculam-se as curvaturas mínima e máxima locais por:

$$K_{min} = \frac{dz_{xx} + dz_{yy} - \sqrt{(dz_{xx} - dz_{yy})^2 + 4dz_{xy}^2}}{2}, \tag{3.6}$$

$$K_{max} = \frac{dz_{xx} + dz_{yy} + \sqrt{(dz_{xx} - dz_{yy})^2 + 4dz_{xy}^2}}{2}, \tag{3.7}$$

onde para as equações 3.6 e 3.7, dz_{xx} é a segunda derivada parcial de z em relação a x, dz_{yy} é a segunda derivada parcial de z em relação a y e dz_{xy} é a segunda derivada mista de z em relação a x e y. As equações K_{min} são a curvatura mínima, que representa a menor taxa de curvatura na superfície, e K_{max} é a curvatura máxima, que indica a maior taxa de curvatura na superfície.

Uma das equações utilizadas nessa adaptação é o cálculo da inclinação, ou *slope*, que é uma equação usada para obter a inclinação da topografia.

> "A inclinação do terreno é representada pela densidade das linhas de contorno, então o valor máximo da inclinação topográfica expressável é restrito pelo intervalo horizontal das linhas de contorno no mapa." (Chiba; Kaneta; Suzuki, 2008).

Em mapas topográficos, o *slope* pode ser calculado através da equação 3.8, como realizado em (Chiba; Kaneta; Suzuki, 2008)

$$i = \frac{\Delta h}{s \tan \theta} \times 1000, \tag{3.8}$$

onde i é o intervalo horizontal das curvas de nível no mapa (em milímetros), Δh é o intervalo vertical de altura real (em metros), s é o fator de escala do mapa, e θ é o gradiente da inclinação. O fator $\times 1000$ é utilizado para converter o valor calculado de metros para milímetros.

Como estamos lidando com dados geofísicos, o cálculo de inclinação precisou ser adaptado para que fosse realizado através do gradiente de profundidade, permitindo que os dados tivessem uma resposta melhor à aplicação da técnica de aprimoramento. Então, a inclinação foi obtida pela combinação das derivadas parciais de uma superfície contínua em relação às coordenadas x e y. A inclinação (equação 3.9) é dada por

$$slope = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}, \tag{3.9}$$

onde $\frac{\partial z}{\partial x}$ representa a derivada parcial de z em relação a x, representando a taxa de variação da profundidade na direção horizontal, e $\frac{\partial z}{\partial y}$ representa a derivada parcial de z em relação a y, representando a taxa de variação da profundidade na direção vertical.

As etapas de desenvolvimento do método *Red Relief Image Map (RRIM)* para dados sísmicos, após sua adaptação, foram:

1. Carregamento de Dados sísmicos;
2. Calcular as derivadas de primeira ordem através das equações 3.1 e 3.2;
3. Calcular as derivadas de segunda ordem através das equações 3.3, 3.4 e 3.5;
4. Gerar as curvaturas máxima e mínima com as equações 3.7 e 3.6;
5. Calcular a inclinação com a equação 3.9;
6. Calcular o RRIM através da subtração da curvatura máxima e mínima, que será dividida por 2;
7. Combinar o resultado do RRIM com o *slope* para obter a imagem com a inclinação;

8. Adaptar o brilho e o contraste do dado gerado para obter uma melhor visualização do RRIM e aplicar a escala de cor vermelha para obter o efeito do *Red Relief Image Map*

As etapas apresentadas constituem o conjunto principal de procedimentos necessários para adaptar a metodologia e viabilizar sua aplicação em um dado sísmico. De forma geral, buscou-se manter um fluxo de processamento consistente (cálculo de atributos como a curvatura e inclinação, integração dos resultados intermediários e ajustes finais de visualização), de modo que os produtos gerados fossem comparáveis entre si e adequados à interpretação.

Na sequência, discutem-se os resultados obtidos para cada técnica implementada.

4 Resultados

Nesta seção, são apresentados os produtos gerados a partir da aplicação das técnicas descritas anteriormente. Em função do custo computacional, cada técnica foi aplicada apenas a recortes do Estado do Rio de Janeiro, selecionados conforme as possíveis áreas de interesse, em vez de se utilizar toda a extensão estadual. Esse recorte também favorece a visualização das feições.

4.1 *Structurally Enhanced RGB*

Proposto por Laake *et al.* (2011), o método *Structurally Enhanced Red-Green-Blue* (seRGB) foi desenvolvido para aplicação em imagens orbitais e tem como propósito realçar feições geológicas por meio do aprimoramento estrutural da composição colorida. De maneira geral, a técnica baseia-se na manipulação das bandas do sensor Landsat 7 ETM+, combinando-as e aplicando operações matemáticas de modo a enfatizar padrões lineares e contrastes associados a estruturas e contatos litológicos. Como resultado, obtém-se uma imagem estruturalmente aprimorada que, quando comparada ao dado bruto (composição RGB convencional), permite distinguir com maior nitidez as feições e estruturas presentes na área de estudo.

Com o objetivo de compreender as etapas de processamento da técnica *SERGB*, a Figura 10 (direita) apresenta sua reprodução. Ao comparar os resultados obtidos com aqueles mostrados na Figura 3, observa-se que a reprodução não alcançou o mesmo resultado da imagem de referência, o que pode ser devido a diferentes fatores. O primeiro deles é a escolha da imagem: embora o artigo informe a área de estudo (Golfo de Suez), não especifica a data de aquisição. Outro fator é a diferença do ambiente de implementação: nesta pesquisa, a técnica foi adaptada e reproduzida em Python, enquanto na imagem de referência foi utilizado um *software* de processamento de imagens. Por fim, e possivelmente o aspecto mais relevante, destaca-se a ausência de detalhamento e transparência sobre todos os procedimentos empregados para se obter o resultado final. No contexto de reprodutibilidade, é desejável que o trabalho

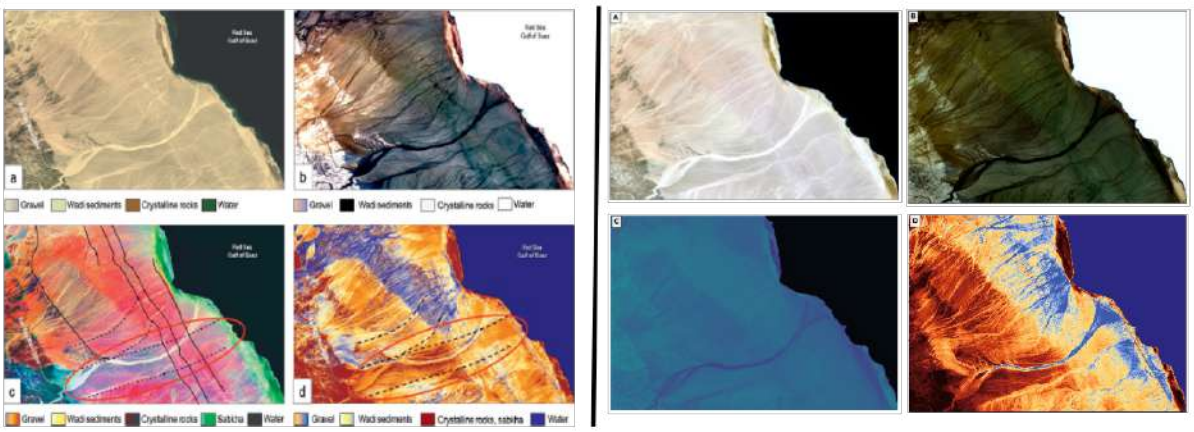


Figura 10 – Comparação entre o processamento apresentado por (Laake *et al.*, 2011) (esquerda) e o processamento realizado neste trabalho (direita). A) corresponde ao dado em RGB; B) à composição das bandas 1–2–3 invertidas; C) imagem da diferença entre as composições 6–7–5 e 3–2–1; e, D) representa a razão entre as bandas 6 e 8.

apresente informações suficientes para permitir sua repetição, inclusive como forma de validação dos resultados obtidos. Assim, é fundamental explicitar cada etapa de desenvolvimento da metodologia, reduzindo lacunas e evitando ambiguidades.

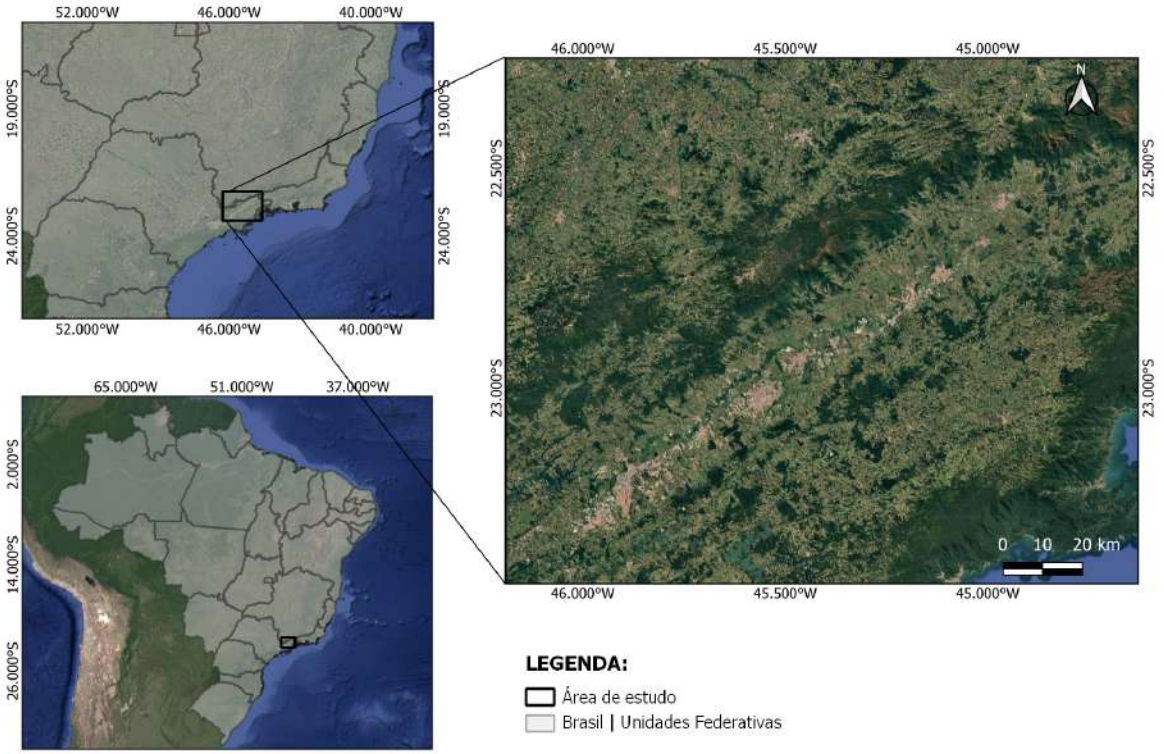
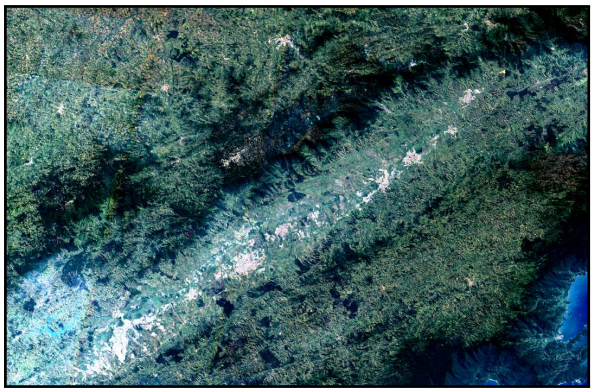


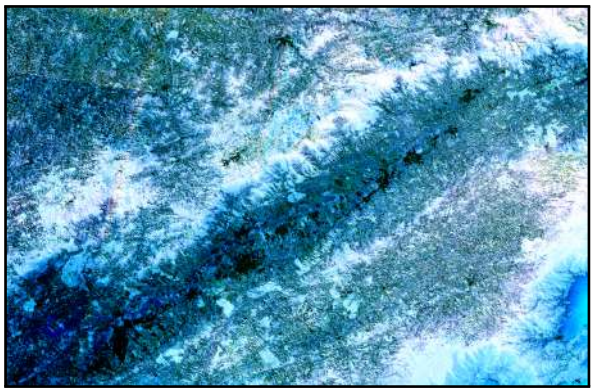
Figura 11 – Área de estudo

A técnica *Structurally Enhanced RGB* foi aplicada à uma parte da área de estudo

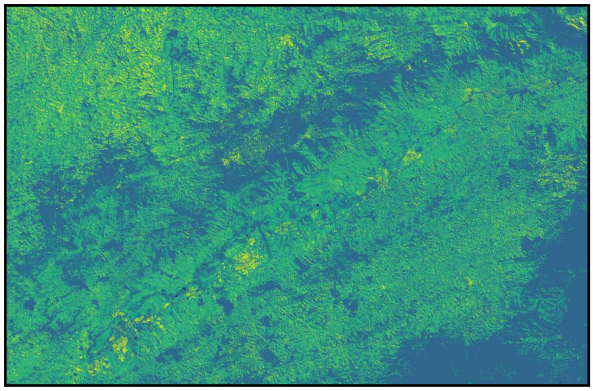
desta pesquisa, como pode ser observado na figura 11, seguindo integralmente o fluxo de processamento proposto, com o objetivo de gerar uma imagem estruturalmente aprimorada que permitisse identificar e/ou realçar feições litológicas a partir de dados de satélite. O primeiro resultado é apresentado na Figura 12: a Figura 12-a corresponde ao dado em RGB; a Figura 12-b, à composição das bandas 1–2–3 invertidas; a Figura 12-c, à imagem da diferença entre as composições 6–7–5 e 3–2–1; e, por fim, a Figura 12-d representa a razão entre as bandas 6 e 8.



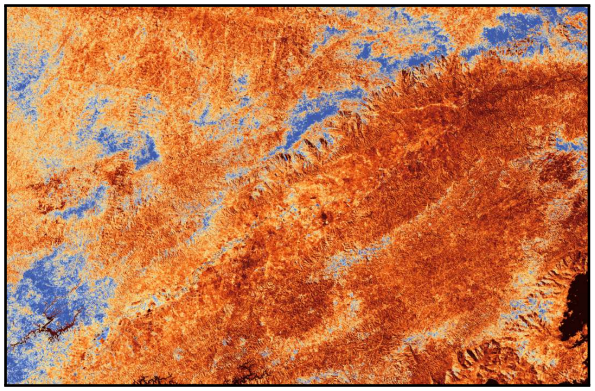
(a) Imagem RGB 321



(b) Composição das bandas 123 invertidas



(c) Imagem da diferença das bandas 675 - 321



(d) Razão entre as bandas 6 e 8

Figura 12 – Fluxo de processamento da técnica *Structurally Enhanced RGB*

A Figura 12 apresenta uma visão geral das etapas de processamento aplicadas à área de estudo, com o objetivo de realçar falhas e fraturas mais superficiais nos dados de satélite por meio da manipulação e da composição de bandas. A análise dos resultados indica que, nas subfiguras 12c e 12d, algumas feições podem estar associadas a estruturas de falhamento.

Com o objetivo de avaliar a capacidade de cada produto em evidenciar estruturas geológicas nos dados orbitais, utilizaram-se arquivos vetoriais com a delimitação de falhas e fraturas, obtidos a partir de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)

(2019). Esses arquivos discriminam as estruturas de forma categórica; em termos gerais, falhas correspondem a descontinuidades com deslocamento relativo entre as camadas, enquanto fraturas representam descontinuidades sem deslocamento. Essa comparação foi realizada para todos os resultados, desde a composição RGB até a imagem de razão entre as bandas 6 e 8.

