

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
COORDENADORIA ESPECIAL DE OCEANOGRAFIA

BRUNA STRACK CÂNDIDO

Título: Reconstituição de perfil batimétrico de praias a partir de imagens do satélite
Sentinel-2

FLORIANÓPOLIS
30 DE JUNHO DE 2022

Bruna Strack Cândido

Título: Reconstituição de perfil batimétrico de praias a partir de imagens do satélite
Sentinel-2

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Henrique da Fontoura Klein

Coorientador: Prof. Dr. Luis Pedro Melo de Almeida

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cândido, Bruna Strack

Reconstituição de perfil batimétrico de praias a partir
de imagens do satélite Sentinel-2 / Bruna Strack Cândido ;
orientador, Antonio Henrique da Fontoura Klein ,
coorientador, Luis Pedro Melo de Almeida, 2022.
62 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências
Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia,
Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. Batimetria Derivada de Satélite. 3.
Sensoriamento Remoto. 4. Perfil batimétrico. I. Klein ,
Antonio Henrique da Fontoura. II. Almeida, Luis Pedro Melo
de. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação
em Oceanografia. IV. Título.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, Rose e Zélio, que nunca mediram esforços para me apoiar durante todos esses anos, por me incentivarem e pelo amor incondicional. E a minha família, em especial a minha tia Zenaide, que me transmitiu seu amor pelo mar, e a Rosângela, que sempre se fez presente.

Ao meu orientador Prof. Antonio Henrique da Fontoura Klein, por todo o tempo dedicado a este trabalho, por todas as ideias, conversas, correções e ensinamentos. Obrigada por acreditar em mim desde o início do desenvolvimento deste trabalho. Ao meu coorientador, Prof. Luis Pedro Melo de Almeida, obrigada por todo o conhecimento compartilhado e por estar presente semanalmente para discussões. Este trabalho não seria possível sem vocês.

Aos membros da banca, Prof. Pedro Pereira e Prof. Deivid Alves, que acompanharam este trabalho desde o projeto, e ao membro suplente Prof. Jarbas, por também se fazer disponível. Ao Guilherme Vieira da Silva e a Ana Bastos pelas colaborações. Agradeço também a Paula Gomes, não apenas pela ajuda neste trabalho, mas também por toda a assistência que me deu quando comecei a aprender a programar, no início da minha vida acadêmica.

Aos meus amigos Júlio e Ana, que viveram comigo a intensidade de TCC e trabalho, com quem tenho a sorte de dividir todos os meus dias. À Giulia, que se tornou tão importante em tão pouco tempo e compartilhou comigo o desespero dos prazos de TCC. À Bruna, por ter sido minha dupla dentro e fora da UFSC durante todos os anos de graduação. À Lisa, por todos os cafezinhos e músicas compartilhadas, à Júlia, por ter me ajudado a pensar de forma mais crítica sobre questões que vão muito além da oceanografia e ao Mateus por ser um amigo. Ao Lucas, Henrique e Renan, por todas as trocas durante esses anos. À Malu por me fazer rir tanto e a Millenne por tornar meus dias mais leves. Ao Marco, o Paulo e a Bianca, que me ajudaram a me desenvolver de diferentes formas. Obrigada por todos os trabalhos em grupo, pelas parcerias de estudos no CA, solzinho na graminha e, principalmente, por terem me feito rir tanto todos esses anos. A vida é muito melhor com vocês por perto.

Ao Lucas Gumz, meu primeiro amigo em Floripa e que foi essencial para minha adaptação aqui, assim como a Deborah e a Duda, que continuaram sempre presentes. Às minhas amigas que fizeram Floripa ser meu lar durante esses anos, Gabi, Renata e Lela,

obrigada por dividirem a vida comigo, fazendo com que eu me sentisse em casa. Aos meus amigos de longa data, Aline, Ellen, Hegui e Lucas Guilherme, por estarem comigo durante todos esses anos. E ao Abel, meu grande amigo, que dividiu comigo tantos momentos importantes e com quem aprendi tanto sobre a vida.

Ao Prof Antônio Fetter, o primeiro a me incentivar a trabalhar com programação e a minha amiga Miriã, que me apresentou um mundo de possibilidades na vida profissional, a quem admiro muito e serei eternamente grata.

À Fractal Engenharia e Sistemas, onde tenho me desenvolvido profissionalmente todos os dias, em especial a equipe de desenvolvimento. Ao Pedro, com quem pude aprender sobre calibração de modelos, e ao Gustavo, que acreditou em mim, possibilitou que eu me desenvolvesse em diferentes áreas e me mostrou que o oceanógrafo não está limitado ao oceano, mas tem um oceano de oportunidades. Também quero agradecer ao William, Rodrigo, Dani e Gio, pela paciência e por tudo que vêm me ensinando sobre programação. Muito do que aprendi com vocês foi fundamental na realização deste trabalho.

Também agradeço ao corpo docente e técnico do curso de oceanografia, pelo ensino de qualidade que me foi proporcionado. Sou imensamente grata pela oportunidade de estudar na UFSC, usufruindo deste espaço tão plural e cheio de possibilidades. A experiência de estudar numa universidade pública e de qualidade é algo que todos deveriam ter acesso.

Finalmente, agradeço a City of Gold Coast pelos dados disponibilizados para este estudo.

RESUMO

O estudo do perfil batimétrico de praias tem aplicações efetivas no controle de erosão, delimitação de áreas suscetíveis a inundações e proteção de ecossistemas. Entretanto, medições *in situ* demandam muito tempo e recursos. Uma técnica de reconstituição de perfil batimétrico de praias a partir da reflectância em imagens de satélite é apresentada, utilizando a combinação das equações de Caballeria *et al.* (2003) e Silvester e Hsu (1997). A metodologia foi aplicada à região da *Gold Coast*, Austrália. Foram obtidos valores de RMSE entre 0,36 e 0,40 e valores de correlação R^2 entre 0,84 e 0,95. A metodologia não apresentou bons resultados no que diz respeito à parte final do perfil, considerando a profundidade de fechamento. As equações se mostraram satisfatórias para representar perfis batimétricos com bancos em equilíbrio morfodinâmico. Entretanto, para representar perfis que não estão em equilíbrio, adaptações precisam ser feitas à metodologia.

Palavras-chave: Batimetria Derivada de Satélite; Sensoriamento Remoto; Perfil batimétrico.

ABSTRACT

The study of bathymetric beach profiles has effective applications in erosion control, delimitation of flood-susceptible areas and ecosystem protection. However, *in situ* measurements demand a lot of time and resources. A technique for reconstructing bathymetric beach profiles from reflectance in satellite images is presented, using the combination of Caballeria *et al.* (2003) and Silvester and Hsu (1997) equations. The methodology was applied to the Gold Coast region, Australia. RMSE values between 0.36 and 0.40 and R² correlation values between 0.84 and 0.95 were obtained. The methodology didn't present good results towards the final section of the profile, considering the closure depth. The equations proved to be satisfactory to represent barred equilibrium beach profiles. However, to represent profiles that are not at equilibrium, adaptations need to be made.

Keywords: Satellite-Derived Bathymetry; Remote sensing; Bathymetric profile.

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Parâmetro de escala do perfil
h_0	Profundidade do ponto próximo a linha de costa
h_∞	Profundidade de fechamento interno
h_c	Profundidade da crista do banco
h_f	Profundidade do ponto final do banco
h_t	Profundidade da distância da linha de costa até a base do banco ou ponto de equilíbrio
R^2	Coefficiente de determinação
$RMSE$	Raiz do Erro Quadrático Médio
x_c	Distância da crista do banco até a linha de costa
x_f	Distância do ponto mais offshore da crista do banco, onde inicia o decaimento exponencial perpendicular à costa
x_m	Distância da linha de costa até o ponto médio entre a cava e a crista do banco
x_t	Distância entre a base do banco e a linha de costa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1 BATIMETRIA DERIVADA DE SATÉLITE	14
3.2 RECONSTITUIÇÃO DO PERFIL BATIMÉTRICO	15
3.3 PROCESSAMENTO DE IMAGENS	18
3.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1 SÉRIES HISTÓRICAS E VARIAÇÕES MORFOLÓGICAS DAS PRAIAS	22
4.2 APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES	23
4.3 PROFUNDIDADE DE FECHAMENTO	25
4.4 COMPARAÇÃO ENTRE A BATIMETRIA CALCULADA E OBSERVADA POR ÉPOCA DO ANO	30
4.5 APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES À IMAGENS DE SATÉLITE	37
4.6 APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES A IMAGEM DE DRONE	42
5 CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS	48
APÊNDICE A - Exemplos de batimetria calculada	51

1 INTRODUÇÃO

Informações de perfis de praia e batimetria são importantes para estudos geomorfológicos, hidrológicos e de processos sedimentares, com aplicações diretas como intervenções efetivas de controle de erosão, delimitação de áreas suscetíveis a inundações, e proteção de ecossistemas (KLEMAS, 2011).

Perfis de praias arenosas são frequentemente caracterizados pela presença de bancos arenosos, principalmente em praias do tipo intermediárias, que representam a transição entre praias dissipativas e reflectivas. Morfológicamente, os estados intermediários de praias frequentemente apresentam a alternância entre cavas e bancos e correntes de retorno. As ondas arrebentam no banco, reconstruindo-se em sua cava, até voltarem a arrebentar na face da praia (SHORT, 1983). Estudos relacionados à sua dinâmica, principalmente obtidos através de imagens de vídeo, indicam que o padrão rítmico dos bancos pode ser comum, com períodos que variam de horas a dias (CABALLERIA *et al.*, 2003).

Técnicas de medições topográficas, bem como a aquisição batimétrica com ecobatímetro, apresentam alto nível de precisão e exatidão, mas demandam muito tempo, esforço e recurso, além da dificuldade na navegação de embarcações em águas extremamente rasas, tornando sua utilização limitada (HU *et al.*, 2014). Outro método empregado para o estudo de processos em praias é a captura de imagens com câmeras posicionadas nos locais de estudo, como as estações Argus, que consiste num conjunto de câmeras de vídeo controladas remotamente que fazem a aquisição de dados de sensoriamento remoto óptico, localizado em locais costeiros de interesse (HOLMAN & STANLEY (2007).

Lippman e Holman (1989) desenvolveram uma técnica de vídeo baseada na dissipação de onda para inferir a morfologia de bancos arenosos, baseados no pressuposto de que a intensidade da luz nas imagens varia conforme a dissipação das ondas incidentes. A partir desta abordagem, estudaram a variabilidade espacial e temporal da morfologia de bancos arenosos, criando um novo modelo de classificação da variabilidade morfológica de praias. Com base na incidência de ondas captadas pelas imagens, definiram ao todo 8 tipos morfológicos diferentes, utilizando como critérios de classificação a presença ou não de bancos e se são rítmicos, contínuos ou descontínuos. Encontraram uma boa correlação qualitativa entre as transições morfológicas entre os estágios morfológicos e os parâmetros das ondas incidentes (LIPPMANN & HOLMAN, 1990).

Holman *et al.* (2013), descrevem o método de inversão de batimetria baseado no algoritmo *cBathy*, utilizando imagens geradas pelo Argus para testar a técnica. O método baseia-se numa malha de pixels, analisados espectralmente, e o número de onda de cada um é calculado. Finalmente, o filtro de Kalman é utilizado para suavizar a profundidade e a batimetria é estimada (HOLMAN *et al.*, 2013). Entretanto para aplicação desta técnica dados de ondas nas fronteiras são necessários.

A Batimetria Derivada de Satélite (BDS), uma técnica utilizada para explorar a profundidade de águas rasas, já foi aplicada para estudos de batimetria de estuários (ALVES *et al.*, 2018; FILIPPI, 2020;), deltas de maré (FORD & DICKSON, 2018) e praias arenosas (LI *et al.*, 2021; TRAGANOS *et al.*, 2018; TURNER *et al.*, 2021), utilizando imagens de sensores orbitais, tanto da série LANDSAT quanto Sentinel, demonstrando resultados satisfatórios.

Ford e Dickson (2018) utilizaram imagens da banda pancromática dos satélites Landsat-7 e Landsat-8, aplicando as técnicas de melhoramento de imagem *Surface Reflectance* (SR) e *Top of Atmosphere* (TOA), para estudar as mudanças no canal do delta de maré vazante do porto de *Manukau*, na Nova Zelândia. As imagens foram subdivididas em pixels e a diferença na reflectância entre ondas que arrebentaram e que não arrebentaram foi utilizada para encontrar a localização de quebra de onda frequente, para a definição da localização do canal. As imagens analisadas compreenderam um período de 12 anos, tornando possível a visualização das alterações na direção do canal do delta ao longo do tempo, entretanto, não representaram sua morfologia.

Traganos *et al.* (2018) desenvolveram um encadeamento de pré-processamento, incluindo algoritmos utilizados no sensoriamento remoto óptico de águas rasas em regiões localizadas no Mediterrâneo Oriental como área de estudo. Foram aplicadas correções de nuvens, atmosféricas e de reflexo solar com uma variação sazonal de 10 m, empregando as bandas azul e verde do Sentinel-2, devido a sua penetração na água. Foram aplicadas metodologias empíricas de batimetria derivada de satélite, que assumem relação linear entre a transformação logarítmica das bandas de satélite e profundidades conhecidas a partir de regressões lineares. Mapas de erros resultantes demonstraram uma reconstituição de batimetria superestimada para fundos com baixa reflectância e muito rasos e resultados subestimados em ambientes com alta reflectância e opticamente fundos, mas uma boa acurácia para ambientes intermediários.

Turner *et al.* (2021) com o intuito de demonstrar um exemplo real de aplicação, tanto de linha de costa derivada de satélite, quanto de batimetria, aplicou a metodologia proposta por Vos *et al.* (2019) e por Traganos *et al.* (2018), respectivamente. Nesta aplicação, a morfologia da antepraia da região da *Gold Coast* foi reproduzida e validada, entretanto a metodologia não foi aplicada à zona de surfe.

Com o avanço das tecnologias de imageamento por satélite, como o aumento da cobertura espacial e espectral, assim como da periodicidade de imagens, proporciona monitoramentos contínuos e automatizados das condições atuais de costas de forma global, ampliando suas possíveis aplicações (TURNER *et al.*, 2021). A alta resolução e periodicidade das imagens dos satélites mais recentes, como o Sentinel-2, torna possível o estudo de processos que ocorrem em períodos curtos de tempo, como a elucidação do comportamento de bancos arenosos, previamente estudados usando imagens oblíquas (MURRAY & DICKSON, 2018).

Assim, neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento e a validação de um método de restituição da batimetria da zona de surfe, onde aceita-se como hipótese que os perfis de praias em equilíbrio podem ser obtidos a partir da aplicação das equações propostas por Caballeria *et al.* (2003) onde as variáveis que descrevem a posição dos bancos são obtidas a partir da análise da reflectância nas imagens de satélite. O método é de baixo custo operacional e complementa trabalhos que apresentam técnicas de reconstituição de batimetria de praias sem descrever a zona de surfe, podendo suprir a escassez de dados desta região.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Considerando a alta demanda de esforço, tempo e recursos na coleta de dados *in situ*, o objetivo geral do trabalho consiste em desenvolver e avaliar a técnica de reconstituição do perfil batimétrico de praias a partir de imagens do satélite Sentinel-2.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

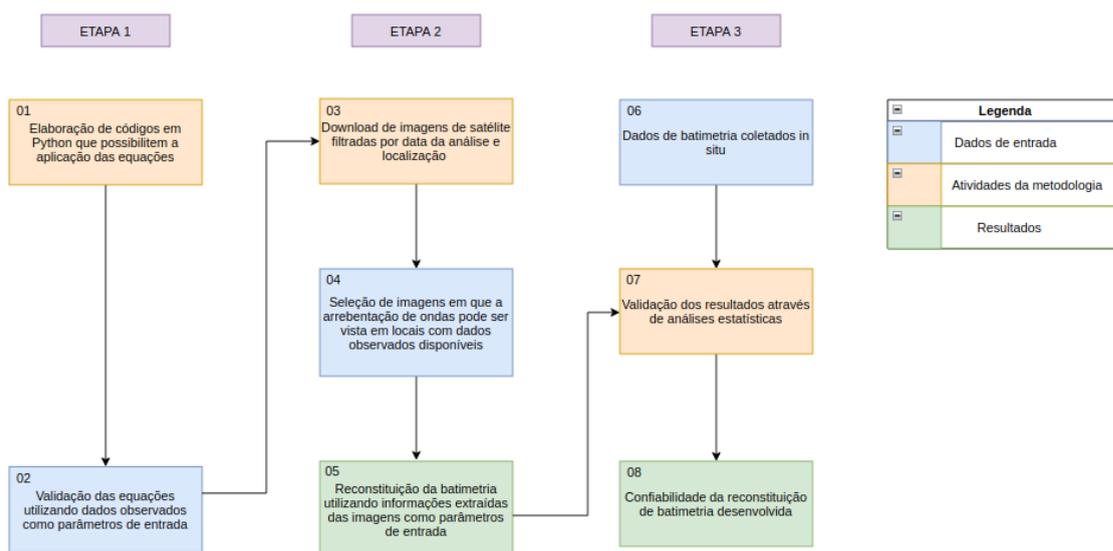
- a) Avaliar a combinação das equações de Cabellaria *et al.* (2003) e Silvester e Hsu (1997) para a reconstituição do perfil batimétrico a partir da metodologia descrita.
- b) Determinar o desempenho do perfil batimétrico estimado pelo algoritmo, considerando dados coletados da região de Gold Coast, Austrália.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 BATIMETRIA DERIVADA DE SATÉLITE

Para estimar a batimetria da zona de surfe, a metodologia foi dividida em 3 etapas. Na primeira etapa as equações foram preparadas para a aplicação, sendo realizados os seguintes passos: 1) Elaboração de códigos em Python que possibilitam a aplicação das equações; 2) Validação das equações utilizando dados observados como parâmetros de entrada. Na segunda etapa, às equações foram aplicadas às imagens de satélite, através do 3) *download* das imagens de satélite, filtradas pela data e localização; 4) Seleção de imagens em que a arrebentação de ondas pode ser vista em locais com dados observados disponíveis; 5) Reconstituição da batimetria utilizando informações extraídas das imagens como parâmetros de entrada. Na terceira etapa foi feita a validação da metodologia, 6) Realizando a comparação da batimetria calculada com dados observados; 7) Validando os resultados através de análises estatísticas e 8) a confiabilidade do método foi avaliada (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma da metodologia.



Fonte: elaborado pela autora.

3.2 RECONSTITUIÇÃO DO PERFIL BATIMÉTRICO

Uma das equações mais conhecidas que descreve o perfil de equilíbrio é a equação proposta por Bruun (1954) e comumente atribuída ao perfil de equilíbrio de Dean (HOLMAN *et al.*, 2014)

$$h = Ax^{2/3} \quad (1)$$

Onde h é a profundidade, x a distância da linha de costa até a profundidade h (fechamento), e A uma constante dependente do tamanho de grão, chamada de parâmetro de escala do perfil. Esta é uma equação empírica baseada no conceito de que o transporte de sedimentos se dá de forma que a dissipação por unidade de volume seja constante (HOLMAN *et al.*, 2014).

