



BATIMETRIA DERIVADA POR SATÉLITE BASEADA EM ABORDAGEM DE SEGMENTAÇÃO GEOGRÁFICA

Juliane Jussara Affonso

RESUMO

Uma vez que a segurança da navegação depende do conhecimento confiável das profundidades do fundo marinho, qualquer melhoria na capacidade de derivar a batimetria é de grande interesse. Ultimamente, a técnica de Batimetria Derivada de Satélite (SDB) tem sido considerada uma alternativa para o mapeamento de águas rasas, devido algumas vantagens em relação às técnicas mais comuns de levantamento. No entanto, a acurácia é consideravelmente baixa quando comparada às tecnologias convencionais de levantamento e mapeamento. Neste contexto, este trabalho apresenta uma abordagem geográfica para melhorar a estimativa da profundidade do fundo. Utilizando imagem do *Sentinel-2A* e dados de *Airborne Lidar Bathymetry (ALB)* em *St. Thomas East End Reserve (STEER)*, nas Ilhas Virgens Americanas, o resultado obtido demonstrou a capacidade de fornecer estimativas batimétricas aprimoradas em comparação às técnicas convencionais, podendo ser utilizadas para fins de cartografia náutica.

¹ Oficial do Corpo de Engenheiros da Marinha, Graduada em Engenharia Cartográfica pela UNESP. Mestre em Mapeamento do Oceano pela CCOM/UNH. Email: juliane.affonso@marinha.mil.br

Palavras-chave: Batimetria Derivada por Satélite; abordagem geográfica; acurácia.

ABSTRACT

Because the safety of the navigation depends on accurate knowledge of the bottom depths, any improvements in the ability to derive bathymetry are of major interest. Ultimately, due to some advantages compared with the most common techniques, Satellite-Derived Bathymetry (SDB) has been considered an alternative for mapping shallow waters. However, the accuracy is considerably low when compared to conventional surveying and mapping technologies. In this context, this work presents a geographic approach to improve bottom depth estimation. Utilizing Sentinel-2A image, Airborne Lidar Bathymetry (ALB) data, in Dry-Tortugas, in the US Virgin Islands, the result demonstrated the ability in providing improved bathymetric estimates compared to conventional techniques, which can enhance the use of satellite derived bathymetry for nautical chart purposes.

Keywords: Satellite Derived Bathymetry; geographic approach; accuracy.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

A carta náutica fornece informações importantes sobre o ambiente costeiro e marinho de modo a proporcionar uma navegação segura aos navegantes. Dentre a variedade de elementos retratados, destacam-se as sondagens, linhas de costa

e curvas de profundidade. No passado, esses elementos eram tradicionalmente desenhados à mão, demandando habilidade e tempo dos profissionais envolvidos. Os avanços na tecnologia e o aumento da produção cartográfica nos últimos anos devido à transformação da carta náutica de sua forma analógica em digital tem exigido aprimorar processos por meio da automação de rotinas na compilação das cartas, além de acesso às fontes que demandem menor tempo de produção e custo reduzido (AFFONSO, 2022).

Além das necessidades de automação, existe uma grande demanda em manter as cartas atualizadas com o levantamento constante de águas rasas e de áreas que não foram levantadas anteriormente devido a diversos fatores, como o aumento do tamanho do calado dos navios que operam em canais cada vez mais limitados (KASTRISIOS & WARE, 2022) e o esforço global para mapear os oceanos até 2030 (*Seabed 2030 Project*) (GEB-CO, 2020). Dentre as técnicas tradicionais para coleta de dados batimétricos com propósito de uso em cartas náuticas, os ecobatímetros multifeixe (MBES) e monofeixe (SBES) são os comumente empregados pela comunidade hidrográfica. Embora essas tecnologias possam coletar profundidade de alta acurácia, elas apresentam algumas limitações relacionadas a custo, tempo e dificuldades de levantamento em ambientes de águas rasas.

Devido essas dificuldades, pesquisadores estudam alternativas para coleta de dado batimétrico. Neste sentido, a Batimetria Derivada de Satélite (SDB) é uma técnica econômica e promissora que utiliza



imagens ópticas de sensoriamento remoto por satélite para estimar a batimetria em áreas de águas rasas (FREIRE, 2017), que explora a física envolvida na interação dos diferentes comprimentos do espectro da luz com o fundo e coluna da água. No entanto, o SDB também apresenta algumas limitações, como a informação normalmente não poder ser obtida para além dos 30 m de profundidade e, quando comparado às técnicas convencionais de levantamento, apresenta baixa acurácia.