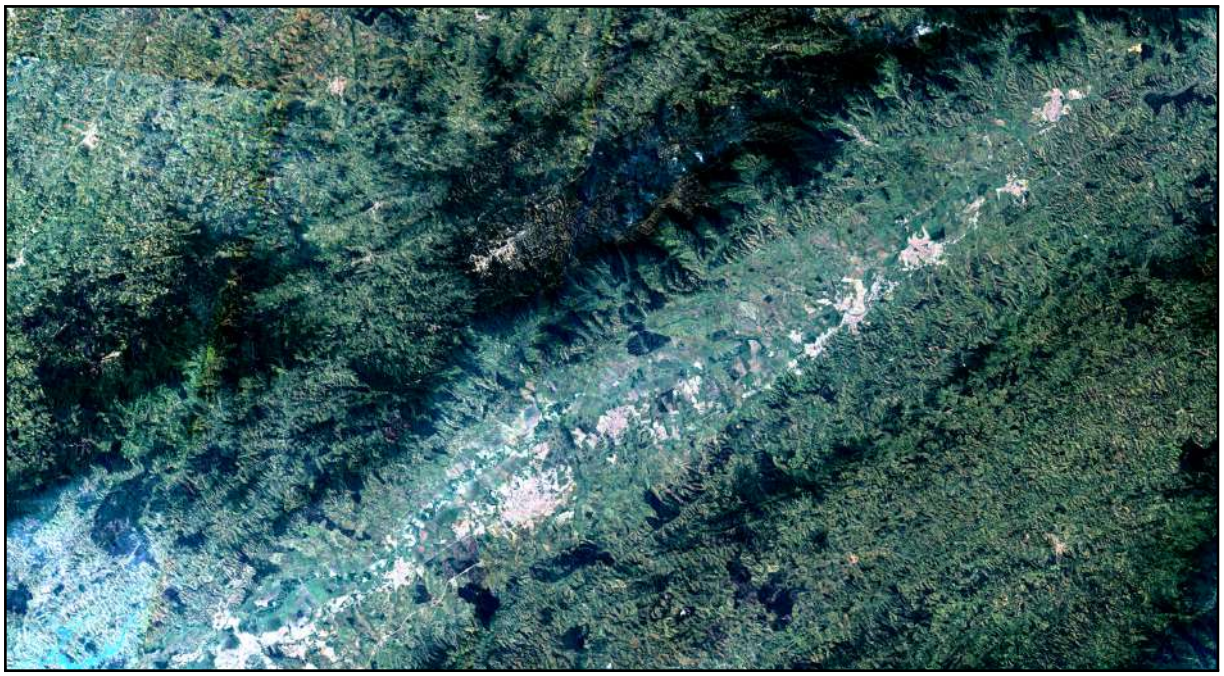
Ao analisar as Figuras 13, 14, 15 e 16 e compará-las aos resultados apresentados por (Laake *et al.*, 2011), observa-se que os produtos gerados neste trabalho não alcançaram desempenho semelhante ao reportado no estudo de referência. Mesmo quando as imagens são visualizadas em conjunto com as estruturas geológicas mapeadas, as feições delimitadas mostram-se pouco contrastantes, tornando-se praticamente imperceptíveis após o aprimoramento.

Para a razão entre as bandas 6 e 8, foram testadas duas etapas de finalização: (i) uma voltada a aproximar a aparência do resultado de referência e (ii) outra com coloração alternativa, com o intuito de verificar um possível ganho de contraste.

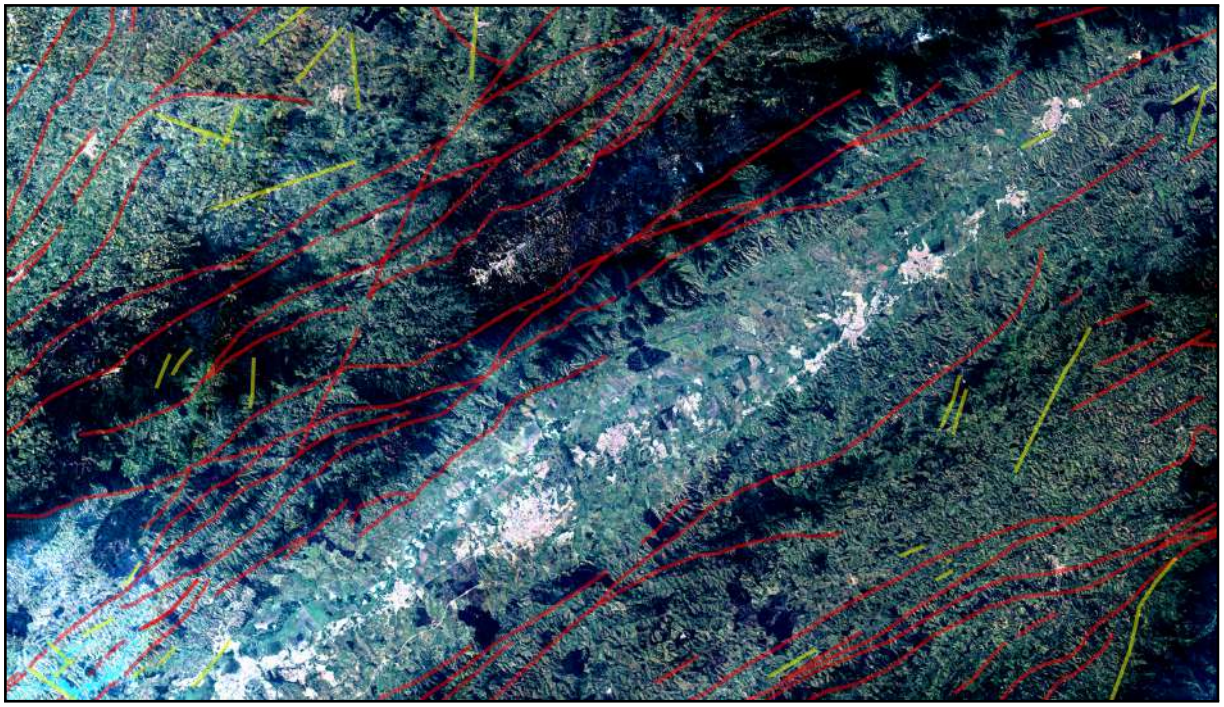
Na Figura 16, diferentemente dos demais casos, a coloração obtida exigiu a reclassificação dos *pixels*, com a atribuição de intervalos de valores a classes cromáticas específicas, buscando evidenciar as estruturas. Já na Figura 17, adotou-se o *colormap* “jet” da biblioteca Matplotlib (Python) para ampliar a distinção visual. Entretanto, assim como na Figura 16, o realce obtido permaneceu abaixo do esperado.

Na primeira tentativa de reprodução da metodologia (Figura 10, à direita), embora o resultado não tenha coincidido integralmente com a imagem de referência, foi possível obter uma resposta interpretável e coerente com os procedimentos adotados para aquela área de estudo. Entretanto, ao transpor a mesma técnica para a área investigada nesta pesquisa, observou-se um desempenho substancialmente distinto. Além das limitações já discutidas a respeito das etapas e parâmetros do próprio método, levanta-se a hipótese de que as características da área de estudo exercem influência direta sobre a qualidade e a legibilidade do produto final.

No trabalho original de Laake *et al.* (2011), a aplicação foi realizada no Golfo de Suez, um ambiente predominantemente costeiro, com ausência ou mínima presença de cobertura vegetal. Essa condição tende a facilitar a observação de sedimentos e variações espectrais associadas a diferentes materiais, permitindo que a técnica realce com maior clareza contrastes entre sedimentos e estruturas geológicas. Em



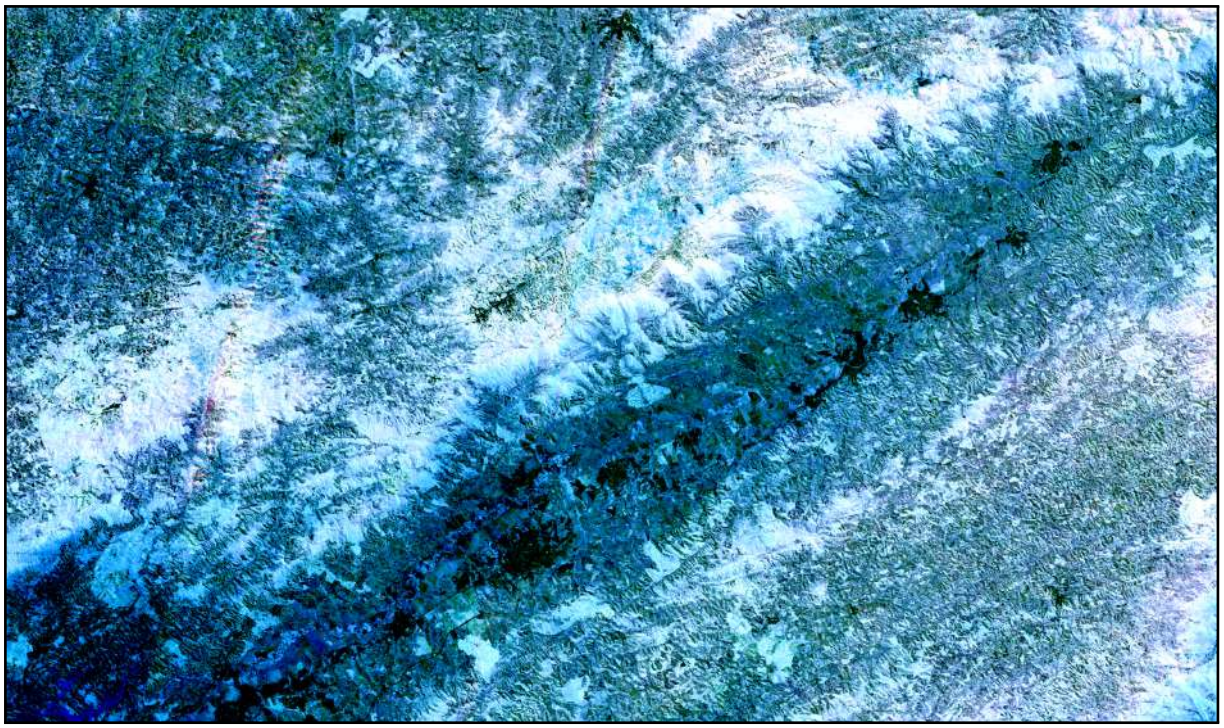
(a) Imagem RGB 321 da área de estudo



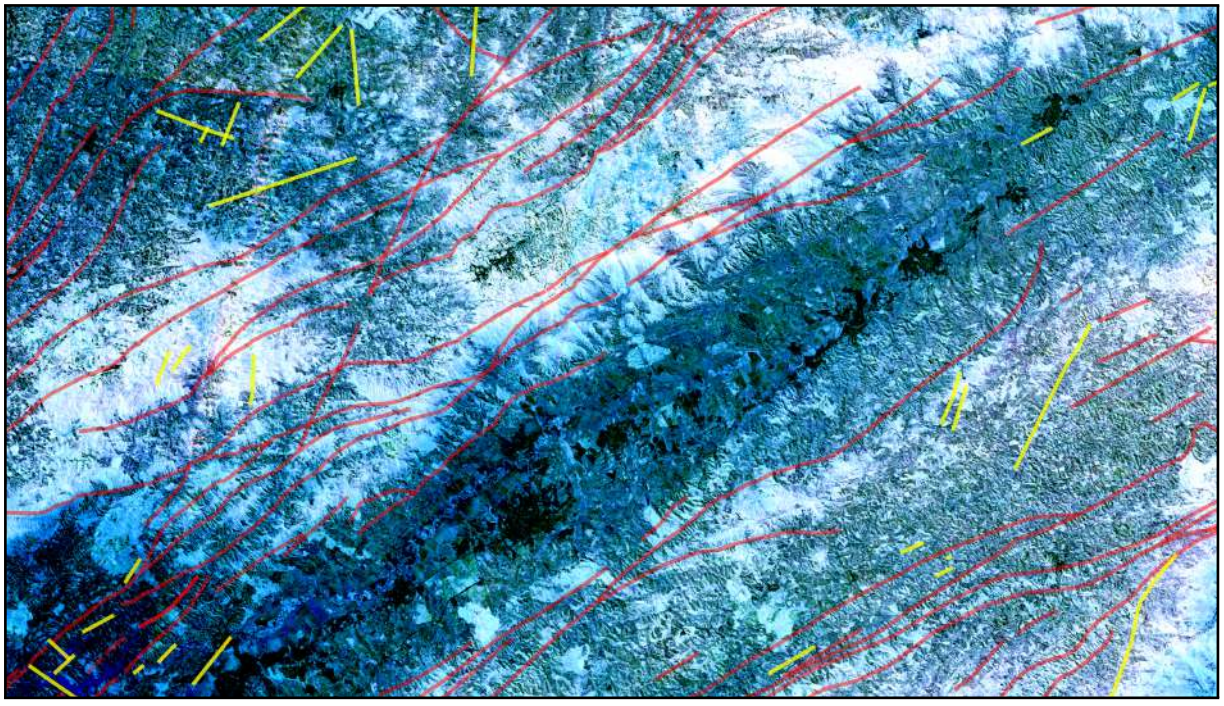
(b) Imagem RGB 321 da área de estudo. Em vermelho as falhas e em amarelo as fraturas retiradas do (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2019).

Figura 13 – Panorama das imagens RGB 321 com marcações de falhas e fraturas.

contrapartida, nesta pesquisa, a área de estudo localiza-se no sudeste brasileiro, especificamente no Estado do Rio de Janeiro, onde, apesar da presença de áreas urbanizadas, há cobertura vegetal expressiva. Esse componente pode mascarar ou atenuar a assinatura espectral das unidades geológicas e, consequentemente, dificultar



(a) Imagem RGB 123 invertido da área de estudo

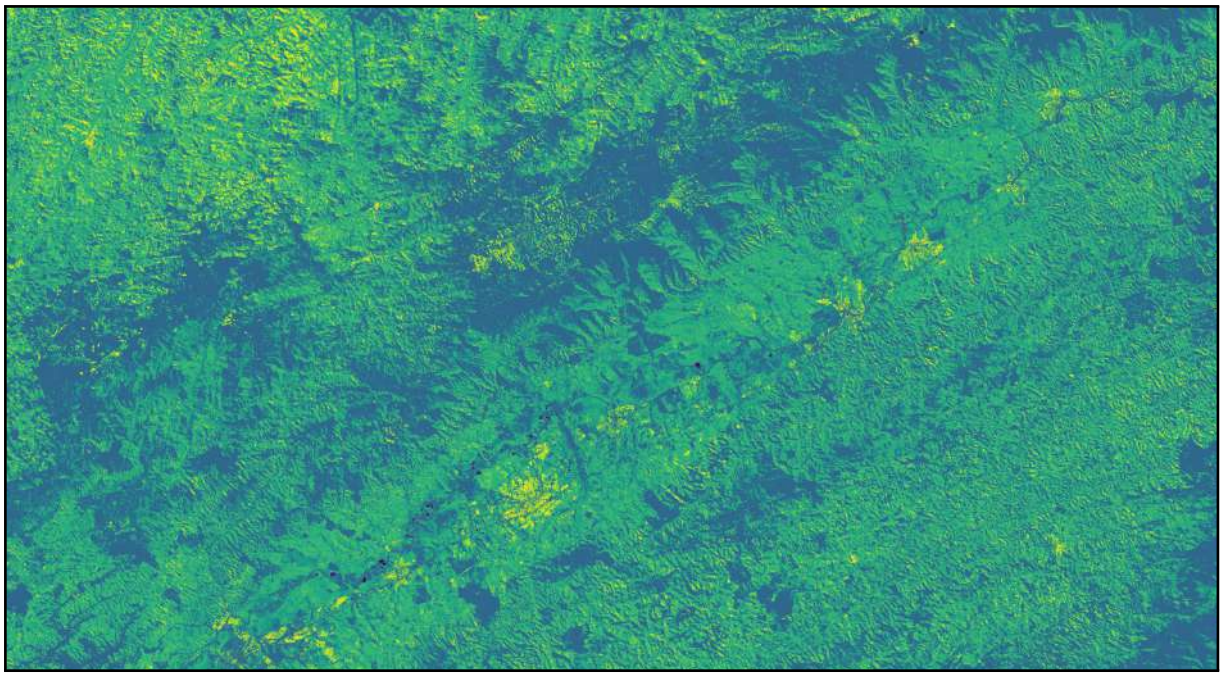


(b) Imagem RGB 123 invertido da área de estudo. Em vermelho as falhas e em amarelo as fraturas retiradas do (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2019).