Silvester e Hsu (1997), através de experiências em tanques de onda, descreveram diversas equações relacionadas à formação de bancos (Eq. 2 a 5). Entre as equações estão as que resultam na distância da crista do banco até a praia (x_c) e a profundidade da crista do banco (h_c) (Eq. 2 e 3), o declive da praia (β) (Eq. 4), o ponto de equilíbrio do perfil (x_t) e sua profundidade (h_t) (Eq. 5). A relação do perfil médio construído por ondulações (*swell*), conhecida como a equação do perfil de equilíbrio de Dean (Eq. 6), pode ser utilizada para o cálculo do ponto mais distante do banco à linha de costa e sua profundidade (x_f de h_f). Uma representação esquemática de um perfil de praia com um banco arenoso pode ser vista na figura 2. Apesar de diferentes equações descreverem a profundidade da crista do banco, todas devem resultar em valores de hc similares (SILVESTER & HSU, 1997). As equações são apresentadas a seguir:

$$h_c = 0,0225x_c \quad (2)$$

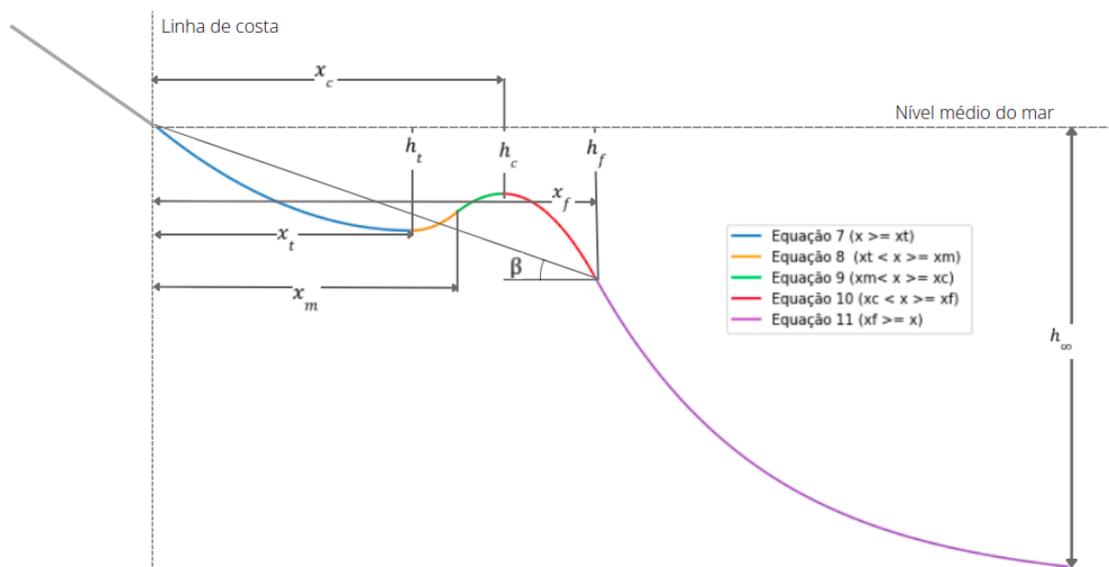
$$h_c = 0,111x_c^{0,575} \quad (3)$$

$$h_c/\tan\beta = 0,6366 + 0,436 x_c \quad (4)$$

$$h_t = x_t \tan\beta \quad (5)$$

$$h = 0,125x^{0,667} \quad (6)$$

Figura 2. Figura esquemática de um perfil de praia com banco arenoso e as variáveis que o descrevem.



Fonte: elaborado pela autora.

Caballeria *et al.* (2003), baseados em análises de estabilidade linear, descreveram um conjunto de equações relacionando parâmetros geométricos e forçantes que influenciam a formação de bancos ao longo da costa. O perfil dos bancos é dividido em cinco regiões, as

primeiras equações sendo funções parabólicas (Eq. 7 a 10) e a última descrevendo um decaimento exponencial com a profundidade, em oceano aberto (Eq. 11).

$$h(x) = (h_0 - h_t) \frac{(x-x_t)^2}{x_t^2} + h_t \quad (x \geq x_t), \quad (7)$$

$$h(x) = (h_c - h_t) \frac{(x-x_t)^2}{(x_m-x_t)(x_c-x_t)} + h_t \quad ; \quad (x_m = \frac{x_t+x_c}{2}) \quad (x_t < x \leq x_m), \quad (8)$$

$$h(x) = (h_c - h_t) \frac{(x-x_c)^2}{(x_m-x_c)(x_c-x_t)} + h_c \quad (x_m < x \leq x_c), \quad (9)$$

$$h(x) = (h_f - h_c) \frac{(x-x_c)^2}{(x_f-x_c)^2} + h_c \quad (x_c < x \leq x_f), \quad (10)$$

$$h(x) = (h_\infty - h_f) \left[1 - e^{-2 \frac{(x-x_f)(h_f-h_c)}{(x_f-x_c)(h_\infty-h_f)}} \right] + h_f \quad (x_f \leq x), \quad (11)$$

Onde h_0 é a profundidade próximo a linha de costa, h_f a profundidade da distância entre a porção mais distante do banco à linha de costa, h_t a profundidade da distância da linha de costa até a base do banco, h_c a profundidade da distância até a crista do banco e h_∞ a profundidade de fechamento interno. x_m a distância da costa até o ponto central entre a cava e a crista do banco, x_c a distância da crista do banco até a costa, x_t a distância entre a base do banco e a costa e x_f a distância do ponto mais offshore da crista do banco, onde inicia o decaimento exponencial perpendicular à costa. O comportamento das equações pode ser observado na figura 2. A linha azul é descrita pela equação 7 e seu limite vai desde a linha de costa até o ponto de equilíbrio do banco (x_t). A linha laranja é resultante da equação número 8 e seus limites vão desde o ponto de equilíbrio do banco (x_t) até a distância da costa até o ponto central entre a cava e a crista do banco (x_m). A linha verde representa a equação 9, cujos limites são x_m até a distância da crista do banco até a costa (x_c). A equação 10, em

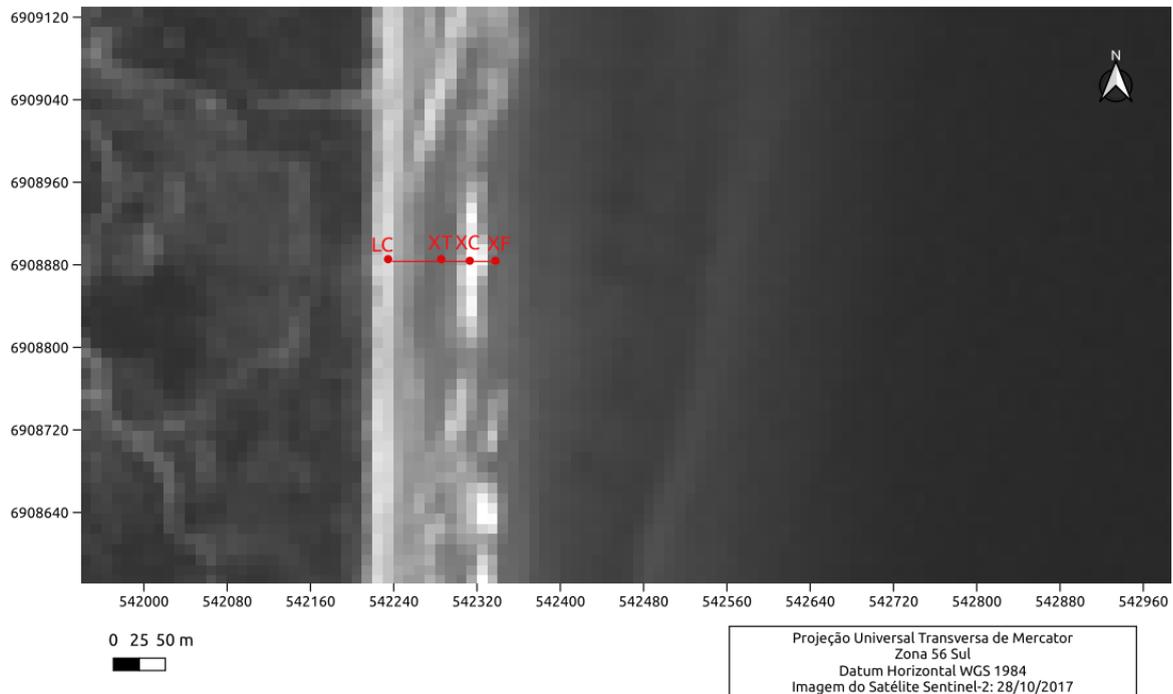
vermelho, descreve desde xc até o fim do banco (xf). E, por fim, a linha lilás representa a equação 11, que descreve desde o fim do banco até a profundidade de fechamento interno.

3.3 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

A missão Copérnicos Sentinel-2 compreende a constelação de dois satélites, com 180° de fase entre si. Apresenta uma revisitação de 10 dias no equador e de 5 dias considerando os dois satélites, e de 2 a 3 dias em latitudes médias. Os satélites são equipados com o sensor *MultiSpectral Instrument*, que possui um tamanho de faixa de 290 km. Os satélites adquirem imagens com resolução espacial de 10 m, 30 m ou 60 m, a depender da banda (SENTINEL, E.S.A., 2015). Devido a sua maior resolução espacial quando comparado a outros satélites cujas imagens também são disponibilizadas livremente, como o Landsat que possui relação máxima de 15m em sua banda pancromática, as imagens de Sentinel foram utilizadas neste estudo. O download das imagens pode ser realizado no site <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>, selecionando a região e o intervalo de datas de interesse.

A hidrodinâmica relacionada a alternância entre cavas e bancos, considerando que as ondas arrebentam nos bancos e se recompõem sobre as cavas, torna possível que imagens de satélites forneçam informações sobre a localização dos bancos. A figura 2 mostra uma imagem da região de Gold Coast, Austrália, adquirida pelo satélite Sentinel-2, na qual é possível observar pixels brancos em meio aos pixels de coloração mais escura, que representam água, onde pode ser inferido que a onda está arrebentando. A linha vermelha representa a distância (xc) entre a localização da arrebentação da onda até a linha de costa.

Figura 3. Imagem do satélite Sentinel-2 da região de Gold Coast. A linha vermelha representa a distância entre a linha de costa (LC), o fim da arrebentação da onda e ponto de equilíbrio do banco (XT), a arrebentação da onda e crista do banco (XC) e o início da arrebentação da onda e final do banco (XF).



Fonte: elaborado pela autora.

Nas imagens de satélite é possível identificar a distância entre a arrebentação da onda, considerando o pixel de coloração mais clara, e a linha de costa, valor que será utilizado como parâmetro de entrada. Além disso, também é possível visualizar a região onde a onda se reconstitui, o que pode ser interpretado como o ponto de equilíbrio do banco (xt). Já a parte final do banco pode ser visualizada no início da quebra de onda, no pixel em que a arrebentação da onda começa a ser percebido. Assim, códigos em python foram desenvolvidos para que as equações sejam executadas a partir destes parâmetros de entrada. Além disso, durante o desenvolvimento do trabalho outros códigos também foram elaborados para a comparação dos transectos observados e calculados, tanto de forma qualitativa quanto quantitativa. Os códigos estão disponíveis em: <https://github.com/brunacandido/satellite-derived-bathymetry>.

3.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Para a validação dos resultados foram utilizados dados de levantamentos batimétricos monofeixe da região de *Gold Coast*, Austrália, disponibilizados pela *City of Gold Coast* para este estudo. Os dados disponíveis foram coletados nas praias *Narrowneck Reef*, *Surfers Paradise*, *Miami*, *Bilinga* e *Palm Beach* (Figura 3), apresentando até 1000m de distância da costa em direção ao mar, compreendendo um período de 2015 a 2021.

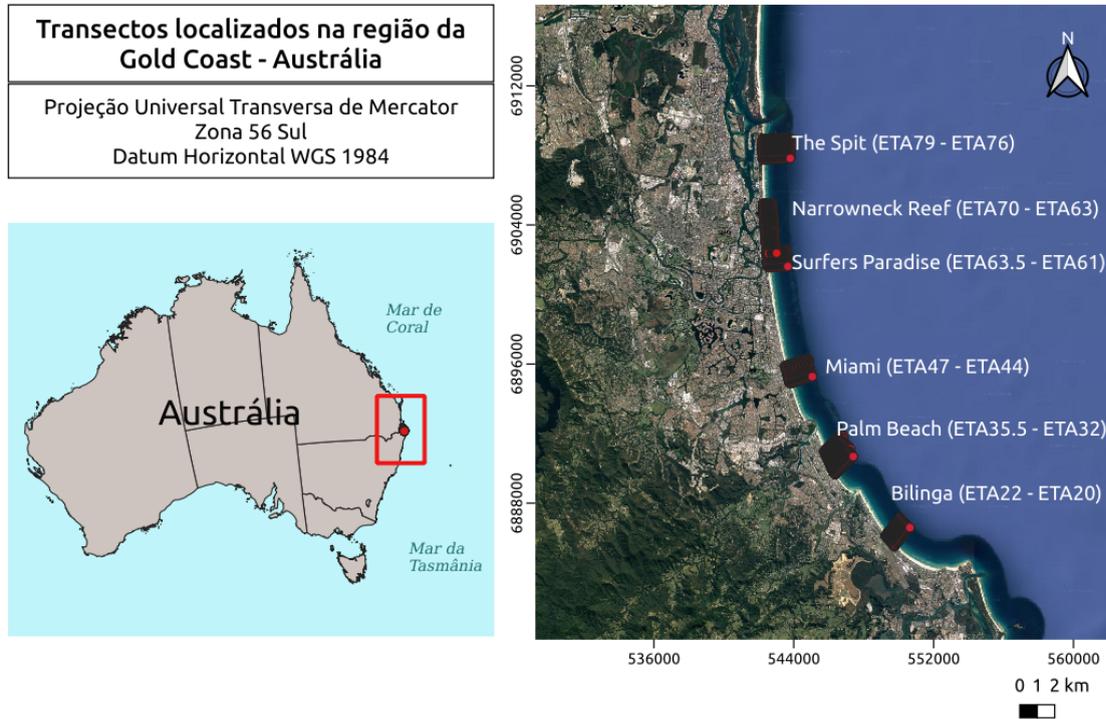
A região é caracterizada por uma morfologia complexa de bancos e canais, com padrões de permanência dos bancos de apenas alguns dias (VAN ENCKEVORT *et al.*, 2004). O sedimento é areia fina com o diâmetro médio de 0,22mm (PATTERSON & NIELSEN, 2016), com praias tipicamente intermediárias (CASTELLE, LE CORRE & TOMLINSON, 2008).

O clima de ondas da costa leste australiana é caracterizado por alterações sazonais. Durante os meses de dezembro a fevereiro, no verão, a geração de ondas aumenta na região do Mar de Coral e na periferia sudoeste do Oceano Pacífico. No outono, de março a maio, um estado multimodal é observado com a energia de ondas aumentando em todo o Mar de Coral e Mar da Tasmânia, e adjacente ao oceano Pacífico (SILVA *et al.*, 2021). Nestas estações, estão presentes ondas de alta energia de nordeste a leste de ciclones tropicais (STRAUSS *et al.*, 2017). Já nos meses de inverno, de junho a agosto, a energia de ondas aumenta na região sul, enquanto no norte a energia substancial decresce. Na primavera, de setembro a novembro, uma diminuição na energia de ondas é observada de maneira geral (SILVA *et al.*, 2021). Nestas estações, ocorre o domínio de ondas de Sul e Sudeste do Mar da Tasmânia e do Oceano Antártico (STRAUSS *et al.*, 2017).

Grandes erosões causadas por eventos extremos são documentadas na região da Gold Coast desde os anos 1900. Estruturas para contenção de erosão começaram a ser construídas na região de Narrowneck em 1923. Em 1999 foram feitas alimentação artificial de praias e a construção do recife artificial de Narrowneck, com o intuito de proteger a linha de costa e melhorar as condições de surfe. O recife foi construído usando contentores cheios de areia, totalizando aproximadamente 700000m³. Posteriormente, o recife foi incrementado com sacos de areia adicionais em 2002, 2004, 2006 e 2017. O recife funciona como ponto de retenção de areia que migra para o norte ao longo da costa, com maior acúmulo de areia observado a montante do recife (DA SILVA *et al.*, 2022). A praia de Bilinga também passou por processo de alimentação artificial em 1988, Surfers Paradise em 1974, 1985, 1999 e 2012, enquanto a

praia Palm Beach é recorrentemente alimentada artificialmente desde 1973 (JACKSON, HILL, & MCGRATH, 2013).

Figura 4. Mapa dos transectos localizados na região de Gold Coast - Austrália.



Fonte: elaborado pela autora.

Para avaliar o desempenho do algoritmo na obtenção da batimetria foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos: Coeficiente de determinação (R^2) (Eq. 12) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) (13):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 + (x_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

(13)

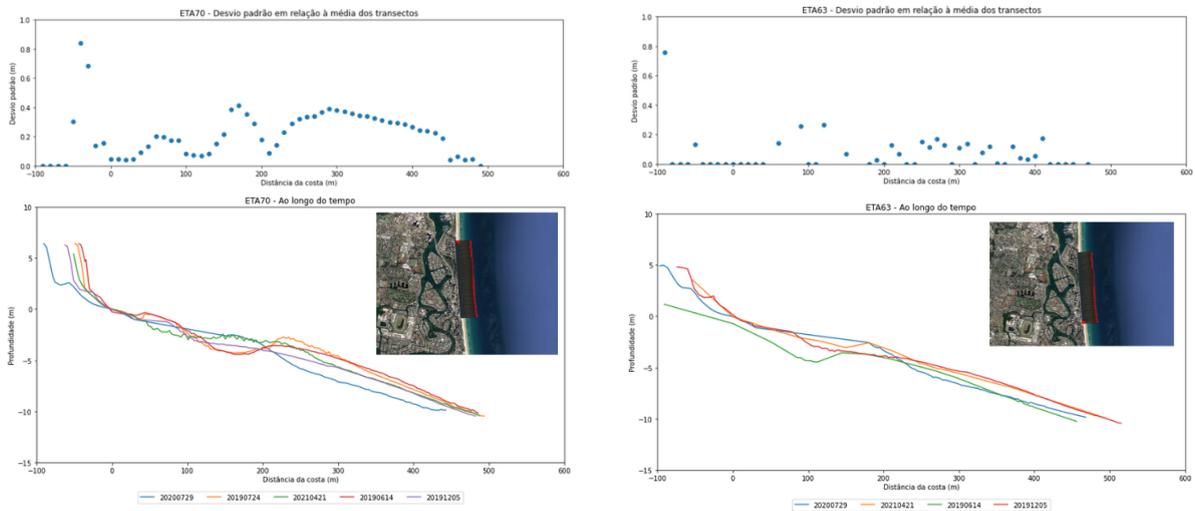
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 SÉRIES HISTÓRICAS E VARIAÇÕES MORFOLÓGICAS DAS PRAIAS

Com o intuito de validar a metodologia, os dados disponíveis foram analisados, de forma que uma série histórica para cada uma das praias pode ser observada, assim como o comportamento da morfologia e dos bancos arenosos ao longo do tempo.

Ao comparar dados de transectos mais ao norte (ETA70) e transectos mais ao sul (ETA63) da praia de Narrowneck (Figura 5), é possível observar um maior acúmulo de sedimentos e formação de bancos no transecto mais ao norte, como descrito por Vieira da Silva *et al.* (2020). A deflexão das correntes nesta área indicam que o recife artificial acaba retendo a areia que migra para o norte ao longo da costa, acumulando em maior quantidade na porção ascendente do recife artificial, reduzindo a erosão na parte superior da praia (VIEIRA DA SILVA *et al.*, 2020). Transectos das outras praias ao longo do tempo podem ser vistos no apêndice A (Figuras 31 a 35).

Figura 5. Os transectos ETA70 (a) e ETA63 (b), localizados na praia Narrowneck Reef, são representados ao longo do tempo, assim como a média do desvio padrão em relação à média dos transectos.