Apesar das limitações, trabalhos anteriores demonstraram alto potencial em estimar batimetria por imagem de satélite. No entanto, assumindo homogeneidade do fundo e da coluna d'água para toda a cena, a prática usual é adotar um modelo batimétrico global e único para toda a área. De forma a abordar áreas onde essas suposições falham, e a coluna d'água e as condições de fundo são heterogêneas, podendo vir a degradar o desempenho dos modelos globais convencionais, este trabalho apresenta uma abordagem de segmentação geográfica com o objetivo de minimizar a não uniformidade do fundo e da coluna d'água e, desta forma, melhorar a acurácia da estimativa dos dados batimétricos.

1.2. SDB

A capacidade de recuperar informações batimétricas a partir de imagens de satélite é baseada na luz solar que penetra na superfície (irradiância), percorre a coluna de água e retorna ao sensor (radiância observada). A radiação captada pelo sensor é função do comprimento de onda e da profundidade, sendo que a irradiação

decai exponencialmente com a profundidade devido a propriedades que dependem da água e seus constituintes (ASHPHAQ, 2021). Vários fatores, como a natureza do fundo, as condições atmosféricas e os parâmetros da coluna d'água atenuam o sinal e a radiância captados pelo sensor. Em condições de águas claras, comprimentos de onda mais longos do espectro visível, como o vermelho (cerca de 0,6 – 0,7 μm), são absorvidos em uma profundidade menor do que comprimentos de onda mais curtos, como o azul (cerca de 0,4 – 0,5 μm) e o verde (cerca de 0,5 – 0,6 μm), que contêm mais energia e penetram mais profundamente na água (GODWIN, 2021). De fato, de 100 a 200 metros de profundidade, praticamente toda a radiação solar é absorvida e, em algum momento, dependendo do comprimento de onda, a luz é totalmente absorvida na água.

Dentre os inúmeros métodos existentes de SDB, esse trabalho fez uso da abordagem desenvolvida por Dierssen *et al.* (2003) e que foi estendida por Freire (2017) para derivar a batimetria (z), cujo conceito baseia-se na diferença logarítmica da radiância observada de duas bandas (L_{OBS}).

$$z = m_1 \times \ln \left(\frac{L_{obs}(\lambda_i) - L_w(\lambda_i)}{L_{obs}(\lambda_j) - L_w(\lambda_j)} \right) + m_0 \quad (1)$$

Onde $L_{obs}(\lambda)$ representa a radiância observada para cada banda; m_0 , o coeficiente de translação, baseado no retorno do fundo e um coeficiente de atenuação difusa; m_1 , o coeficiente de escala baseado na atenuação difusa, e L_w representa a contribuição da coluna da água na radiância observada (PE'ERI *et al.*, 2014).

A solução do modelo ($X = m_0, L_{w1}, L_{w2}, m_1$) é alcançada por meio de regressão linear, usando medições de profundidade de referência como pontos de controle. Porém, como o modelo não é linear, a solução final representa uma solução aproximada da observação, e o modelo é linearizado pela série de Taylor (FREIRE, 2017). O processo tem início com a estimativa do vetor inicial ($X_0 = m_0, L_{w1}, L_{w2}, m_1$) e é repetido até que a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) seja minimizada. Neste estudo, a definição do vetor inicial foi derivada considerando a coluna d'água como zero para calcular os coeficientes m_0 e m_1 a partir de uma correlação linear entre valores de pixel da razão logarítmica e medidas de profundidade. Para obtenção dos parâmetros da coluna d'água, aplica-se a linearização do modelo e uma solução inicial é capaz de ser derivada. O vetor solução é então aplicado para cada pixel da imagem de forma a produzir uma superfície batimétrica referenciada aos pontos de controle.

1.3. SDB na cartografia náutica

A carta náutica é uma ferramenta indispensável, capaz de prover informações essenciais ao navegante, tais como profundidades, perigos à navegação, localização e característica dos sinais náuticos, informações de maré e muitos outros elementos. Sua precisão depende da confiabilidade do levantamento hidrográfico e da habilidade do cartógrafo em interpretar e compilar os dados. Para subsidiar as informações aos navegantes sobre a confiabilidade dos dados contidos

na carta, um dos elementos definidos pelo padrão S-57 da Organização Hidrográfica Internacional (OHI) é a Categoria da Zona de Confiança (CATZOC), que contém especificações da acurácia das profundidades, sendo classificada em seis categorias: A1, A2, B, C, D e U (sendo A1 a mais precisa e U onde os dados ainda precisam ser avaliados) (IHO, 2002).