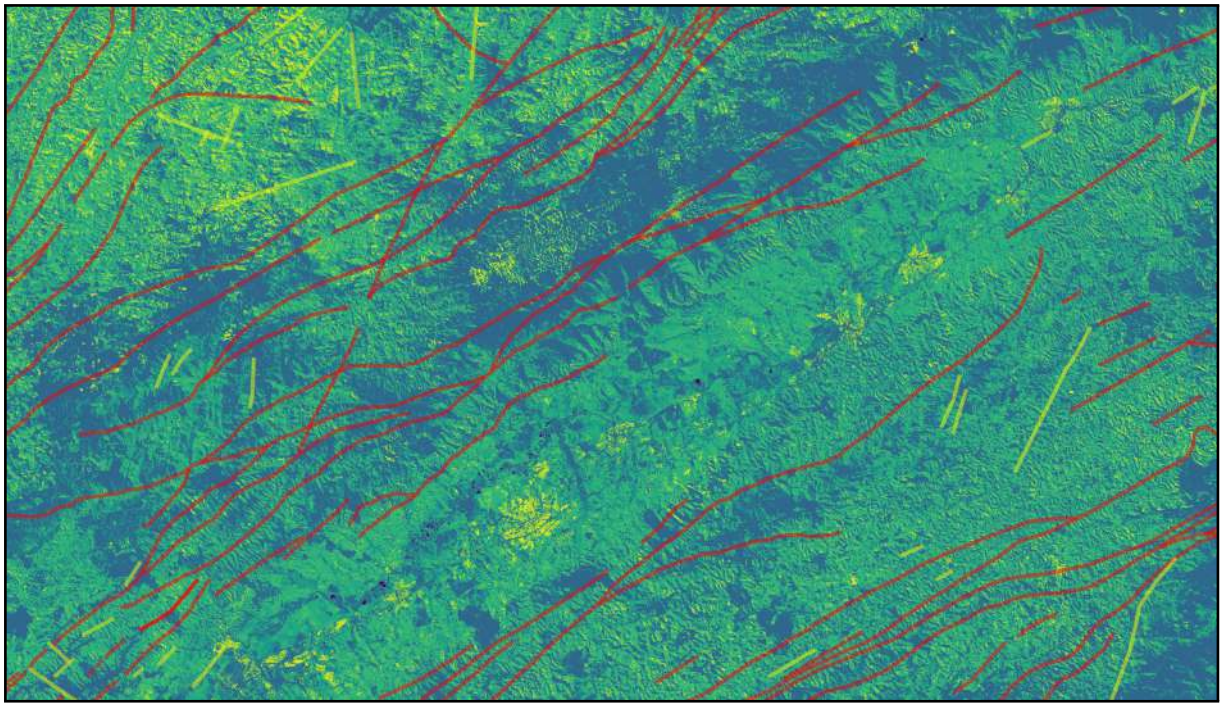
Figura 14 – Panorama das imagens RGB 123 com marcações de falhas e fraturas

a identificação de feições estruturais a partir de dados orbitais.

Assim, além das questões metodológicas previamente levantadas, os resultados sugerem que a técnica pode apresentar maior efetividade em determinados contextos



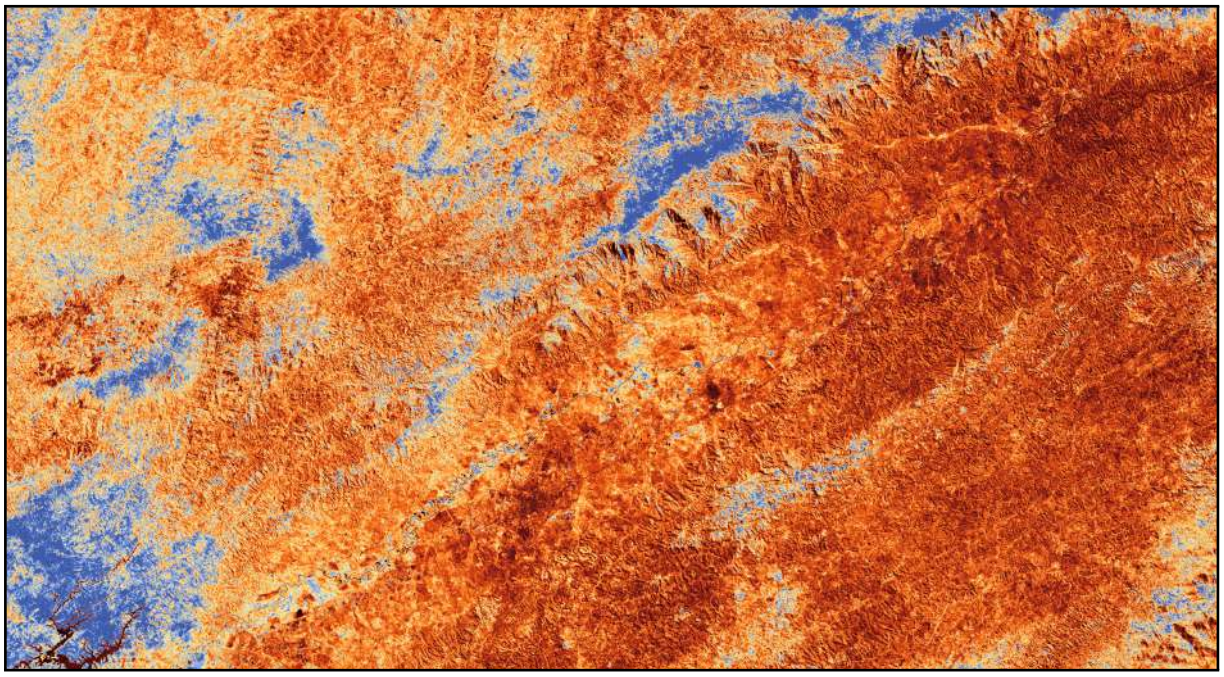
(a) Imagem da diferença das bandas 675-321



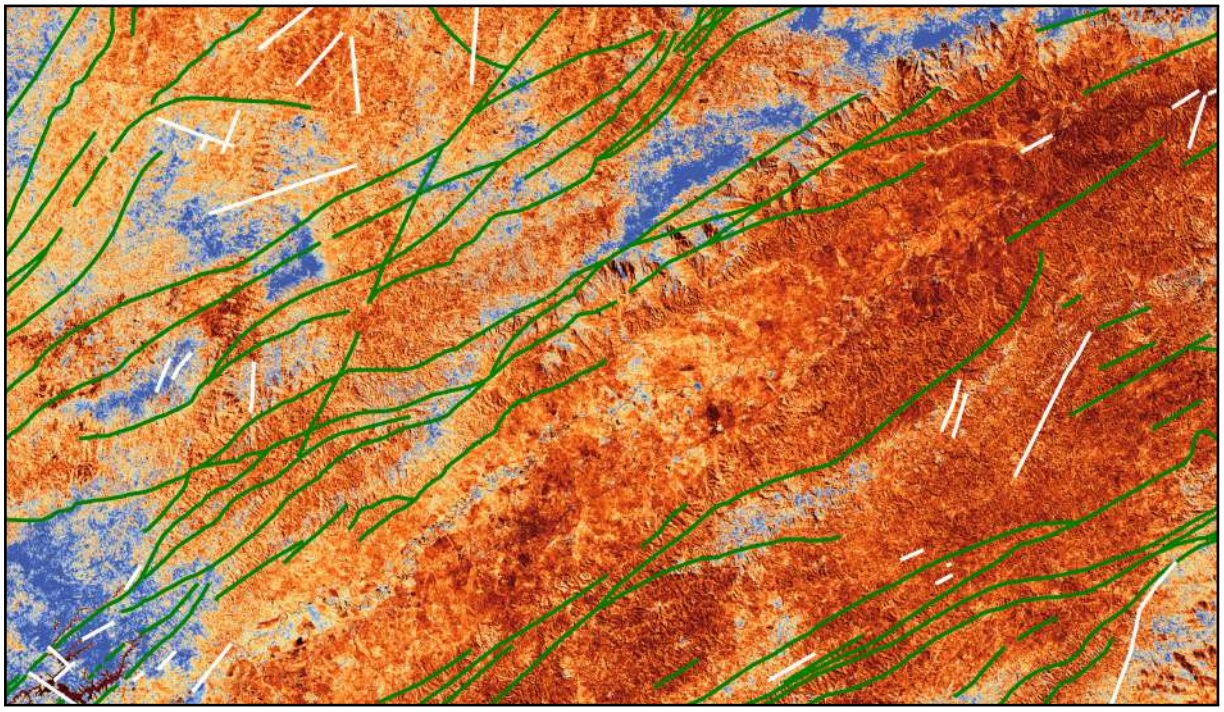
(b) Imagem da diferença das bandas 675-321. Em vermelho as falhas e em amarelo as fraturas retiradas do (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2019).

Figura 15 – Panorama das imagens da diferença das bandas 675-321 com marcações de falhas e fraturas

ambientais e menor desempenho em outros, tornando a adequação ao tipo de superfície e à ocupação do terreno um fator a ser considerado na sua aplicação.

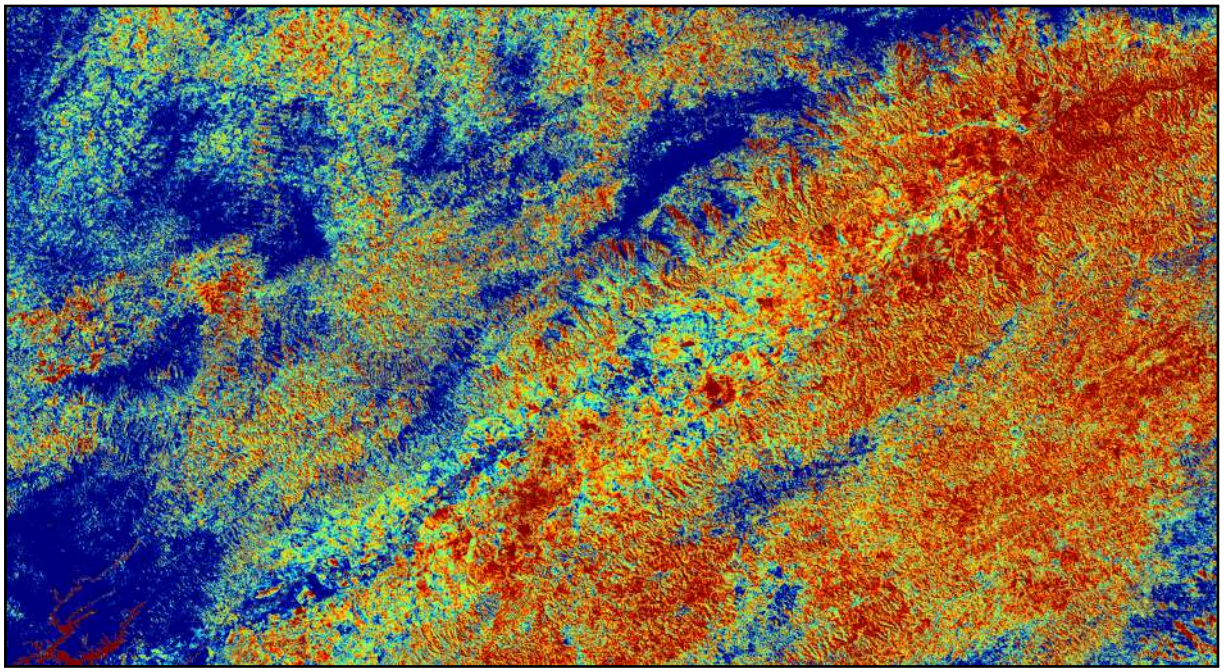


(a) Imagem da razão entre as bandas 6 e 8, utilizando classificação em *pixels*.

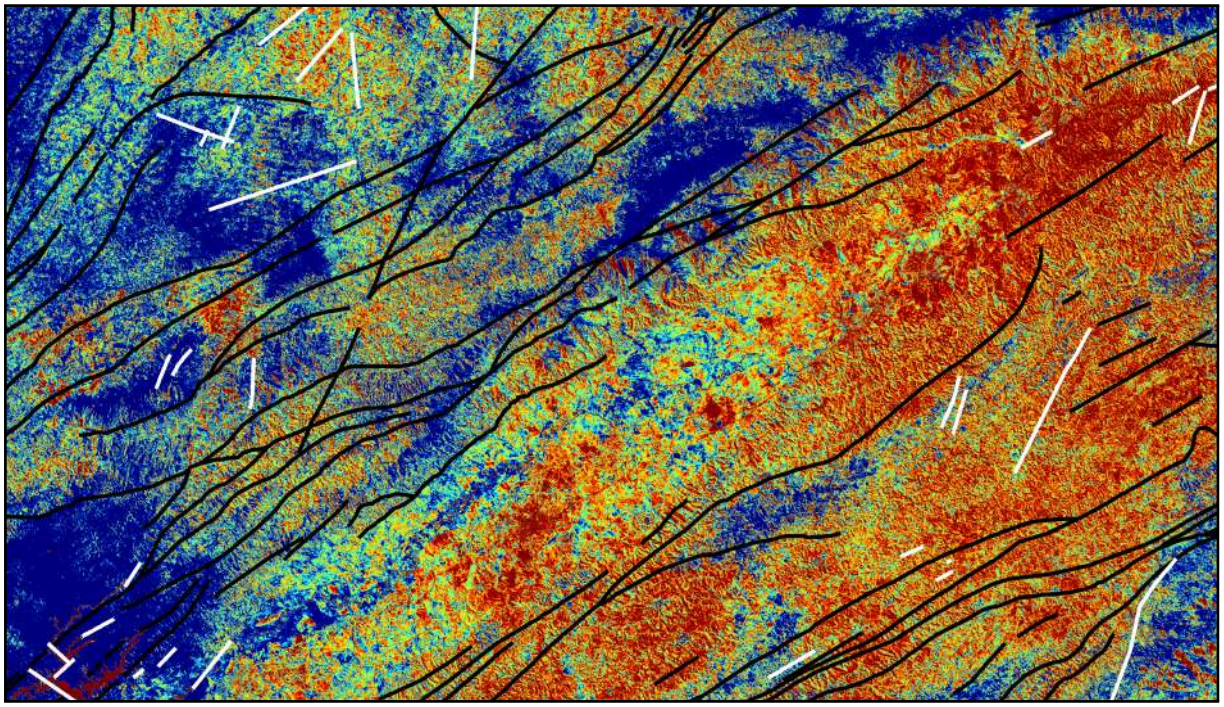


(b) Imagem da razão entre as bandas 6 e 8, utilizando classificação em *pixels.* Em verde as falhas e em branco as fraturas retiradas do (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2019).

