

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
COORDENADORIA ESPECIAL DE OCEANOGRAFIA
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

Bianca Filippi

**OBTENÇÃO DE BATIMETRIA EM ESTUÁRIOS ATRAVÉS DE IMAGENS DE
SATÉLITE: ESTUDO DE CASO NA BAÍA DA BABITONGA, SC**

Florianópolis

2020

Bianca Filippi

**OBTENÇÃO DE BATIMETRIA EM ESTUÁRIOS ATRAVÉS DE IMAGENS DE
SATÉLITES: ESTUDO DE CASO NA BAÍA DA BABITONGA, SC**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito 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

2020

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

Filippi, Bianca

Obtenção de batimetria em estuários através de imagens de satélite : estudo de caso na Baía da Babitonga, SC / Bianca Filippi ; orientador, Antonio Henrique da Fontoura Klein, coorientador, Luis Pedro Melo de Almeida, 2020.

76 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

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

Bianca Filippi

**OBTENÇÃO DE BATIMETRIA EM ESTUÁRIOS ATRAVÉS DE IMAGENS DE
SATÉLITE: ESTUDO DE CASO NA BAÍA DA BABITONGA, SC**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharela em Oceanografia e aprovado em sua forma final.

Local, 04 de Agosto de 2020.

Prof. Dr. Felipe Mendonça Pimenta
Coordenador do Curso de Oceanografia

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antonio Henrique da Fontoura Klein
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Dr. Mauricio Almeida Noernberg
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Prof. Dr. Deivid Cristian Leal Alves
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Armando e Marcia, pelo amor incondicional, por todos os ensinamentos, por terem acreditado em mim e ajudado a realizar todos os meus sonhos. Sou eternamente grata.

Agradeço ao meu orientador Prof. Antonio Henrique de Fontoura Klein por ter me ensinado tanto sobre a Oceanografia e sobre a vida, por todas as dicas e conhecimentos compartilhados, por todas as incríveis oportunidades que me proporcionou e por ter acreditado no meu potencial, muito obrigada!

Agradeço também ao meu coorientador Luis Pedro Melo de Almeida por toda a ajuda que me ofereceu no desenvolvimento deste trabalho, por todas as conversas, ideias e conhecimentos passados que foram essenciais.

Quero agradecer a todos os meus amigos que estiveram ao meu lado nesses anos de graduação que me ajudaram a enfrentar cada etapa e sempre me apoiaram como a Carol, Marco, Juana, Gabi, Larissa, Lucas, Ronaldo, Nandara, Phelype, Amanda, Ana, Paulo e todos os amigos que a Oceanografia me proporcionou.

Sou muito grata a Maiara e ao Franco por tudo que me ensinaram nos trabalhos de campo, todas as dicas e técnicas, por toda a parceria e ajuda que foram muito importantes para a execução deste trabalho e também para minha evolução profissional.

Agradeço ao Laboratório de Oceanografia Costeira – LOC pela disponibilização da infraestrutura necessária para a realização do trabalho. Agradeço também aos amigos do LOC e do NEMAR pela ajuda, pelas conversas, por todos os cafés e bolos que aliviaram e descontraíram os momentos de trabalho.

Quero agradecer a todos da SLI, que nestes meses de estágio foram muito importantes para o meu crescimento pessoal e profissional, ajudando assim, na evolução deste trabalho.

Agradeço ao grupo Pró Babitonga pelas oportunidades de apresentar os resultados gerados neste estudo, obrigada Cláudio, Celso, Tiago e a todos os envolvidos.

Um agradecimento especial a todas as mulheres cientistas e oceanógrafas que me inspiram nessa caminhada e eu tenho grande admiração, como Maiara Werner, Camila Treteski, Alessandra Fonseca, Ju Leonel, Regina Rodrigues, Marinez Scherer, Agatha Nurnberg e Caroline Bergamo.

Por fim, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do Projeto Baías “Subida do nível do mar e a Baía

da Babitonga: uma abordagem eco-morfodinâmica para prever e mitigar impactos (*Bay Squeeze*)” Chamada Pública MCTIC/CNPq – Nº 21/2017 – Pesquisa e Desenvolvimento em Ações Integradas e Sustentáveis nas Baías do Brasil Nº Processo: 441545/2017-3 e pela bolsa Apoio Técnico em Extensão no País do CNPq - Nível B concedida que possibilitou a realização deste estudo.