Atualmente, a publicação S-4 da OHI (especificação B424.7) reconhece o uso de imagens de satélite para representação de isóbatas quando não existe outra fonte de dados ou quando os dados na área não são confiáveis. No entanto, para que o SDB seja incorporado aos produtos cartográficos, é necessário atribuir um CATZOC e atender a todos os parâmetros de qualidade dos dados, o que não é uma tarefa simples em SDB, visto que isso depende de diversos fatores ambientais e da imagem.

Embora existam grandes desafios para tornar essa tecnologia para fins cartográficos, a extração de batimetria a partir de imagens tem sido reconhecida e fortemente investigada. O *United Kingdom Hydrographic Office* (UKHO) publicou em 2015 a sua primeira carta náutica (carta número 2066) com profundidades derivadas de imagem de satélite. Em 2018, o Serviço Hidrográfico Canadense (CHS) também usou informações derivadas do SDB em uma carta para *Havre-aux-Maisons* (carta número 4955), classificada como nível CATZOC C. Em 2022, a MCD (*Marine Chart Division*), atualizou seu manual de cartas náuticas, incorporando diversas exigências quanto ao uso da



batimetria derivada por satélite. Portanto, destaca-se que os Serviços Hidrográficos tem demonstrado avanços promissores quanto ao uso e a aprovação do SDB para fins de produção cartográfica.

2. MATERIAL

A área sob investigação, STEER, foi escolhida com base nas condições gerais de águas claras, níveis de turbidez médios a baixos e ambientes aquáticos complexos. STEER está localizado no extremo sudeste da ilha de St. Thomas nas Ilhas Virgens Americanas, com uma área total de aproximadamente $9,6 \text{ km}^2$.

Para aplicação do modelo, foram usadas imagens Sentinel-2A, referentes ao dia 15 de janeiro de 2019, sem nenhuma cobertura de nuvem. As imagens foram obtidas por intermédio da ferramenta *Earth Explorer*, mantida pelo *United States Geological Survey* (USGS, 2022). Além disso, destaca-se que as imagens já foram adquiridas com correções geométricas, radiométricas (reflectância TOA) e ortorretificação oriundas da *European Space Agency* (ESA). Observações de alta resolução ALB com profundidades de até 20 m, coletada pelo *National Geodetic Survey* (NGS) em de 20 de janeiro à 2 de junho de 2019, foram usadas como dados de referência para treinamento e validação.

3. METODOLOGIA

3.1. SDB

Este trabalho investiga a segmentação da área a fim de contribuir na melhora

das estimativas batimétricas usando imagem de satélite para fins de mapeamento cartográfico. A metodologia proposta, resumida no fluxo de trabalho (Figura 1), utiliza o modelo estendido de Dierssen (FREIRE, 2017). O procedimento usado para derivar batimetria por imagem pode ser descrito, de forma resumida por: (a) pré-processamento: que inclui um aprimoramento radiométrico, separação terra/água e filtragem espacial através de um filtro passa-baixa de média 3×3 , minimizando ruídos e o efeito de borramento da imagem; (b) aplicação do algoritmo batimétrico: neste caso, foram usadas as bandas do azul e do verde, e o modelo estendido de Dierssen foi calibrado para cada unidade segmentada; e (c) referenciamento vertical.

Antes da aplicação do modelo batimétrico, as imagens foram corrigidas atmosféricamente usando o processador ACOLITE de código aberto e desenvolvido pelo *Royal Belgian Institute of Natural Sciences* (RBINS). O conjunto de dados ALB (originalmente referenciado em NAD83) foi transformado em WGS-84 (o mesmo Datum das imagens Sentinel-2A) usando o software VDatum desenvolvido pela NOAA/NOS e dividido em dois conjuntos de dados: treinamento (para o processo de calibração do modelo) e validação (para a análise da acurácia). Em seguida, as áreas sem água (terra seca) foram mascaradas aplicando a técnica *Normalized Difference Water Index* (NDWI).