Figura 16 – Panorama das imagens da razão entre as bandas 6 e 8, utilizando classificação e com marcações de falhas e fraturas



(a) Imagem da razão entre as bandas 6 e 8, utilizando *colormap*



(b) Imagem da razão entre as bandas 6 e 8, utilizando *colormap*. Em preto as falhas e em branco as fraturas retiradas do (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2019).

Figura 17 – Panorama das imagens da razão entre as bandas 6 e 8, utilizando *colormap* e com marcações de falhas e fraturas.

4.2 *Structured-Sharpened Continuous RGB (SRGB)*

Structured-Sharpened Continuous Red-Green-Blue (SRGB) foi a técnica desenvolvida por (Laake, 2015) para a visualização de dados sísmicos, na qual se emprega a renderização simultânea de múltiplas camadas de informação em cores RGB contínuas, com o objetivo de evidenciar feições geológicas em um dado sísmico. Trata-se de um método aplicado a volumes sísmicos ou a atributos sísmicos: a partir do atributo escolhido, extraem-se três fatias adjacentes, e estas são atribuídas, respectivamente, aos canais da composição RGB, de modo a realçar padrões e descontinuidades presentes no dado. Além do realce visual, o método apresenta aplicações para a exploração do conjunto de dados, a extração de características e também para a validação da interpretação. A técnica combina a projeção em RGB com ajustes de contraste da imagem resultante e com a detecção de bordas, gerando uma representação aprimorada. Assim como o método anterior, seu foco é restrito a um tipo específico de dado, neste caso, o volume sísmico, o que limita sua reprodução e aplicação em outros tipos de dados.

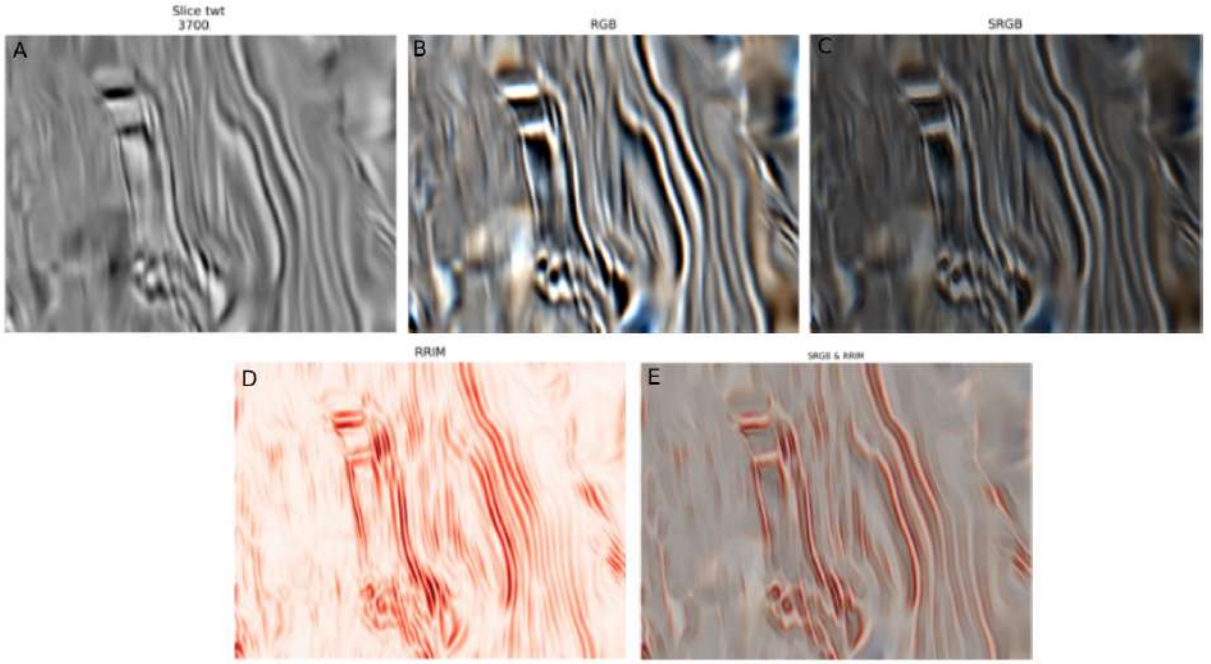


Figura 18 – A) *Time- Slice* índice 3700; B) Conversão para RGB com ajuste no contraste; C) Imagem RGB aprimorada, D) *Slice* em RRIM e E) *Slice* com a junção dos métodos RRIM e SRGB

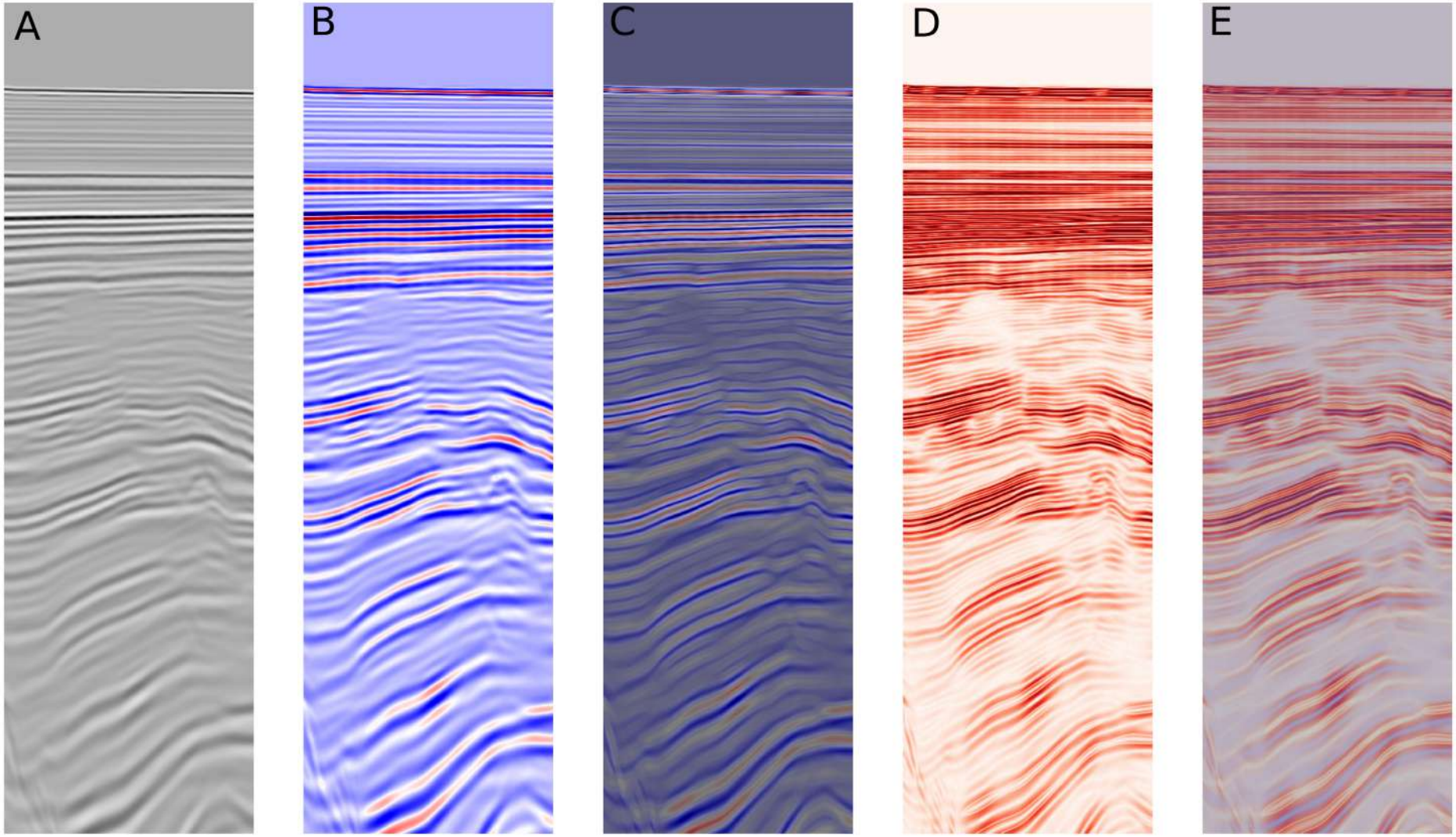


Figura 19 – A) Dimensão *crossline* índice 8726 do cubo sísmico em escala de cinza; B) *Crossline* em escala de cor *seismic*; C) *Crossline* em SRGB; D) *Crossline* em RRIM e E) *Crossline* com a junção dos métodos RRIM e SRGB

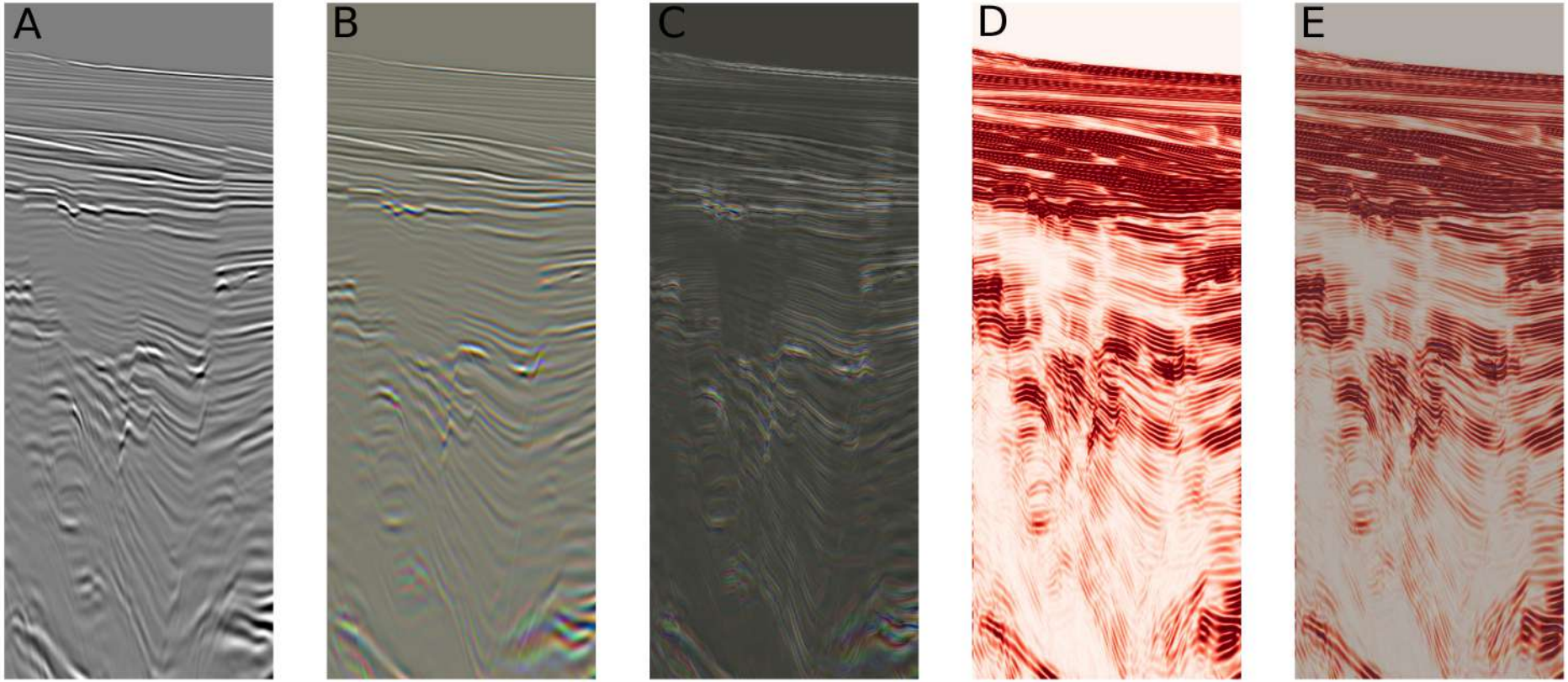


Figura 20 – A) Dimensão *inline* índice 22400 do cubo sísmico ; B) *Inline* em RGB; C) *Inline* em SRGB; D) *Inline* em RRIM e E) *Inline* com a junção dos métodos RRIM e SRGB

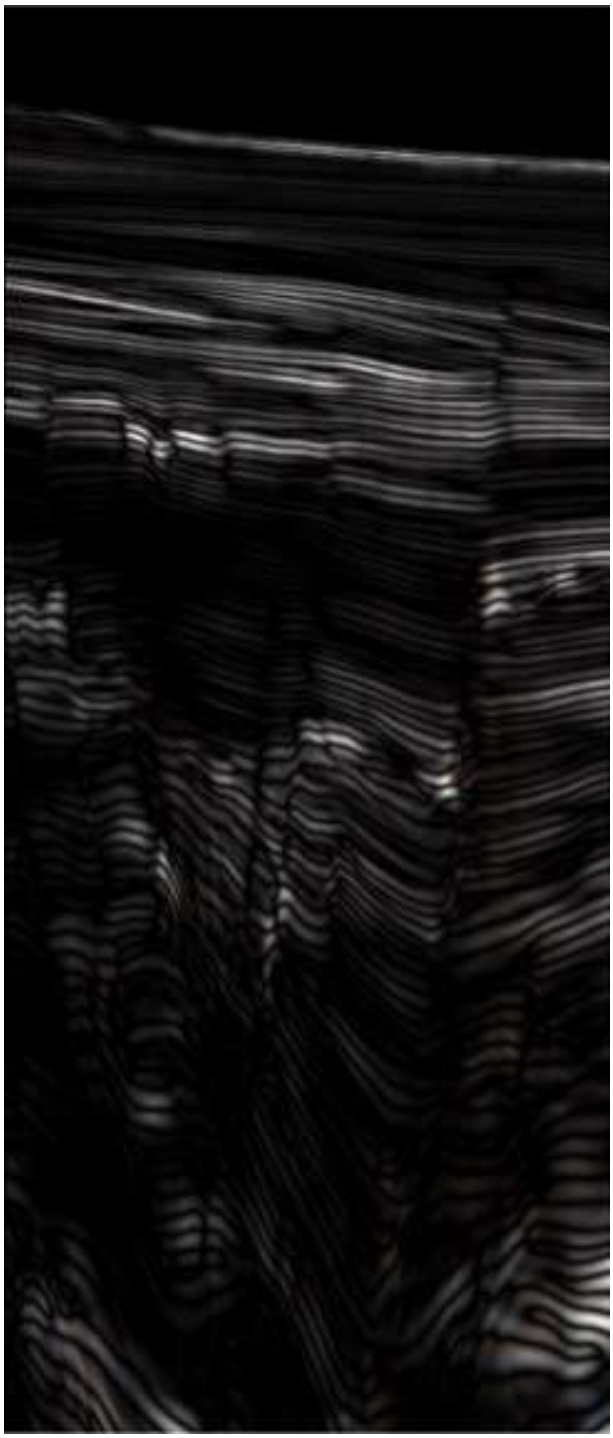


Figura 21 – *Inline* em SRGB

Nesta técnica, os procedimentos foram aplicados nas três dimensões do cubo sísmico. O volume sísmico utilizado consiste em um volume tridimensional migrado em profundidade pelo método *Pre-Stack Depth Migration* (PSDM), porém, o dado utilizado está em tempo. Esse volume reúne 801 *inlines* (22400–24000) e 898 *crosslines* (8206–10000), totalizando uma malha de 801×898 traços. No eixo vertical, o cubo contém 2401 amostras, com passo de 5 m, cobrindo de 0 até cerca de 12 km de profundidade.

Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 18, 19 (A–B–C) e 20 (A–B–C). Como discutido anteriormente, cada dimensão exigiu ajustes próprios de parametrização, o que se refletiu em desempenhos distintos: a resposta do realce depende tanto da geometria dos eventos na direção analisada quanto da distribuição de amplitudes na fatia selecionada.

De modo geral, a conversão para RGB com contraste aprimorado já promoveu um ganho perceptível de separação entre refletores e feições estruturais. Na etapa seguinte, a fusão do resultado RGB com o filtro de Sobel (detecção de bordas) intensificou ainda mais os lineamentos, favorecendo a identificação visual de descontinuidades e de tendências estruturais, especialmente nas Figuras 18 e 19 (A–B–C).

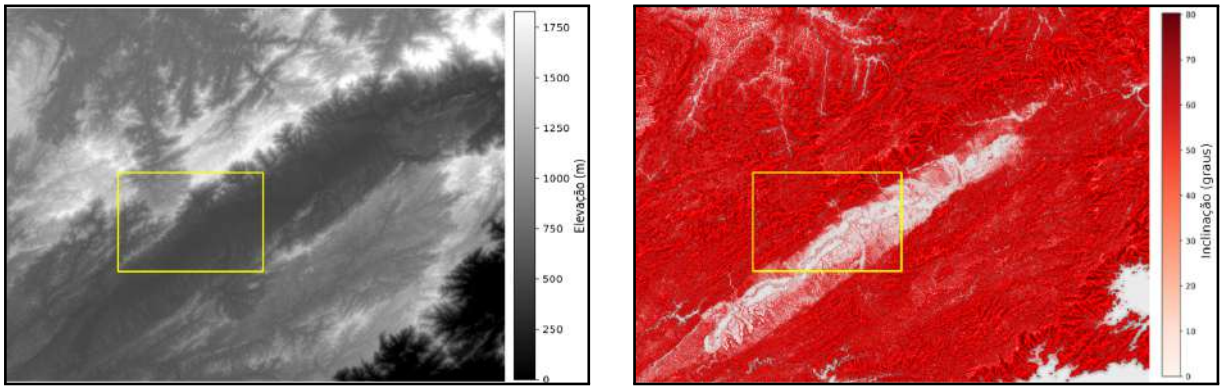
Entretanto, observou-se uma limitação na dimensão *inline* (A–B–C). A metodologia recomenda o uso de três fatias adjacentes; contudo, ao aplicar esse procedimento ao volume desta pesquisa, obteve-se um SRGB como o ilustrado na Figura 21. Como as amplitudes entre as fatias eram muito semelhantes, a composição resultou excessivamente escura, inviabilizando a identificação das estruturas realçadas. Para contornar esse problema, optou-se por utilizar fatias mais espaçadas, de modo a aumentar a variação entre os canais e, assim, obter uma resposta mais adequada na adaptação da metodologia.

Na Figura 20-B (imagem RGB), parte dos refletores do dado sísmico foi atenuada, tornando-se menos evidente. Esse efeito se acentuou na Figura 20-C: embora as bordas tenham sido realçadas pelo Sobel, o aumento do contraste local e a predominância de contornos dificultaram a leitura do padrão de refletores, reduzindo a interpretabilidade do evento sísmico em si.

Assim, para este conjunto de dados, a técnica apresentou melhor desempenho visual nas *time-slices)* e *crosslines* do que em *inlines*. Ainda assim, essa diferença não deve ser interpretada como uma limitação intrínseca do método, pois pode estar associada à fatia (camada) escolhida e aos parâmetros adotados; novos testes com outros níveis e com ajuste fino dos limiares de realce podem melhorar a preservação dos refletores na direção *inline*.

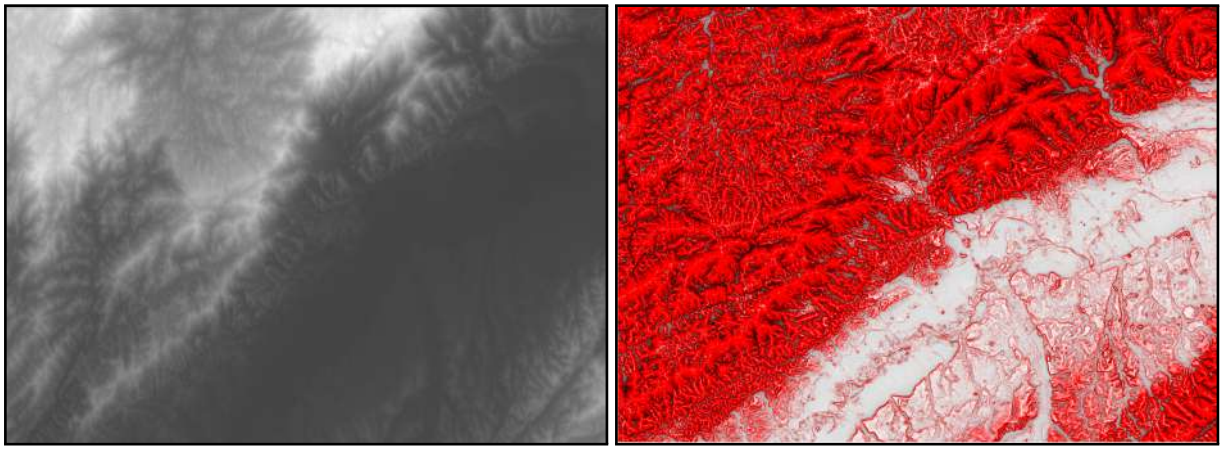
4.3 *Red Relief Image Map (RRIM)*

O *Red Relief Image Map* (RRIM) é uma técnica de realce do relevo baseada na integração de diferentes camadas derivadas de modelos digitais de elevação, em especial a inclinação topográfica e as medidas de abertura (*openness*) positivas e negativas. A combinação desses parâmetros resulta em uma imagem aprimorada que evidencia, de forma simultânea, as feições côncavas e os dados nos quais a metodologia é aplicada. Por essa razão, o RRIM é empregado principalmente para a detecção e o mapeamento de variações na superfície terrestre, além de facilitar a identificação e a interpretação de estruturas morfológicas e lineares, como bordas, cristas, escarpas, lineamentos e outras descontinuidades topográficas.



(a) Modelo Digital de Elevação. (b) RRIM aplicado ao DEM da área de estudo.

Figura 22 – Comparação entre o Modelo Digital de Elevação e o produto RRIM gerado para a área de estudo, com o retângulo amarelo indicando a área de zoom da figura 23a.



(a) Modelo Digital de Elevação com zoom (b) RRIM aplicado ao DEM da área de estudo com zoom

Figura 23 – RRIM aplicado à um Modelo Digital de elevação da área de estudo

O *Red Relief Image Map* (*RRIM*) foi a técnica que reuniu a maior quantidade de

informações neste trabalho, sobretudo pela sua flexibilidade de adaptação a diferentes tipos de dados e produtos derivados. Essa versatilidade a torna particularmente útil para integrar e sintetizar variáveis morfométricas e feições dos dados em uma única visualização. Por outro lado, justamente por admitir diferentes combinações de parâmetros, entradas e etapas de processamento, o método não apresenta um fluxo de trabalho único e padronizado, exigindo decisões metodológicas específicas para cada conjunto de dados e objetivo de interpretação.

As figuras 22b e 23b apresentam o principal resultado da aplicação do *RRIM*, pois mostram a técnica aplicada ao Modelo Digital de Elevação (MDE). A figura 23 corresponde a um *zoom* do produto gerado para uma porção da área de estudo e evidencia como o RRIM é capaz de realçar variações do relevo de forma clara, ao intensificar contrastes associados, principalmente à declividade e à abertura topográfica incorporadas no método. Nesse recorte, observa-se que o produto facilita a distinção entre compartimentos topográficos e a leitura de descontinuidades e alinhamentos, permitindo reconhecer o controle estrutural e a organização do relevo. Além disso, feições de maior escala, como estruturas regionais e elementos lineares relacionados às redes de drenagem, tornam-se mais perceptíveis. Em síntese, a compartimentação do terreno no RRIM se apresenta de maneira significativamente mais evidente do que no dado original (figura 22a).

Para os dados potenciais, os fluxos de processamento foram ajustados de acordo com as particularidades de cada conjunto de dados. Os resultados da implementação do *Red Relief Image Map* (RRIM) podem ser observados nas Figuras 25, 27 e 28.

Os dados gravimétricos utilizados neste estudo foram obtidos do modelo global de anomalias gravimétricas derivado de altimetria por satélite de (Sandwell *et al.*, 2014), que integra medições das missões CryoSat-2 e Jason-1 com dados de missões anteriores, resultando em uma melhoria de 2 a 4 vezes no campo global de gravidade marinha. O processamento concentrou-se na Anomalia de Bouguer, calculada a partir da aplicação de correções que removem o efeito gravitacional da topografia e da massa rochosa entre o ponto de observação e um plano de referência, permitindo realçar de forma mais direta os contrastes de densidade em subsuperfície. O *grid* possui aproximadamente 1195 km de extensão na direção leste–oeste e 1078 km na direção norte–sul, com resolução espacial de cerca de 2066,35 m. O sistema de referência de coordenadas adotado foi o SIRGAS 2000 / UTM zona 23S (EPSG:31983), com

unidades em metros, assegurando compatibilidade com as demais bases cartográficas utilizadas no trabalho.

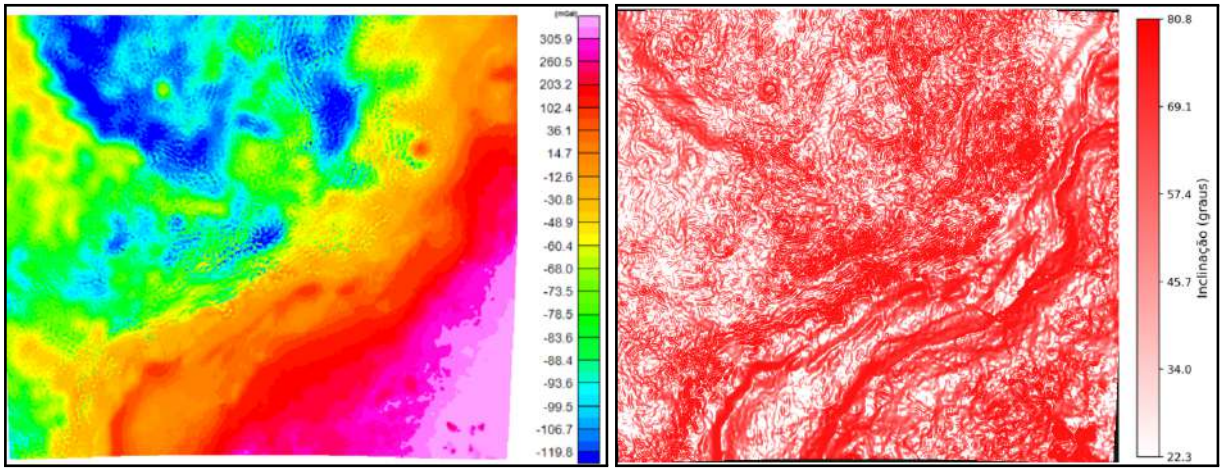
Os dados magnetométricos e gamaespectrométricos utilizados nesta pesquisa são produtos do Programa de Geologia do Brasil - PGB, intitulado **Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro**, que abrangeu uma área de 32.202 km² no estado do Rio de Janeiro e realiza perfis de alta resolução com os métodos magnetométricos e gamaespectrométricos, com linhas de voo e controle espaçadas de 500 m e 10.000 m, respectivamente, orientadas nas direções N–S e E–W (CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2012). De acordo com as informações obtidas no CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2012), os dados magnetométricos foram submetidos a uma sequência de correções sucessivas para assegurar a consistência do conjunto. Primeiramente, aplicou-se a correção do erro de paralaxe, ajustando a defasagem temporal entre os registros do magnetômetro e do GPS. Em seguida, a variação magnética diurna foi removida a partir dos dados da estação base. Posteriormente, procedeu-se ao nivelamento e ao micronivelamento dos perfis, de modo a minimizar discrepâncias entre linhas e atenuar ruídos residuais. Por fim, efetuou-se a remoção do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*), resultando no campo magnético anômalo associado às estruturas geológicas, no caso, o campo magnético total (TMI). O dado utilizado é um grid regular do TMI, exportado no formato GeoTIFF, com resolução espacial de 125 m e 8130 $\times$ 6968 pixels.

De forma análoga, o processamento gamaespectrométrico, realizado no *OASIS MONTAJ* conforme as recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), incluiu correções instrumentais e de aquisição (tempo morto, filtragens, paralaxe e altura efetiva), remoção dos *backgrounds* aeronáutico e cósmico e correções radiométricas (radônio, *skyshine* e Compton), além da correção altimétrica para 100 m, com limitação para não amplificar ruídos; ao final, os dados foram convertidos em concentrações de K, U e Th e utilizados no cálculo da taxa de exposição. O produto utilizado corresponde a um grid regular do canal de potássio (K%), armazenado em formato GeoTIFF, com resolução espacial de 150 m e dimensões de 1585 $\times$ 1742 pixels. As concentrações estimadas de potássio variam até aproximadamente 5,46%, com média de 0,77% e desvio padrão de 0,70%, o que expressa a distribuição espacial dos radioelementos na área de estudo.

A Figura 25 apresenta o RRIM aplicado ao dado gravimétrico em parte da área



Figura 24 – Área de estudo do dado Gravimétrico



(a) Dado gravimétrico (b) RRIM aplicado ao dado gravimétrico.

Figura 25 – Comparação entre o dado gravimétrico (Anomalia Bouguer) e o produto RRIM gerado para a área de estudo.

de estudo que pode ser observada na figura 24, que representa o recorte utilizado neste dado. Nesse caso, de forma análoga ao que ocorre com o Modelo Digital de Elevação, a declividade teve um papel central no realce das feições, uma vez que o realce de bordas associado ao método aumenta o contraste entre domínios adjacentes e torna mais evidentes os limites das estruturas. Como consequência, os contatos e as descontinuidades são delimitados com maior nitidez, com destaque para padrões lineares com direções preferenciais NE–SW. Além disso, o aumento de contraste favoreceu a distinção entre setores, contribuindo para uma leitura mais clara da distribuição de densidade em subsuperfície.