A

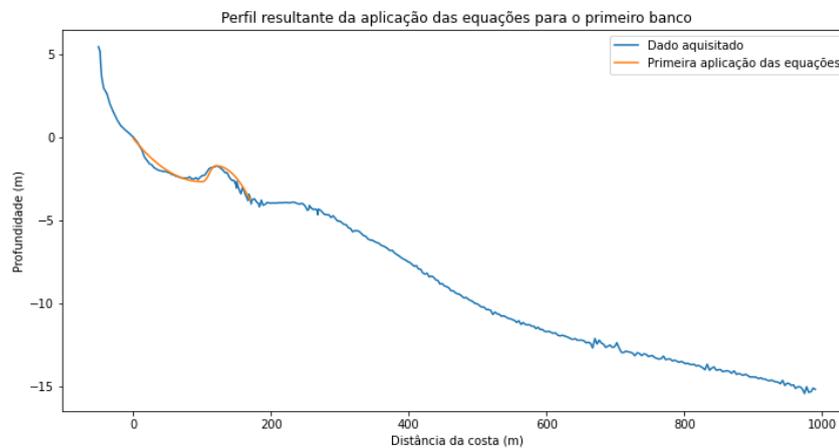
B

Fonte: elaborado pela autora.

4.2 APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES

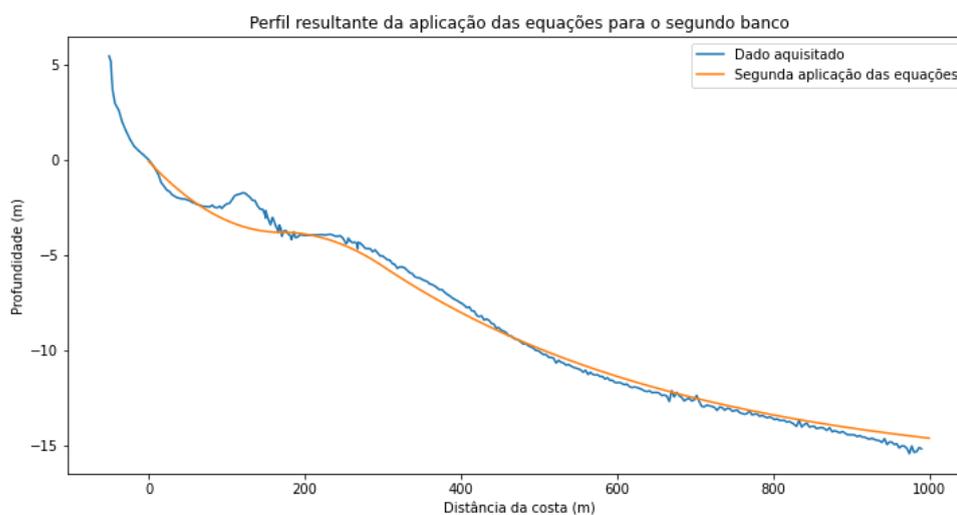
A fim de avaliar o comportamento das equações em relação aos perfis batimétricos, foram empregados dados observados como parâmetros de entrada. Para perfis com mais de um banco, as equações foram aplicadas separadamente para cada um dos bancos presentes no perfil, como nas figuras 6 e 7, e então unidos como demonstrado na figura 8.

Figura 6. Perfil resultante da aplicação das equações para o primeiro banco do perfil, do transecto ETA78.50, localizado na praia The Spit, em 26 de março de 2021.



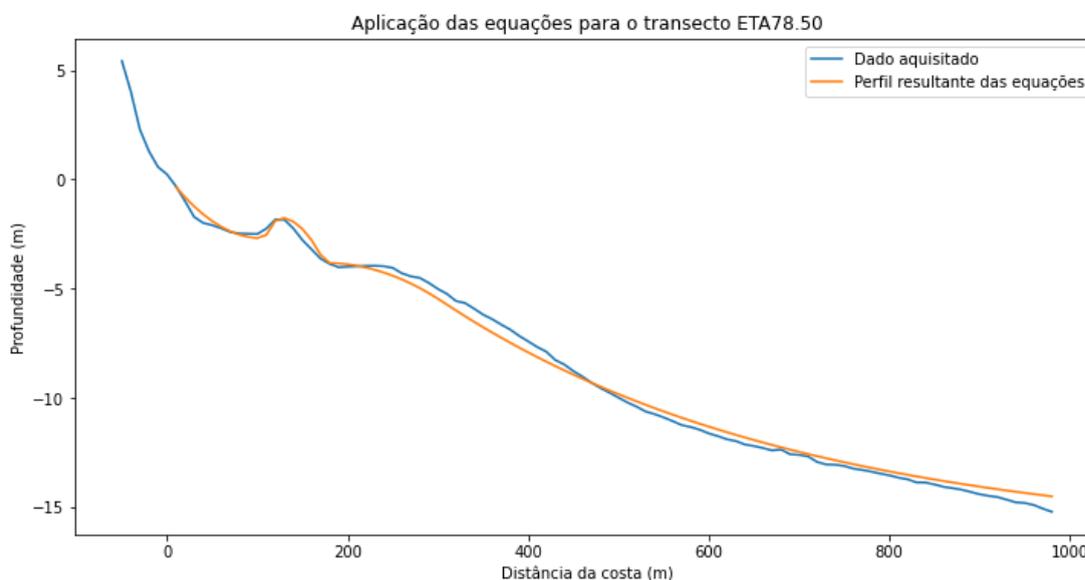
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 7. Perfil resultante da aplicação das equações para o segundo banco do perfil, do transecto ETA78.50, localizado na praia The Spit, em 26 de março de 2021.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 8. Perfil resultante da junção entre os resultados das aplicações das equações para o primeiro e segundo banco, do transecto ETA78.50, localizado na praia The Spit, em 26 de março de 2021.

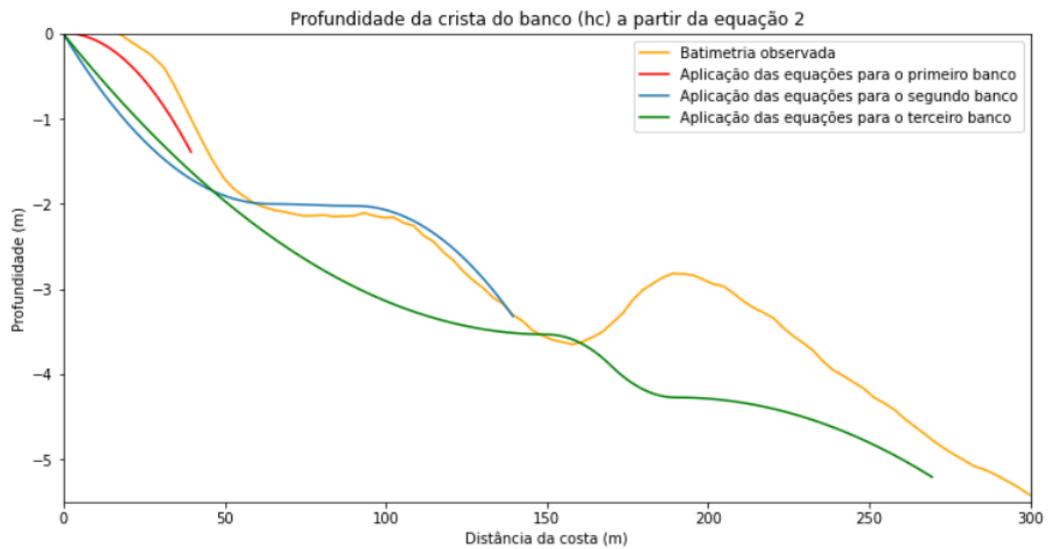


Fonte: elaborado pela autora.

Testes foram realizados para comparar as equações 2 e 3 para a reconstituição da profundidade da crista do banco (h_c), utilizado como parâmetro de entrada nas equações 7 a

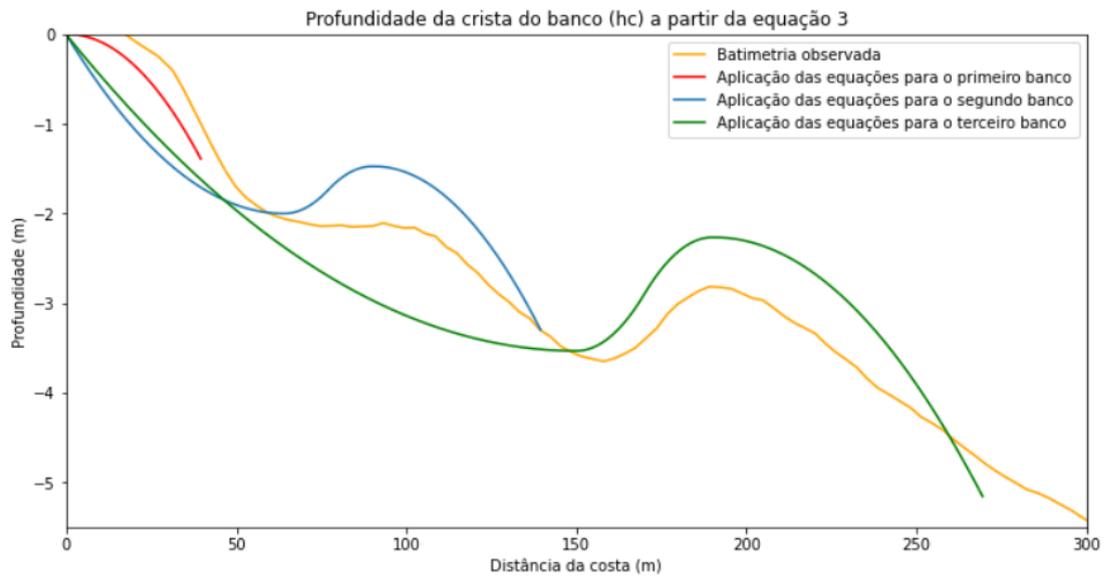
11 na inversão do perfil. Como pode ser observado nas figuras 8 e 9, as alterações são maiores no segundo e terceiro banco.

Figura 9. Perfil resultante da aplicação das equações utilizando a equação 2 para inferir a profundidade das cristas dos bancos, utilizada como parâmetro de entrada nas equações 7 - 11. O Perfil apresentado é o transecto ETA69.25, localizado na praia de Narrowneck Reef, obtido em 21 de abril de 2021.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 10. Perfil resultante da aplicação das equações utilizando a equação 3 para inferir a profundidade das cristas dos bancos, utilizada como parâmetro de entrada nas equações 7 - 11. O Perfil apresentado é o transecto ETA69.25, localizado na praia de Narrowneck Reef, obtido em 21 de abril de 2021.

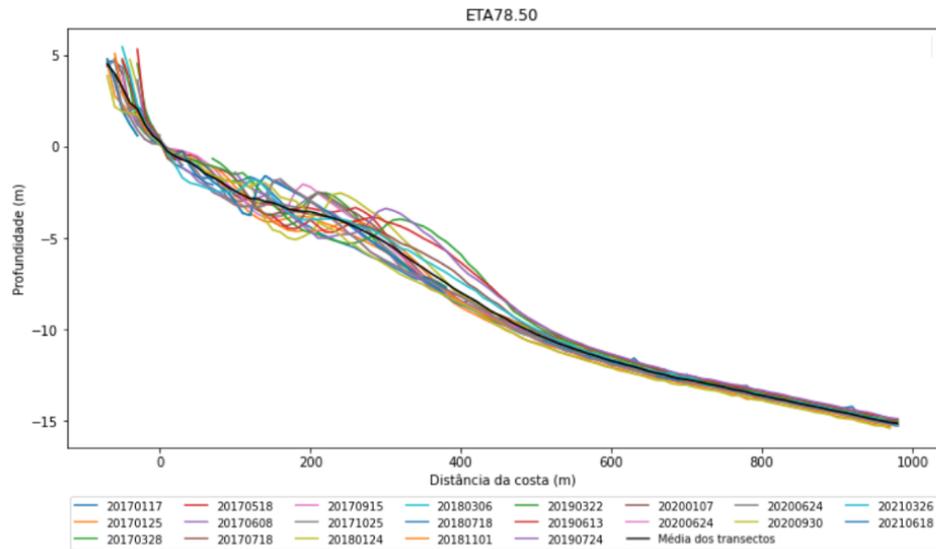


Fonte: elaborado pela autora.

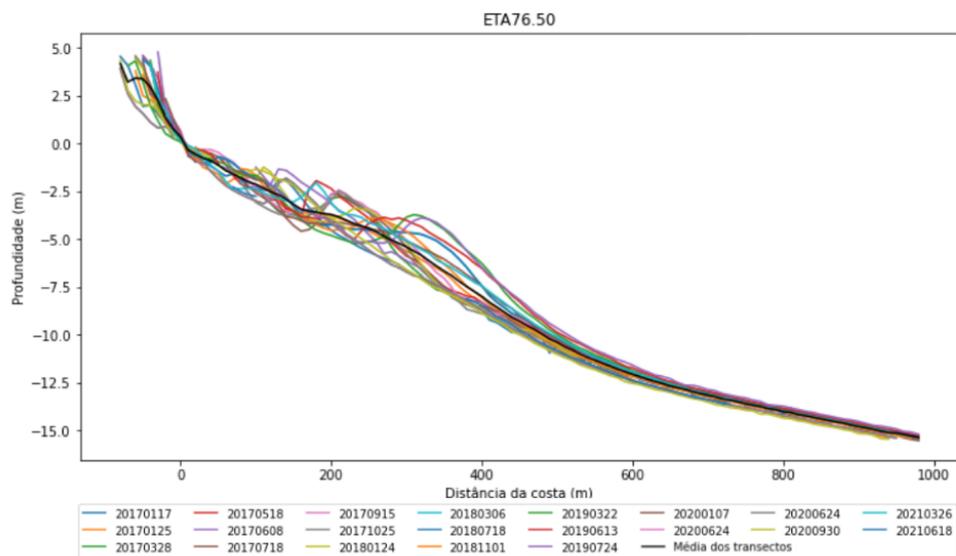
4.3 PROFUNDIDADE DE FECHAMENTO

Em virtude da periodicidade dos dados é possível verificar as alterações nos bancos ao longo dos anos (Figuras 11.A e 11.B).

Figura 11. As figuras demonstram o perfil ao longo dos anos do mesmo transecto, a linha preta representando a média dos transectos coloridos, representando transectos obtidos entre os anos de 2017 e 2021. Os perfis apresentados são o transecto ETA78.50 (A) e ETA76.50 (B), localizados na praia The Spit.



A



B

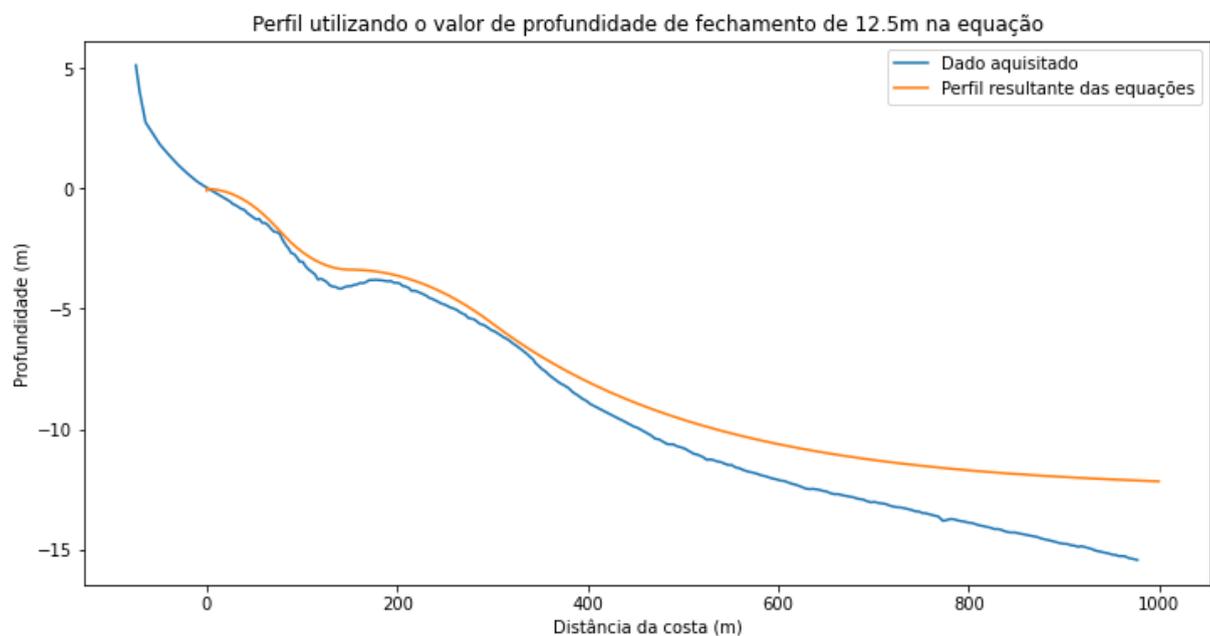
Fonte: elaborado pela autora.

A profundidade de fechamento externa, cujo cálculo é função da altura e do período significativo da onda (DEAN, 2002), caracteriza a transição entre a região do perfil da praia onde mudanças significativas podem ser observadas e a região onde essas mudanças são negligenciáveis (VALIENTE *et al.*, 2019).

Ao observar a figura 11 é possível perceber que a morfologia do perfil não apresenta grandes alterações a partir de cerca de 12,5m de profundidade, o que caracteriza a profundidade de fechamento, corroborando o que descreveram Patterson e Nielsen (2016), para a região da Gold Coast, assim como na base de dados da distribuição global de profundidades próximas à costa, geradas por Athanasiou *et al.* (2019).

Entretanto, ao utilizar esse valor na equação 10 não foram obtidos bons resultados, como pode ser observado na figura 12.

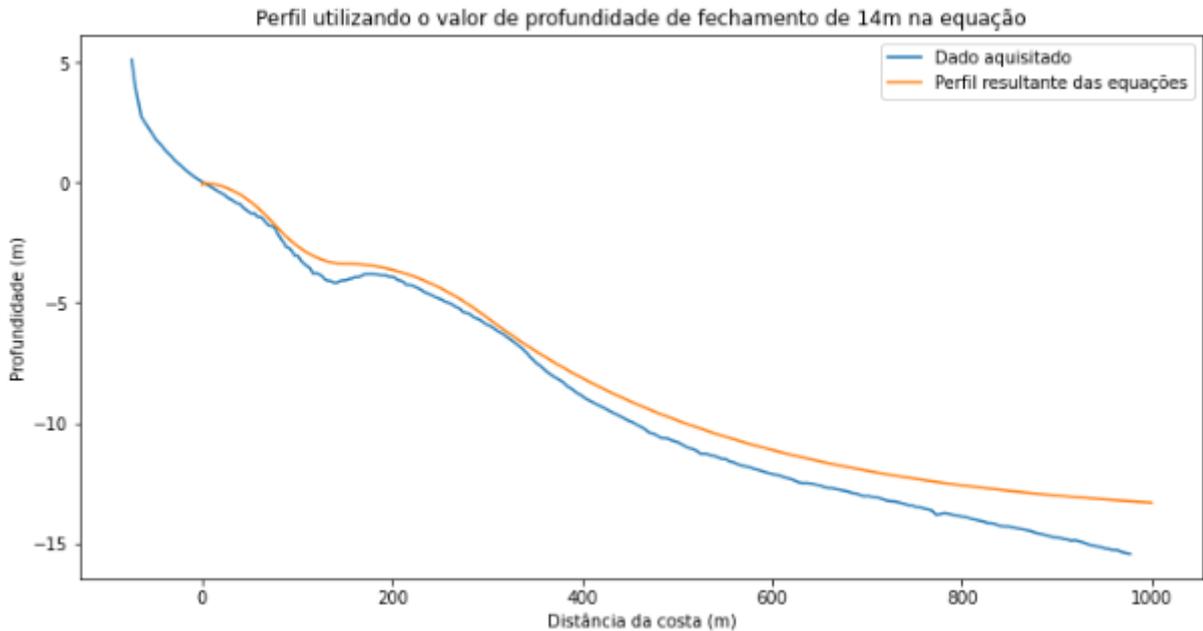
Figura 12. Perfil resultante da aplicação das equações utilizando o valor de 12,5m como profundidade de fechamento na equação 11. O Perfil apresentado é o transecto ETA78.50 no dia 25 de janeiro de 2017, localizado na praia The Spit.