Posteriormente, a solução do modelo estendido de Dierssen ($X = m_0, L_{w1}, L_{w2}, m_1$) foi derivada por meio de etapas que consistem em: (a) estimativa do vetor

inicial (X_0), (b) desenvolvimento da matriz jacobiana, e (c) minimização da soma quadrática dos resíduos. Os quatro parâmetros calculados na solução são aplicados a cada pixel da imagem, produzindo a superfície SDB. O elemento em destaque desse trabalho é que a solução do modelo (X) foi derivada e aplicada para cada área segmentada de acordo com a abordagem geográfica adotada, ao contrário do que é realizado em abordagens convencionais, em que uma solução única é derivada para toda a cena.

3.2. Abordagem geográfica

Embora a abordagem representada pela Equação (1) seja simples e, usualmente adequada, quando aplicada de forma única para toda a imagem, áreas com tipos de fundo e qualidade da água que variam espacialmente podem apresentar resultados que não refletem inteiramente a realidade da cena. No entanto, a magnitude

da heterogeneidade espacial depende da escala, e a segmentação da cena da imagem pode vir a minimizar a variação do tipo de fundo e da coluna de água dentro desses segmentos, permitindo estimar os parâmetros ideais. Desta forma, foi proposto segmentar a cena de acordo com duas abordagens:

- **Segmentação horizontal regular:**

a área é dividida em células regulares para derivar uma solução SDB (Figura 2). O tamanho de duas células foi avaliado arbitrariamente de acordo com o número de pontos dentro das células, sendo primeiramente divididos em pequenos segmentos de 30 x 30 pixels (célula menor). Quando essas células não são capazes de prover uma solução devido ao número insuficiente de pontos de controle dentro do segmento, elas são mescladas em uma grade maior de 150 x 150 pixels (célula maior), resultando na superfície batimétrica final por segmentação horizontal regular.

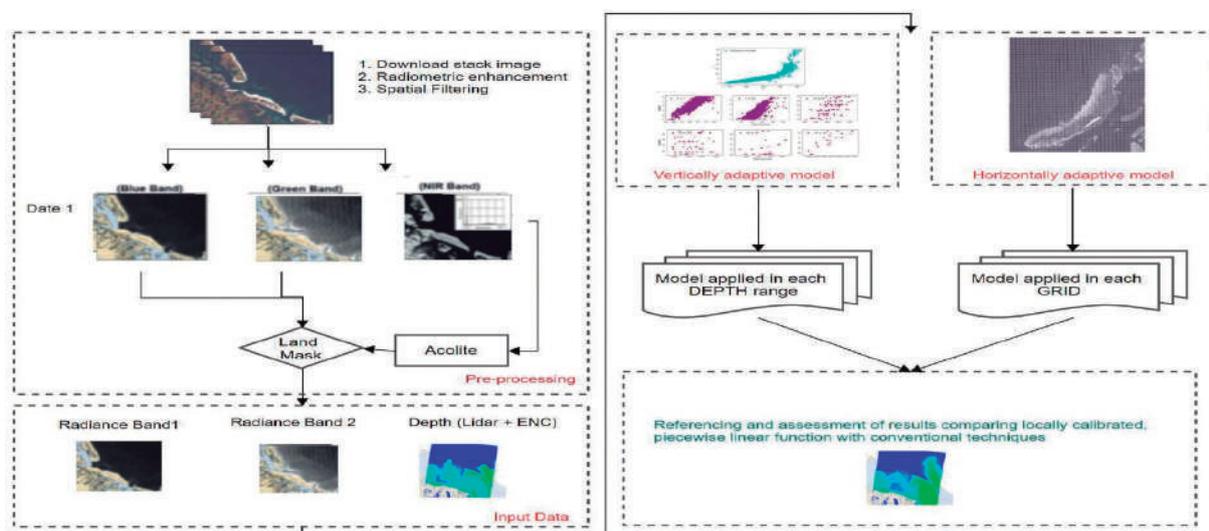


Figura 1 – Fluxo de trabalho da batimetria derivada por satélite usando a abordagem geográfica

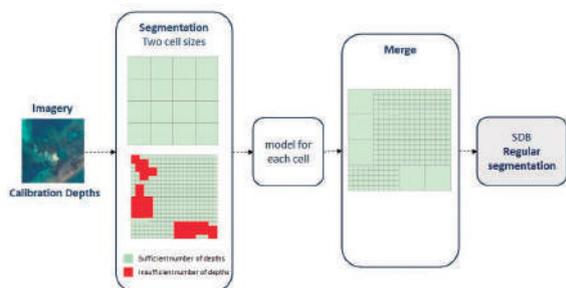


Figura 2 – Fluxo de trabalho da abordagem geográfica baseada na segmentação horizontal regular

• **Segmentação vertical:** a segmentação vertical explora a melhor solução de aproximação relacionando o modelo e as profundidades de referência aplicando uma função por partes (Figura 3). A segmentação vertical consiste em dividir o conjunto de dados em intervalos de profundidade de 5 e 10 metros. Um modelo foi calibrado para cada faixa de profundidade usando os pontos de dados de treinamento que estão inseridos dentro de cada intervalo.

