

BATIMETRIA DERIVADA DE SATÉLITE (BDS) EMPÍRICA PARA UM TRECHO DA PLATAFORMA LESTE DO RIO GRANDE DO NORTE: ESTUDO DE CASO EM AMBIENTE TROPICAL

EMPIRICAL SATELLITE-DERIVED BATHYMETRY (SDB) FOR A SECTION OF THE EASTERN CONTINENTAL SHELF OF RIO GRANDE DO NORTE: A CASE STUDY IN A SHALLOW TROPICAL ENVIRONMENT

Ricardo Carlos CARVALHO¹, Moab Praxedes GOMES¹, Paulo Victor Nascimento ARAÚJO², Filipe Ezequiel da SILVA¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Câmpus Universitário - Lagoa Nova, Natal - RN

E-mails: rcc137@gmail.com; moab.gomes@ufrn.br; ezequielevaldo@gmail.com

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Câmpus Macau. RN-221, Macau - RN.

E-mail: paulo.araujo@ifrn.edu.br

Introdução

Área de estudo

Material e métodos

Aplicação da metodologia empírica

Acervo de imagens multiespectrais

Processamento digital de imagens

Dados de batimetria (Marinha do Brasil)

Ruídos associados à metodologia da BDS

Resultados

Modelos batimétricos derivados por satélites

Aplicação de filtros de mediana

Modelagem do terreno

Discussão

Conclusões

Agradecimentos

Referências

RESUMO - As plataformas continentais rasas são zonas costeiras influenciadas por correntes, ondas e marés, diretamente associadas a processos de erosão e sedimentação, embora marcadas por significativa limitação de dados disponíveis. O relevo plataformar é geralmente obtido por métodos geofísicos hidroacústicos, os quais, embora precisos, envolvem elevados custos, consumo de tempo e limitações logísticas, sobretudo em áreas com condições oceanográficas adversas que dificultam levantamentos embarcados. Nesse cenário, a Batimetria Derivada de Satélite (BDS) empírica surge como alternativa econômica e complementar aos métodos tradicionais, permitindo mapeamento prévio com elevada resolução espacial e temporal. Este estudo aplicou a BDS empírica para mapear uma área da plataforma leste do Estado do Rio Grande do Norte, região caracterizada por afloramentos e bancos recifais que comprometem a navegação e a coleta de dados *in situ*. A metodologia baseou-se na utilização da refletância subaquática das faixas visíveis para estimar profundidades, calibradas com dados de cartas náuticas da Marinha do Brasil. As imagens foram processadas em ambiente SIG, empregando-se o modelo de Stumpf *et al.* (2003) sobre dados dos sensores Sentinel-2 MSI e Landsat-8 OLI. O melhor desempenho foi observado nas imagens Sentinel, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,90, enquanto as imagens Landsat apresentaram R^2 de 0,83. A técnica demonstrou aplicabilidade em áreas com profundidades de até 30 m. Ruídos iniciais foram mitigados por meio de filtros de mediana, melhorando a qualidade dos perfis gerados. Os resultados evidenciam o potencial e as limitações da BDS como ferramenta auxiliar para ampliar o conhecimento batimétrico em ambientes costeiros restritivos.

Palavras-chave: Plataformas continentais rasas. Imagens de satélite. Razão de bandas. Estimativa de batimetria. Filtro de mediana.

ABSTRACT - Shallow continental shelves are coastal zones influenced by currents, waves, and tides, directly associated with erosion and sedimentation processes, although characterized by a significant lack of available data. The shelf relief is generally obtained through hydroacoustic geophysical methods, which, although accurate, involve high costs, time consumption, and logistical limitations, especially in areas with adverse oceanographic conditions that hinder vessel-based surveys. In this context, empirical Satellite-Derived Bathymetry (SDB) emerges as a cost-effective and complementary alternative to traditional methods, allowing preliminary mapping with high spatial and temporal resolution. This study applied empirical SDB to map an area of the eastern continental shelf of the State of Rio Grande do Norte, a region marked by outcrops and reef banks that hinder navigation and *in situ* data collection. The methodology was based on the use of underwater reflectance from visible spectral bands to estimate depths, calibrated using nautical chart data provided by the Brazilian Navy. Satellite images were processed in a GIS environment, employing the model proposed by Stumpf *et al.* (2003) using data from Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI sensors. The best performance was observed with Sentinel images, yielding a coefficient of determination (R^2) of 0.90, while Landsat images presented an R^2 of 0.83. The technique proved applicable in areas with depths of up to 30 meters. Initial noise was mitigated through the application of median filters, improving the quality of the generated profiles. The results highlight both the potential and the limitations of SDB as an auxiliary tool for expanding bathymetric knowledge in constrained coastal environments.

Keywords: Shallow continental shelves. Satellite imagery. Band ratio. Bathymetry estimation. Median filter.

INTRODUÇÃO

As plataformas continentais rasas, intimamente associadas a processos sedimentares e morfológicos marinhos e costeiros (Masselink et al., 2014; Davidson-Arnott et al., 2019), têm sua morfologia e dinâmica de erosão, sedimentação e transporte controladas por forçantes oceanográficas como correntes, ondas e marés (Weiner et al., 2021). O monitoramento contínuo dessas áreas em amplas escalas espaciais e temporais é essencial para compreender a dinâmica costeira e mitigar transformações naturais ou antrópicas (Benveniste, 2019; Bergsma et al., 2021; Evagorou et al., 2022).

Apesar da existência de estudos morfossedimentares na plataforma continental brasileira (e.g., Muehe & Carvalho, 1992; Gomes et al., 2016; Goes & Júnior, 2017; Santos et al., 2019), persiste uma significativa lacuna de dados hidrográficos de alta resolução em cerca de 50% de sua extensão, muitos dos quais não atendem à Norma OHI S-44 (Leder & Leder, 2020; Westley, 2021). Essa norma constitui a principal referência técnica internacional no campo da hidrografia, ao definir os padrões operacionais para levantamentos hidrográficos adotados pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI). Entre suas diretrizes, destaca-se a determinação do nível de precisão necessário para que cartas batimétricas sejam consideradas adequadas tanto para a segurança da navegação quanto para aplicações em engenharia (OHI, 2022).

No Estado do Rio Grande do Norte (RN), embora a porção norte conte com diversos trabalhos geológico-geofísicos (e.g. Santos et al., 2007; Vital et al., 2008; Gomes et al., 2020; Matos et al., 2014), a porção leste permanece substancialmente subestudada, principalmente devido aos elevados custos envolvidos na aquisição de dados marinhos (Damasceno et al., 2021). Caracterizada por uma direção predominantemente N-S (Vital et al., 2010), a plataforma continental leste do RN apresenta largura relativamente estreita, com média de 40 km (Gomes et al., 2020).

Portanto, há necessidade de serem desenvolvidos estudos que incorporem metodologias alternativas, como a Batimetria Derivada de Satélite, a fim de suprimir as lacunas de levantamentos batimétricos plataformais no nordeste brasileiro.

A BDS é uma técnica econômica, de ampla cobertura espaço-temporal e particularmente eficaz em águas rasas (Bergsma et al., 2021; Zhang et al., 2022; Darmanin et al., 2023). Baseia-se na

atenuação exponencial da luz na coluna d'água e na refletância subaquática captada por sensores ópticos multiespectrais (Lysenga, 1978), permitindo monitoramento morfobatimétrico muito mais acessível que métodos hidroacústicos (Brando et al., 2009; Pacheco et al., 2015). Sua acurácia, porém, é limitada por turbidez, presença de sedimentos em suspensão, heterogeneidade do substrato e condições atmosféricas (Ashphaq et al., 2021; Saeed et al., 2021; Evagorou et al., 2022).

Tais restrições fazem com que aplicações confiáveis sejam, em geral, limitadas a profundidades inferiores a 30 m (Gao, 2009; Harris & Baker, 2012; Saeed et al., 2021), apresentando ótimo desempenho ótimo até 25 m em águas claras (Eugenio et al., 2015; Vinayaraj et al., 2016) e podendo alcançar até 40 m em situações excepcionais (Silveira et al., 2022).

A abordagem empírica utiliza dados batimétricos obtidos *in situ* para a calibração do modelo, e sua precisão é comumente avaliada por meio do Coeficiente de Determinação (R^2), Erro Quadrático Médio (RMSE) e Erro Médio Absoluto (MAE), que quantificam o grau de ajuste e a dispersão entre profundidades estimadas e medidas (Stumpf et al., 2003; Pacheco et al., 2015).

Além da abordagem empírica, os métodos de BDS podem ser classificados como analíticos e semi-analíticos (Vinayaraj et al., 2016; Laporte et al., 2020). Os métodos analíticos dispensam dados de batimetria *in situ* para sua calibração, uma vez que se fundamentam em modelos de transferência radiativa e propriedades ópticas da água (tais como coeficiente de atenuação, retroespalhamento e assinaturas espectrais), embora demandem procedimentos complexos e parâmetros ópticos de difícil obtenção (Capo et al., 2014; Liang et al., 2017; Ashphaq et al., 2021).

De forma semelhante ao método empírico, os procedimentos semi-analíticos requerem calibração a partir de dados batimétricos medidos, apoiando-se em relações estatísticas entre valores de pixels de imagens e as medições prévias de profundidade (Leder & Leder, 2020; Salameh et al., 2019).

O método empírico proposto por Stumpf et al. (2003) assume a proporcionalidade entre duas bandas do espectro visível, a banda azul (B2) e a banda verde (B3), utilizando a razão entre suas refletâncias para estimar a profundidade (Evagorou et al., 2019).

As bandas azul (≈ 490 nm) e verde (≈ 560 nm) são preferencialmente empregadas devido à sua maior capacidade de penetração na coluna d'água em ambientes costeiros (Stumpf et al., 2003), característica que decorre tanto de suas propriedades óticas quanto dos princípios descritos pela Lei de Beer-Lambert, segundo a qual a intensidade luminosa diminui de forma exponencial com o aumento da profundidade (Evagorou et al., 2019; Darmanin et al., 2023).

Assim, ao considerar o comportamento exponencial do decaimento da luz subaquática (Ashphaq et al., 2021), aplica-se uma transformação logarítmica para linearizar a relação entre a radiância das bandas espectrais e a profundidade medida, possibilitando o ajuste por regressão e a obtenção de estimativas batimétricas (Stumpf et al., 2003; Ashphaq et al., 2021).

Os avanços nos sensores multiespectrais, contemplando a evolução presente na série Landsat, desde o TM (*Thematic Mapper*), e o ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), até o OLI (*Operational Land Imager*), bem como a plataforma MSI (*MultiSpectral Instrument*), dos satélites Sentinel, aliados ao desenvolvimento de modelos matemáticos mais robustos, têm impulsionado de maneira expressiva o aprimoramento

do desempenho das metodologias de BDS (Ashphaq et al., 2021; Darmanin et al., 2023).