Fonte: elaborado pela autora.

Strauss *et al.* (2017) utiliza a profundidade de fechamento de -14m, com base em medições alternativas de Index de Volumes de praias. Assim, testes também foram realizados utilizando esta profundidade, como o demonstrado na figura 13.

Figura 13. Perfil resultante da aplicação das equações utilizando o valor de 14m como profundidade de fechamento na equação 11. O Perfil apresentado é o transecto ETA78.50 no dia 25 de janeiro de 2017, localizado na praia The Spit.

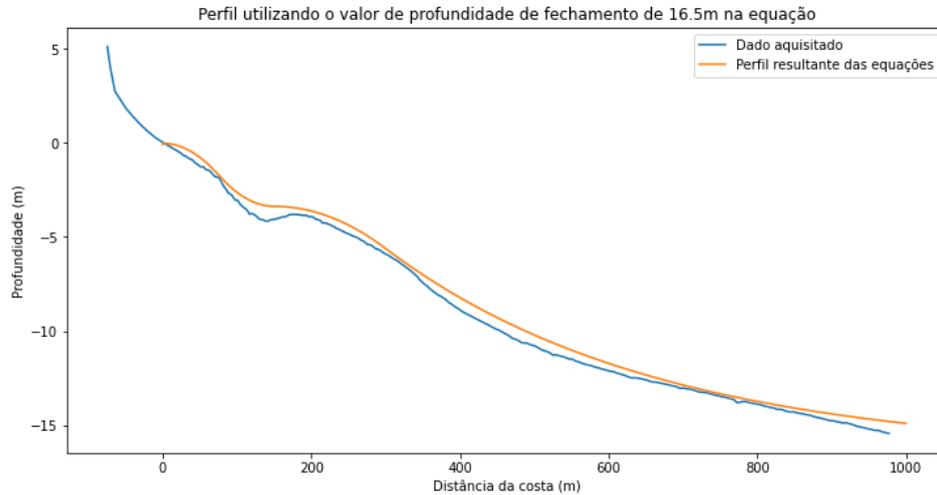


Fonte: elaborado pela autora.

Como descrito por Patterson e Nielsen (2016), a região de Gold Coast apresenta um declive não usual, no qual a porção do perfil após os bancos demonstra um decaimento linear, e não côncavo.

Na tentativa de calibrar as equações aos perfis analisados, constatou-se que empregando o valor de profundidade de fechamento de 16,5m na equação 11 (Figura 14) os resultados mostram-se melhores quando comparados aos dados obtidos, entretanto, utilizar o valor de 16,5m para a profundidade de fechamento não representa a física do local.

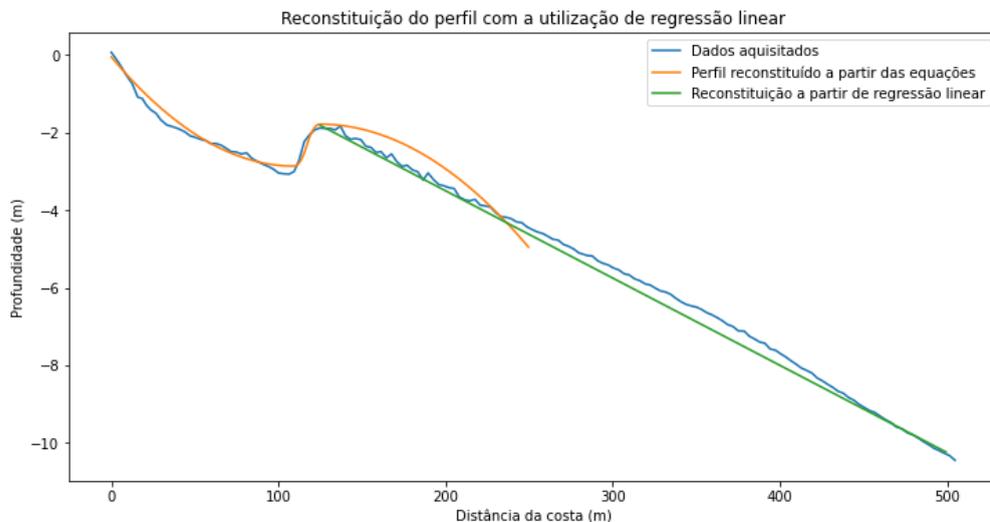
Figura 14. Perfil resultante da aplicação das equações utilizando o valor de 16,5m como profundidade de fechamento na equação 11. O Perfil apresentado é o transecto ETA78.50 no dia 25 de janeiro de 2017, localizado na praia The Spit.



Fonte: elaborado pela autora.

Como alternativa para a inversão da batimetria nesta região do perfil, para outros perfis, houve a tentativa de implementar uma regressão linear utilizando os pontos dos dados obtidos para gerar a equação. Um exemplo pode ser observado na figura 15.

Figura 15. Perfil resultante da aplicação das equações em laranja e utilizando regressão linear em verde. O Perfil apresentado é o transecto ETA66 no dia 21 de abril de 2021, localizado na praia de Narrowneck Reef.



Fonte: elaborado pela autora.

Para solucionar o problema relacionado à descrição da profundidade de fechamento, uma possibilidade seria utilizar as equações 7 a 10 para descrever os perfis dos bancos e a metodologia proposta Traganos *et al.* (2018) e aplicada por Turner *et al.* (2021) a partir da distância do final do banco (xf) até a distância da profundidade de fechamento.

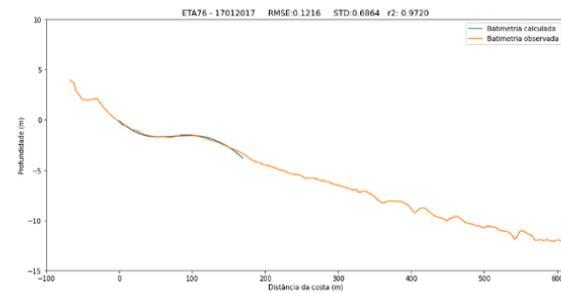
Considerando que a equação 11 não apresentou bons resultados para a metodologia no local de estudo aplicado, optou-se por prosseguir as análises considerando o perfil batimétrico até o final do banco (xf), sem estimar a porção que vai do final do banco até a profundidade de fechamento.

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE A BATIMETRIA CALCULADA E OBSERVADA POR ÉPOCA DO ANO

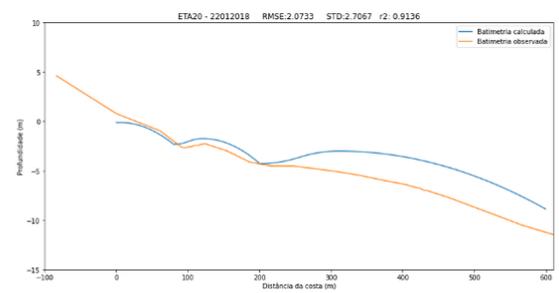
A partir da aplicação descrita, foi possível comparar a batimetria calculada e observada. Trezentos (300) transectos foram reproduzidos utilizando dados observados como parâmetros de entrada.

A reconstituição dos perfis coletados no verão apresentou um RMSE variando de 0,12 a 2,07, com o parâmetro de correlação R^2 variando de 0,83 a 0,97 (Figura 16). Para os perfis de outono, o RMSE variou de 0,34 a 2,09 e R^2 0,86 a 0,96 (Figura 17). Para a primavera, o RMSE variou de 0,49 a 1,97 com R^2 0,89 a 0,95 (Figura 18). A estação de inverno apresentou melhores resultados estatísticos, com RMSE variando de 0,26 a 1,82 e maior correlação, variando de 0,86 a 0,98 em comparação com os dados observados (Figura 19). Este comportamento pode ser relacionado com o regime de ondas do local, pois enquanto nos meses de inverno há uma redução na energia de ondas, no verão a energia de ondas aumenta (SILVA *et al.*, 2021). A reconstituição de outros perfis pode ser vista no apêndice A (Figuras 36 a 39).

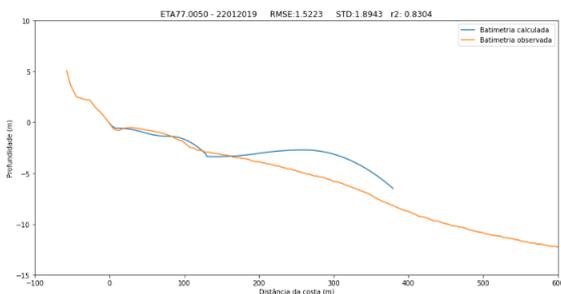
Figura 16. Dados de perfis batimétricos coletados na estação de verão, utilizando dados observados (linha laranja) como dados de entrada para calcular a batimetria (linha azul). A) Transecto ETA76, localizado na praia The Spit, do dia 17 de janeiro de 2017, RMSE de 0,1216 e R^2 0,9720. B) Transecto ETA20, localizado na praia Bilinga, do dia 22 de janeiro de 2018, RMSE de 2,7067 e R^2 0,9136. C) Transecto ETA77.0050, localizado na praia The Spit do dia 22 de janeiro de 2019, RMSE de 1,523 e R^2 0,8304.



A



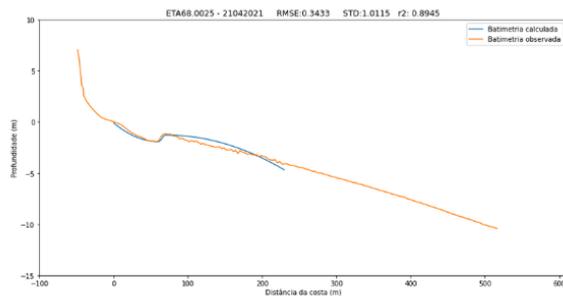
B



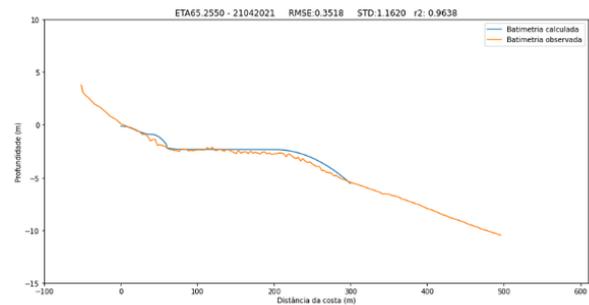
C

Fonte: elaborado pela autora.

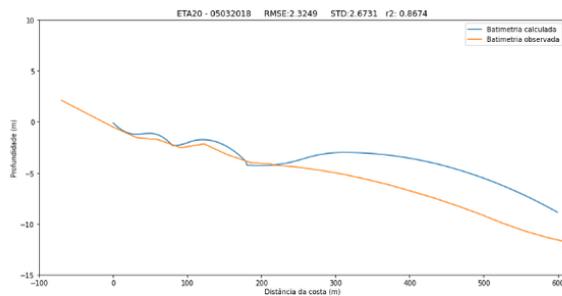
Figura 17. Dados de perfis batimétricos coletados na estação de outono, utilizando dados observados (linha laranja) como dados de entrada para calcular a batimetria (linha azul). A) Transecto ETA68.0025, localizado na praia do recife artificial de Narrowneck, do dia 21 de abril de 2021, RMSE de 0,3433 e R^2 0,8925. B) Transecto ETA65.2550, localizado na praia do recife artificial de Narrowneck, do dia 21 de abril de 2021, RMSE de 0,3518 e R^2 0,9638. C) Transecto ETA20, localizado na praia Bilinga do dia 05 de março de 2018, RMSE de 2,3249 e R^2 0,8674.



A



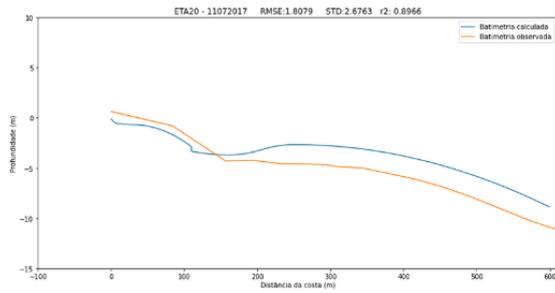
B



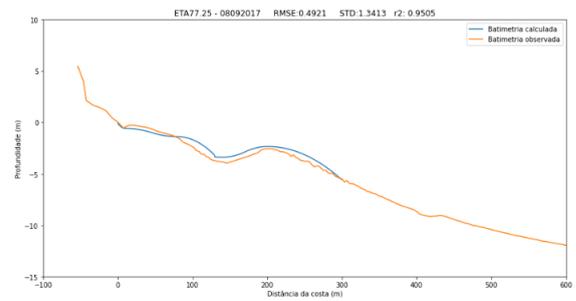
C

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 18. Dados de perfis batimétricos coletados na estação de primavera, utilizando dados observados (linha laranja) como dados de entrada para calcular a batimetria (linha azul). A) Transecto ETA20, localizado na praia de Bilinga, no dia 11 de julho de 2017, RMSE de 1,8079 e R^2 0,8966. B) Transecto ETA77.25, localizado na praia The Spit, no dia 08 de setembro de 2017, RMSE de 0,49 e R^2 0,9505.



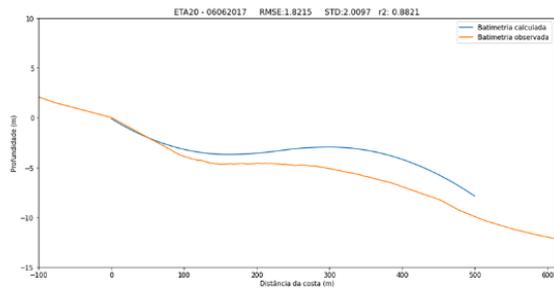
A



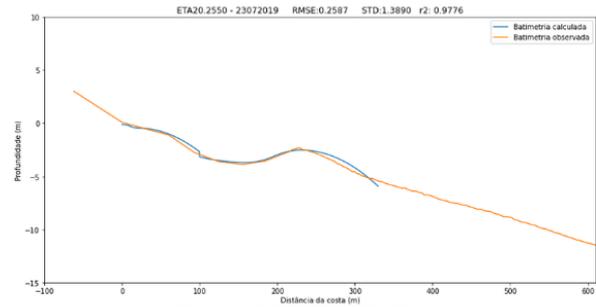
B

Fonte: elaborado pela autora.

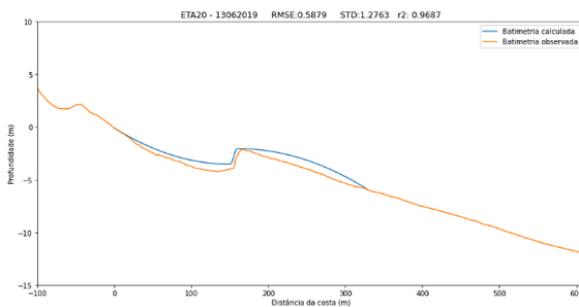
Figura 19. Dados de perfis batimétricos coletados na estação de inverno, utilizando dados observados (linha laranja) como dados de entrada para calcular a batimetria (linha azul). A) Transecto ETA20, localizado na praia de Bilinga, no dia 06 de junho de 2017, RMSE de 1,8215 e R^2 0,8821. B) Transecto ETA20.2550, localizado na praia Bilinga, no dia 23 de julho de 2019, RMSE de 0,2587 e R^2 0,9776. B) Transecto ETA20, localizado na praia The Spit, no dia 13 de junho de 2019, RMSE de 0,5879 e R^2 0,9607.



A



B

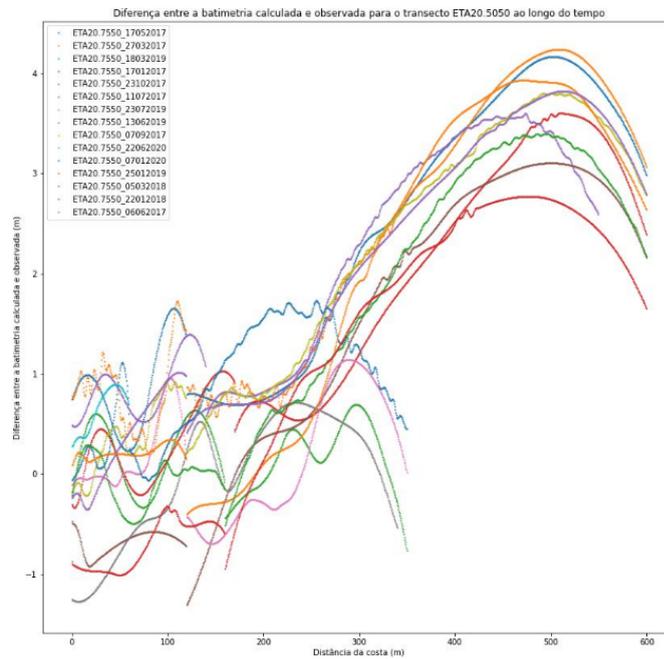


C

Fonte: elaborado pela autora.

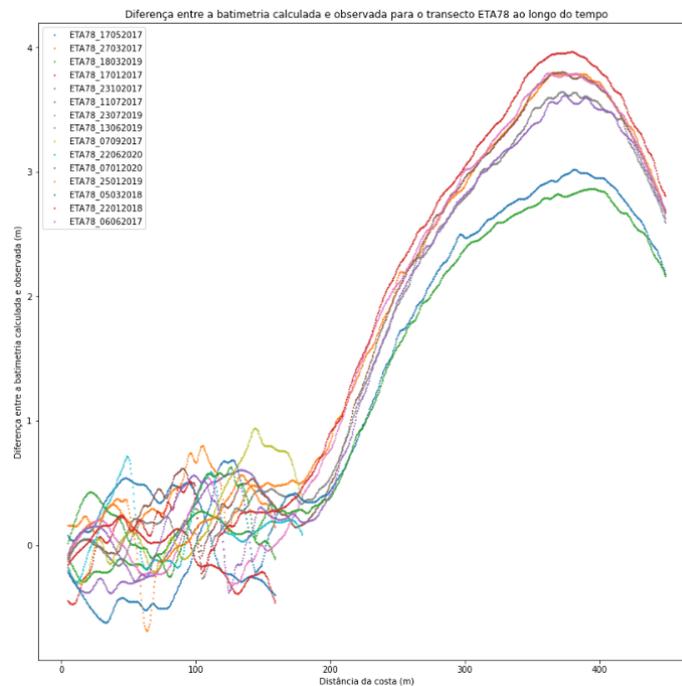
Um comportamento a ser observado é a superestimação do banco mais externo dos perfis, quando há mais de um banco no mesmo perfil, como os que ocorreram nos perfis representados nas figuras 16B, 16C, 17C, 18A e 19A. Este aspecto foi observado aplicando as equações para diferentes praias, como pode ser visto a seguir em gráficos da batimetria calculada e observada (Figuras 20 e 21). É importante lembrar que estas praias já passaram por empreendimentos de alimentação artificial (JACKSON, HILL, & MCGRATH, 2013), o que pode ter influência na morfologia dos perfis.

Figura 20. Diferença entre a batimetria calculada e a observada para o transecto ETA20.5050, localizado na praia Bilinga, ao longo do tempo.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 21. Diferença entre a batimetria calculada e a observada para o transecto ETA78, localizado na praia The Spit, ao longo do tempo.



Fonte: elaborado pela autora.