“É sempre mais difícil ancorar um navio no espaço.”

Ana Cristina César

RESUMO

A Batimetria Derivada de Satélite é uma das ferramentas mais promissoras para mapear a morfologia de águas rasas e apresenta como vantagem a extensa área de cobertura dos sistemas de imageamento orbital e a repetitividade, facilitando a identificação de mudanças. O objetivo deste trabalho foi aplicar e avaliar a estimativa da batimetria por satélite com sensor multispectral para a Baía da Babitonga, um estuário localizado ao Norte de Santa Catarina, através da comparação de dados batimétricos medidos em campo e observações dos padrões da imagem de satélite. Um levantamento batimétrico monofeixe classificado com categoria B de acordo com a NORMAM-25 foi realizado para calibração e validação do algoritmo de derivação batimétrica. Foi utilizada uma imagem do satélite Sentinel-2 adquirida na mesma data da execução do levantamento batimétrico. Os dados da batimetria medida e os diferentes valores de reflectância das bandas do satélite foram correlacionados para encontrar o algoritmo que melhor representa a batimetria da área de estudo. O processamento das imagens consistiu na correção atmosférica para reflectância da superfície e aplicação de filtros para remoção de ruídos. Diversos algoritmos foram testados utilizando as bandas da região do visível (bandas 1 a 5) das imagens multispectrais. Os algoritmos foram aplicados para profundidades inferiores a 20 m e áreas que apresentaram concentrações de material particulado em suspensão estimado menor do que 10 g/m^3 . Como resultado, a raiz do erro quadrático médio (RMSE) entre a batimetria medida em campo e estimada pelo satélite, apresentou-se entre 2 e 3 m para os algoritmos. Dentre os métodos testados, o índice NDWI para a bandas 5 (infravermelho) e 3 (verde) apresentou os menores erros (RMSE= 2,4 m), estimando uma profundidade máxima de 18 m e mínima de 0,6 m. Com o objetivo de aumentar a acurácia do algoritmo, a área foi dividida em duas zonas, a entremarés e a permanentemente submersa, e novas equações foram aplicadas para cada zona. O RMSE para a zona entremarés reduziu 0,3 m do encontrado para toda a área da baía, enquanto o erro para a zona permanentemente submersa aumentou 0,4 m. Portanto, conclui-se que a zona entremarés apresenta contribuição significativa na derivação da batimetria por satélite e em áreas com maior profundidade, a acurácia do algoritmo diminui. Os resultados do modelo são considerados satisfatórios para estimativa batimétrica em águas estuarinas e possibilitaram a identificação de feições morfológicas, visto as limitações do material em suspensão e da profundidade.

Palavras-chave: Batimetria Derivada de Satélite, Sensoriamento Remoto, Morfologia.

ABSTRACT

The Satellite Derived Bathymetry is one of the most promising tools to map the shallow water morphology and has the advantage of the extensive coverage area of the orbital imaging sensors and repeatability, facilitating identification of changes. The objective of this work was to implement and assess de bathymetric estimation from a satellite with multispectral sensors for Babitonga Bay, an estuary located at North of Santa Catarina State, through the comparison of the *in-situ* bathymetric data and the satellite observed patterns. A single-beam bathymetric survey classified as category B according to NORMAM-25 was performed for calibration and validation of the bathymetric derivation algorithm. An image from the Sentinel-2 satellite acquired on the same date as the bathymetric survey was used. The in situ bathymetric data and the different reflectance values of the satellite bands were correlated to find the algorithm that best represents the bathymetry of the study area. The image processing consisted of atmospheric correction for surface reflectance and application of noise removal filters. Several algorithms were tested using the bands of the visible region (bands 1 to 5) of the multispectral images. The algorithms were applied for depths up to 20 m and areas that presented Suspended Particulate Matter concentration estimated less than 10 g/m^3 . As a result, the root mean square error (RMSE) between the bathymetry *in-situ* and estimated by satellite was between 2 and 3 m for the algorithms. Among the tested methods, the NDWI equation for bands 5 (infrared) and 3 (green) presented the smallest errors (RMSE = 2.4 m), estimating a maximum depth of 18 m and a minimum depth of 0.6 m. To increase the algorithm accuracy, the area was divided into two zones, between tides and permanently submerged, and new equations were applied for each zone. The RMSE for the intertidal zone reduced 0.3 m from the calculated for the entire bay area, while the error for the permanently submerged area increased by 0.4 m. Therefore, it is concluded that the intertidal zone has a significant contribution to the satellite derived bathymetry and for areas with greater depth, the algorithm accuracy decreases. The model results are considered satisfactory for estuarine waters and allowed the identification of morphological features, given the limitations of the suspended material and depth.