O presente estudo teve como finalidade avaliar a aplicabilidade da Batimetria Derivada de Satélite (BDS) Empírica e examinar seu potencial para a elaboração de um mapa morfológico e de um modelo batimétrico, abrangendo a caracterização das feições e do relevo do fundo marinho em um segmento da plataforma continental leste do Rio Grande do Norte (RN), compreendido entre a foz do rio Potengi, no município de Natal, ao norte, e a foz do rio Pirangi, no município de Nísia Floresta, ao sul (Figura 1).

Trata-se da primeira aplicação sistemática da BDS na plataforma continental leste do Rio Grande do Norte, região cuja investigação batimétrica convencional limita-se pela presença de obstáculos físicos, como afloramentos e bancos recifais. Tais feições dificultam a navegação e comprometem a exequibilidade dos registros *in situ*.

Área de estudo

A Plataforma Continental Leste do RN (Figura 1) é considerada rasa, demarcando a quebra da plataforma a valores médios de 60 a 70 m abaixo do nível do mar (Vital et al., 2010; Gomes et al., 2016).

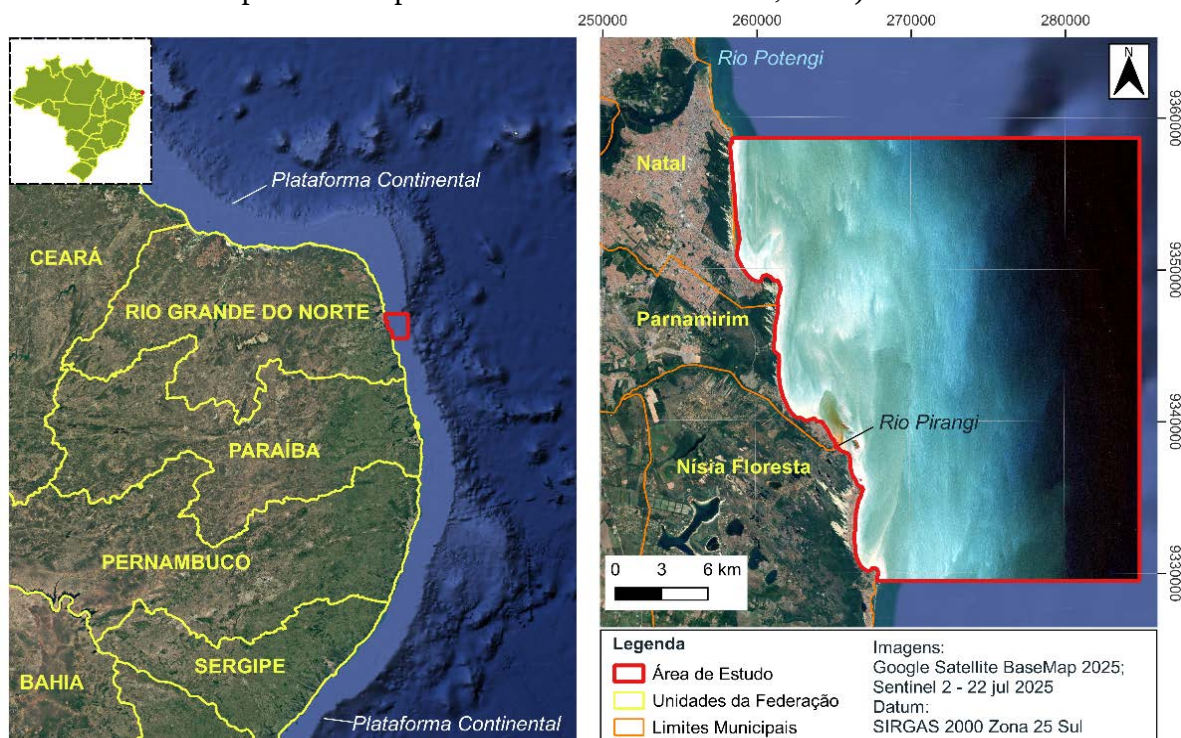


Figura 1 - Mapa de localização da Plataforma do RN, e em destaque, a área de estudo, representada em uma imagem Sentinel-2.

Seu relevo é predominantemente plano, caracterizado por um baixo gradiente batimétrico ao longo de grande parte da sua extensão, com valor médio de $0,5^\circ$, e sob o ponto de vista morfo-

dinâmico, o processo dominante na região é de ondas (Vital et al., 2010; Vital, 2014) e com predominância de depósitos carbonáticos (Gomes et al., 2020). As feições morfológicas de fundo na

região em estudo são marcadas pela presença de dunas submersas, recifes de corais, afloramentos de rochas praias (*beachrocks*), e vales incisos, esculpidos pela atividade fluvial de rios preeminentes, exemplificados pelo Vale Inciso Estuarino do Rio Potengi (Vital et al., 2008; Gomes et al., 2020).

As características geomorfológicas são influenciadas por fatores dinâmicos costeiros, incluindo a influência direta das correntes marítimas, a

incidência de ventos alísios intensos, com velocidades de até 18 m/s, e um regime de marés variando de moderado a elevado, com uma amplitude mínima de 1,2 m durante as marés de quadratura e 3,3 m durante as marés de sizígia, fatores estes que moldam continuamente o perfil costeiro da área, decorrendo em uma severa erosão costeira na região (Vital et al., 2018; Damasceno et al., 2021).

MATERIAL E MÉTODOS

Aplicação da metodologia empírica

Foi aplicada e avaliada a técnica empírica proposta por Stumpf et al. (2003) para a estimativa da batimetria na área de estudo, utilizando-se imagens multiespectrais provenientes dos sensores Landsat-8 OLI e Sentinel-2 MSI. Além da aplicação do método original de Stumpf, que utiliza a razão entre as bandas azul e verde (B2/B3), foram testadas variações e adaptações, como as razões entre as bandas azul costeiro e verde (B1/B3) e entre as bandas azul costeiro e azul (B1/B2). Essas modificações tiveram como objetivo avaliar o desempenho comparativo dos algoritmos e verificar sua adequação às condições da região investigada.

Os modelos batimétricos foram construídos a partir da regressão linear entre a refletância do fundo marinho e os dados de batimetria obtidos a partir de cartas náuticas disponibilizadas pela Marinha do Brasil. Com base no mapeamento resultante, foram traçados perfis longitudinais e verticais destinados à identificação e à caracterização das principais feições geomorfológicas presentes na área de estudo.

O método da BDS baseia-se na teoria da refletância e da óptica subaquática para gerar batimetria a partir de imagens de sensoriamento remoto (Polcyn & Rollin, 1969; Lysenga, 1978). A técnica explora a atenuação diferencial de comprimentos de onda pela água, permitindo estimar profundidade via inversão óptica da refletância do fundo, e tem se mostrado eficaz por sua ampla cobertura e repetitividade (Benveniste et al., 2019; Bergsma et al., 2021).

Em grandes profundidades, a penetração da luz torna-se praticamente inexistente, inviabilizando informações espectrais (Saeed et al., 2021; Evagorou et al., 2022; Darmanin et al., 2023). Dessa forma, as maiores profundidades não serão consideradas na análise dos dados, uma vez que a ausência de iluminação inviabiliza a obtenção de informações espectrais.

A seleção do espectro eletromagnético é crucial (Mobley et al., 2005). Em águas claras predominam comprimentos de onda curtos ($\sim 0,45 \mu\text{m}$), enquanto em águas turvas o sinal desloca-se para faixas mais longas, com maior correlação na banda vermelha do que na azul (Stumpf et al., 2003; Caballero et al., 2019; Gao, 2009).

Acervo de imagens multiespectrais

As imagens Landsat-8 foram obtidas a partir do portal *USGS EarthExplorer*, disponibilizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) em parceria com a NASA. As imagens Sentinel-2, por sua vez, foram adquiridas através do portal *Copernicus Data Space*, mantido pela Agência Espacial Europeia (ESA). Ambas as plataformas oferecem acesso gratuito.

Para este estudo, foram selecionadas imagens com baixa cobertura de nuvens. No entanto, os percentuais informados de nebulosidade referem-se à totalidade da cena — que, no caso do Sentinel-2, abrange $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ — enquanto a área de estudo é significativamente menor ($26,5 \text{ km} \times 29 \text{ km}$). Dessa forma, devido à distribuição espacialmente irregular das nuvens, tais índices não representam com precisão as condições atmosféricas específicas sobre a área analisada, devendo ser utilizados apenas como referência geral. Assim, a seleção das cenas foi efetivada através de inspeção visual, uma vez que não há ferramentas de filtragem automatizada nos portais da USGS e da ESA capazes de considerar exclusivamente a região de interesse.

O sensor OLI, a bordo do satélite Landsat-8, lançado em 2013, possui largura de faixa de 185 km, resolução espacial de 30 m e resolução temporal de 16 dias. A missão Sentinel-2, por sua vez, é composta pelos satélites 2A (lançado em 2015) e 2B (lançado em 2017), ambos equipados com sensor MSI. Esse equipamento oferece resolução espacial de 10 m nas bandas do espectro visível, largura de faixa de 290 km, e tempo de revisita de 5 dias quando considerados conjunta-

mente ambos os veículos da constelação.

Foram selecionados produtos com correção atmosférica: Level-2 (Surface Reflectance) para Landsat-8 e Level-2A para Sentinel-2. Esses níveis de processamento minimizam interferências atmosféricas, como as causadas por gases, aerossóis e vapor d'água, tornando os dados mais precisos e adequados para as análises de BDS (Caballero & Stumpf, 2020).

Desse modo não se fez necessário aplicar processamento adicional de correção atmosférica às imagens, uma vez que todas as cenas utilizadas já apresentavam este procedimento incorporado.

As imagens são disponibilizadas já agregando correções geométricas e radiométricas, o que assegura maior rigor tanto na representação espacial como na estimativa dos valores de refletância da superfície (Gao, 2009).

Considerando que as sondagens das cartas náuticas são referenciadas à maré baixa de sizígia, não se fez necessária a correção dos níveis de maré relativas ao momento da aquisição das imagens.

Nos métodos de BDS, a calibração empírica depende da relação entre a refletância dos pixels e as profundidades *in situ*, de modo que o *datum* vertical das cartas náuticas é incorporado diretamente ao ajuste do modelo (Saeed et al., 2021; Caballero & Stumpf, 2020a).