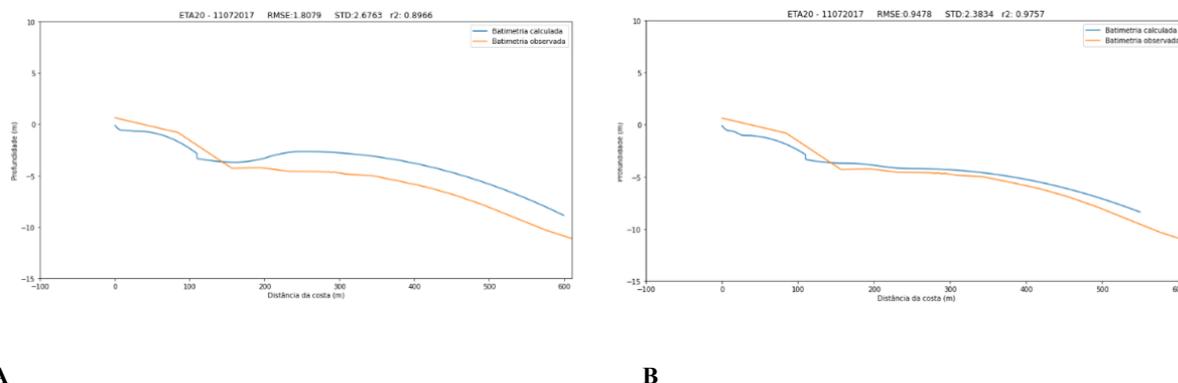
Considerando as equações, algumas das causas desse comportamento podem ser (a) o maior valor de x_c , uma vez que a distância entre a crista do segundo banco será maior do que a do primeiro; (b) o estado morfodinâmico do banco, pois as equações foram descritas para representar bancos em equilíbrio; (c) As equações não foram descritas para representar mais de um banco no mesmo perfil, aplicar as equações duas vezes para o mesmo perfil foi uma adaptação feita neste trabalho; (d) o tamanho de grão não é considerado nas equações 2 e 3, que descrevem a profundidade da crista do banco.

O tamanho de grão, assim como a seleção, influencia na declividade do perfil. Perfis com maiores ângulos de inclinação estão associados a maiores tamanhos de grãos, assim como sedimentos melhor selecionados estão comumente associados a perfis mais íngremes, enquanto zonas de sedimentos pobremente selecionados estão mais associadas a platôs. (MCLEAN, 1969).

Com a intenção de incluir o tamanho de grão na metodologia, a equação (1) foi empregada. Para definir o parâmetro de escala do perfil (A), Dean (2002) apresenta uma tabela para valores de tamanho de areia incrementando de 0,01mm de diâmetro, de 0,1mm até 1,09 mm.

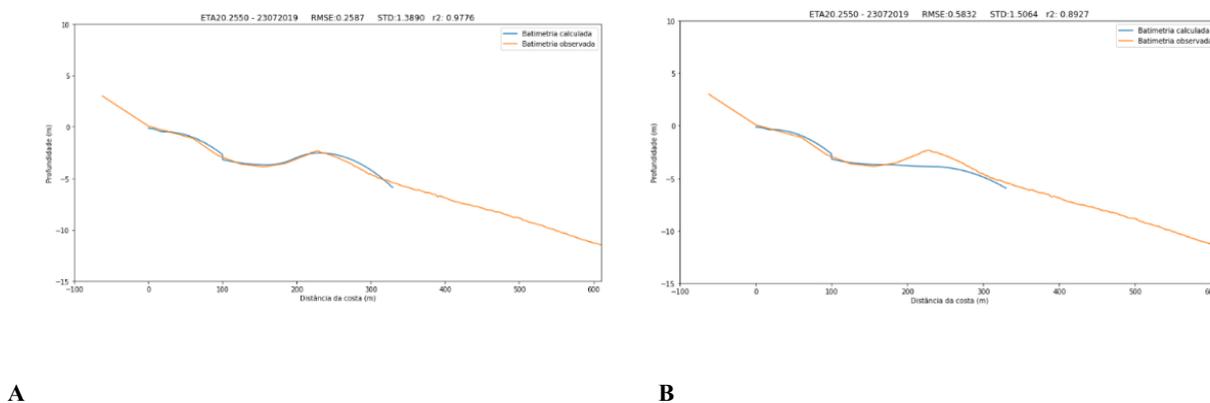
Considerando o diâmetro de 0,22mm para a região da Gold Coast (PATTERSON e NIELSEN, 2016) e a tabela de Dean (DEAN, 2002) para encontrar o valor de A, um diâmetro de 0,22mm resulta num $A=0,106$. Assim, a equação: $h_c = 0,106x_c^{2/3}$ foi considerada para gerar os perfis demonstrados a seguir. A figura 22 representa um perfil no qual a equação 1 (Figura 22A) apresentou menor valor de RMSE e maior correlação, quando comparado ao perfil gerado pelas equações 2 e 3 (Figura 22B), variando de 1,81 para 0,94 e de 0,89 a 0,97, respectivamente. Todavia, a figura 23 demonstra um perfil no qual as equações 2 e 3 são as que demonstraram melhor resultado, com RMSE de 0,26 e R^2 de 0,98 (Figura 23A), passando a um RMSE de 0,58 e R^2 0,89 com a equação 1 (Figura 23B). Outras figuras comparando as equações são demonstradas no apêndice A (Figuras 40 a 44).

Figura 22. Transecto ETA20, obtido no dia 11 de julho de 2017. A linha azul representa a batimetria calculada e a linha laranja a batimetria observada. A batimetria exposta na figura (a) foi calculada através da equação (2), enquanto a da figura (b) foi calculada a partir da relação $hc=0,106*xc^{(2/3)}$.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 23. Transecto ETA20.2550, obtido no dia 23 de julho de 2019. A linha azul representa a batimetria calculada e a linha laranja a batimetria observada. A batimetria exposta na figura (a) foi calculada através da equação (2), enquanto a da figura (b) foi calculada a partir da relação $hc=0,106*xc^{(2/3)}$.



Fonte: elaborado pela autora.

Tendo em consideração que o estado morfodinâmico dos perfis que apresentaram melhores resultados com as equações 2 e 3 estão mais próximos de um perfil de equilíbrio, fica evidente que as equações de Silvester e Hsu (1997) e Caballeria *et al.* (2003) são representativas para perfis em equilíbrio, mas para representar perfis em outro estado morfodinâmico a metodologia precisa de modificações. Levando em conta os resultados

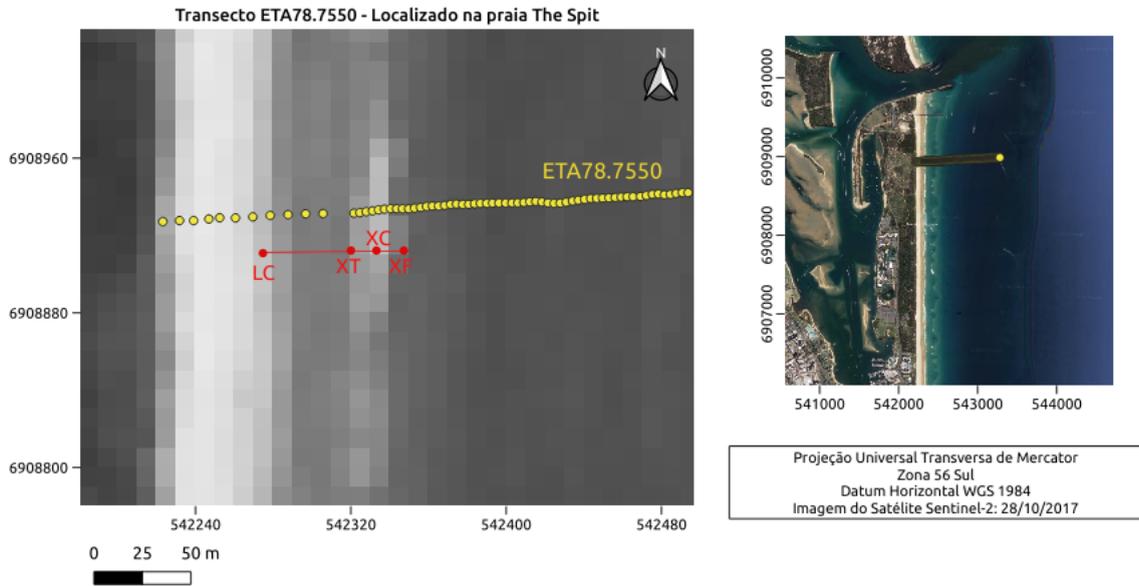
apresentados, a equação 1, que considera o tamanho de grão da região, apresenta-se como uma boa opção de adaptação à metodologia.

4.5 APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES À IMAGENS DE SATÉLITE

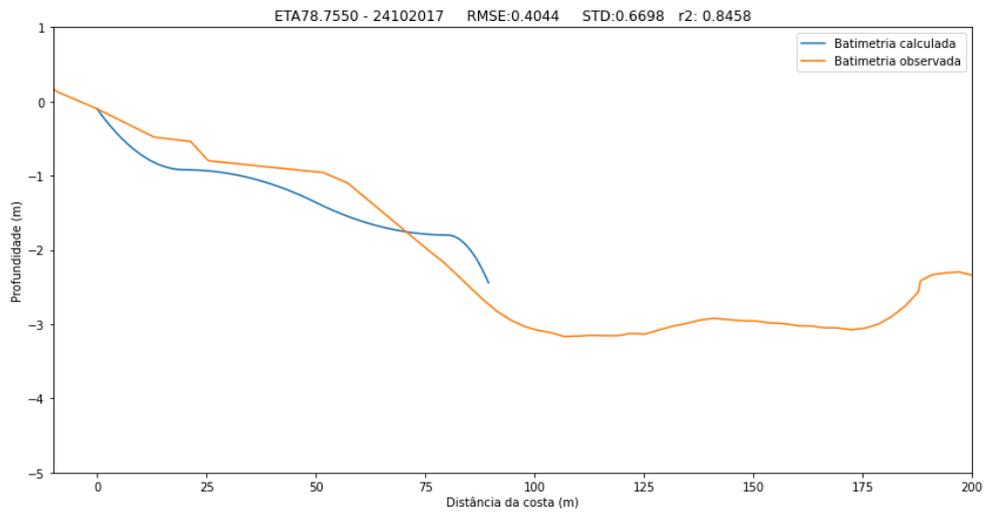
A metodologia foi aplicada 30 vezes para cada praia, totalizando 150 reconstituições de transectos. Alguns dos perfis reconstituídos podem ser vistos nas Figuras 24 a 27.

Comparando a batimetria observada e calculada, foram obtidos valores de RMSE variando entre 0,36 e 0,40 e valores do parâmetro R^2 para correlação entre 0,84 e 0,95.

Figura 24. (a) Representação dos dados extraídos da imagem do satélite Sentinel-2 do dia 28 de outubro de 2017 para o transecto ETA78.7550, onde LC representa a Linha de costa, XC a distância da linha de costa até a crista do banco, XT o ponto de equilíbrio do banco e XF a distância entre o ponto final do banco e a LC. (b) Batimetria calculada (linha azul) a partir das variáveis extraídas da figura (a) e a batimetria observada (linha laranja) para o transecto ETA78.7550 no dia 24 de outubro de 2017.



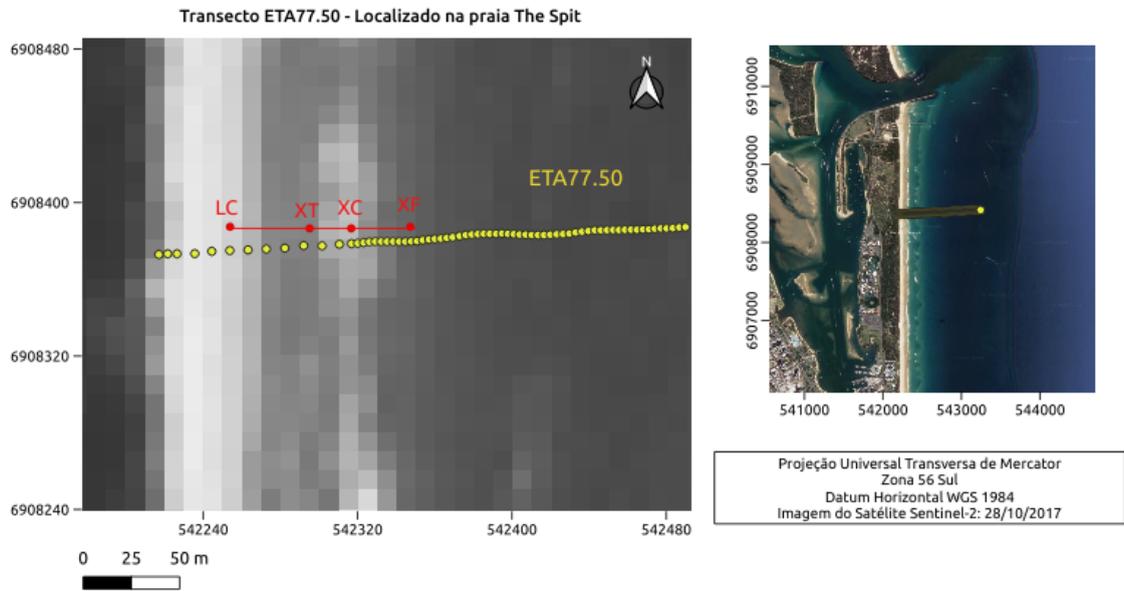
A



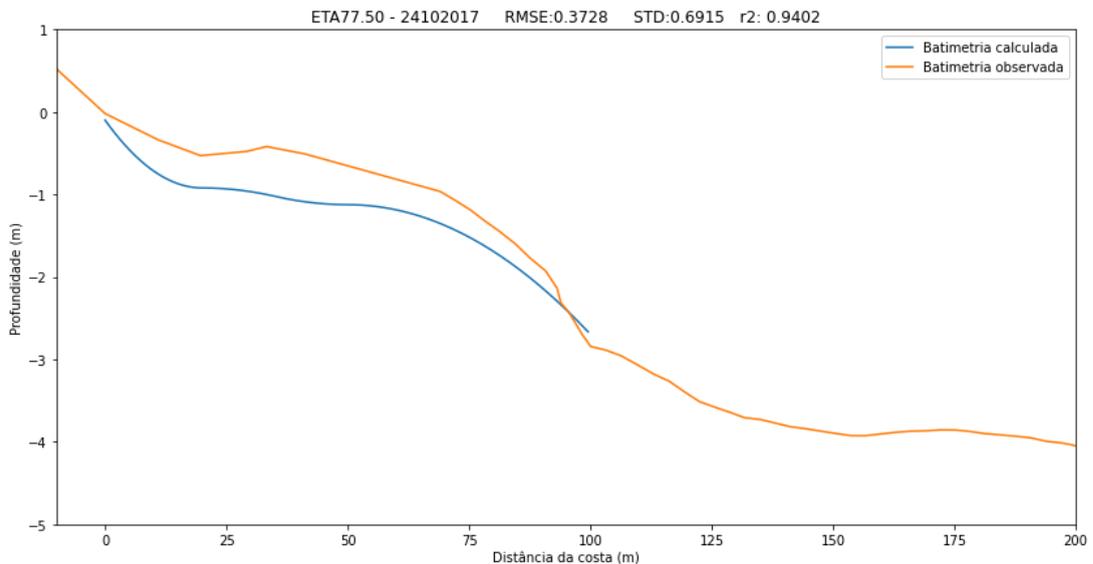
B

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 25. (a) Representação dos dados extraídos da imagem do satélite Sentinel-2 do dia 28 de outubro de 2017 para o transecto ETA77.50, onde LC representa a Linha de costa, XC a distância da linha de costa até a crista do banco, XT o ponto de equilíbrio do banco e XF a distância entre o ponto final do banco e a LC. (b) Batimetria calculada (linha azul) a partir das variáveis extraídas da figura (a) e a batimetria observada (linha laranja) para o transecto ETA77.50 no dia 24 de outubro de 2017.



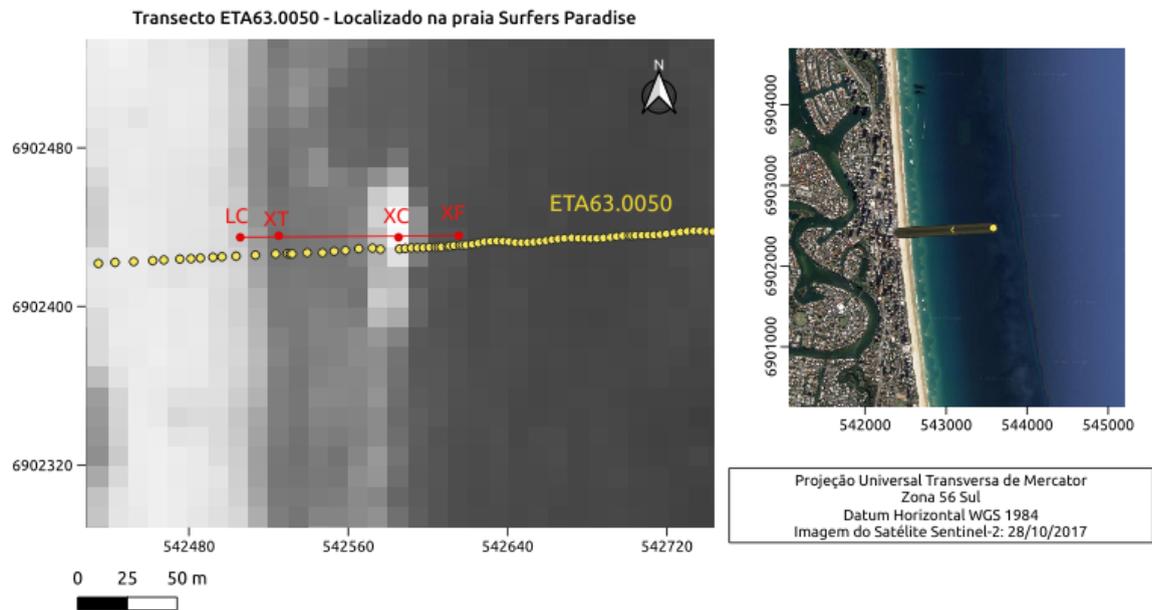
A



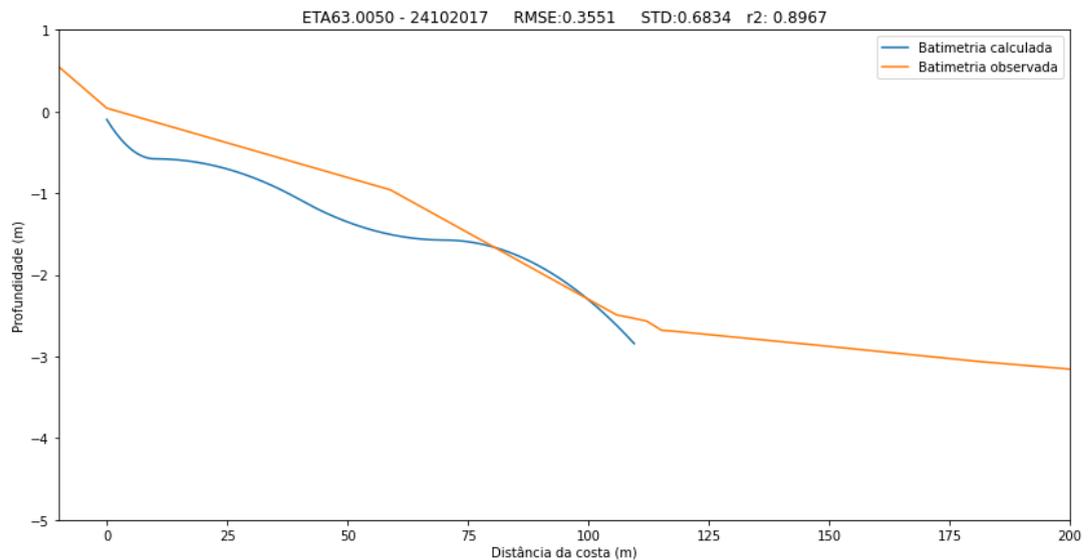
B

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 26. (a) Representação dos dados extraídos da imagem do satélite Sentinel-2 do dia 28 de outubro de 2017 para o transecto ETA63.0050, onde LC representa a Linha de costa, XC a distância da linha de costa até a crista do banco, XT o ponto de equilíbrio do banco e XF a distância entre o ponto final do banco e a LC. (b) Batimetria calculada (linha azul) a partir das variáveis extraídas da figura (a) e a batimetria observada (linha laranja) para o transecto ETA63.0050 no dia 24 de outubro de 2017.