O modelo foi calibrado para cada unidade espacial segmentada considerando as profundidades de referência e

seus correspondentes valores da função logarítmica da radiância dentro de cada segmento. Assim, vários modelos foram calibrados em vez de um único modelo para toda a cena. Embora a forma matemática seja a mesma em todos os segmentos, os parâmetros do modelo são determinados de forma otimizada dentro de uma região geográfica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao subdividir a cena em vários segmentos e, em seguida, calibrar o modelo dentro de cada unidade espacial, novas estimativas de profundidade (solução SDB) são calculadas. O desempenho das abordagens geográficas foi avaliado de acordo com seu RMSE global e a cada 5 metros, e seus respectivos CATZOC referente à acurácia vertical, utilizando os pontos de verificação independentes da profundidade de referência (Tabela 1). A coluna *Units* (Unidades) informa o número de segmentos criados em cada abordagem.

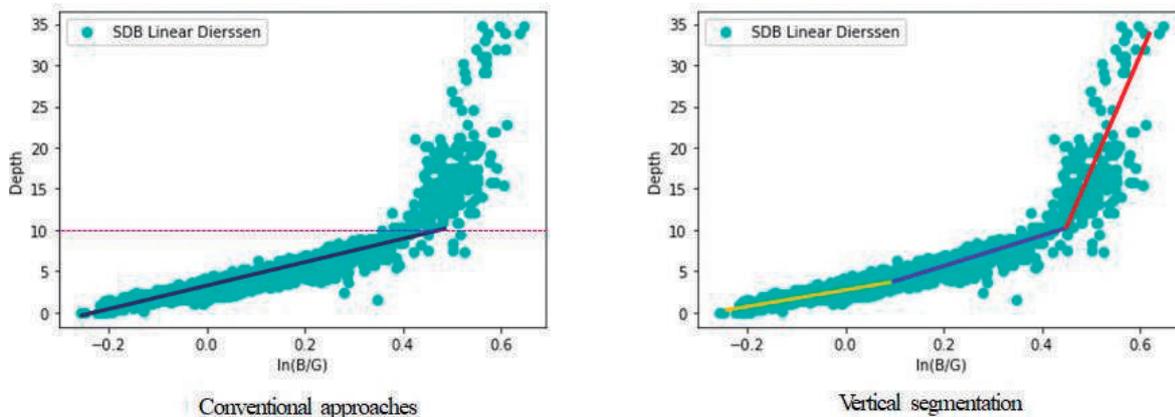


Figura 3 – Conceito da abordagem convencional comparado ao da abordagem de segmentação vertical. À esquerda, a regressão linear para toda a área até a profundidade de extinção e, à direita, a solução é aplicando a função por partes por faixas de profundidade

Tabela 1 – Comparação entre as abordagens de acordo com o RMSE por profundidades e CATZOC/ZOC para 20m

Abordagem		0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	0 -20	Units	ZOC	R ²
Horizontal	Regular	0,81	0,63	0,93	1,16	0,90	122	C	0,97
Vertical	5 m	0,66	0,96	0,83	1,06	0,88	4	C	0,97
	10 m	0,78	1,02	1,07	1,29	1,05	2	C	0,96
Convencional	Global	0,65	0,84	1,15	1,72	1,15	1	C	0,96

Na abordagem geográfica, o RMSE calculado varia de 0,88 a 1,05 m. Como já era esperado, o coeficiente de determinação (R^2) está fortemente relacionado com a magnitude do RMSE, ou seja, um coeficiente de correlação mais baixo está associado a um erro maior, o que se observa na abordagem convencional e na segmentação vertical a cada 10 m.

Entre todas as abordagens, a segmentação vertical com intervalo de profundidade de 5 m apresentou o melhor desempenho em termos de RMSE – 0,88 m, melhorando a acurácia geral em 23,47% em relação ao método global convencional.