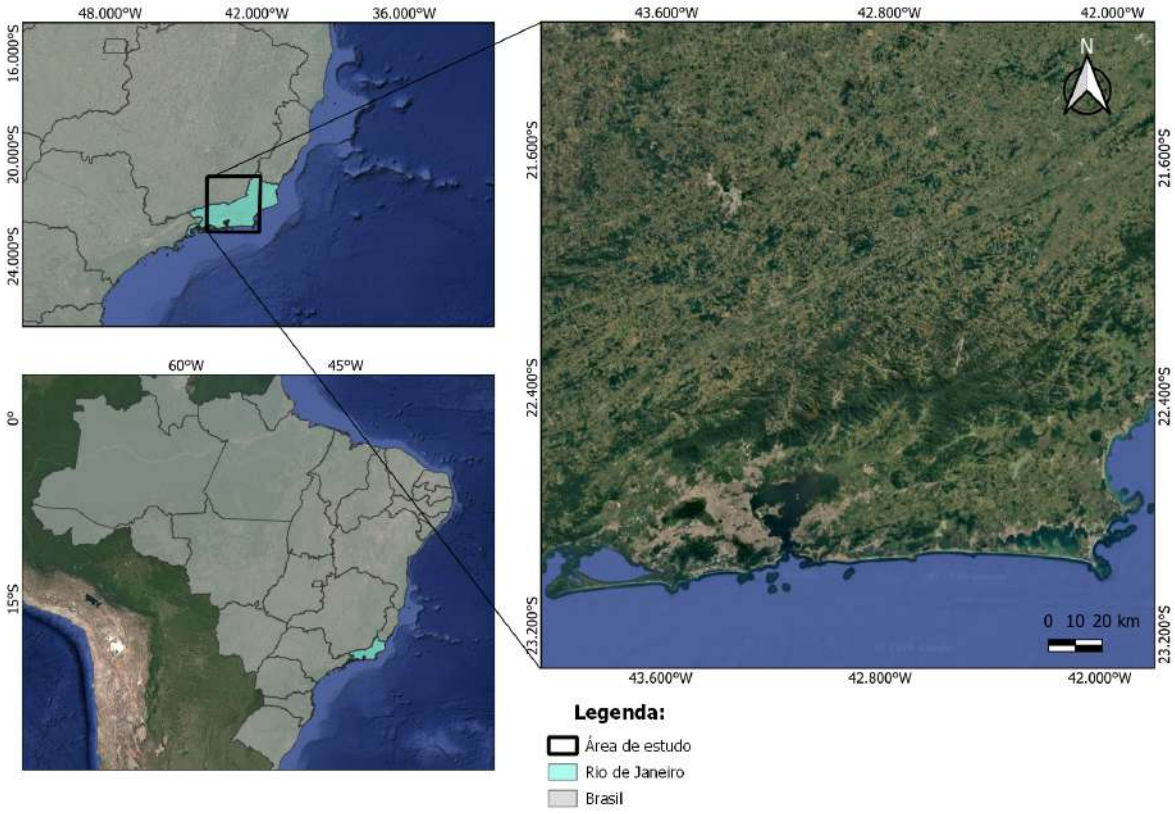
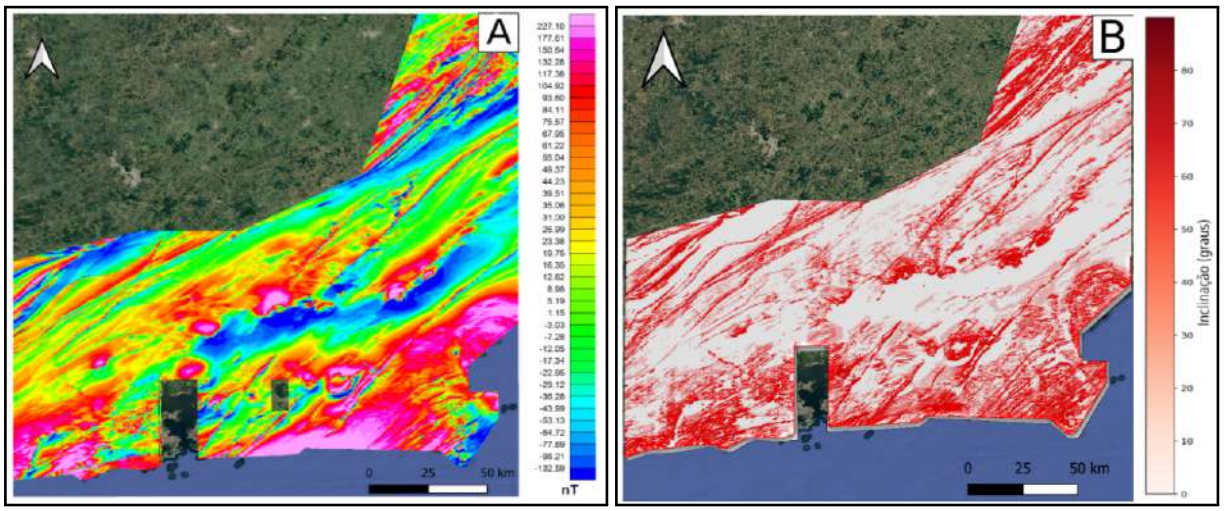


Figura 26 – Área de estudo dos dados magnetométricos e gamaespectrométrico

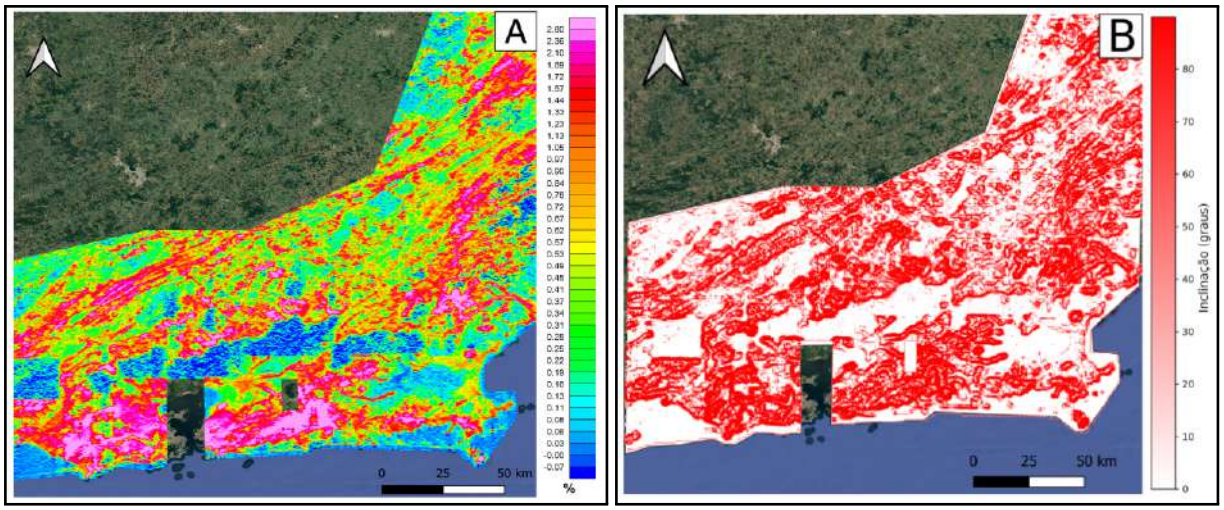
A Figura 27, correspondente ao dado magnetométrico, também apresentou uma resposta satisfatória à aplicação do RRIM, referente à área de estudo apresentada na figura 26, que também coincide com a localização da área de estudo do dado gamaespectrométrico. As feições evidenciadas incluem lineamentos com elevada continuidade espacial, novamente com orientação dominante NE–SW, o que sugere a presença de estruturas regionais persistentes. O método também realçou zonas caracterizadas por gradientes mais elevados, interpretáveis como limites entre unidades com diferentes propriedades magnéticas ou como faixas de maior concentração de



(a) Dado magnetométrico de uma porção da área de estudo

(b) RRIM aplicado a um dado magnetométrico em uma porção da área de estudo

Figura 27 – Comparação entre o dado magnetométrico e o produto RRIM gerado para a área de estudo.

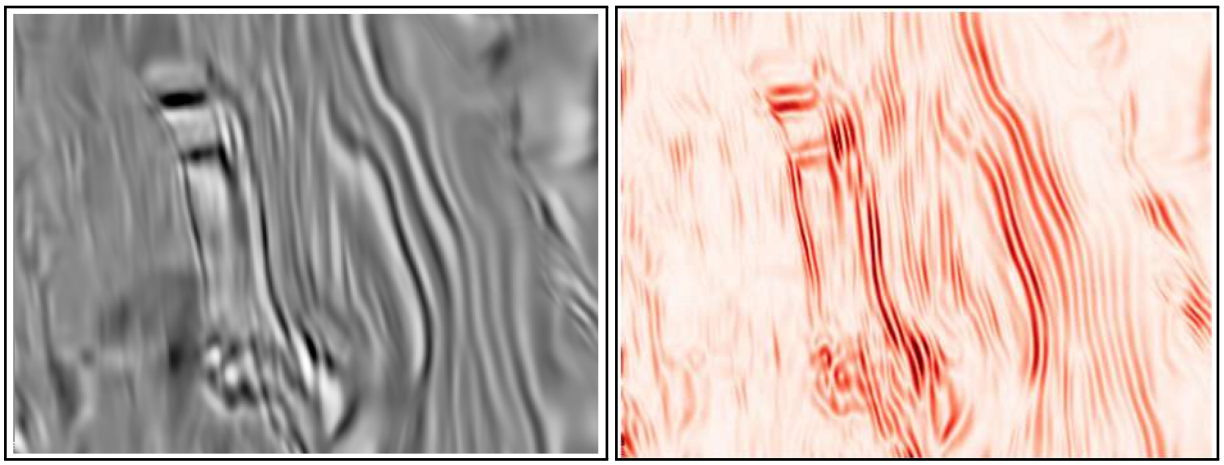


(a) Dado gamaespectrométrico de uma porção da área de estudo

(b) RRIM aplicado a um dado gamaespectrométrico em uma porção da área de estudo

Figura 28 – Comparação entre o dado gamaespectrométrico e o produto RRIM gerado para a área de estudo.

descontinuidades estruturais. Por fim, a Figura 28 apresenta os resultados para o dado gamaespectrométrico. Embora o RRIM devesse auxiliar na visualização da distribuição das anomalias radiométricas e algumas estruturas realçadas coincidam com feições do dado magnetométrico, a técnica pode demandar ajustes adicionais para este tipo de dado; de modo geral, o desempenho foi inferior ao obtido para os demais dados de campo potencial, pois as bordas não foram definidas satisfatoriamente.



(a) Seção na dimensão *time-slice*

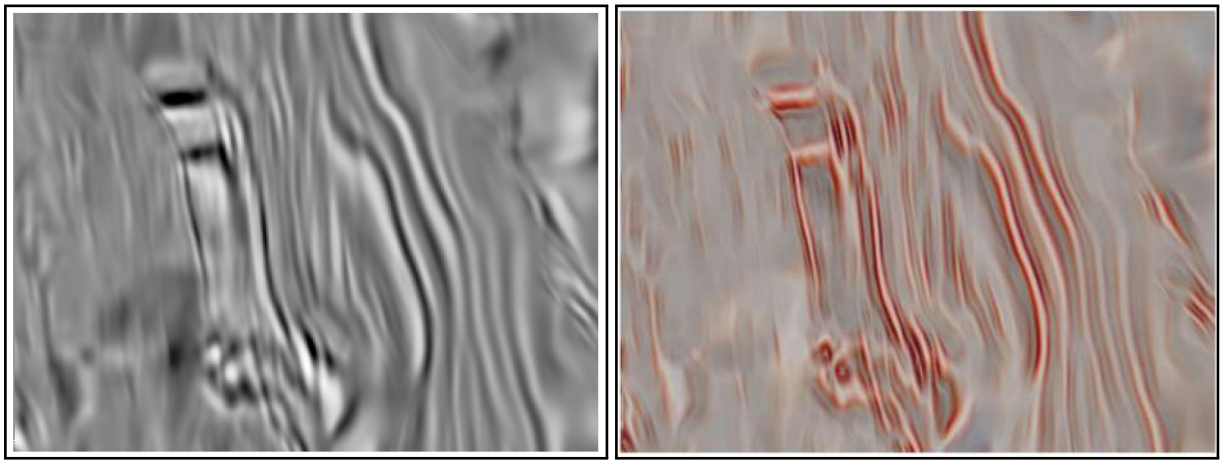
(b) RRIM aplicado em uma seção na dimensão *time-slice*

Figura 29 – Comparação entre o dado original e o RRIM aplicado em uma seção sísmica na dimensão *time-slice*

Por fim, o *Red Relief Image Map* (RRIM) também foi adaptado para os dados sísmicos. Mantendo o padrão metodológico descrito anteriormente, a técnica foi implementada nas três dimensões do cubo sísmico, e seus resultados são apresentados nas Figuras 19-D, 20-D e 29. De modo geral, o desempenho do RRIM foi consistente entre as três seções analisadas: nas regiões em que os refletores já se encontravam mais bem definidos, o método acompanhou esse comportamento e intensificou o realce das estruturas, tornando sua leitura ainda mais clara. Em comparação ao SRGB, a aplicação do RRIM destacou com maior nitidez possíveis falhas e zonas de descontinuidade, que se mostraram menos perceptíveis na técnica anterior. Dessa forma, os realces obtidos sugerem que a adaptação do *Red Relief Image Map* a dados sísmicos pode constituir uma ferramenta útil para a identificação e interpretação desse tipo de feição.

4.4 Junção do SRGB com RRIM

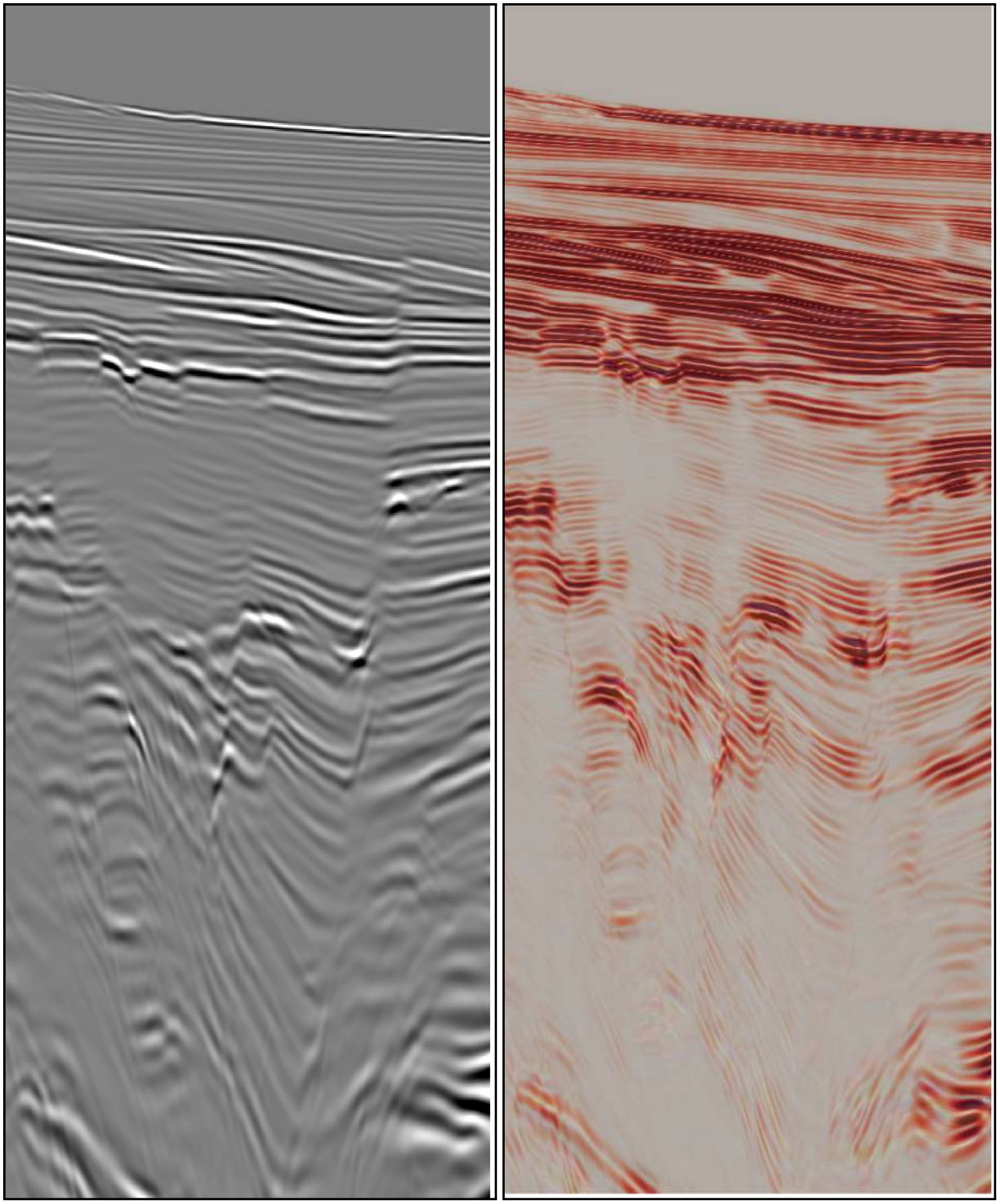
Como etapa adicional que não está incluída entre as técnicas de aprimoramento de imagens avaliadas nesta pesquisa, realizou-se um teste com os resultados de *Structured-Sharpened Continuous (SRGB)* e *Red Relief Image Map (RRIM)* aplicados aos dados sísmicos. Nesse experimento, os dois produtos foram sobrepostos com o objetivo de verificar se a combinação poderia intensificar o realce das feições. Esse teste foi realizado somente com os dados sísmicos, pois o SRGB lida somente com este tipo de dado, enquanto o RRIM é adaptado para diversos dados diferentes.