Key-words: Satellite Derived Bathymetry, Remote Sensing, Morphology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cartas Náuticas disponíveis para a região da Baía da Babitonga.	18
Figura 2 - Localização da área de estudo.	20
Figura 3 - Fluxograma das etapas de aquisição e processamento dos dados batimétricos.....	23
Figura 4 - Linhas planejadas para o levantamento batimétrico.	24
Figura 5 - Esquema representativo da localização dos equipamentos na embarcação.....	25
Figura 6 - Fluxograma dos procedimentos para extração da batimetria derivada de satélite...29	
Figura 7 - Batimetria obtida no levantamento monofeixe. Fonte da Imagem de Satélite: Landsat-8 (14/05/2017).	35
Figura 8 - Gráfico das Incertezas Verticais do levantamento.....	36
Figura 9 - Mapa batimétrico gerado com o interpolador <i>Nearest Neighbor</i> no <i>software</i> ArcGIS. As linhas em preto representam os transectos para comparação entre as batimetrias.	37
Figura 10 - Mapa da batimetria, compilada por Silva (2011) de levantamentos entre 2003 e 2005, gerado com o interpolador <i>Nearest Neighbor</i> no <i>software</i> ArcGIS.....	38
Figura 11- Perfis de comparação entre as batimetria medida (azul), batimetria interpolada (verde) e a batimetria pretérita (vermelho).....	39
Figura 12 - Gráficos da reflectância dos algoritmos para todas as profundidades. Em azul estão correlacionados os dados da reflectância de cada algoritmo com a profundidade medida com o ecobatímetro. Em preto é a média dos dados de reflectância. Em vermelho é uma curva polinomial de segundo grau ajustada aos dados.	41
Figura 13 - Testes da reamostragem dos dados (eixo x) e relação com a correlação (eixo y). 42	
Figura 14 - Testes da reamostragem dos dados (eixo x) e relação com o RMSE (eixo y).....	43
Figura 15 - Distribuição espacial do MPS na Baía da Babitonga estimado através da imagem de satélite.	44
Figura 16- Gráficos da reflectância dos algoritmos para até 20 m, áreas com MPS menor que 10 g/cm^3 e reamostragem dos dados. Em azul estão correlacionados os dados da reflectância de cada algoritmo com a profundidade medida com o ecobatímetro. Em preto é a média dos dados de reflectância. Em vermelho é uma curva polinomial de segundo grau ajustada aos dados.	45
Figura 17 - Resultados da derivação batimétrica para o algoritmo B2/B4.....	48
Figura 18- Resultados da derivação batimétrica para o algoritmo B3/B4.....	48
Figura 19 - Resultados da derivação batimétrica para o algoritmo NDWI B1 e B5.	49