Com relação a segmentação regular, quando comparada à abordagem convencional, o RMSE geral foi de 0,90 m, representando melhora de 21,73%. Um fator relevante que deve ser considerado nessa abordagem é o número de segmentos formado. Enquanto os modelos convencionais se utilizam de um único modelo aplicado para toda a cena, o modelo vertical usa 2 segmentos na segmentação vertical de 10 m, 4 na segmentação vertical de 5 m, e 122 segmentos na abordagem horizontal regular. Esse número, expressivamente superior na segmentação horizontal regular, faz com que a referida segmentação seja altamente dependente do número de pontos disponíveis dentro de cada grade.

Quando um número pequeno ou insuficiente de pontos de controle está dentro da célula menor (30 x 30 pixels), a célula maior (150 x 150 pixels) é usada, conforme explicado no Item 3.2. Por usar dados ALB como pontos de controle, cuja cobertura de dados é densa, uma grande proporção das células menores (77%) possuíam pontos de controle suficientes e foram utilizadas para a calibração do modelo, o restante (23%) foi combinado com as células maiores. Caso haja indisponibilidade de densa cobertura de dados como pontos de calibração, como é o caso de SBES ou dados provenientes da carta náutica, essa abordagem deve ser reavaliada no que se refere ao tamanho dos segmentos, uma vez que o tamanho das células deverá ser maior a ponto de conter um número significativo de pontos de calibração dentro de cada grade.

Com relação à segmentação vertical, a divisão da área em intervalos de profundidade menores aumentou a acurácia da batimetria estimada. O RMSE geral usando um intervalo de 5 m foi de 0,88 m, melhora de 16,19% em relação à segmentação de 10 m e 23,47% em comparação com a abordagem convencional.

De modo geral, observa-se que a acurácia das estimativas batimétricas aplicando a abordagem geográfica apresenta melhor performance quando comparada com a abordagem global convencional.



No entanto, quando avaliada a cada 5 m, observa-se que, dependendo do intervalo, nem sempre o modelo geográfico se apresentou mais eficaz. Essa observação fica mais evidente quando a variação do erro é plotada a cada 2 m, como pode ser observado na Figura 4.

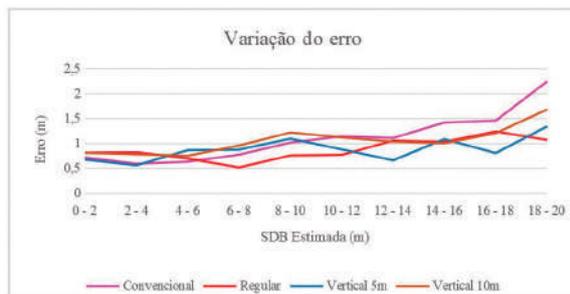


Figura 4 – Variação do erro da abordagem convencional e dos geográficos

Analisando o gráfico da figura acima, observa-se que, de uma forma geral, as abordagens apresentaram uma tendência de aumento do erro, apresentando maiores erros para as áreas mais profundas. No entanto, até a faixa de 10 m, a única abordagem que se apresentou melhor que a convencional foi a de segmentação

regular. Diferentemente do resultado obtido após os 10 m, em que todas as abordagens geográficas tiveram melhores desempenhos quando comparado ao modelo único. Na segmentação regular, o erro é mais expressivo próximo à linha da costa e é reduzido gradualmente até os 8 m de profundidade. A partir deste ponto, começa a aumentar novamente. Da mesma forma, ocorre com a segmentação vertical, no entanto, quando particionada em intervalos de 5 m, existe uma tendência flutuante do erro em torno de 1 m, enquanto as demais abordagens apresentam claramente uma tendência de aumento.

O fato do erro se apresentar oscilante em vez de seguir uma tendência crescente na abordagem de segmentação vertical em intervalos de 5 m chamou a atenção e fez com que mais análises fossem realizadas. Desta forma, como ilustrado na Figura 5, foram criados gráficos comparando os pontos de controle provenientes do ALB versus a batimetria estimada em cada abordagem.