A literatura destaca que as variações locais do nível da água podem ser tratadas como um simples deslocamento vertical, o qual não afeta a relação linear do método de razão logarítmica (Saeed et al., 2021). Assim, não houve necessidade de calibração adicional para diferentes marés, pois as profundidades ficam normalizadas ao *datum* das cartas (Stumpf et al., 2003; Caballero & Stumpf, 2020b), de modo que os valores de pixel representam profundidades referenciadas ao *datum* cartográfico, e não à profundidade instantânea (Saeed et al., 2021; Caballero & Stumpf, 2021).

As imagens utilizadas neste trabalho foram as discriminadas na tabela 1.

Tabela 1 - Imagens utilizadas nos processamentos de BDS.

#	Satélite	Data de aquisição	Nuvens em toda a imagem (%)
A	LANDSAT 8	08/ago/17	7,90%
B	LANDSAT 8	08/ago/17	7,90%
C	LANDSAT 8	08/ago/17	7,90%
D	LANDSAT 8	24/fev/21	35,72%
E	SENTINEL 2	26/jul/22	0,64%
F	SENTINEL 2	31/ago/18	0,43%
G	SENTINEL 2	11/abr/24	35,30%

Processamento Digital de Imagens

As imagens selecionadas foram importadas para o ambiente SIG (*software* ArcGIS 10.7) e recortadas de acordo com o limite marinho da poligonal correspondente à área de estudo, compreendida entre a foz do Rio Potengi, ao norte, e a foz do Rio Pirangi, ao sul (W: -35,218°; E: -34,813°; N: -5,566°; S: -6,131°; ver Figura 1). Após o recorte, os dados das bandas espectrais foram reprocessados e preparados para as etapas subsequentes de análise.

O modelo de razão logarítmica de Stumpf et al. (2003) é expresso pela equação (Equação 1):

$$Z = m_1 \cdot \frac{\ln(nR_W(\lambda_i))}{\ln(nR_W(\lambda_j))} - m_0$$

Equação 1 – Modelo proposto por Stumpf et al. (2003), onde:

Z : profundidade batimétrica derivada, variável a ser estimada pelo modelo (m);

m₁ : parâmetro empírico de ganho, também denominado fator de escala ou coeficiente linear (determinado por regressão linear com dados de campo);

ln: logaritmo natural;

R_W(λ_i): valor de refletância atmosférica corrigida (usualmente da banda espectral azul B2);

R_W(λ_j): valor de refletância atmosférica corrigida (usualmente da banda espectral verde B3);

m₀: parâmetro empírico de deslocamento, também denominado constante de ajuste (determinado por regressão linear com dados de campo). Em termos operacionais, a variável de entrada corresponde à informação espectral transformada — derivada das bandas das imagens de satélite — enquanto a variável de saída corresponde à profundidade do fundo marinho estimada pela técnica de BDS. As profundidades estimadas derivam das equações lineares obtidas. O R² entre profundidades estimadas e sondagens de referência foi utilizado como métrica central de verificação e desempenho do modelo.

Dados de Batimetria (Marinha do Brasil)

Os dados batimétricos empregados neste estudo foram obtidos por meio da digitalização de cartas náuticas em formato *raster* disponibilizadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN). Conforme informado pela DHN, os levantamentos seguem as Normas Técnicas da Organização Hidrográfica Internacional (OHI). A conversão das cartas eletrônicas para uso em análises espaciais foi realizada em ambiente SIG.

As cartas foram obtidas no padrão NOAA-BSB (KAP/BSB), versão 3.0, com *datum* geodésico WGS-84, disponibilizadas para *download* no portal oficial da DHN. Para a área de estudo, foram utilizadas as cartas nº 802 (*Porto de Natal*, arquivo de 7 jan. 2022) e nº 810 (*Proximidades do Porto de Natal*, arquivo de 25 out. 2023),

ambas na escala de 1:50.000. No limite espacial considerado, foram identificados 57 pontos de sondagem, com distância média de aproximadamente 4 km entre eles. Desse total, 30 pontos (cerca de 53%) apresentam profundidades inferiores a 30 metros, correspondendo ao setor mais raso da plataforma continental interna (Figura 2).

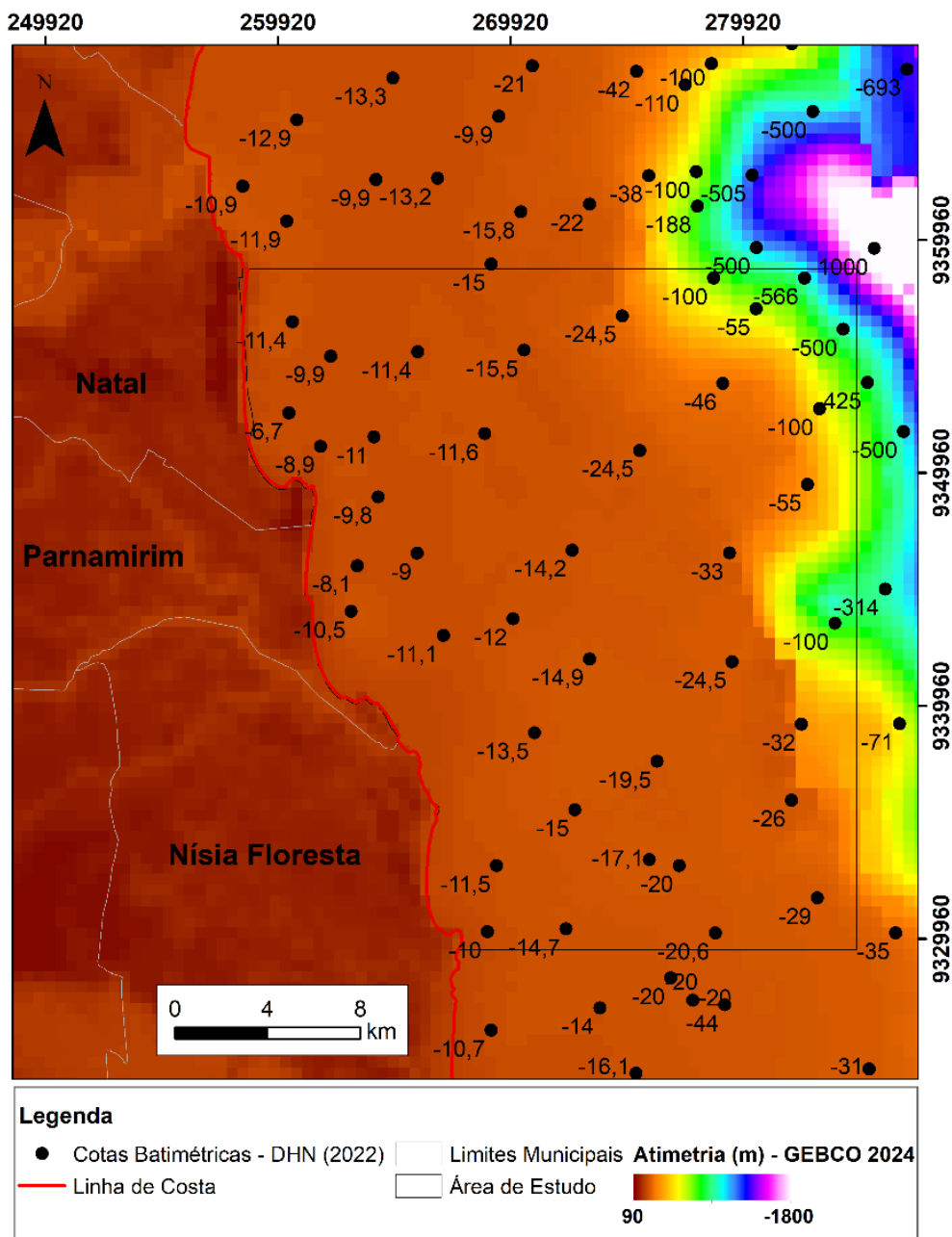


Figura 2 - Distribuição da Batimetria considerando profundidades até -30m, com 57 pontos de controle

Ruídos associados à metodologia da BDS

As limitações e os ruídos inerentes à composição espectral (Brando et al., 2009; Zhang et al., 2022), associados às particularidades do processo de BDS, tendem a ser amplificados pelos fatores físicos intrínsecos ao método. Entre esses fatores, destacam-se o espalhamento atmosférico, a reflexão especular na superfície da água, o espalhamento na coluna d'água e a

reflexão difusa do fundo (Lee et al., 1999; Gao, 2009; Stumpf et al., 2003; Mobley et al., 2005).

Além disso, as relações matemáticas que fundamentam a metodologia de Stumpf, ao serem aplicadas as transformações logarítmicas às radiâncias observadas em cada pixel, intensificam exponencialmente perturbações de pequena magnitude, ampliando, por consequência, as variações associadas à Relação Sinal-Ruído (SNR)

(e.g., Stumpf et al., 2003; Ashpahq et al., 2021; Bergsma et al., 2021).

De acordo com a literatura, a aplicação de filtros de mediana constitui uma abordagem eficaz para a

atenuação de ruídos associados à BDS, preservando as características espectrais essenciais ao processamento (Stumpf et al., 2003; Caballero et al., 2019; Evagorou et al., 2022).

RESULTADOS

Modelos batimétricos derivados por satélites

Para as imagens Landsat-8, verificou-se que a a BDS B2/B3 apresentou o melhor resultado quanto à variância de dados, com maior coeficiente de determinação ($R^2=0,8319$), bem como melhores MAE (1,98 m) e RMSE (2,42 m). A fórmula B1/B3 exibiu resultados semelhantes

($R^2=0,8295$, MAE=1,99 e RMSE=2,44) devido à proximidade existente entre os comprimentos das bandas espectrais presentes nos sensores do Landsat-8: Banda B2 (azul): 0,450 a 0,515 μm e Banda B1 (azul costeiro): 0,433 a 0,453 μm . A tabela 2 apresenta os resultados obtidos para cada imagem e respectivas razão de bandas utilizadas.

Tabela 2 - Resultados obtidos

#	Satélite	Data de aquisição	Razão entre Bandas	Equação de calibração	R^2	MAE	RMSE
A	LANDSAT 8	08/ago/17	B2/B3	$y = -1.084,9x + 1.064,1$	0,83	1,98	2,42
B	LANDSAT 8	08/ago/17	B1/B3	$y = -629,18x + 604,79$	0,83	1,99	2,44
C	LANDSAT 8	08/ago/17	B1/B2	$y = -1.411,8x + 1.383,2$	0,79	2,13	2,70
D	SENTINEL 2	26/jul/22	B2/B3	$y = -571,13x + 551,71$	0,90	1,41	1,89
E	SENTINEL 2	31/ago/18	B2/B3	$y = -358,95x + 347,9$	0,72	2,39	3,11
F	SENTINEL 2	11/abr/24	B2/B3	$y = -842,1x + 840,84$	0,61	2,92	3,71

Estes testes realizados com dados do sensor Landsat-8 OLI indicaram que a razão entre as bandas azul e verde (B2/B3) apresentou o melhor desempenho, sem evidências de ganhos significativos decorrentes das demais variações testadas (B1/B3) e (B1/B2).