(a) Seção na dimensão *time-slice*

(b) Junção do resultado do SRGB com RRIM em *time-slice*

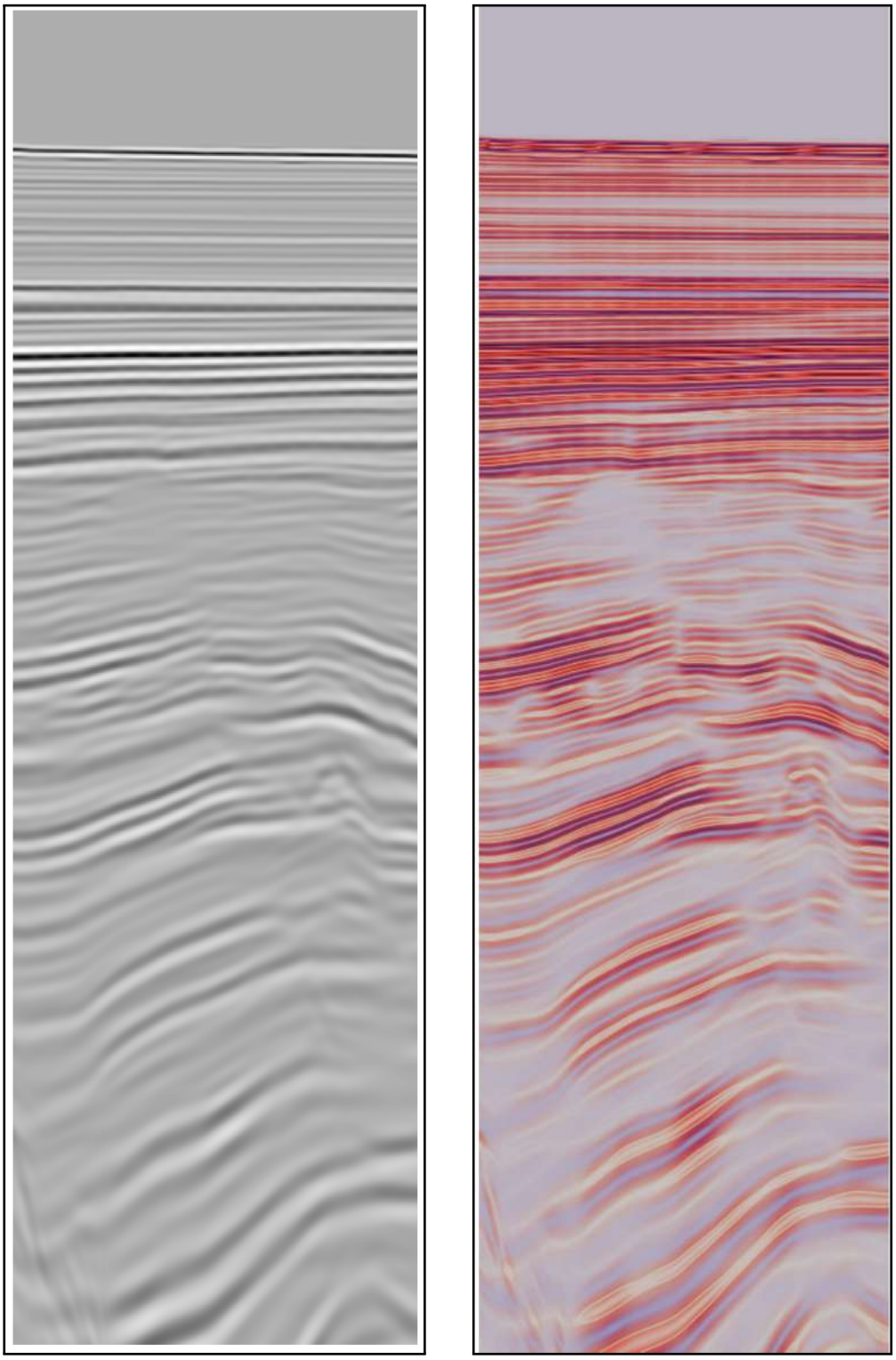
Figura 30 – Comparação entre o dado original e a junção do resultado do SRGB com RRIM em *time-slice*



(a) Seção na dimensão *inline*

(b) Junção do resultado do SRGB com RRIM em *inline*

Figura 31 – Comparação entre o dado original e a junção do resultado do SRGB com RRIM em *inline*



(a) Seção na dimensão *crossline*

(b) Junção do resultado do SRGB com RRIM em *crossline*

Figura 32 – Comparação entre o dado original e a junção do resultado do SRGB com RRIM em *crossline*.

O *Red Relief Image Map (RRIM)* mostrou-se uma técnica particularmente consistente para dados sísmicos de amplitude, sobretudo por produzir realces mais estáveis e comparáveis entre as diferentes visualizações do volume. Em contraste, o *Structured-Sharpened Continuous RGB (SRGB)* apresentou respostas bastante distintas em cada dimensão do dado, o que indica uma sensibilidade maior ao sentido de varredura e ao tipo de feição predominante em cada plano.

Quando os produtos de ambas as técnicas são sobrepostos, esses comportamentos ficam mais evidentes. O RRIM tende a dominar a combinação por realçar regiões com maior contraste e por ressaltar variações sutis de relevo/gradiente no atributo, enquanto o SRGB atua como uma espécie de máscara cromática, ajudando a delimitar lineamentos e bordas que, no RRIM isoladamente, podem não ficar tão bem separadas. Assim, a junção dos dois, conforme mostrado nas Figuras 30, 31 e 32, evidencia simultaneamente o ganho de contraste do RRIM e o papel do SRGB na organização e segmentação visual das feições.

Em síntese, a combinação RRIM+SRGB se mostra vantajosa por reunir realce e discriminação: o RRIM melhora a legibilidade estrutural dos dados, enquanto o SRGB contribui para diferenciar e contornar elementos de interesse, tornando a interpretação mais robusta e menos dependente de uma única representação do volume.

5 Discussões

Esta pesquisa têm como objetivos adaptar e implementar técnicas de aprimoramento de imagens utilizando a linguagem de programação Python. A partir disso, propõe-se disponibilizar essas metodologias como uma ferramenta *open source* [1], passível de reprodução e aprimoramento para diferentes problemas, algo que tende a ser mais difícil quando se utiliza um *software* comercial. Com a implementação das técnicas descritas nesta pesquisa, esperava-se realçar e melhorar a qualidade visual dos atributos e estruturas presentes nos dados analisados, de modo a auxiliar a interpretação dos resultados.

A primeira técnica utilizada foi a *Structurally Enhanced RGB (seRGB)* proposta por (Laake *et al.*, 2011); o seRGB utiliza transformações e combinações das bandas do Landsat 7 ETM+ para destacar padrões estruturais na cena. Em termos práticos, a imagem resultante costuma evidenciar lineamentos e contatos com mais contraste do que a composição RGB convencional, o que facilita a interpretação visual das estruturas na área de estudo. Os resultados da implementação da técnica podem ser observados na figura 12.

Ao compará-los com aqueles apresentados por (Laake *et al.*, 2011) (figura 3), observa-se que a composição obtida difere substancialmente, o que pode ser atribuído a diversos fatores. Além de a área de estudo diferir substancialmente daquela considerada no trabalho de referência, a metodologia descrita por (Laake *et al.*, 2011) apresenta lacunas e ambiguidades quanto a algumas etapas intermediárias necessárias para a obtenção do produto final. Mesmo após a reprodução dos procedimentos reportados para gerar a imagem estruturalmente aprimorada, não se alcança um resultado idêntico ou mesmo plenamente compatível com o esperado, o que sugere (i) a possibilidade de que nem todas as etapas e parâmetros tenham sido explicitados de forma completa e reprodutível e/ou (ii) que o fluxo de processamento dependa de rotinas e ajustes específicos de um *software* comercial. Ainda assim, a adaptação desenvolvida mostrou-se adequada para realçar feições estruturais em dados de satélite, conforme proposto, entretanto, a área de estudo também pode influenciar na eficiência da metodologia.

[1] Open source ou código aberto é uma ferramenta que é disponibilizada de forma gratuita.

A segunda técnica reproduzida nesta pesquisa foi o *Structured-Sharpened Continuous (SRGB)*, igualmente proposto por (Laake, 2015). Em contraste com a seRGB, o SRGB é aplicado a dados sísmicos com o propósito de realçar feições geológicas, padrões estruturais e zonas de descontinuidade. O método decorre de uma adaptação do *Structurally Enhanced Red-Green-Blue* e tem como objetivo intensificar o contraste do volume sísmico, de modo a favorecer a identificação e o mapeamento de elementos como falhas, canais e corpos salinos, os quais apresentam respostas características ao fluxo de processamento empregado por essa metodologia.

Conforme apresentado nos resultados, a técnica foi aplicada a um cubo sísmico completo, de modo a avaliar seu desempenho nas diferentes formas de visualização do volume (*inline*, *crossline* e *slices*). Essa escolha permitiu observar como o realce responde a feições com geometrias e orientações distintas, bem como identificar eventuais limitações do método em cada perspectiva.

Um obstáculo relevante nessa adaptação é que o fluxo de processamento em Python não é totalmente uniforme entre as dimensões dos dados: a organização do *array*, a orientação espacial e o comportamento estatístico do sinal podem variar entre *inlines*, *xlines* e *slices*, exigindo ajustes pontuais para que as etapas sejam aplicadas de forma consistente. Por essa razão, como indicado nas figuras 18, 19 e 20, as composições finais diferem de maneira significativa. Assim, a seleção da dimensão e do atributo mais adequados deve ser orientada pelo objetivo interpretativo e pelo conhecimento do intérprete sobre o tipo de feição que se deseja realçar.

Além disso, como em outras rotinas de processamento, foi necessário trabalhar com recortes (subvolumes) do cubo sísmico, uma vez que a manipulação de grandes volumes de dados em Python pode impor custos computacionais elevados (memória e tempo de processamento), sobretudo quando se executam múltiplas transformações e combinações de atributos. A comparação direta com o dado de referência também se torna limitada, pois, além de se tratar de conjuntos de dados distintos, o atributo empregado não é necessariamente o mesmo. Ainda assim, a sequência de etapas implementada mostrou-se mais reprodutível e tecnicamente consistente, e os produtos obtidos mantiveram coerência com o comportamento esperado ao longo do fluxo de processamento.

Por fim, a última técnica implementada neste estudo foi o *Red Relief Image Map*

(RRIM), proposta em (Yokoyama Ryzo; Shirasawa, 2002) e (Chiba; Kaneta; Suzuki, 2008). Trata-se de um método voltado à visualização de variações na superfície terrestre, originalmente desenvolvido a partir de dados LiDAR, mas posteriormente difundido para a análise de Modelos Digitais de Elevação. Em termos conceituais, o RRIM busca enfatizar a morfologia do relevo ao destacar concavidades e convexidades, realçando descontinuidades e estruturas que, em representações convencionais, podem ficar mascaradas.

Nesta pesquisa, o RRIM foi a técnica que melhor se prestou à aplicação em diferentes tipos de dados, sobretudo por sua flexibilidade de adaptação. De modo geral, o método mostrou-se eficaz para evidenciar feições e padrões nos produtos analisados, conforme observado nas figuras 19-D, 20-D,22, 25, 27, 28 e 29. Ainda que o objetivo do realce se mantenha o mesmo, o comportamento do RRIM varia de acordo com a natureza do dado de entrada, o que é esperado: para acomodar diferentes domínios (por exemplo, topografia, potenciais e sísmica), a técnica requer ajustes e tratamentos específicos que respeitem a distribuição de valores, a escala e o conteúdo espectral/estrutural de cada conjunto.

Embora os procedimentos adotados preservem o mesmo princípio e se apoiem em etapas consideradas fundamentais para atingir o realce, o fluxo de processamento em Python não é necessariamente idêntico entre todos os dados; em alguns casos, são exigidas etapas adicionais para assegurar que as concavidades e convexidades estejam visíveis nos dados. Esse aspecto constituiu o principal obstáculo durante o desenvolvimento: na tentativa de ampliar a reprodutibilidade do RRIM, verifica-se que ainda não há um fluxo metodológico único e padronizado, apesar de as implementações convergirem para os mesmos fundamentos e objetivos. Por outro lado, essa ausência de rigidez também se traduz em uma vantagem, pois amplia a aplicabilidade da técnica e evita que ela se restrinja apenas aos dados nos quais foi originalmente concebida.

Como discutido anteriormente, o RRIM possui nuances para cada tipo de dado no qual a metodologia é aplicada, porém, as principais etapas são similares em todos os dados, ainda assim, ao realizar a integração com o SRGB, mostrou-se promissora para *time-slice* e *inline*, onde as feições ficaram mais evidentes. Em contrapartida, na visualização *crossline*, a sobreposição atenuou o realce, reduzindo a nitidez das estruturas. Ressalta-se que se trata apenas de um teste exploratório, ilustrando como técnicas distintas podem ser combinadas para gerar um novo produto de visualização.

De modo geral, a principal limitação observada para todas as técnicas avaliadas está associada ao fato de que, originalmente, elas são executadas em softwares dedicados, enquanto, nesta pesquisa, precisaram ser adaptadas para um fluxo reprodutível em Python. Nesse ambiente, o fator mais restritivo é o volume (ou tamanho) dos dados: o processamento de produtos muito extensos ,como imagens de satélite que cobrem grandes áreas ou cubos sísmicos completos, demanda elevada capacidade de memória, tempo e recurso computacional. Consequentemente, em configurações mais modestas (ou em ambientes com limitações de RAM e armazenamento), rotinas que envolvem filtros, combinações de bandas/atributos e operações matriciais podem tornar-se instáveis, resultando em travamentos, interrupções e falhas de execução.

Como estratégia para contornar esse problema e viabilizar a aplicação das ferramentas em diferentes computadores, foi necessário trabalhar com recortes espaciais e subvolumes, de modo a reduzir a carga computacional e manter o desempenho do processamento. Essa abordagem, embora prática, impõe cuidados metodológicos adicionais, pois a escolha do tamanho da janela e do particionamento pode influenciar o realce obtido, sobretudo nas bordas dos recortes e em feições de maior escala. Assim, sempre que possível, torna-se recomendável padronizar critérios de recorte, considerar sobreposições entre janelas e avaliar a consistência dos resultados em diferentes tamanhos de amostra.