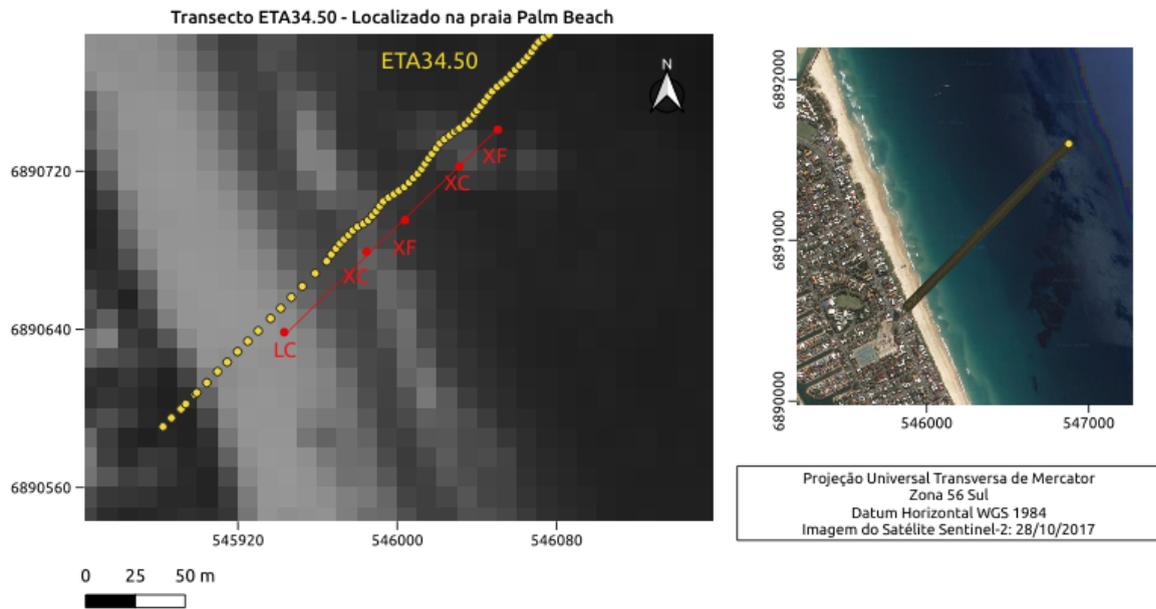
A



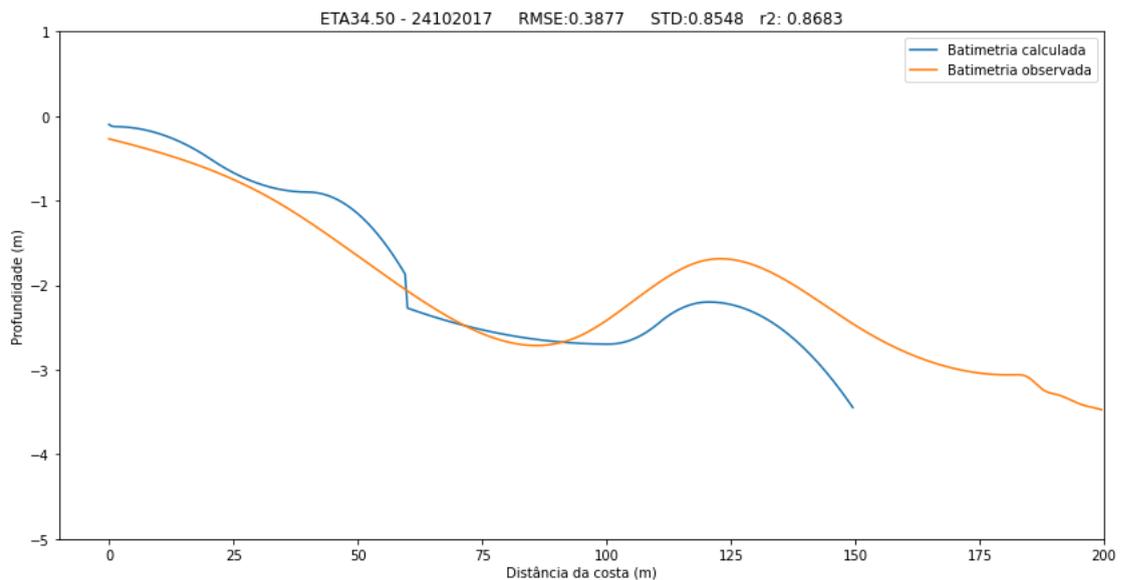
B

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 27. (a) Representação dos dados extraídos da imagem do satélite Sentinel-2 do dia 28 de outubro de 2017 para o transecto ETA77.50, onde LC representa a Linha de costa, XC a distância da linha de costa até a crista do banco, XT o ponto de equilíbrio do banco e XF a distância entre o ponto final do banco e a LC. (b) Batimetria calculada (linha azul) a partir das variáveis extraídas da figura (a) e a batimetria observada (linha laranja) para o transecto ETA77.50 no dia 24 de outubro de 2017.



A

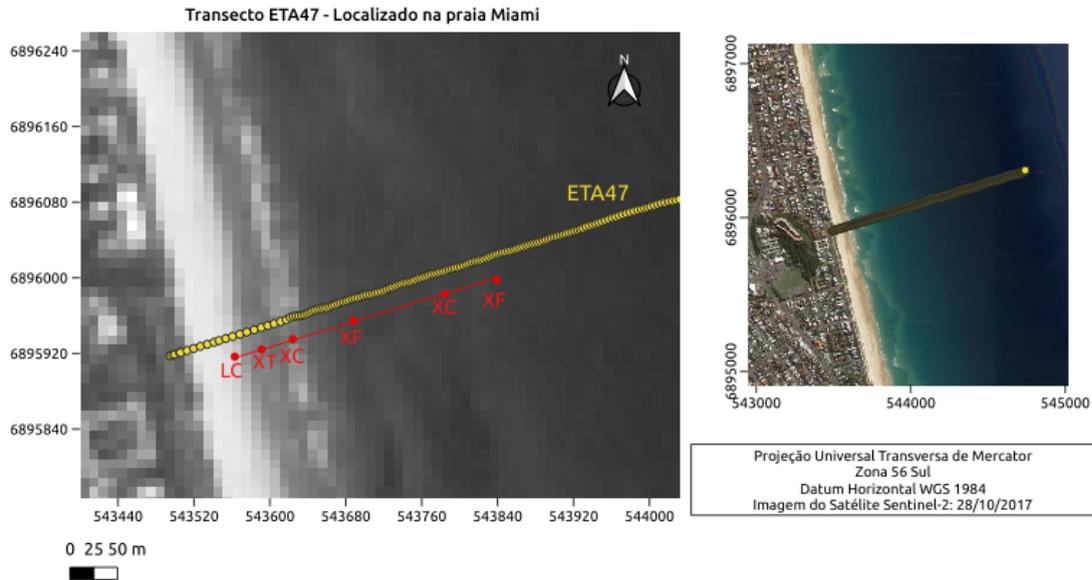


B

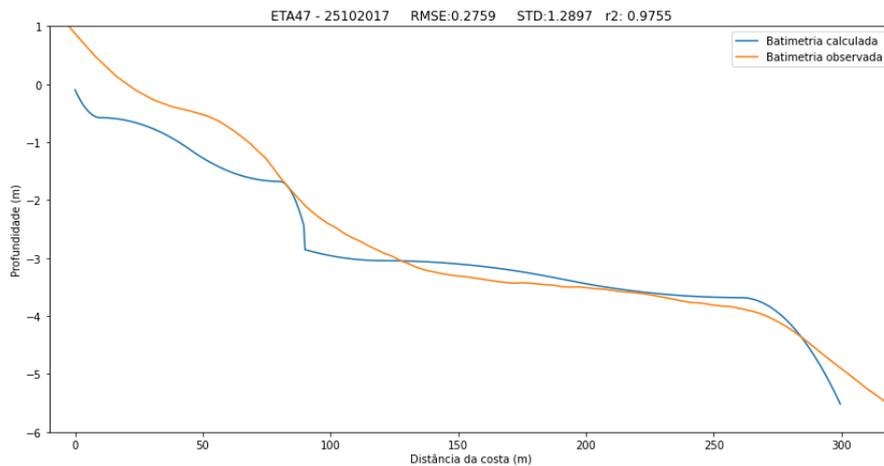
Fonte: elaborado pela autora.

Apesar de ser recorrente o aparecimento de mais de um banco nos perfis da região, a metodologia raramente pode ser aplicada aos bancos posteriores, pois a arrebenção de ondas neste caso ocorre apenas em eventos enérgicos, acompanhados de alta coberturas de nuvens, impedindo a observação de arrebenção de ondas nas imagens. Entretanto, com a finalidade de validar a metodologia, as equações foram aplicadas a alguns bancos cuja visualização foi possível graças à alta transparência da água (Figura 28).

Figura 28. (a) Representação dos dados extraídos da imagem do satélite Sentinel-2 do dia 28 de outubro de 2017 para o transecto ETA77.50, onde LC representa a Linha de costa, XC a distância da linha de costa até a crista do banco, XT o ponto de equilíbrio do banco e XF a distância entre o ponto final do banco e a LC. (b) Batimetria calculada (linha azul) a partir das variáveis extraídas da figura (a) e a batimetria observada (linha laranja) para o transecto ETA77.50 no dia 24 de outubro de 2017.



A



B

Fonte: elaborado pela autora.

Ao observar os resultados de RMSE de 0,27 e de R2 de 0,98 do exemplo da figura 28, mesmo que nas imagens de satélite comumente apenas o primeiro banco demonstre

arrebentação de ondas, as equações podem ser aplicadas a mais de um banco caso a transparência da água seja alta o suficiente para que os bancos posteriores sejam visualizados nas imagens.

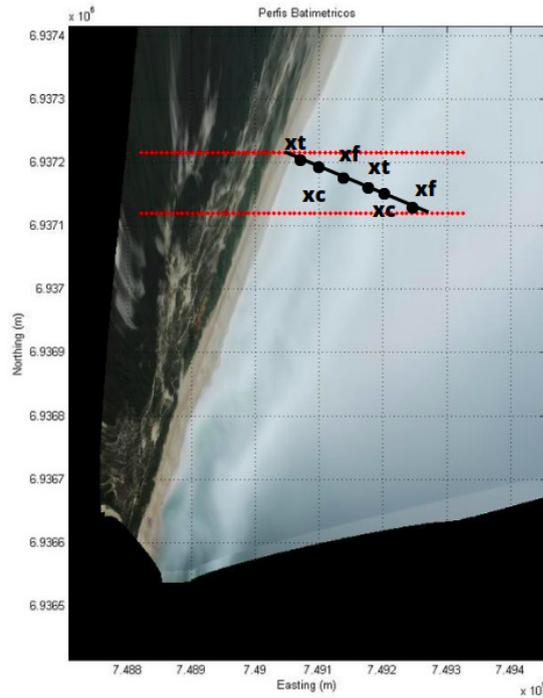
4.6 APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES A IMAGEM DE DRONE

O imageamento por drone pode ser uma alternativa às imagens de satélite devido a possibilidade de serem feitas com uma maior periodicidade e com maior resolução. Conforme discutido por Holman, Brodie e Spore (2017), imagens de drone podem produzir resultados comparáveis a estações de câmeras fixas e até apresentarem vantagens na medição no início da quebra da onda, um parâmetro importante para a metodologia descrita neste estudo.

Considerando o potencial de imagens de drone para a inversão batimétrica, foi realizado um teste com uma imagem retificada da praia do Campeche, localizada em Florianópolis, Santa Catarina. A imagem foi gerada a partir de um vídeo de 17 minutos, com início às 9:00 horas do dia 27 de Abril de 2019. A imagem retificada foi gerada por Bastos (*no prelo*).

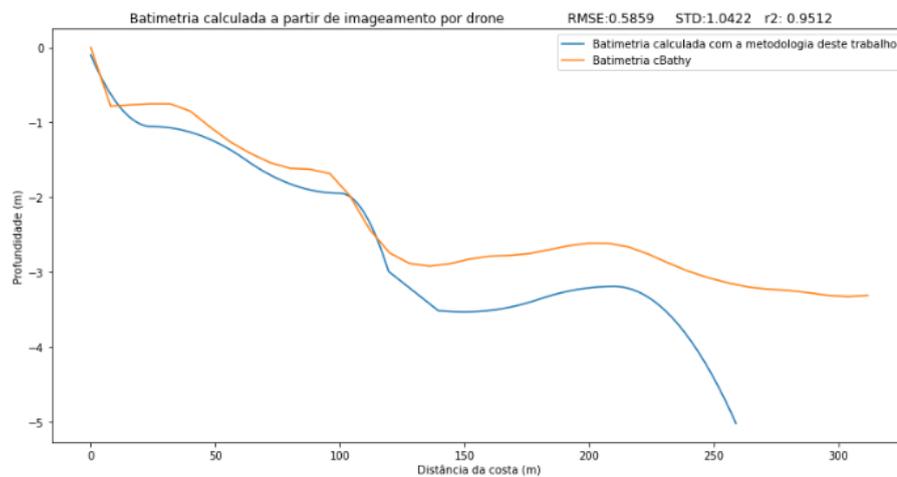
O diâmetro médio de grão presente na região é 0,17mm (PEIXOTO, HORN & CASTELANI, 2012; TORRONTEGUY, 2002). Utilizando os dados da tabela de Dean (DEAN, 2002), obtém-se o parâmetro de escala de perfil da praia $A = 0,0904$. Este valor foi utilizado nas equações para a reconstituição do perfil (Figura 29). A batimetria disponibilizada para este estudo segue a malha da imagem, portanto, os dois transectos em vermelho foram interpolados de acordo com a distância da costa, compondo o transecto em preto, o qual foi extraído da forma descrita na metodologia deste trabalho. A batimetria de todo o perfil calculado apresentou um RMSE de 0,58 e R^2 de 0,86. Em comparação com a batimetria calculada pelo cBathy. Considerando apenas a porção do transecto calculada para o primeiro banco, o RMSE encontrado foi de 0,20 e R^2 de 0,94.

Figura 29. (A) Representação dos dados extraídos da imagem de drone do dia 27 de Abril de 2019, para a praia do Campeche, onde LC representa a Linha de costa, XC a distância da linha de costa até a crista do banco, XT o ponto de equilíbrio do banco e XF a distância entre o ponto final do banco e a LC. (B) Batimetria calculada pela metodologia proposta neste trabalho (linha azul) a partir das variáveis extraídas da figura (A) e a batimetria calculada pelo cBathy (linha laranja).



A

Fonte: Bastos (no prelo).

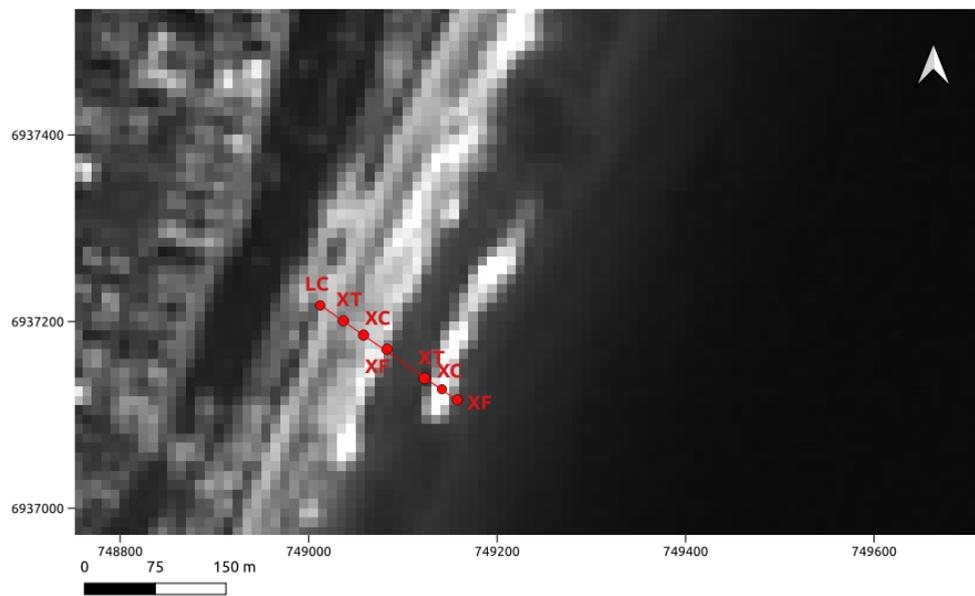


B

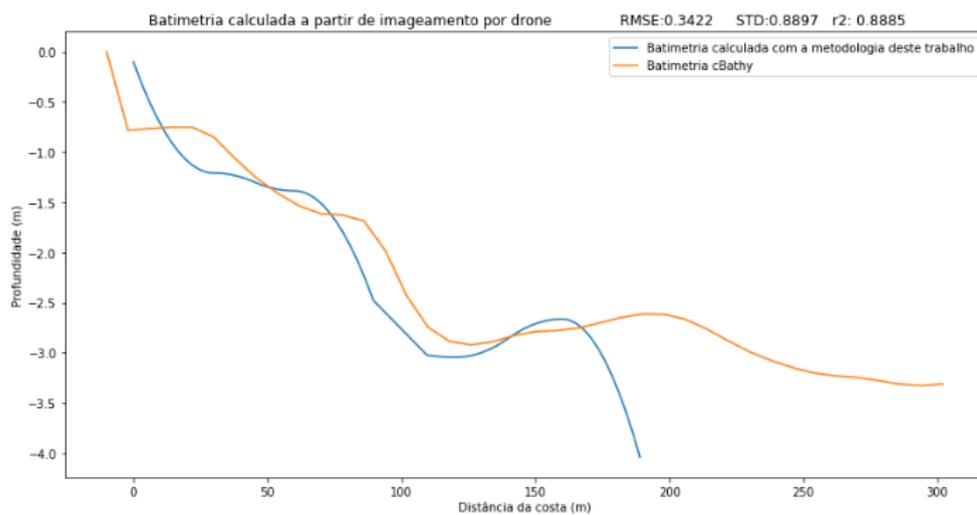
Fonte: elaborado pela autora.

A fim de complementar a comparação entre os métodos, um perfil da mesma região foi reconstituído a partir de uma imagem de satélite para uma data próxima ao imageamento por drone (Figura 30). A reconstituição a partir da imagem de satélite apresentou um deslocamento na distância da costa, entretanto a profundidade dos bancos ficou próxima aos valores de batimetria gerados com o *cBathy* por Bastos (*no prelo*), resultando num valor menor de RMSE, mas com uma menor correlação. A reconstituição do primeiro banco se mostrou muito mais próxima, assim como os encontrados para a região da Gold Coast, apresentados neste trabalho. Os resultados expressam que, mesmo que com uma maior resolução melhores resultados possam ser encontrados, o uso de imagens de satélite na reconstituição de perfis batimétricos não deve ser descartado, já que são de mais fácil acesso, com uma maior cobertura espacial e temporal.

Figura 30. (A) Representação dos dados extraídos de imagem do satélite Sentinel-2 do dia 02 de maio de 2019, para a praia do Campeche, onde LC representa a Linha de costa, XC a distância da linha de costa até a crista do banco, XT o ponto de equilíbrio do banco e XF a distância entre o ponto final do banco e a LC. (B) Batimetria calculada pela metodologia proposta neste trabalho (linha azul) a partir das variáveis extraídas da figura (A) e a batimetria calculada pelo cBathy (linha laranja).



A



B

Fonte: elaborado pela autora.