Figura 20 - Resultados da derivação batimétrica para o algoritmo NDWI B2 e B4.	49
Figura 21 - Resultados da derivação batimétrica para o algoritmo NDWI B5 e B3.	50
Figura 22- Batimetria estimada pelo satélite Sentinel-2 através do algoritmo NDWI B5 e B3.	51
Figura 23 - Mapa batimétrico do algoritmo NDWI B5 e B3 aplicado a todos os pixels da imagem que apresentam MPS calculado menor que 10 g/cm^3 . As linhas em preto representam os transectos para comparação entre as batimetrias.	52
Figura 24- Perfis de comparação entre as batimetria medida e a estimada pelo algoritmo NDWI B5 e B3.	53
Figura 25 - Mapas da Babitonga com a separação entre a zona entremarés e a zona permanentemente submersa.....	55
Figura 26 - Gráficos da reflectância dos algoritmos para a zona entremarés com MPS menor que 10 g/cm^3 e reamostragem dos dados. Em azul estão correlacionados os dados da reflectância de cada algoritmo com a profundidade medida com o ecobatímetro. Em preto é a média dos dados de reflectância. Em vermelho é uma curva polinomial de segundo grau ajustada aos dados.	57
Figura 27 - Resultados da derivação batimétrica para o algoritmo NDWI B5 e B3 para a zona entremarés com MPS menor que 10 g/cm^3	58
Figura 28 - Gráficos da reflectância dos algoritmos para a zona permanentemente submersa com MPS menor que 10 g/cm^3 e reamostragem dos dados de 230 m. Em azul estão correlacionados os dados da reflectância de cada algoritmo com a profundidade medida com o ecobatímetro. Em preto é a média dos dados de reflectância. Em vermelho é uma curva polinomial de segundo grau ajustada aos dados.....	60
Figura 29 - Resultados da derivação batimétrica para o algoritmo NDWI B5 e B3 para a zona permanentemente submersa com MPS menor que 10 g/cm^3	61
Figura 30 - Descrição da Estação Maregráfica Clube Náutico Cruzeiro do Sul, localizada na Baía da Babitonga.....	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Revisão bibliográfica da aplicação da técnica BDS em estudos realizados no Brasil. S/I significa sem informação encontrada no trabalho.....	17
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Offsets dos equipamentos utilizados.	25
Tabela 2 - Requisitos Mínimos para a validação dos levantamentos da categoria B.	27
Tabela 3 - Resolução espectral para cada banda do satélite Sentinel-2 MSI.	30
Tabela 4 - Equações para aplicação da batimetria, onde Z_{eco} é a batimetria medida em campo e Z_{sat} a batimetria a ser estimada pelo satélite.	46
Tabela 5 – Equação gerada pelo algoritmo NDWI B5 e B3 para a zona entremarés, onde Z_{eco} é a batimetria medida em campo e Z_{sat} a batimetria a ser estimada pelo satélite.	56
Tabela 6 - Equação gerada pelo algoritmo NDWI B5 e B3 para a zona permanentemente submersa, onde Z_{eco} é a batimetria medida em campo e Z_{sat} a batimetria a ser estimada pelo satélite.	59
Tabela 7 - Parâmetros estatísticos calculados para os resultados dos algoritmos aplicados para toda baía.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDS	Batimetria Derivada de Satélite
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil
DSF	<i>Dark Spectrum Fitting</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
IHO	<i>International Hydrographic Organization</i>
IHT	Incerteza Horizontal Total
IVT	Incerteza Vertical Total
MPS	Material Particulado em Suspensão
MSI	<i>Multispectral Instrument</i>
MRU	<i>Motion Reference Unit</i>
NIR	<i>Near Infrared</i>
NM	Nível Médio do Mar
NR	Nível de Redução
NORMAM-25	Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos
RBINS	<i>Royal Belgian Institute of Nature Sciences</i>
PE	Profundidade de Extinção
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SR	<i>Reflectância da Superfície</i>
SVP	<i>Sound Velocity Profile</i>
SWIR1	<i>Short-wave Infrared 1</i>
SWIR2	<i>Short-wave Infrared 2</i>
TOA	Topo da Atmosfera
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS 84	<i>World Geodetic System 1984</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Parcela da incerteza que não varia de acordo com a profundidade
ALG	Resultado do algoritmo para encontrar os coeficientes da equação
b	Coefficiente da parcela de incerteza que varia com a profundidade
$B1$	Reflectância da superfície da banda aerossol costeiro
$B2$	Reflectância da superfície da banda azul
$B3$	Reflectância da superfície da banda verde
$B4$	Reflectância da superfície da banda vermelho
$B5$	Reflectância da superfície da banda <i>Red Edge 1</i>
$B8$	Reflectância da superfície da banda infravermelho próximo
$Bias$	Viés em metros
d	Profundidade medida em metros para cálculo da Incerteza Vertical Total
IVT	Incerteza Vertical Total em metros
km	Quilômetros
ln	Logaritmo natural
m	Metros
m_0	Offset da maré da equação polinomial de segundo grau
m_1, m_2	Coefficientes de ajuste da curva da equação polinomial de segundo grau
n	Constante inteira positiva para o logaritmo da reflectância
$NDWI$	Algoritmo <i>Normalized Difference Water Index</i> proposto por Mcfeeters (1996)
R^2	Coefficiente de Determinação
$RMSE$	Raiz do Erro Quadrático Médio em metros
$R_w(\lambda_i)$	Reflectância da superfície da banda i
$R_w(\lambda_j)$	Reflectância da superfície da banda j
ST	Algoritmo Transformação da Razão de Bandas proposto por Stumpf <i>et al.</i> (2003)
X	Offset <i>Starboard</i> da embarcação em metros
x	Profundidade medida pelo ecobatímetro em metros para os cálculos estatísticos
Y	Offset <i>Forward</i> da embarcação em metros
y	Profundidade estimada pelo satélite em metros para os cálculos estatísticos
Z	Offset vertical em metros
Z_{sat}	Profundidade estimada pelo satélite em metros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1	LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO	23
4.1.1	Planejamento.....	23
4.1.2	Sondagem	24
4.1.3	Processamento.....	26
4.1.4	Incertezas do Levantamento	27
4.1.5	Comparação com Dados Pretéritos.....	28
4.2	BATIMETRIA DERIVADA DE SATÉLITE	28
4.2.1	Download de Imagens	29
4.2.2	Processamento.....	30
4.2.3	Identificação da Profundidade de Extinção	31
4.2.4	Análise do Material Particulado em Suspensão.....	32
4.2.5	Aplicação do Algoritmo Batimétrico	32
4.2.6	Cálculo da Exatidão.....	34
5	RESULTADOS	35
5.1	LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO	35
5.2	BATIMETRIA DERIVADA DE SATÉLITE	40
5.2.1	Definição do Melhor Algoritmo.....	40
5.2.1.1	<i>Reamostragem dos Dados</i>	<i>42</i>
5.2.1.2	<i>Influência do Material em Suspensão.....</i>	<i>43</i>
5.2.2	Separação por Zonas	54
5.2.2.1	<i>Zona Entremarés</i>	<i>55</i>