Diante desse resultado, os procedimentos aplicados às imagens Sentinel-2 foram conduzidos utilizando exclusivamente essa relação espectral (B2/B3).

O processamento de imagens apresentando percentuais maiores de cobertura de nuvens resultou em degradação substancial da qualidade dos produtos batimétricos gerados, como era esperado, e em consonância com o que a literatura indica. Para a mesma área de estudo, R^2 obtido foi de 0,83, MAE=1,98m e RMSE=2,42m, a partir de imagens com nebulosidade de 7,90% para a cobertura geral da cena.

Em contraste, quando foram utilizadas imagens contendo acima de 35% de cobertura média de nuvens, observou-se uma queda acentuada do R^2 para 0,04, e aumentos significativos dos erros MAE=4,84m e RMSE=5,78m. Em ambos os modelos avaliados, as estimativas de profundidade abrangeram valores de até 30 metros.

A figura 3 apresenta os gráficos de dispersão, respectivas linhas de tendência e coeficientes de determinação correspondentes para cada imagem processada, conforme especificado nas tabelas 1 e 2.

As análises baseadas em imagens Sentinel-2 evidenciaram desempenho robusto, com coeficientes de determinação superiores a 0,85. Destaca-se a imagem de 26 jul. 2022, cujo $R^2=0,90$; MAE=1,41m e RMSE=1,89m indicam o melhor ajuste obtido, resultado coerente com a maior resolução espacial oferecida pelo sensor europeu MSI, quando comparado ao Landsat-8 OLI. O valor de $R^2 = 0,90$ indica que o modelo empírico empregado na derivação batimétrica é capaz de explicar aproximadamente 90% da variabilidade observada nos dados de profundidade da carta náutica.

Com o objetivo de avaliar a aplicabilidade do método, procedeu-se à análise comparativa entre as profundidades estimadas e as profundidades observadas na carta náutica, disponibilizadas pela DHN. Para estabelecer essa relação, foram elaborados mapas de profundidades resultantes da BDS, contendo os valores modelados exatamente nas mesmas coordenadas dos pontos de profundidade de referência fornecidos pela DHN, considerando as profundidades até 35 m.

Adicionalmente, com o emprego do método de interpolação por krigagem ordinária, com células de 100 m, foram gerados mapas destinados a representar a distribuição espacial das diferenças entre as profundidades estimadas e as profundidades da carta náutica. Para tal, foram utilizados os valores em módulo das diferenças (profundidade estimada

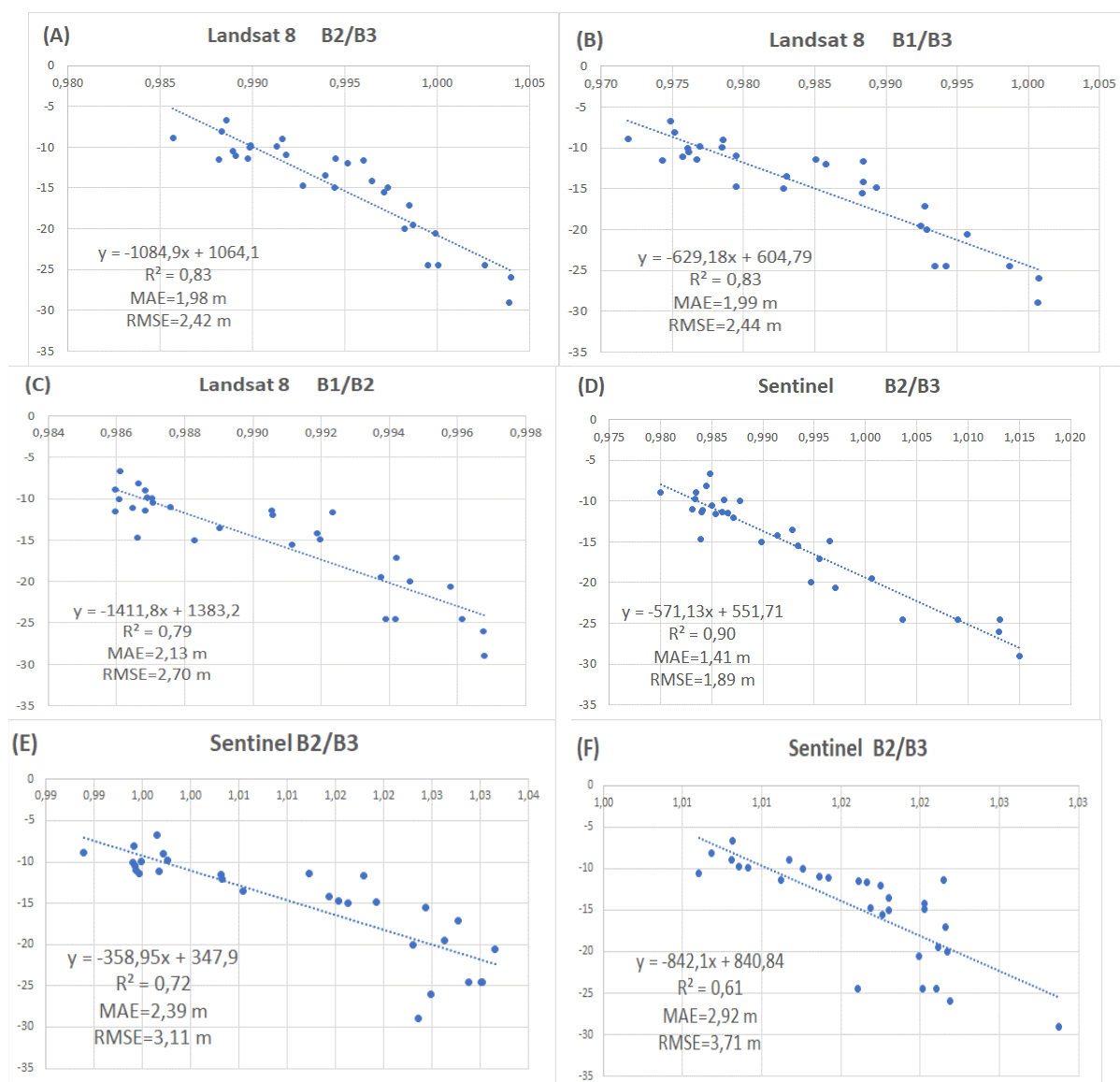


Figura 3 - Gráficos de dispersão, respectivas linhas de tendências lineares e coeficientes de determinação

– profundidade real), de modo a evidenciar a ordem de grandeza desses desvios e permitir a identificação de padrões espaciais dos resíduos para cada processamento realizado na área estudada (Figuras. 4 e 5).

De um modo geral, os mapas de resíduos apresentam valores mais baixos de erro (0-2 m) em áreas centrais e parte da plataforma interna, sugerindo forte concordância com as medições da Marinha.

Áreas com erro moderado (2–5 m) são distribuídas de maneira localizada. Como já era esperado, as diferenças de valores entre a batimetria estimada e a de referência atinge maiores desvios (5–10 m e >10 m) conforme a profundidade aumenta, onde o modelo perde desempenho, resultado da atenuação óptica que reduz a sensibilidade espectral.

Para as imagens Sentinel (Figura 5), no

primeiro par (a–b), relativo à cena de 26 jul. 2022, e combinação B2/B3 - que apresentou os resultados mais expressivos, com $R^2=0,90$, observa-se elevada concordância entre os valores modelados e as profundidades da carta náutica.

Verifica-se predominância de erros inferiores a 1 m, abrangendo uma extensa área, com apenas algumas regiões de discrepância mais elevada, especialmente no setor leste, onde a atenuação óptica tende a comprometer a resposta espectral, como já era esperado. No segundo par (c–d), referente à imagem datada de 31 ago.2018 (B2/B3) nota-se aumento da variabilidade espacial dos resíduos, com maior presença de valores entre 2 e 5 m e núcleos pontuais de erro acima de 5 m. Esse comportamento indica menor estabilidade do processamento.

Por fim, no terceiro par (e–f), análise B2/B3, referente à imagem de 11 abr. 2024 observa-se