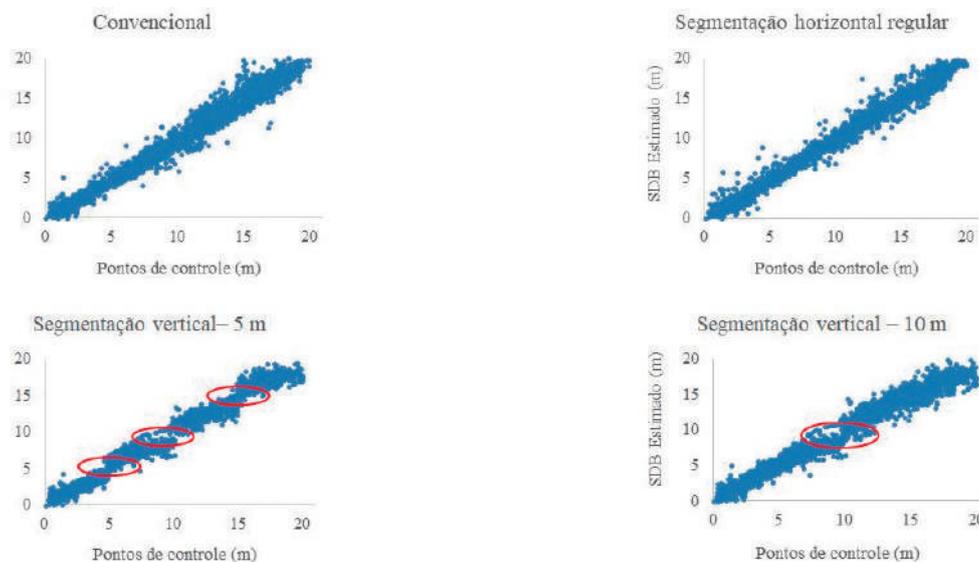


Figura 5 – Gráficos de dispersão das profundidades estimadas pelo SDB usando a abordagem (a) convencional (b) de segmentação horizontal regular (c) de segmentação vertical – 5 m, e (d) de segmentação vertical – 10 m

Ao analisar os gráficos da Figura 5, observa-se que existe uma descontinuidade da superfície batimétrica nos gráficos de abordagem vertical, mostrando profundidades discretizadas em relação ao tamanho da faixa de profundidade. Essa descontinuidade das profundidades estimadas, também mencionada nos trabalhos de Wei & Theuerkauf (2020) e Rulbert *et al.* (2003), é causada devido à aplicação de funções por partes. Uma vez que os modelos são calibrados separadamente para cada faixa de profundidade, e à medida que esses intervalos se reduzem, as profundidades são ajustadas dentro do segmento, resultando nessa aparência comprimida nos gráficos (c) e (d) da Figura 5.

Embora a abordagem de segmentação vertical com intervalo de 5 m tenha apresentado a melhor acurácia (RMSE = 0.88), é importante observar que ainda restam dúvidas sobre a interpretação desse resultado devido à aparência discretizada dos dados e, em particular, se pode estar relacionado ao *overfitting*, em vez de uma melhoria real na acurácia. Desse modo, recomenda-se que trabalhos futuros incluam testes adicionais para investigar a real aferição da abordagem, usando diferentes fontes de dados para calibração e validação.

Ao segmentar a área e otimizar os parâmetros do modelo para cada unidade espacial, os efeitos da variação do tipo de fundo e da qualidade da água foram reduzidos, melhorando a acurácia e a confiabilidade das profundidades estimadas a partir

da imagem. No entanto, uma das limitações do método é o número necessário de profundidades de treinamento; à medida que os segmentos se tornam menores, o número total de pontos para treinar o modelo aumenta. Quando o modelo é aplicado, são necessários, no mínimo, quatro pontos de treinamento para cada unidade espacial. Embora esses números de pontos sejam capazes de fornecer uma solução, para obter um bom desempenho do modelo e, conseqüentemente, um melhor resultado, na prática, o número ideal de pontos de calibração pode depender de diversos fatores, tais como a geomorfologia da área de estudo, o número e tipos de substratos e o tamanho da área de estudo.

Além disso, é importante ressaltar que a abordagem geográfica quando comparada à convencional consiste em um número maior de processos, uma vez que o modelo aplicado para cada segmento criado demanda mais tempo de processamento.

Referente à categorização dos resultados do SDB de acordo com o CATZOC, nenhum avanço pode ser notado, uma vez que todas as abordagens apresentaram CATZOC C referente à acurácia vertical para as profundidades de 20 m. No entanto, com o RMSE reduzido nas abordagens geográficas, é importante destacar que existe uma proximidade em atingir o CATZOC B: 0,3 m é a acurácia vertical restante para classificar em B a segmentação vertical – 5 m, enquanto para a abordagem convencional é 0,8 m.