5 CONCLUSÃO

Uma técnica de reconstituição de perfil batimétrico de praias a partir de imagens do satélite Sentinel-2 foi desenvolvida, utilizando a combinação das equações de Caballeria *et al.* (2003) e Silvester e Hsu (1997). A metodologia foi aplicada à região da *Gold Coast*, Austrália, para imagens registradas entre o período de 2015 e 2021.

A arrebentação de ondas pode ser identificada nas imagens de satélite pelo contraste entre a intensidade luminosa dos pixels. As imagens do Sentinel-2 têm 10m de resolução, o que torna os resultados de RMSE encontrados baixos. Para outros estudos, seria interessante que a metodologia fosse testada com imagens com maior resolução, como as obtidas por drones. Um teste com imagem de drone foi realizado para a região da praia do Campeche, em Florianópolis - SC. Os resultados demonstraram que a partir de imagens com maior resolução são melhores, entretanto, imagens de satélite também apresentam bons resultados e seu uso na reconstituição de perfis batimétricos não deve ser descartado, especialmente para levantamentos exploratórios, que permitem trabalhar com menor acurácia apresentando baixo custo, assim como a possibilidade de construção de séries temporais.

Apesar de nas imagens de satélite frequentemente apenas o primeiro banco demonstrar arrebentação de ondas, a metodologia pode ser aplicada a mais de um banco, desde que seja possível observar a arrebentação de onda nessa região do perfil, ou a transparência da água seja alta o suficiente para que os bancos posteriores sejam visualizados nas imagens.

A metodologia não apresentou bons resultados no que diz respeito à parte final do perfil, considerando a profundidade de fechamento. Para a reconstituição de todo o perfil, uma sugestão é utilizar a metodologia descrita neste trabalho até a profundidade do fim do banco, e uma metodologia alternativa até a profundidade de fechamento, como a proposta Traganos *et al.* (2018) e aplicada por Turner *et al.* (2021) para a região da *Gold Coast*.

As equações de Silvester e Hsu (1997) e Caballeria *et al.* (2003) se mostraram satisfatórias para representar perfis batimétricos com bancos em equilíbrio morfodinâmico. Entretanto, para representar bancos que não estão em equilíbrio, adaptações precisam ser feitas à metodologia. Integrar o tamanho de grão à técnica, como com a equação de Bruun (1954), demonstrou bons resultados.

A automatização desta metodologia é uma sugestão para outros trabalhos, pois tanto a localização da arrebentação de ondas, quanto sua distância da linha de costa, pode ser feito de

forma automatizada, utilizando o método apresentado por Ford e Dickson (2018), assim aumentando a possibilidade de perfis a serem reconstituídos. Com o aumento da periodicidade do imageamento por satélite, também torna-se possível a utilização de mais imagens para um mesmo período, sendo possível a análise da frequência de arrebenção de ondas para um mesmo local, reduzindo os erros da reconstituição.

REFERÊNCIAS

- ALVES, D. C. L.; de ALMEIDA ESPINOZA, J. M.; ALBUQUERQUE, M. da G.; da SILVA, M. B.; FONTOURA, J. S.; SERPA, C.; WESCHENFELDER, J.. Bathymetry estimation by orbital data of OLI sensor: A case study of the Rio Grande harbor, southern Brazil. **Journal of Coastal Research**, n. 85 (10085), p. 51-55, 2018.
- ATHANASIOU, P., DONGEREN, A., GIARDINO, A., VOUSDOUKAS, M., GAYTAN-AGUILAR, S. ROSHANKA, R. Global distribution of nearshore slopes with implications for coastal retreat. **Earth system science data**, v. 11, n. 4, p. 1515-1529, 2019.
- BASTOS, A. F. C.. Estudo das correntes longitudinais por meio de modelagem numérica e batimetria inversa: estudo de caso na praia do Campeche. *No prelo*.
- BRUUN, P.. Coast erosion and the development of beach profiles: technical memorandum Rep. Technical Memorandum No. 44 Beach Erosion Board Corps Of Engineers. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/11681/3426>>. 1954.
- CABALLERIA, M., CALVETE, D., COCO, G., DODD, N., FALQUES, A. Formation and alongshore spacing of crescentic bars. In: **Proceedings of the 3rd Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics**. 2003.
- CASTELLE, B.; LE CORRE, Y.; TOMLINSON, R.. Can the gold coast beaches withstand extreme events?. **Geo-Marine Letters**, v. 28, n. 1, p. 23-30, 2008.
- DA SILVA, G. V., HAMILTON, D., STRAUSS, D., MURRAY, T., & TOMLINSON, R. Sediment pathways and morphodynamic response to a multi-purpose artificial reef—New insights. **Coastal Engineering**, v. 171, p. 104027, 2022.
- DEAN, R. Beach nourishment: theory and practice. **World scientific**, v.18 p.31, 2002.
- FILIPPI, Bianca. Obtenção de batimetria em estuários através de imagens de satélite: estudo de caso na Baía da Babitonga, SC. 2020.
- FORD, M. R.; DICKSON, M. E. Detecting ebb-tidal delta migration using Landsat imagery. **Marine Geology**, v. 405, p. 38-46, 2018.
- HOLMAN, R. A.; STANLEY, J.. The history and technical capabilities of Argus. **Coastal engineering**, v. 54, n. 6-7, p. 477-491, 2007.
- HOLMAN, R.; PLANT, N.; HOLLAND, T. cBathy: A robust algorithm for estimating nearshore bathymetry. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 118, n. 5, p. 2595-2609, 2013.
- HOLMAN, R. A.; LALEJINI, D. M.; EDWARDS; K.; VEERAMONY, J. A parametric model for barred equilibrium beach profiles. **Coastal engineering**, v. 90, p. 85-94, 2014.

- HOLMAN, R. A.; BRODIE, K. L.; SPORE, N. J. Surf zone characterization using a small quadcopter: Technical issues and procedures. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, v. 55, n. 4, 2017.
- HU, L.; ZHEN, L.; ZHISHEN, L.; CHUANMIN, H.; MING-XIA, H.; Mapping bottom depth and albedo in coastal waters of the South China Sea islands and reefs using Landsat TM and ETM+ data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 11-12, p. 4156-4172, 2014.
- JACKSON, A; HILL, P.; & MCGRATH, J.. A history of the implementation and evolution of sand nourishment methods on the Gold Coast, Australia. **Coasts Ports**. p. 418-423, 2013.
- KLEMAS, V. Beach profiling and LIDAR bathymetry: An overview with case studies. **Journal of Coastal Research**, v. 27, n. 6, p. 1019-1028, 2011.
- LI, J., KNAPP, D. E., LYONS, M., ROELFSEMA, C., PHINN, S., SCHILL, S. R., ASNER, G. P. Automated global shallow water bathymetry mapping using Google Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 13, n. 8, p. 1469, 2021.
- LIPPMANN, T.C., HOLMAN, R.A.. Quantification of sand bar morphology: a video technique based on wave dissipation. **Journal of Geophysical Research** 94, 995–1011. 1989
- LIPPMANN, T.C., HOLMAN, R.A.. The spatial and temporal variability of sand bar morphology. **Journal of Geophysical Research** 95, 11,575–11,590. 1990
- MCLEAN, R. F.; KIRK, R. M. Relationships between grain size, size-sorting, and foreshore slope on mixed sand-shingle beaches. **New Zealand Journal of Geology and Geophysics**, v. 12, n. 1, p. 138-155, 1969.
- PATTERSON, D. C.; NIELSEN, P. Depth, bed slope and wave climate dependence of long term average sand transport across the lower shoreface. **Coastal Engineering**, v. 117, p. 113-125, 2016.
- SENTINEL, E. S. A. User Handbook. **ESA Standard Document**, v. 64, 2., 2015.
- SHORT, A. D.; WRIGHT, L. D. Physical variability of sandy beaches. In: **Sandy beaches as ecosystems**. Springer, Dordrecht, p. 133-144. 1983.
- SILVA, A.P.; GOMES DA SILVA, P.; VIEIRA DA SILVA, G. ; PEREZ, J.; CAGIGAL, L.; MURRAY, T.; STRAUSS, D.; TOMLINSON, R. **Australasian Coasts & Ports 2021 Conference**. Wave Generation Zones off the East Australian Coast. 2021
- SILVESTER, R; HSU, J RC. Coastal stabilization. **Singapore: World Scientific**, p. 139-159, 1997.
- STRAUSS, D. S.; MURRAY, T.; HARRY, M.. Coastal data collection and profile surveys on the Gold Coast: 50 years on. In: **Australasian Coast & Ports Conference**. p. 1030-1036. 2017.

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.

TURNER, I. L. HARLEY, M. D., ALMAR, R., BERGSMA, E. W. Satellite optical imagery in Coastal Engineering. **Coastal Engineering**, v. 167, p. 103919, 2021.

VALIENTE, N. G., MASSELINK, G., SCOTT, T., CONLEY, D., & MCCARROLL, R. J. Role of waves and tides on depth of closure and potential for headland bypassing. *Marine Geology*, v. 407, p. 60-75, 2019.

VAN ENCKEVORT, I. M. J., RUESSINK, B. G., COCO, G., SUZUKI, K., TURNER, I. L., PLANT, N. G., HOLMAN, R. A. Observations of nearshore crescentic sandbars. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 109, n. C6, 2004.

VOS, K., HARLEY, M. D., SPLINTER, K. D., SIMMONS, J. A., TURNER, I. L. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. **Coastal Engineering**, v. 150, p. 160-174, 2019.

APÊNDICE A - EXEMPLOS DE BATIMETRIA CALCULADA

Figura 31. Os transectos ETA79 (A) e ETA76 (B), localizados na praia The Spit, são representados ao longo do tempo, assim como a média do desvio padrão em relação à média dos transectos.

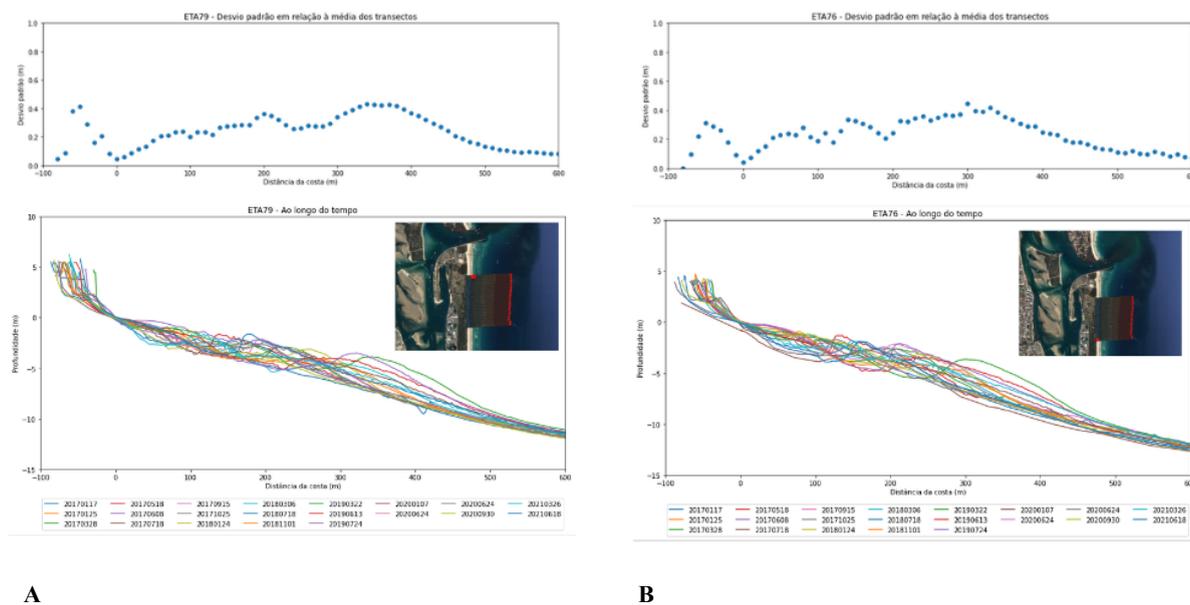


Figura 32. Os transectos ETA63 (A) e ETA62 (B), localizados na praia Surfers Paradise, são representados ao longo do tempo, assim como a média do desvio padrão em relação à média dos transectos.

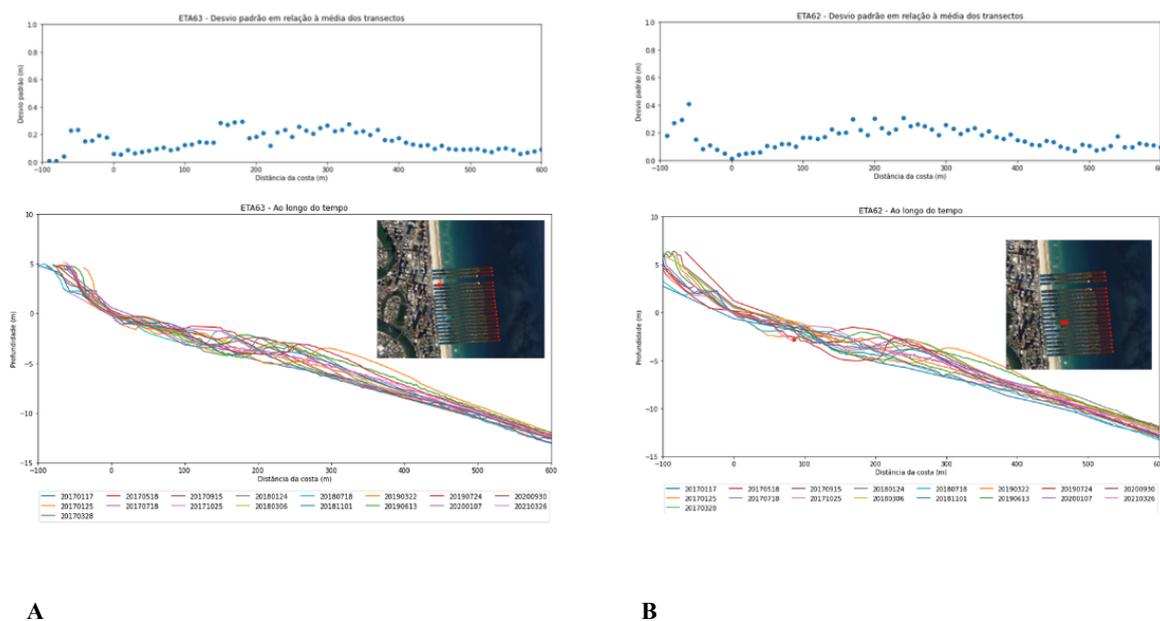


Figura 33. Os transectos ETA47 (A) e ETA44 (B), localizados na praia Miami, são representados ao longo do tempo, assim como a média do desvio padrão em relação à média dos transectos.

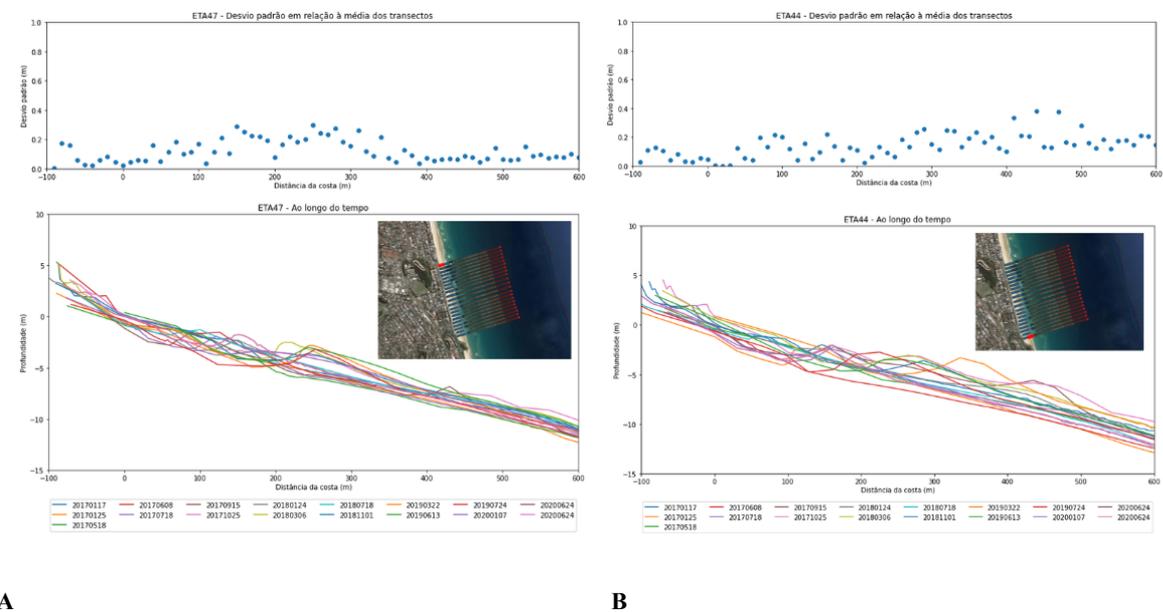


Figura 34. Os transectos ETA35.50 (A) e ETA22 (B), localizados na praia Palm Beach, são representados ao longo do tempo, assim como a média do desvio padrão em relação à média dos transectos.

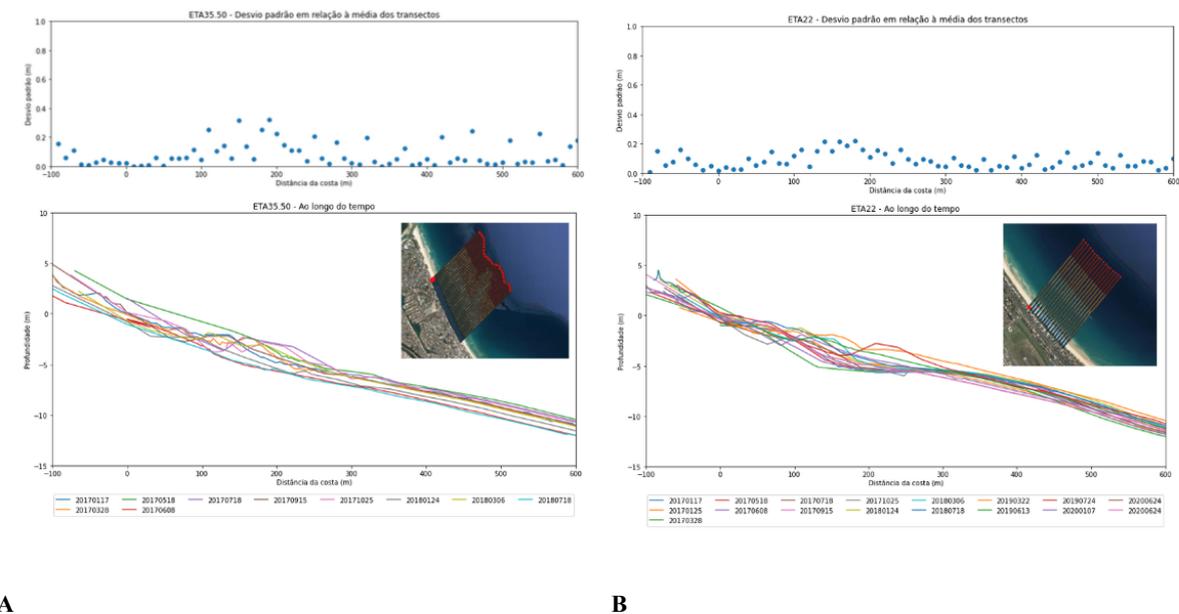
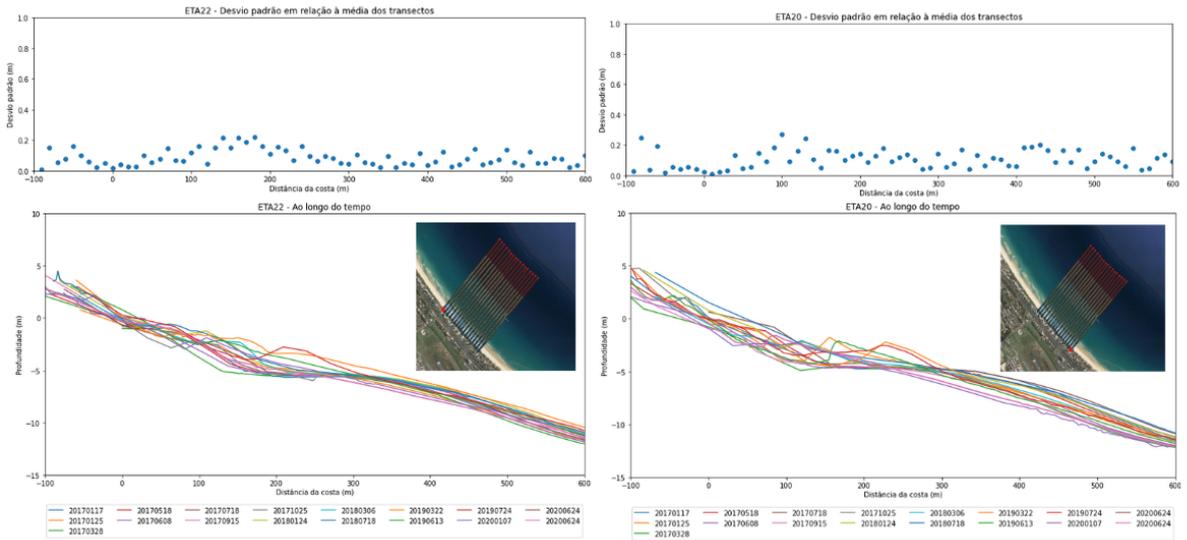


Figura 35. Os transectos ETA22 (A) e ETA20 (B), localizados na praia Bilinga, são representados ao longo do tempo, assim como a média do desvio padrão em relação à média dos transectos.