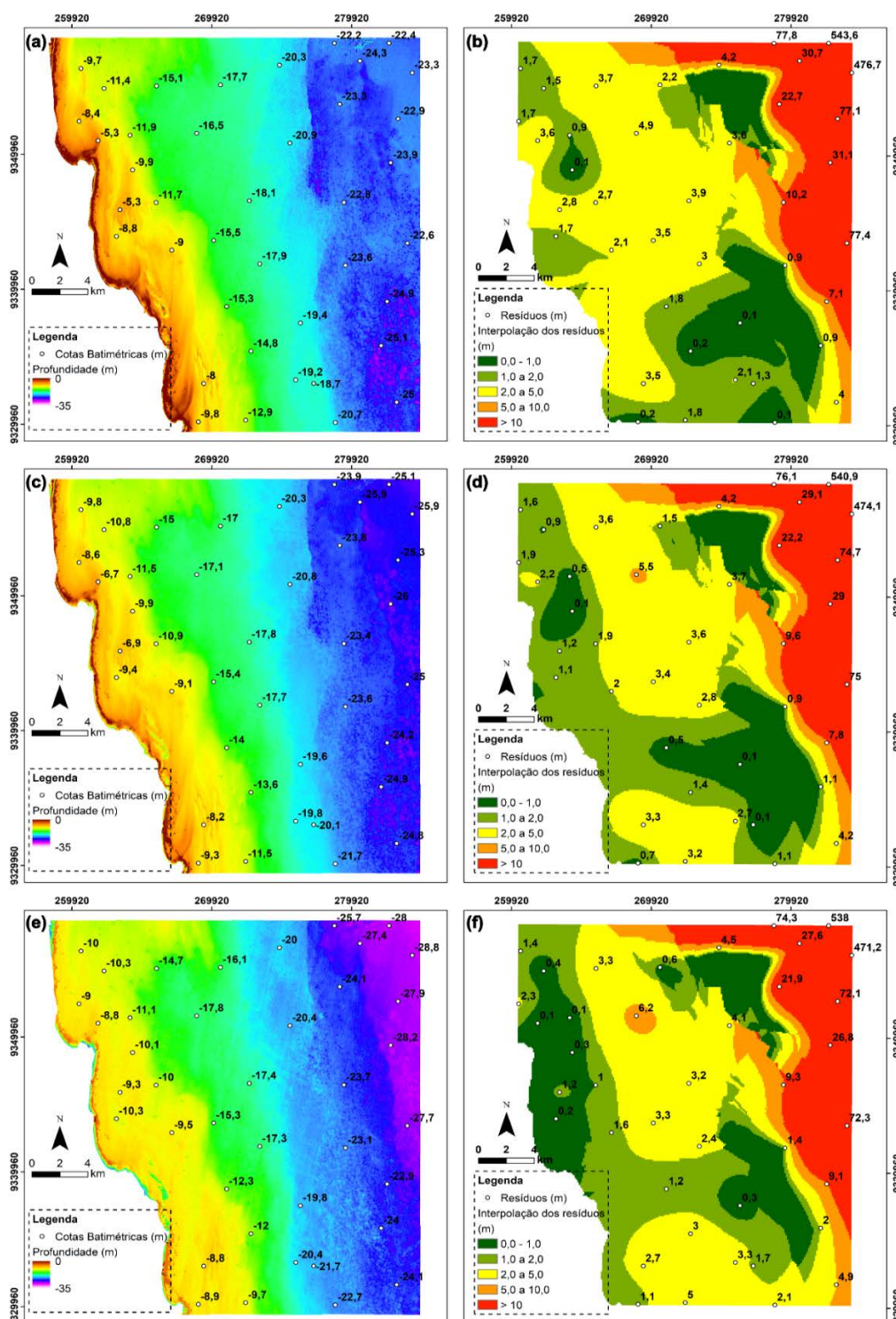


Figura 4 - À esquerda os mapas batimétricos resultantes da BDS apresentados em formato raster, e à direita, os respectivos mapas das diferenças entre as profundidades estimadas e reais. (a) e (b) Imagem Landsat-8, de 08 ago. 2017, razão de bandas B2/B3; (c) e (d) Imagem Landsat-8, de 08 ago. 2017, razão de bandas B1/B3; (e) e (f) Imagem Landsat-8, de 08 ago. 2017, razão de bandas B1/B2

novamente um padrão mais coeso, no qual as estimativas batimétricas apresentam transições mais homogêneas e os resíduos se distribuem majoritariamente abaixo de 2 m na porção interna da plataforma.

Apesar disso, ainda ocorrem discrepâncias mais pronunciadas a leste, reproduzindo o padrão observado nos demais processamentos.

Aplicação de filtros de mediana

Os filtros de mediana foram aplicados aos resultados da imagem de 26 jul. 2022, que apresentou o melhor desempenho estatístico ($R^2=0,90$; $MAE=1,41$ m e $RMSE=1,89$ m) e evidenciou uma distribuição de resíduos consistente, com predominância de erros inferiores a 1,0 m, conforme previamente observado.

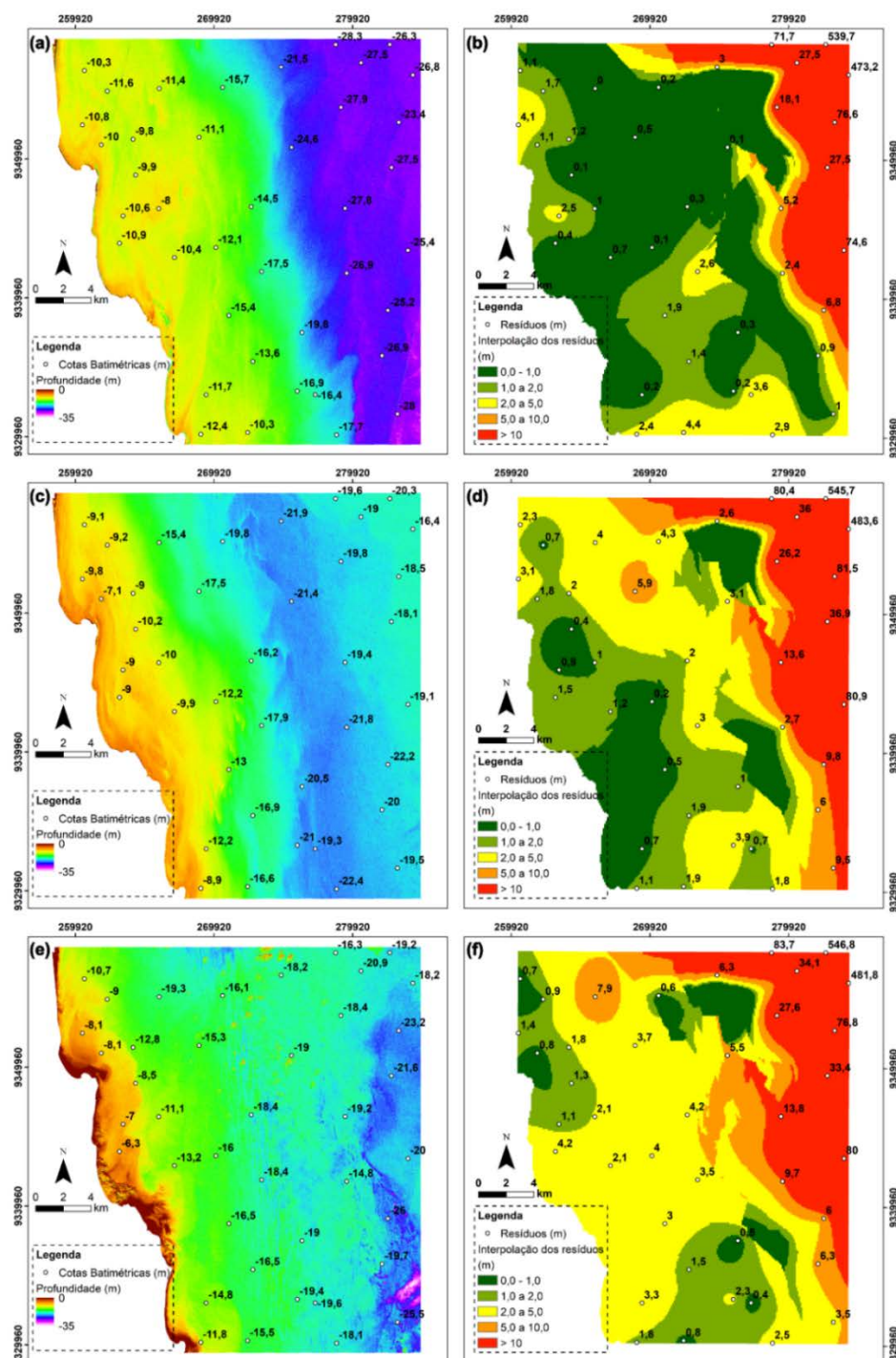


Figura 5- À esquerda os mapas batimétricos resultantes da BDS apresentados em formato raster, e à direita, os respectivos mapas das diferenças entre as profundidades estimadas e reais. (a) e (b) Imagem Sentinel-2, de 26 jul. 2022, razão de bandas B2/B3; (c) e (d) Imagem Sentinel-2, de 31 ago. 2018, razão de bandas B2/B3; (e) e (f) Imagem Sentinel-2, de 11 abr. 2024, razão de bandas B2/B3.

A análise dos resultados apresentados na tabela 3 evidencia o impacto da aplicação de filtros de mediana com matrizes de diferentes tamanhos (3×3, 5×5, 9×9 e 15×15) sobre as métricas de desempenho R^2 , MAE e RMSE. Sem filtragem, os dados apresentam os maiores valores de MAE e RMSE e um R^2 inferior às demais condições, demonstrando a presença considerável de ruído.

Com a aplicação do filtro de mediana 3×3,

observa-se uma melhoria sensível, com elevação do R^2 e redução significativa dos erros, o que confirma a eficácia da técnica para janelas pequenas, capazes de mitigar ruídos preservando detalhes estruturais.

Ao se ampliar a janela para 5×5, os resultados tornam-se ainda melhores, apresentando os menores valores de MAE e RMSE e o maior R^2 dentre todos os casos avaliados (1,06 m, 1,54 m e 0,93, respectivamente). Isso mostra que, para

Filtragem	R ²	MAE (m)	RMSE (m)
Sem filtro	0,8982	1,41	1,89
Mediana 3x3	0,9261	1,18	1,61
Mediana 5x5	0,9324	1,06	1,54
Mediana 9x9	0,937	1,09	1,49
Mediana 15x15	0,9388	1,09	1,46

Tabela 3 - Resultados obtidos utilizando os Filtros de Mediana para a Imagem Sentinel-2, de 26 jul. 2022

esse conjunto específico de dados, o tamanho 5×5 oferece o melhor equilíbrio entre suavização do ruído e preservação das bordas. Já os filtros 9×9 e 15×15 continuam proporcionando melhorias em relação à ausência de filtragem, mas apresentam desempenho inferior aos filtros menores.

A partir dessas dimensões, a janela maior passa a suavizar excessivamente os detalhes da imagem, reduzindo a nitidez e provocando uma diminuição na qualidade geral, ainda que mantendo alguma eficácia na eliminação do ruído.

Em síntese, a análise evidencia que matrizes menores, como 3×3 e especialmente 5×5, oferecem o melhor desempenho entre redução do ruído e manutenção das características essenciais da imagem. Janelas maiores tendem a comprometer a definição dos detalhes, reforçando que a escolha do tamanho da matriz deve considerar tanto o tipo de ruído quanto a necessidade de preservar informações estruturais relevantes.

Modelagem do terreno

A aplicação da BDS na área de estudo possibilitou a extração de perfis longitudinais e transversais, além da geração de superfícies batimétricas, evidenciando alinhamentos morfológicos proeminentes - como altos e depressões lineares - e sugerindo a possível presença de dunas subaquáticas, dada a repetitividade e organização espacial das feições. Contudo, as limitações inerentes ao método impediram uma análise geomorfológica detalhada. A presença de ruído, intensificada por fatores físico-espectrais e pelas transformações matemáticas do modelo, introduziu variabilidade suficiente para restringir e limitar a interpretação de feições de menor escala, embora não invalide os resultados alcançados.

A aplicação de filtros de mediana em diferentes configurações atenuou irregularidades pontuais, suavizando flutuações indesejadas e realçando elementos morfológicos espacialmente consistentes. A comparação entre os resultados pré e pós-filtragem evidenciou um aprimoramento expressivo na qualidade estrutural dos perfis, favorecendo interpretação mais estável

das tendências batimétricas regionais.

A figura 6 apresenta as superfícies geradas e o perfil A-A' sem filtragem e após aplicação de Filtros de Mediana com janelas 3×3, 5×5, 9×9 e 15×15.