5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As tecnologias convencionais de levantamento e mapeamento, embora sejam capazes de coletar informações muito acuradas, representam um desafio operacional e logístico, devido às limitações de tempo, ao risco de levantamento em ambientes próximos à costa e, principalmente, ao alto custo das operações. Buscando por alternativas com custos reduzidos e capazes de obter informação batimétrica em águas rasas, esse trabalho investigou a técnica de batimetria derivada por satélite baseada em diferentes abordagens de segmentação da imagem com intuito de abordar as limitações do SDB em relação ao tipo de fundo e à heterogeneidade da qualidade da água e assim melhorar a performance da batimetria estimada. A lógica por trás da segmentação é que em unidades espaciais menores as condições ambientais devem ser mais estáveis do que em toda a cena.

Os resultados apresentaram melhora ao segmentar a cena, tanto verticalmente quanto horizontalmente, com um ganho de mais de 20% quando comparado ao modelo único aplicado em toda a imagem. A segmentação vertical proporcionou melhor desempenho no aumento da acurácia da profundidade devido às funções por partes, além de exigir um número menor de pontos de controle quando comparado à segmentação

horizontal regular. No entanto, as previsões discretizadas dos modelos demonstrados pela segmentação vertical constroem uma superfície descontínua dos dados e levantam a questão do *overfitting* em vez de uma melhora real na acurácia, algo que deve ser investigado em trabalhos futuros.

Por outro lado, embora tenha havido uma melhora nas profundidades estimadas com a abordagem de segmentação horizontal em comparação com o convencional, essa abordagem requer um número de pontos de controle muito superior às demais abordagens, além de possuir uma dependência no tamanho da célula.

De modo geral, houve uma melhora na acurácia das estimativas batimétricas ao segmentar a cena em unidades espaciais menores e recomenda-se avaliação do uso da abordagem para obtenção de melhores resultados, principalmente, com relação a investigações que envolvam mais fatores do fundo marinho e que possam vir a contribuir no número otimizado de segmentos.

Como citado anteriormente, o uso do SDB possui barreiras em relação aos Serviços Hidrográficos, tendo em vista as diversas limitações já mencionadas. No entanto, trabalhos como este, além de impulsionar pesquisas, são uma excelente oportunidade para subsidiar os membros da OHI para uma aplicação regulamentada das informações do SDB dentro de produtos de navegação, e assim contribuir nos processos de produção cartográfica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFONSO, J. J. *A geographic segmentation approach for satellite-derived bathymetry. (Dissertação de Mestrado, University of New Hampshire)*, 2022, Durham

ASHPHAQ, M. *et al. Review of near-shore satellite derived bathymetry: Classification and account of five decades of coastal bathymetry research. Journal of Ocean Engineering and Science*, 2021, 6: 10-101

DIERSSEN, H. M., *et al. Ocean color remote sensing of seagrass and bathymetry in the Bahamas Banks by high-resolution airborne image. Limnology and Oceanography*, 2003, 48: 444–455.

FREIRE, R.R. *Evaluating Satellite Derived Bathymetry in Regard to Total Propagated Uncertainty, Multi-Temporal Change Detection, and Multiple Non-Linear Estimation (Dissertação de Doutorado, University of New Hampshire)*, 2017, Durham. Disponível em: <https://scholars.unh.edu/dissertation/2281/>

GEBCO, 2020. Seabed 2030 Projeto. Disponível em: https://www.gebco.net/about_us/seabed2030_project/

GODWIN B., *Penetration of Visible Radiation from Sunlight through Water. University of Minnesota Sea Grant Program.*, 2021.

IHO (International Hydrographic Organization). *S-4 - Regulations of the IHO for international (INT) charts and chart specifications of the IHO: Monaco, the Principality of Monaco*, 2018.

IHO (International Hydrographic Organization) *S-57 – IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data: Monaco, the Principality of Monaco*, 2000.

KASTRISIOS, C., & WARE, C. *Textures for coding bathymetric data quality sectors on electronic navigational chart displays: design and evaluation, Cartography and Geographic Information Science*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15230406.2022.2059572>.

PE'ERI, S., *et al. Satellite Remote Sensing as a Reconnaissance Tool for Assessing Nautical Chart Adequacy and Completeness. Marine Geodesy*, 2014, 37(3): 293-314.

RUPPERT D., *et al. Semiparametric Regression. Cambridge, New York: Cambridge University Press*; 2003, pp. 386.

WEI, C. & THEUERKAUF, S. J. *A Novel Multitemporal Approach for Satellite-Derived Bathymetry for Coastal Waters of Palau. Journal of Coastal Research*, 2020, 37: 336–348.