Em síntese, as adaptações para Python ampliam a transparência e a reprodutibilidade dos procedimentos, mas evidenciam a necessidade de soluções que escalem melhor para grandes volumes de dados. Trabalhos futuros podem explorar otimizações de desempenho (por exemplo, paralelização, processamento e uso de GPU), bem como a integração com bibliotecas voltadas a grandes matrizes e dados geoespaciais, visando reduzir a dependência de recortes e permitir a aplicação das técnicas em produtos completos, sem comprometer a robustez do fluxo.

6 Conclusão

As técnicas de aprimoramento de imagens constituem uma ferramenta importante para a obtenção de novas formas de visualização de um mesmo conjunto de dados. Ao produzir representações alternativas, essas técnicas permitem enfatizar feições já presentes, mas que podem estar pouco evidentes em produtos convencionais, contribuindo para a análise, a interpretação e, consequentemente, para uma compreensão mais consistente do alvo de estudo. Além disso, por se tratarem de procedimentos essencialmente de processamento e realce, podem ser aplicadas a diferentes tipos de dados e adaptadas a múltiplos contextos e objetivos.

Embora esta pesquisa tenha se concentrado em um conjunto específico de abordagens, a literatura apresenta uma ampla variedade de técnicas de aprimoramento de imagens, cada uma direcionada a finalidades particulares. Nesse sentido, a seleção da técnica (ou da combinação de técnicas) a ser implementada depende, principalmente, de dois fatores: (i) o tipo de dado a ser aprimorado; e (ii) o conjunto de atributos que se pretende realçar (tais como lineamentos, limites de unidades, texturas, variações sutis de relevo ou contrastes espectrais). Esses dois aspectos funcionam como ponto de partida para a tomada de decisão, pois orientam tanto a parametrização quanto a avaliação do produto final.

A partir do balanço dos resultados obtidos, considerando-se a área de estudo e os tipos de dados aprimorados, as técnicas que apresentaram melhor desempenho geral foram a *Structured-Sharpened Continuous (SRGB)* de Laake (2015) e o *Red Relief Image Map* de Yokoyama Ryzo; Shirasawa (2002) e Chiba, Kaneta e Suzuki (2008). Além de apresentarem reprodução e adaptação mais próximas às propostas originais dos trabalhos de referência, os resultados demonstraram maior efetividade no realce de estruturas e de características geológicas relevantes nos dados analisados. Em contraste, a aplicação da técnica *Structurally Enhanced RGB (seRGB)* ao dado e à área de estudo desta pesquisa não evidenciou, com a mesma consistência, os realces esperados para as feições de interesse.

Como continuidade deste estudo, pode-se investigar estratégias para tornar a aplicação da técnica *Structurally Enhanced RGB (seRGB)* mais eficiente em dados de

satélite, bem como avaliar alternativas para viabilizar seu processamento em áreas de maior extensão. Para a técnica *Structured-Sharpened Continuous (SRGB)*, propõe-se a padronização do fluxo de processamento em *Python*, considerando que, até o momento, sua utilização tem sido reportada principalmente para dados sísmicos. Por fim, recomenda-se aprofundar a análise de combinações entre técnicas de aprimoramento, de modo a integrá-las ao realce proporcionado pelo *Red Relief Image Map*.

Um ponto fundamental para a continuidade deste estudo é a realização de simulações e modelagens geológicas e geofísicas a partir dos dados potenciais e sísmicos, a fim de verificar se os realces obtidos pelas técnicas correspondem, de fato, a estruturas geológicas ou se resultam de artefatos presentes nos dados de origem. Essa etapa visa assegurar a eficácia dos métodos na identificação e no realce de feições.

Em síntese, os resultados obtidos reforçam o potencial das técnicas de aprimoramento de imagens como suporte à interpretação geológica, ao favorecer a identificação e o entendimento de feições que podem permanecer sutis em produtos convencionais. Espera-se que os encaminhamentos aqui propostos ampliem a robustez metodológica e a aplicabilidade das técnicas avaliadas, contribuindo para análises futuras em diferentes áreas e conjuntos de dados.

Referências

ALMALKI, R.; KHAKI, M.; SACO, P. M.; RODRIGUEZ, J. F. Monitoring and mapping vegetation cover changes in arid and semi-arid areas using remote sensing technology: A review. *Remote Sensing*, MDPI AG, v. 14, n. 20, p. 5143, out. 2022. ISSN 2072-4292. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.3390/rs14205143⟩.

ALMEIDA, F. de; HASUI, Y.; NEVES, B. de B.; FUCK, R. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science Reviews*, Elsevier BV, v. 17, n. 1–2, p. 1–29, abr. 1981. ISSN 0012-8252. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9⟩.

BHARDWAJ, S.; MITTAL, A. A survey on various edge detector techniques. *Procedia Technology*, Elsevier BV, v. 4, p. 220–226, 2012. ISSN 2212-0173. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2012.05.033⟩.

BLAICH, O. A.; FALEIDE, J. I.; TSIKALAS, F. Crustal breakup and continent-ocean transition at south atlantic conjugate margins. *Journal of Geophysical Research*, American Geophysical Union (AGU), v. 116, n. B1, jan. 2011. ISSN 0148-0227. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.1029/2010JB007686⟩.

BRêDA, T. C. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), *Análise petrográfica da Formação Resende (Bacia de Resende, RJ)*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2010. Disponível em: ⟨https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/4318/1/BREDA%2C%20T.C.pdf⟩.

CHIBA, T.; KANETA, S.-I.; SUZUKI, Y. Red relief image map: New visualization method for three dimensional data. *Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, v. 37, 07 2008.

CHOPRA, S.; MARFURT, K. Curvature attribute applications to 3d surface seismic data. *The Leading Edge*, Society of Exploration Geophysicists, v. 26, n. 4, p. 404–414, abr. 2007. ISSN 1938-3789. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.1190/1.2723201⟩.

CHOPRA, S.; MARFURT, K. J. Evolution of seismic interpretation during the last three decades. *The Leading Edge*, Society of Exploration Geophysicists, v. 31, n. 6, p. 654–676, jun. 2012. ISSN 1070-485X. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.1190/tle31060654.1⟩.

CONCEIçãO, J. C. d. J.; ZALáN, P. V.; WOLFF, S. Mecanismo, evolução e cronologia do rift sul-atlântico. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2-4, p. 255–265, 1988.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. *Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos*. [S.l.], 2012. v. 1. Volume I – Texto técnico. Executado por Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda.

D'URSO, G.; GIARDINI, C.; QUARTO, M.; MACCARINI, G. Cost index model for the process performance optimization of micro-edm drilling on tungsten carbide.

Micromachines, MDPI AG, v. 8, n. 8, p. 251, ago. 2017. ISSN 2072-666X. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.3390/mi8080251⟩.

EIRADO, L. G. d.; HEILBRON, M.; ALMEIDA, J. C. H. d. Os terrenos tectônicos da faixa ribeira na serra da bocaina e na baía da ilha grande, sudeste do brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 36, n. 3, p. 426–436, set. 2006. Disponível em: ⟨https://bjg.siteoficial.ws/2006/n.3/5.pdf⟩.

FURTADO, P. C. *Mapeamento geológico, petrografia e caracterização das unidades litológicas no município de Rio Bonito, Rio de Janeiro*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, jul. 2015. Pantheon (Repositório Institucional da UFRJ). Identificador: http://hdl.handle.net/11422/4045. Orientadora: Sílvia Regina de Medeiros; coorientador: Julio Cezar Mendes. Disponível em: ⟨https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/4045/3/FURTADO%2C%20P.C.pdf⟩.

HEILBRON, M.; EIRADO, L. G.; ALMEIDA, J. *Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Rio de Janeiro*. Belo Horizonte, 2016. Escala 1:400.000.

HEILBRON, M.; SILVA, L. G. d. E.; ALMEIDA, J. C. H. d.; TUPINAMBá, M.; PEIXOTO, C.; VALERIANO, C. d. M.; LOBATO, M.; RODRIGUES, S. W. d. O.; RAGATKY, C. D.; SILVA, M. A.; MONTEIRO, T.; FREITAS, N. C. d.; MIGUENS, D.; GIRãO, R. Proterozoic to ordovician geology and tectonic evolution of rio de janeiro state, se-brazil: insights on the central ribeira orogen from the new 1:400, 000 scale geologic map. *Brazilian Journal of Geology*, FapUNIFESP (SciELO), v. 50, n. 2, 2020. ISSN 2317-4889. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.1590/2317-4889202020190099⟩.

HERCOS, C. M.; SCHREINER, S.; FERREIRA, E. T. I. Deep-water seafloor geomorphic features of the santos basin, southeastern brazilian margin, shown by analyses and integration of an exten-sive 3-d seismic data set. *Ocean and Coastal Research*, FapUNIFESP (SciELO), v. 71, n. suppl 3, 2023. ISSN 2675-2824. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.1590/2675-2824071.22067cmh⟩.

HOPPIN, R. A.; ANDERSON, D. M.; STEWART, R. K.; AMSBURY, D. L.; FRIERSON, V. R.; MAZADE, A. V.; MILLER, M. L. Geology and hydrology. In: *Skylab EREP Investigations Summary*. Washington, DC: Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration, 1978, (NASA Special Publication, SP-399). p. 119–188. NASA SP-399. Disponível em: ⟨https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1978NASSP.399..119H⟩.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Geologia 1:250.000 – Base de Dados Geoespaciais (falhas e fraturas), versão 2019*. 2019. Online. Conjunto de arquivos vetoriais temáticos de falhas e fraturas disponível para download. Disponível em: ⟨https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geologia/15822-geologia-1-250-000.html?=&t=downloads⟩.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). *LIDAR (Light Detection and Ranging)*. s.d. Página web, Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR). Acesso em: 12 fev. 2026. Disponível em: ⟨https://www.dsr.inpe.br/DSR/areas-de-atuacao/sensores-plataformas/lidar/⟩.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. An introduction to geophysical exploration, 3rd ed. *Geological Magazine*, v. 140, n. 3, p. 366–366, 2002.

LAAKE, A. Structural interpretation in color — a new rgb processing application for seismic data. *Interpretation*, Society of Exploration Geophysicists, v. 3, n. 1, p. SC1–SC8, fev. 2015. ISSN 2324-8866. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.1190/INT-2014-0041.1⟩.

LAAKE, A. W.; SHENESHEN, M. S.; STROBBIA, C.; VELASCO, L.; CUTTS, A. Integration of surface/subsurface techniques reveals faults in gulf of suez oilfields. *Petroleum Geoscience*, Geological Society of London, v. 17, n. 2, p. 165–179, abr. 2011. ISSN 2041-496X. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.1144/1354-079310-014⟩.

LI, Y.; WANG, W.; BAI, B. Edge information preserving generative adversarial network combining transformer and multi-scale fusion for mri modality transfer. Springer Science and Business Media LLC, mar. 2024. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-4035697/v1⟩.

LOESDAU, M.; CHABRIER, S.; GABILLON, A. Hue and saturation in the rgb color space. In: ____. *Image and Signal Processing*. Springer International Publishing, 2014. p. 203–212. ISBN 9783319079981. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-07998-1_23⟩.

MAINI, R.; AGGARWAL, H. A comprehensive review of image enhancement techniques. arXiv, 2010. Disponível em: ⟨https://arxiv.org/abs/1003.4053⟩.

MARTINS, G. S. *Evolução tectono-estratigráfica dos evaporitos Horizonte e Paripueira na porção alagoana da Bacia de Sergipe-Alagoas e suas implicações na abertura do Oceano Atlântico Sul*. 258 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Análise de Bacias; Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais)) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Acesso em: 20 mar. 2026. Disponível em: ⟨http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/7140⟩.

MCDOWELL, P. W.; BARKER, R. D.; BUTCHER, A. P.; CULSHAW, M. G.; JACKSON, P. D.; MCCANN, D. M.; SKIPP, B. O.; MATTHEWS, S. L.; ARTHUR, J. C. R. Geophysics as an investigative tool. In: *Geophysics in Engineering Investigations*. London: Geological Society of London, 2002, (Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 1). p. 23–35. Disponível em: ⟨https://doi.org/10.1144/GSL.ENG.2002.019.01.02⟩.

MOREIRA, J. L. P.; MADEIRA, C. V.; GIL, J. A.; MACHADO, M. A. P. Bacia de santos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 531–549, maio/nov. 2007.

RAMOS, R. R. C.; MELLO, C. L.; SANSON, M. d. S. R. Bacias sedimentares brasileiras: Bacia de resende. *Phoenix*, Fundação Paleontológica Phoenix, Aracaju, SE, v. 7, n. 76, p. 1–6, apr 2005. ISSN 1517-7351. Disponível em: ⟨https://www.phoenix.org.br⟩.

RAMOS, R. R. C.; MELLO, C. L.; SANSON, M. d. S. R. Revisão estratigráfica da bacia de resende, rift continental do sudeste do brasil, estado do rio de janeiro. *Geociências*, UNESP, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 59–69, 2006.

RICCOMINI, C. *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Tese (Doutorado) — Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA), 1990. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.11606/T.44.1990.tde-18032013-105507⟩.

ROBERT, X. *robertxa/pyRRIM: Zenodo Release*. Zenodo, 2021. Disponível em: ⟨https://zenodo.org/record/4745556⟩.

SANDWELL, D. T.; MüLLER, R. D.; SMITH, W. H. F.; GARCIA, E.; FRANCIS, R. New global marine gravity model from cryosat-2 and jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 346, n. 6205, p. 65–67, out. 2014. ISSN 1095-9203. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.1126/science.1258213⟩.

SEBAI, D.; ZOUAOUI, M.; GHORBEL, F. Seismic data compression: an overview. *Multimedia Systems*, Springer Science and Business Media LLC, v. 30, n. 1, jan. 2024. ISSN 1432-1882. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.1007/s00530-023-01233-4⟩.

SOUZA, L. Silveira de; SGARBI, G. N. C. Bacia de santos no brasil: geologia, exploração e produção de petróleo e gás natural. *Boletín de Geología*, Universidad Industrial de Santander, v. 41, n. 1, p. 175–195, jan. 2019. ISSN 2145-8553. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v41n1-2019009⟩.

SUSURRANT. *Red Relief Image Map*. 2026. ⟨https://github.com/susurrant/rrim⟩. Acesso em: 9 jun. 2026.

TIAN, R.; SUN, G.; LIU, X.; ZHENG, B. Sobel edge detection based on weighted nuclear norm minimization image denoising. *Electronics*, MDPI AG, v. 10, n. 6, p. 655, mar. 2021. ISSN 2079-9292. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.3390/electronics10060655⟩.

U.S. Geological Survey. *What are the best Landsat spectral bands for use in my research?* 2025. Acesso em: 14 mar. 2026. Disponível em: ⟨https://www.usgs.gov/faqs/what-are-best-landsat-spectral-bands-use-my-research⟩.

XIE, Y.; SHA, Z.; YU, M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*, Oxford University Press (OUP), v. 1, n. 1, p. 9–23, mar. 2008. ISSN 1752-993X. Disponível em: ⟨http://dx.doi.org/10.1093/jpe/rtm005⟩.

YOKOYAMA RYZO; SHIRASAWA, M. P. R. J. Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 2002. ISSN 0099-1112.

Apêndices

APÊNDICE A – Repositório

Os códigos desenvolvidos para este estudo estão disponíveis no repositório em: https://github.com/MottaD2/Tecnicas-de-aprimoramento-de-imagens