O perfil A-A' revela quatro segmentos distintos: (i) 0–5 km: zona praticamente horizontal com declividades entre 0,02% e 0,06%, onde oscilações refletem micro-irregularidades do fundo ou ruídos residuais; (ii) 5–10 km: rugosidade suave com inclinações entre 0,03% e 0,10%, indicando transição fisiográfica gradual; (iii) 10–16 km: rampa principal com declividades entre 0,06% e 0,11%, configurando a transição morfológica mais expressiva do transecto; (iv) 16–25 km: estabilização batimétrica com declividades entre 0,00% e 0,05%, caracterizando platô interno de relevo suave da plataforma.

A figura 6 apresenta produtos derivados do Sentinel-2A. Em (a), imagem de 11 abr. 2024 em composição RGB (B4-B3-B2); em (b), a Banda 2 individualizada revela estruturas lineares norte-sul com alternância entre altos e depressões, sugerindo dunas subaquáticas ou formas sedimentares alinhadas a fluxos hidrodinâmicos.

O menor comprimento de onda do espectro azul proporciona maior penetração na coluna d'água, explicando sua eficácia na detecção batimétrica em águas claras.

A BDS de 26 jul. 2022 (c) mostra que a turbidez compromete substancialmente a identificação dessas feições, enquanto a BDS de 11 abr. 2024 (d) as preserva parcialmente.

Os perfis B-B' em (e, f) apresentam elevado nível de ruído. Em (e), apesar do ruído, observa-se tendência consistente de aumento de profundidade; em (f), essa tendência é menos evidente, mas altos e depressões compatíveis com as estruturas planimétricas permanecem identificáveis. No conjunto, a imagem de 11 abr. 2024 foi a que apresentou melhor capacidade de revelar as formas submersas, reforçando o potencial da BDS para a interpretação morfodinâmica e para a compreensão da organização espacial das feições na área investigada.

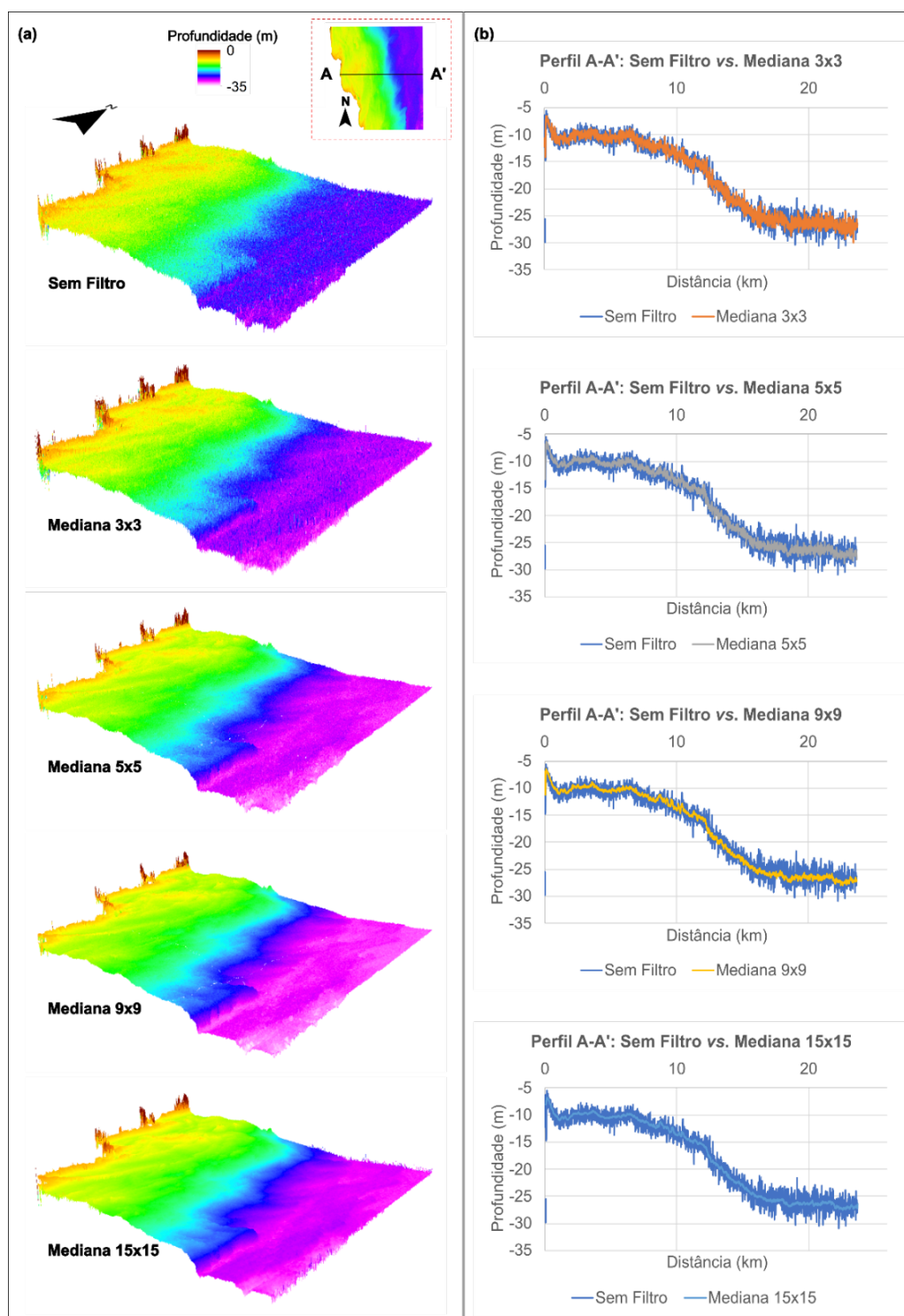


Figura 6 - Superfícies e perfis gerados com a aplicação de filtros de mediana (imagem Sentinel-2, de 26 jul 2022).

DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir do processamento da imagem Sentinel-2 de 22 jul. 2022, após a aplicação do filtro de mediana 5×5, apresentaram $R^2 = 0,93$, MAE = 1,06 m e RMSE = 1,54 m. Esses valores são compatíveis com estudos realizados em ambientes tropicais e subtropicais. Evagorou et al. (2019), por exemplo, obtiveram R^2 de 0,95 e RMSE de 1,39 m em Limassol, Chipre, utilizando imagens Sentinel-2.

De modo semelhante, Traganos et al. (2018)

alcançaram R^2 de 0,90 e RMSE de 1,67 m em três áreas do Mar Egeu, resultados ligeiramente inferiores aos observados neste estudo. Por outro lado, Saeed et al. (2021), aplicando o método em Safaga, Egito, reportaram coeficientes de determinação consideravelmente inferiores (R^2 entre 0,42 e 0,71) utilizando Landsat-8, indicando que a menor resolução do satélite Landsat aliado às condições ambientais locais exercem influência determinante no desempenho dos algoritmos empíricos.

A convergência dos resultados estatísticos deste trabalho com estudos em águas claras oligotróficas (Mediterrâneo Oriental, Mar Egeu, no trabalho de Traganos et al., 2018) e a divergência parcial com ambientes de maior turbidez (Mar Vermelho; trabalho de Saeed et al., 2021) indicam que a plataforma leste do RN apresenta características ópticas viáveis à aplicação da BDS.

A superioridade de imagens Sentinel-2 sobre imagens Landsat-8 observada neste estudo (diferença de $R^2 = 0,07$) constitui uma confirmação quantitativa da hipótese de que a resolução espacial exerce papel determinante na acurácia da BDS em ambientes costeiros heterogêneos.

Lee et al. (2021) destacam que a resolução espacial de 10 m do Sentinel-2, comparada aos 30 m do Landsat-8, permite capturar variações espaciais de pequena escala em propriedades ópticas da água e características do substrato.

Traganos et al. (2018) aplicaram igualmente filtros de mediana, com uma janela de 3×3 , evidenciando que esta abordagem é fundamental para atenuar interferências de alta frequência associadas aos processos de BDS.

A progressão observada no presente estudo (melhoria gradual com janelas maiores até 5×5 , seguida de ligeira degradação com janelas maiores) sugere a existência de um limiar ótimo de suavização, abaixo do qual predomina o ruído espectral e acima do qual ocorre perda de detalhes batimétricos. Esta relação não-linear entre tamanho de janela e acurácia representa uma contribuição metodológica relevante para o refinamento de protocolos de BDS.

A restrição da aplicabilidade da BDS a profundidades superiores a 30 m, conforme amplamente reportado na literatura e confirmado neste estudo, encontra explicação nos princípios físicos da propagação da luz em meio aquático. Lee et al. (2021) desenvolveram um sistema de medida de confiança pixel a pixel para produtos batimétricos derivados de satélite, demonstrando que a incerteza aumenta exponencialmente com a profundidade devido à atenuação diferencial da radiação eletromagnética.

Na área de estudo, a análise dos perfis batimétricos revelou que além dos 20 m a correlação entre valores estimados e medidos diminui substancialmente, padrão consistente com as observações de Saeed et al. (2021), que identificaram limitações similares da técnica em profundidades superiores a 20 m em águas tropicais.

Outro aporte deste trabalho consistiu na caracterização espacial dos erros batimétricos por meio de mapas de resíduos, os quais evidenciaram padrões sistemáticos: subestimação das profundidades em áreas rasas (<6 m) e superestimação em zonas mais profundas (>17 m).

De modo semelhante, Lee et al. (2021) propuseram uma classificação de confiança baseada na similaridade espectral e no erro absoluto relativo, oferecendo um enquadramento metodológico para a quantificação objetiva dessas incertezas espacialmente variáveis. A incorporação desses sistemas de distribuição espacial de resíduos aos produtos de BDS constitui um avanço essencial para a consolidação e adoção operacional da técnica.

A influência adversa da cobertura de nuvens, evidenciada neste estudo pela drástica redução do R^2 de 0,83 para 0,04 quando a nebulosidade média aumentou de 7,90% para 35,72%, constitui um dos principais fatores limitantes da BDS em regiões tropicais. Traganos et al. (2018) contornaram parcialmente esta limitação implementando composições temporais medianas de múltiplas imagens Sentinel-2, abrangendo o período de agosto a dezembro de 2016.

Esta estratégia de composição multitemporal reduz significativamente a probabilidade de contaminação por nuvens e atenua efeitos de variabilidade nas condições da superfície marinha (Sunglint e ondas) e da coluna d'água (turbidez sazonal).

Evagorou et al. (2019) demonstraram através de análise de série temporal de 12 imagens mensais que a acurácia da BDS varia sazonalmente, com melhores resultados no verão mediterrânico ($RMSE = 1,39$ m em junho) comparado ao outono ($RMSE = 2,56$ m em novembro).