A

B

Figura 36. Dados de perfis batimétricos coletados na estação de verão, utilizando dados observados (linha laranja) como dados de entrada para calcular a batimetria (linha azul).

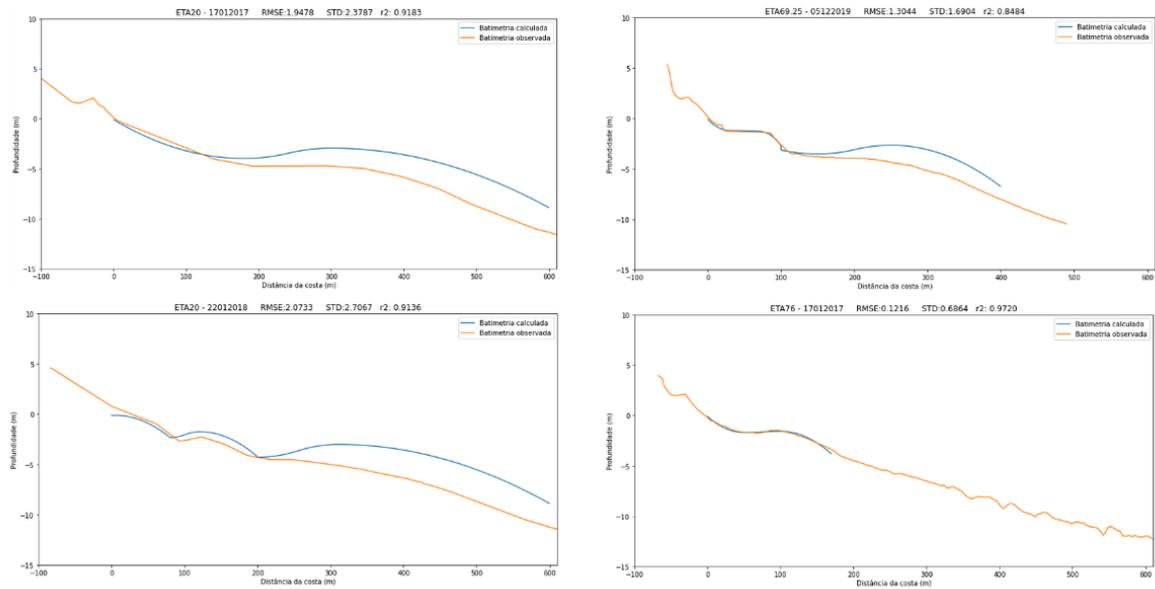


Figura 37. Dados de perfis batimétricos coletados na estação de outono, utilizando dados observados (linha laranja) como dados de entrada para calcular a batimetria (linha azul).

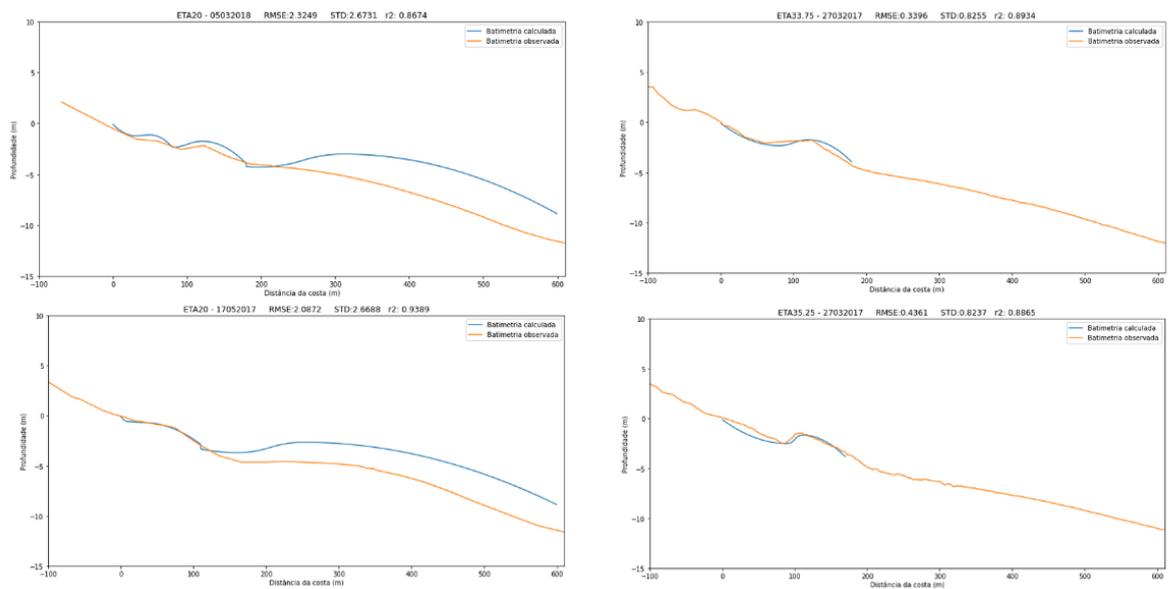


Figura 38. Dados de perfis batimétricos coletados na estação de primavera, utilizando dados observados (linha laranja) como dados de entrada para calcular a batimetria (linha azul).

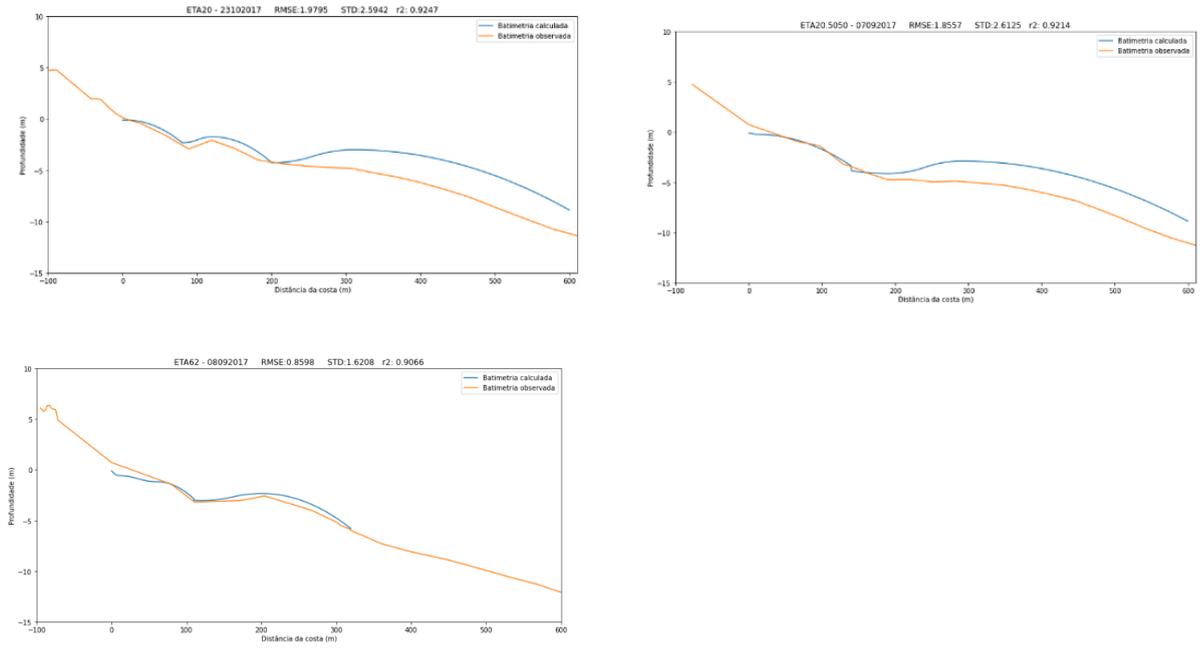


Figura 39. Dados de perfis batimétricos coletados na estação de inverno, utilizando dados observados (linha laranja) como dados de entrada para calcular a batimetria (linha azul).

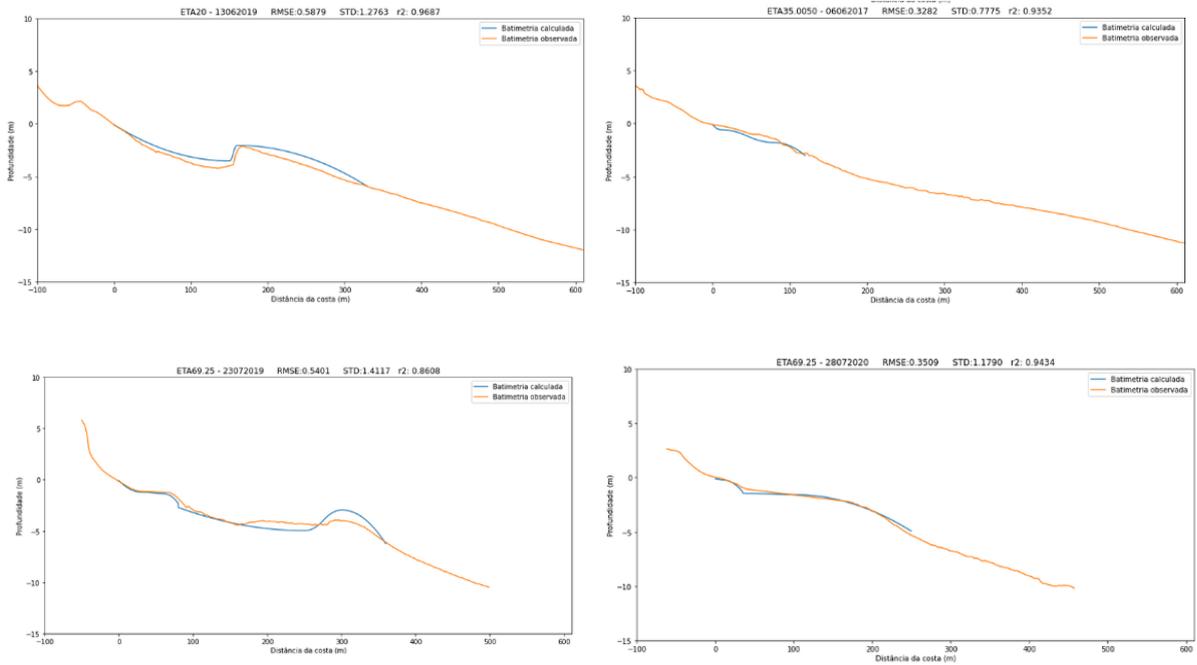
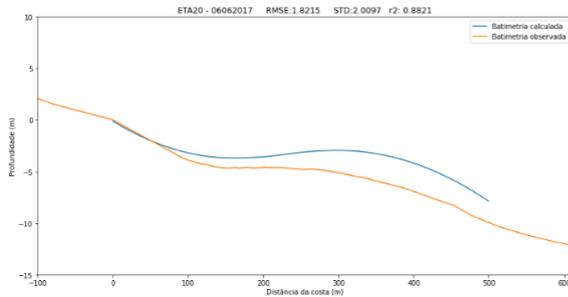


Figura 40. Transecto ETA20, obtido no dia 06 de junho de 2017. A linha azul representa a batimetria calculada e a linha laranja a batimetria observada. A batimetria exposta na figura A foi calculada através da equação (2), enquanto a da figura B foi calculada a partir da relação $hc=0,106*xc^{(2/3)}$.



A

B

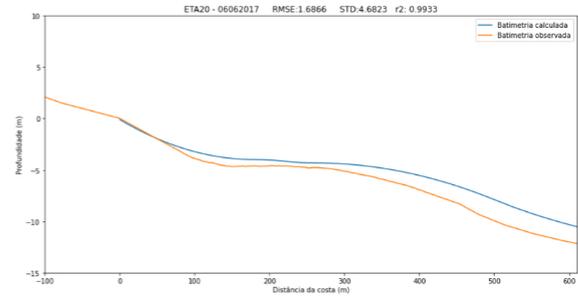
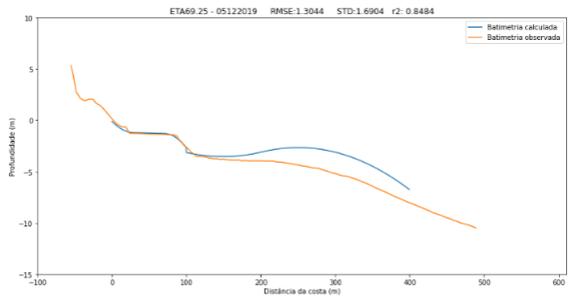


Figura 41. Transecto ETA69.25, obtido no dia 05 de dezembro de 2019. A linha azul representa a batimetria calculada e a linha laranja a batimetria observada. A batimetria exposta na figura A foi calculada através da equação (2), enquanto a da figura B foi calculada a partir da relação $hc=0,106*xc^{(2/3)}$.



A

B

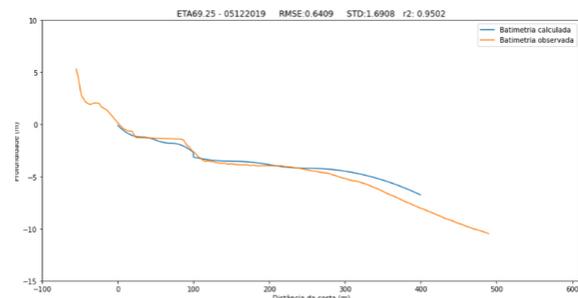


Figura 42. Transecto ETA20, obtido no dia 22 de janeiro de 2018. A linha azul representa a batimetria calculada e a linha laranja a batimetria observada. A batimetria exposta na figura A foi calculada através da equação (2), enquanto a da figura B foi calculada a partir da relação $hc=0,106*xc^{(2/3)}$.

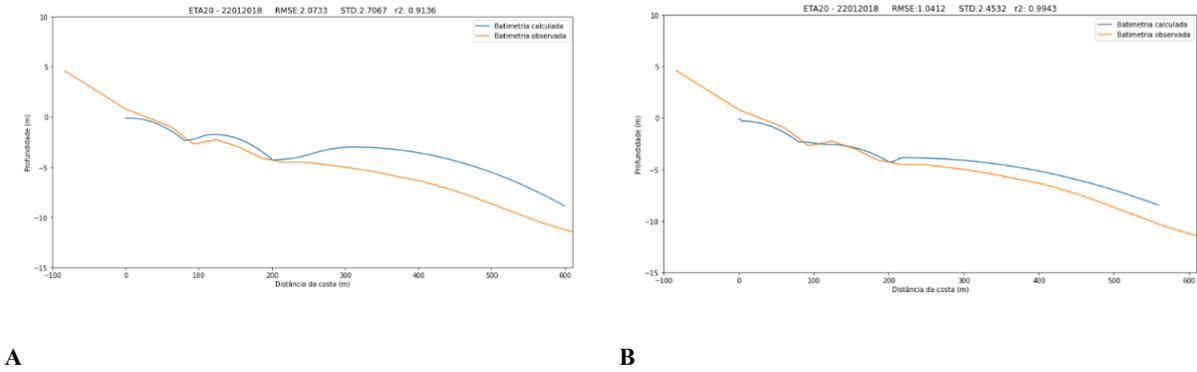


Figura 43. Transecto ETA76, obtido no dia 17 de janeiro de 2017. A linha azul representa a batimetria calculada e a linha laranja a batimetria observada. A batimetria exposta na figura A foi calculada através da equação (2), enquanto a da figura B foi calculada a partir da relação $hc=0,106*xc^{(2/3)}$.

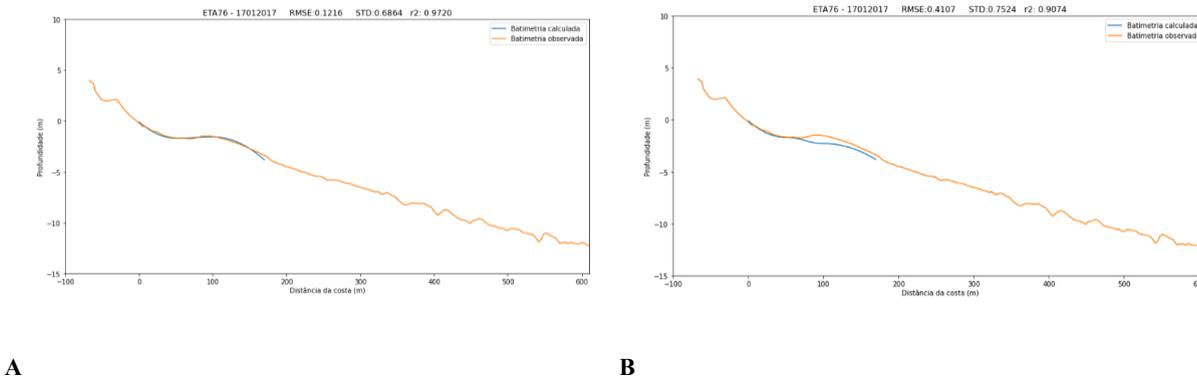
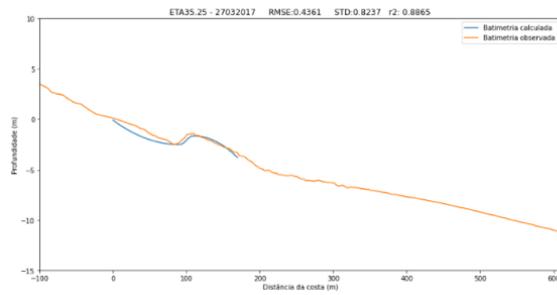
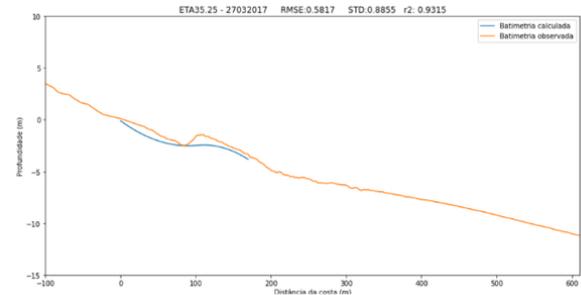


Figura 44. Transecto ETA35.25, obtido no dia 27 de março de 2017. A linha azul representa a batimetria calculada e a linha laranja a batimetria observada. A batimetria exposta na figura A foi calculada através da equação (2), enquanto a da figura B foi calculada a partir da relação $hc=0,106*xc^{(2/3)}$.



A



B