Para a plataforma do RN, onde as imagens foram selecionadas individualmente, a implementação de técnicas de composição temporal representa uma oportunidade de aprimoramento metodológico futuro, particularmente considerando a elevada frequência de revisita do Sentinel-2 (5 dias). Os parâmetros estatísticos de alta qualidade alcançados (com R^2 entre 0,90 a 0,94) oferecem uma base sólida para o desenvolvimento e treinamento de abordagens mais complexas, como métodos híbridos ou algoritmos de Machine Learning (ML).

Esses estudos podem explorar a BDS em águas ligeiramente mais profundas ou turvas, onde os métodos empíricos tradicionais atingem limitações próprias de sua abordagem técnica.

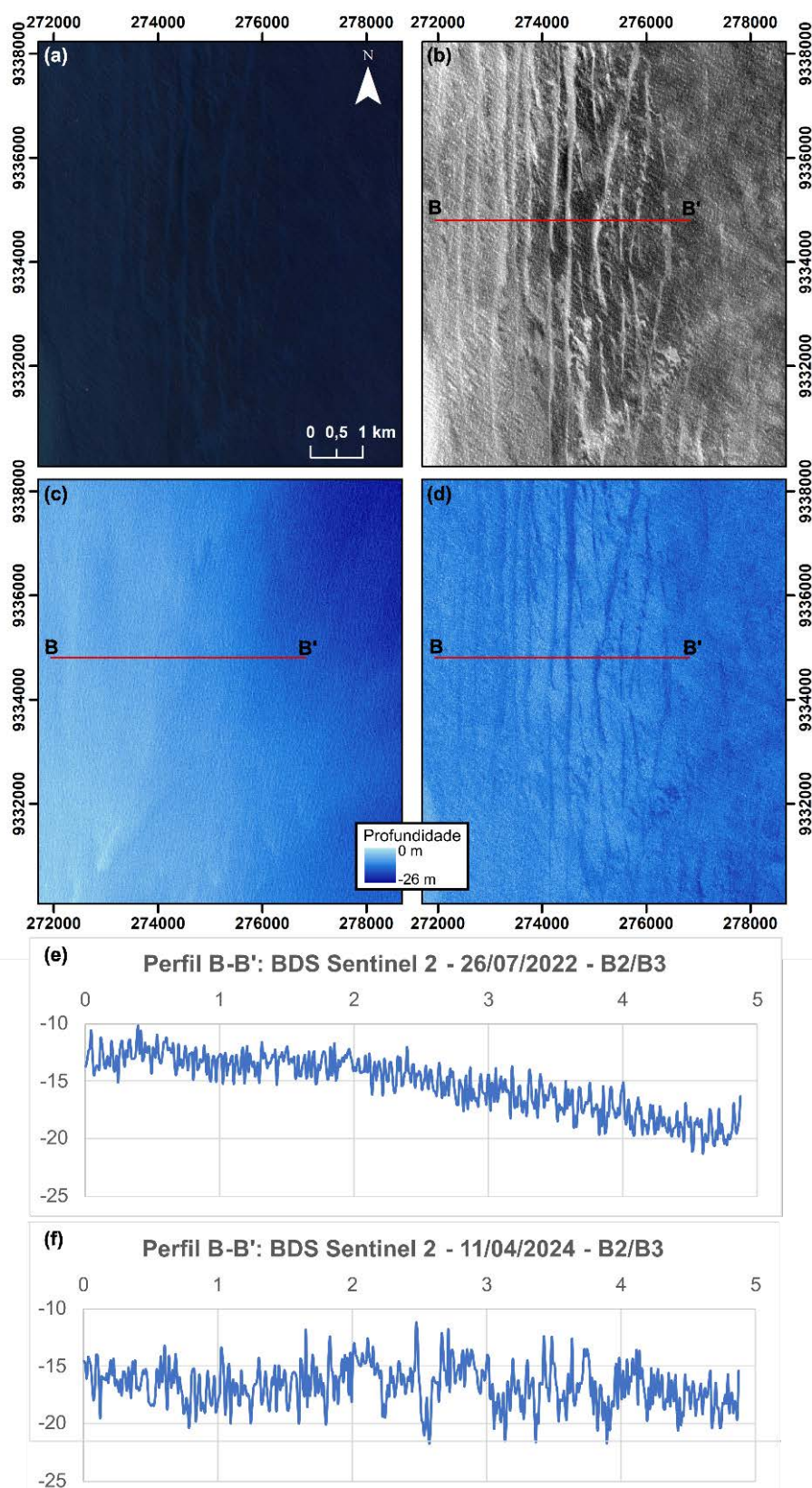


Figura 7 - Produtos de BDS obtidos a partir de imagens Sentinel adquiridas em 26 jul. 2022 e 26 jul. 2022

Os resultados confirmam que plataformas tropicais rasas com águas relativamente claras constituem ambientes adequados para aplicação operacional da técnica, desde que observadas as limitações metodológicas identificadas (profundidade <30 m, cobertura de nuvens <10%,

aplicação de filtros de mediana).

As implicações metodológicas deste trabalho transcendem o contexto regional, oferecendo protocolo replicável para outras plataformas continentais brasileiras e tropicais.

A comparação entre Sentinel-2 e Landsat-8, a

avaliação sistemática de diferentes tamanhos de janela de filtros de mediana, e a caracterização espacial dos erros batimétricos constituem contri-

buições que podem fundamentar o desenvolvimento de sistemas operacionais de monitoramento batimétrico baseados em satélites.

CONCLUSÕES

Este estudo representa a primeira aplicação sistemática da BDS na plataforma continental leste do Rio Grande do Norte. Foram testados três modelos empíricos para a estimativa da profundidade com base em valores de pixel: azul-verde (B2/B3), azul costeiro-verde (B1/B3) e azul costeiro-azul (B1/B2).

O modelo proposto por Stumpf (2003), que utiliza a razão entre as bandas azul e verde (B2/B3), apresentou o melhor desempenho, com elevada correlação entre as profundidades da carta náutica e as estimadas. Esse resultado confirma a hipótese empírica de Stumpf (2003), de que a combinação das bandas azul e verde constitui o modelo mais adequado para a estimativa batimétrica.

Os resultados também indicaram padrões distintos em áreas mais profundas, que poderão ser explorados em estudos futuros. Nas regiões rasas, especialmente até 30 metros, observou-se uma forte correspondência entre as estimativas e as medições de campo, confirmando a robustez do modelo de Stumpf, bem como sua eficácia para a área de estudo.

A metodologia possibilitou a extração de perfis longitudinais e transversais, revelando padrões morfológicos de maior escala, como alos, depressões lineares e possíveis dunas subaquáticas. Embora o ruído espectral e a turbidez tenham limitado análises de maior detalhamento, a BDS demonstrou capacidade para delinear tendências batimétricas regionais e identificar transições fisiográficas mais representativas.

O estudo evidencia que a combinação entre modelos empíricos de BDS, krigagem dos resíduos e filtragem por mediana constitui uma estratégia robusta e de fácil implementação para a geração de batimetrias operacionais em ambientes sujeitos a elevado ruído espectral. Um dos principais avanços metodológicos identificados foi o desempenho superior do filtro de mediana com janela

5×5, o qual apresentou os melhores indicadores estatísticos ($R^2 = 0,9324$; MAE = 1,06 m; RMSE = 1,54 m), configurando um protocolo potencial para aplicações em áreas com características semelhantes.

Esse procedimento apresenta elevada transferibilidade, podendo ser adaptado a outras bacias costeiras brasileiras e utilizado como referência em estudos de caracterização geomorfológica e monitoramento de variações batimétricas em escala regional. A filtragem por mediana mostrou-se fundamental para aprimorar a BDS ao reduzir ruídos intensificados por processos físico-ópticos e pelas transformações logarítmicas inerentes ao método.

O potencial de aplicação da BDS para mapeamento de extensas áreas da plataforma continental brasileira, particularmente nas regiões Norte e Nordeste, onde os dados hidrográficos são limitados, reforça a necessidade de investimentos em pesquisa e no desenvolvimento de sistemas operacionais baseados nessa tecnologia. Entretanto, a BDS deve ser aplicada como ferramenta complementar aos levantamentos acústicos tradicionais, permitindo fornecer informação espacialmente contínua e temporalmente repetível.

A convergência dos resultados aqui obtidos com estudos ocorridos em diferentes contextos geográficos reforça a robustez e transferibilidade da metodologia, desde que devidamente adaptada às condições locais. A expressiva redução de custos em levantamentos hidrográficos de águas rasas posiciona a BDS como uma opção especialmente promissora para estudos preliminares de viabilidade em projetos de infraestrutura marinha, tais como implantação de oleodutos, cabos e estruturas de energia submarinos, parques eólicos e plataformas *offshore*. Essa alternativa representa uma redução significativa de custos nas fases de prospecção, seleção de locais e monitoramento de riscos.

AGRADECIMENTOS

Este estudo integra a Tese de Doutorado do primeiro autor, Ricardo Carlos Carvalho, que agradece ao Comando da Aeronáutica pela autorização concedida para a realização da missão PLAMENS. Os autores também expressam seu agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa de MPG (PQ: 302375/2022-8). Por fim, estendem-se os agradecimentos aos revisores e ao corpo editorial desta revista científica.

REFERÊNCIAS

- ASHPHAQ, M.; SRIVASTAVA, P.K.; MITRA, D. Review of near-shore satellite derived bathymetry: Classification and account of five decades of coastal bathymetry research, *Journal of Ocean Engineering and Science*, v. 6, n. 4, 2021, p. 340-359, ISSN 2468-0133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joes.2021.02.006>, 2021.
- BERGSMA, E. W.J.; ALMAR, R.; ROLLAND, A.; BINET, R.; BRODIE, L. L.; BAK, A. S. Coastal morphology from space: a showcase of monitoring the topography-bathymetry continuum. *Remote Sensing of Environment*, v. 261, p. 112469, 2021. ISSN 0034-4257, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112469>, 2021.
- BRANDO, V.; ANSTEE, J.M.; WETTLE, M.; DEKKER, A.G.; PHINN, S.R.; ROELSFSEMA, C.A. Physics Based Retrieval and Quality Assessment of Bathymetry from Suboptimal Hyperspectral Data. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, n. 4, p. 755–770, 2009.
- CABALLERO, I. & STUMPF, R. P. Towards Routine Mapping of Shallow Bathymetry in Environments with Variable Turbidity: Contribution of Sentinel-2A/B Satellites Mission. *Remote Sensing of Environment*, 12, 451. 10.3390/rs12030451, 2020a.
- CABALLERO, I. & STUMPF, R.P. Atmospheric correction for satellite-derived bathymetry in the Caribbean waters: From a single image to multi-temporal approaches using Sentinel-2A/B. *Opt. Express*, 28, 11742–11766, 2020b.
- CABALLERO, I & STUMPF, R. P. On the use of Sentinel-2 satellites and lidar surveys for the change detection of shallow bathymetry: The case study of North Carolina inlets. *Coastal Engineering*. 169. 103936. 10.1016/j.coastaleng.2021.103936, 2021.
- CABALLERO, I.; STUMPF, R.P.; MEREDITH, A. Preliminary Assessment of Turbidity and Chlorophyll Impact on Bathymetry Derived from Sentinel-2A and Sentinel-3A Satellites in South Florida. *Remote Sensing of Environment*, vol. 11, n. 645. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11060645>, 2019.
- DAMASCENO, U.; GOMES, M.P.; VITAL, H. Imageamento Acústico da Plataforma Interna Adjacente à Praia de Ponta Negra - RN. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 44, p. 42626, 2021.
- DARMANIN, G.; GAUCI, A.; DEIDUN, A.; GALONE, L.; D'AMICO, S. Satellite-Derived Bathymetry for Selected Shallow Maltese Coastal Zones. *Applied Sciences*, v. 13, n. 9, p. 5238, 2023.
- DAVIDSON-ARNOTT, R.; BAUER, B.; HOUSER, C. Introduction to Coastal Processes and Geomorphology. Cambridge University Press, 2nd Revised edition, October, 2019, ISBN-13, 978-1108439862, 2019.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN, Marinha do Brasil). 2023. Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos, outubro de 2023. Disp. em: <<https://www.marinha.mil.br/dhn/?q=pt-br/node/266>>. Acesso em: 07 mai. 2025.
- EUGENIO, F.; MARCELLO, J.; MARTIN, J. High-resolution maps of bathymetry and benthic habitats in shallow-water environments using multispectral remote sensing imagery. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, v. 53, n. 7, p. 3539 – 3549, 2015.
- EVAGOROU, E.; ARGYRIOU, A.; PAPADOPOULOS, N.; METTAS, C.; ALEXANDRAKIS, G.; HADJIMITSIS, D. Evaluation of Satellite-Derived Bathymetry from High and Medium-Resolution Sensors Using Empirical Methods. *Remote Sensing*, v. 14, n. 3, p. 772, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14030772>, 2022.
- EVAGOROU, E.; METTAS, C.; AGAPIOU, A.; THEMISTOCLEOUS, K.; & HADJIMITSIS, D.G. Bathymetric maps from multi-temporal analysis of Sentinel-2 data: The case study of Limassol, Cyprus. *Advances in Geosciences*, v. 45, p. 397-407, 2019.
- GAO, J. Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. *Progress in Physical Geography*, v. 33, n. 1, p. 103-116, 2009.
- GOES, E. R. & FERREIRA JÚNIOR, A. V. Caracterização Morfossedimentar da Plataforma Continental Brasileira (Morphosedimentary characterization of the Brazilian Continental Shelf). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 10, p. 1595-1613, 2017.
- GOMES, M.P. & VITAL, H. Revisão da compartimentação geomorfológica da Plataforma Continental Norte do Rio Grande do Norte, Brasil. *Revista Brasileira de Geologia*, v. 40, n. 3, p. 321–329, 2010. DOI:10.25249/0375-7536.2010403321329,
- GOMES, M. P.; VITAL, H.; STATTEGGER, K.; SCHWARZER, K. Bedrock control on the Assu incised valley morphology and sedimentation in the Brazilian equatorial shelf. *Int. J. Sediment Res.* v. 31, p. 181 – 193, 2016.
- GOMES, M.P.; VITAL, H.; DROXLER, A.W. Terraces, reefs, and valleys along the Brazil northeast outer shelf: deglacial sea-level archives? *Geo-Mar Lett.*, v. 40, p. 699–711, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00367-020-00666-4>,
- LAPORTE, J.; DOLOU, H.; AVIS, J.; ARINO, O. Thirty years of Satellite Derived Bathymetry: The charting tool that Hydrographers can no longer ignore. *The International Hydrographic Review*, v. 24, p. 129-154, 2020.
- LEDER, T.D., & LEDER, N. Optimal conditions for satellite derived bathymetry (SDB) - case study of the Adriatic Sea. In: Conference: FIG Working Week 2020 -At: Amsterdam April 2020, 2020.
- LEE, Z.; CARDER, K.L.; MOBLEY, C.D.; STEWARD, R.G.; PATCH, J.S. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization, *Appl. Opt.* V. 38, p. 3831-3843, 1999.
- LEE, Z.L.; SHANGGUAN, M.; GARCIA, R.A.; LAI, W.; LU, X.; WANG, J.; YAN, X. Confidence Measure of the Shallow-Water Bathymetry Map Obtained through the Fusion of Lidar and Multiband Image Data. *J Remote Sens.* 2021. DOI:10.34133/2021/9841804,
- LYSENGA, D.R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, v. 17, n. 3, p. 379-383, 1978.
- MASSELINK, G.; HUGHES, M.G.; KNIGHT, J. Introduction to coastal processes and geomorphology. Routledge, London, England. 432 p. ISBN 13:978-1-4444-12240-4.
- MATOS, M.; AMARO, V.; FORTES, C.; SCUDELARI, A. Interação entre ondas oceânicas e fundo marinho: resultados na plataforma continental setentrional do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15. 2014.
- MOBLEY, C.D.; BOWLES, J.H.; DOWNES, T.; LEATHERS, R.A. Interpretation of hyperspectral remote-sensing imagery by spectrum matching and look-up tables. *Applied Optics*, v. 44, n. 17, p. 3576-3637, 2005.
- MUEHE, D. & CARVALHO, V. Geomorphology, sediment distribution and transport on the inner continental shelf between Ponta de Saquarema and Cabo Frio (RJ). *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 41, p. 01-12, 1992.
- ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL (OHI). IHO Standards for Hydrographic Surveys. Monaco: International Hydrographic Organization. 6.1.0 ed., October 2022. Disp. em: <https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_Edition_6.1.0.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2025, 2022.
- PACHECO, A.; HORTA, J.; LOUREIRO, C.; FERREIRA, Ó. Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat-8 images: A tool for coastal monitoring in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*, v. 159, p. 102-115, 2015.
- POLCYN, F.C. & ROLLIN, R.A. Remote Sensing Techniques for the Location and Measurement of Shallow-Water Features. *Spacecraft Oceanography Project*, 1–80, 1969.
- SAEED, R.; ABDELRAHMAN, S. M.; NEGM, A. Satellite-Derived Bathymetry Using Landsat-8 Imagery for Safaga

- Coastal Zone, Egypt, *Acta Marisiensis. Seria Technologica*, v. 18, n.1, p. 8-15, 2021. <https://doi.org/10.2478/amset-2021-0002>, 2021.
- SANTOS, C.L.A.; VITAL, H.; AMARO, V.E.; KIKUCHI, R.K.P. Mapeamento de recifes submersos na costa do Rio Grande do Norte, NE Brasil: Macau a Maracajau. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25 (Supl. 1): p. 27-36, 2007.
- SANTOS, J.; SANTOS, L.; FONTES, L. C. S. Mapeamento Geomorfológico e Sedimentar de Paleolinas de Costa na Plataforma Continental Sul de Alagoas. *Revista GeoNordeste*, p. 60-79, 2019.
- STUMPF, R. P.; HOLDERIED, K.; SINCLAIR, M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology And Oceanography*, v. 48, p. 547-556, 2003. DOI: 10.4319/lo.2003.48.1
- TRAGANOS, D.; POURSANIDIS, D.; AGGARWAL, B.; CHRYSOULAKIS, N.; REINARTZ, P. Estimating Satellite-Derived Bathymetry (SDB) with the Google Earth Engine and Sentinel-2. *Remote Sensing*, v. 10, n. 6, p. 859, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10060859>, 2018.
- VITAL, H. The north and northeast Brazilian tropical shelves. In: CHIOCCI F.L. & CHIVAS, A.R. (eds.). *Continental Shelves of the World: Their Evolution During the Last Glacio-eustatic Cycle*, 41, Geological Society, London, Memoirs, p. 35-46, 2014.
- VITAL, H.; STATTEGGER, K.; AMARO, V.E.; SCHWARZER, K.; FRAZÃO, E.P.; TABOSA, W. F.; SILVEIRA, I.M. A Modern High-Energy Siliciclastic-Carbonate Platform: Continental Shelf Adjacent to Northern Rio Grande Do Norte State, North-eastern Brazil In: G. J. Hampson, R. J. Steel, P. M. Burgess, & R. W. Dalrymple (Eds.), *Recent Advances in Models of Siliciclastic Shallow-Marine Stratigraphy*, v. 90, p. 175-188, 2008. *Sepm Special Publication*. DOI: <http://dx.doi.org/10.2110>,
- VITAL, H.; GOMES, M.P.; TABOSA, W.F.; FRAZÃO, E.P.; SANTOS, C.L.A.; JÚNIOR, P.; SARAIVA, J. Characterization of the Brazilian continental shelf adjacent to Rio Grande do Norte State, NE Brazil. *Braz. J. Oceanogr.* V. 58 (SPE1), p. 43 – 54, 2010.
- VITAL, H; SILVEIRA, I.M.; LIMA, Z.M.C.; TABOSA, W.F.; SILVA, A.G.A.; SOUZA, F.E.S.; CHAVES, M.S. & GOMES, M.P. Rio Grande do Norte. In: MUEHE, D. (org.). *Panorama da Erosão Costeira no Brasil*. Brasília, MMA, p. 289-326, 2018.
- WEINER, D.M.; AMARO, V.E.; CARVALHO, I.Q.; ARAÚJO, P.V.N. Geotecnologias aplicadas na análise da dinâmica costeira na desembocadura do Rio Punaú-RN, Nordeste do Brasil. *REDE: Revista Eletrônica do PRODEMA*, v. 15, p. 21-39, 2021.
- WESTLEY, K. Satellite-derived bathymetry for maritime archaeology: Testing its effectiveness at two ancient harbours in the Eastern Mediterranean, *Journal of Archaeological Science: Reports*, v. 38, p. 103030, 2021. ISSN 2352-409X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103030>, 2021.
- ZHANG, X.; MA Y., LI Z.; ZHANG, J. Satellite derived bathymetry based on ICESat-2 diffuse attenuation signal without prior information, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 113, p. 102993, 2022. ISSN 1569-8432, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102993>, 2022.

Submetido em 7 de fevereiro de 2025

Aceito para publicação em 17 de abril de 2026