5.2.2.2	<i>Zona Permanentemente Submersa</i>	59
6	DISCUSSÃO	62
7	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE A – Parâmetros estatísticos da Batimetria Estimada pelo Satélite	71
	ANEXO A – F-41 Descrição da Estação Maregráfica Clube Náutico Cruzeiro do Sul	73

1 INTRODUÇÃO

Estuários são ambientes complexos, muito produtivos e diversos. Caracterizados como uma zona de transição entre o ambiente marinho e terrestre, nos estuários ocorrem transformações nas mais diversas escalas de tempo e espaço (MIRANDA *et al.* 2002). A Baía da Babitonga é o maior complexo estuarino e com a maior área de manguezal de Santa Catarina, sendo um dos estuários mais importantes do estado (VIEIRA *et al.*, 2008). E essa importância também está relacionada com os aspectos econômicos da região, destacando as atividades portuárias através do Porto de São Francisco do Sul e do Porto de Itapoá (SILVA, 2011).

Segundo Dalrymple *et al.* (1992), os sistemas estuarinos estão sujeitos a processos continentais e marinhos como ação de ondas, marés, correntes marinhas e ação fluvial. Como consequência dessas forçantes, há uma contínua alteração na remobilização de sedimentos e na morfologia submersa. O conhecimento da morfologia e a disponibilidade de dados precisos e atualizados da profundidade são necessários para a realização de estudos e gestão eficaz das áreas costeiras, bem como para garantir a segurança na navegação, extremamente importante em regiões portuárias (PACHECO *et al.*, 2015).

O método tradicional para a obtenção da batimetria é através da utilização do ecobatímetro (monofeixe ou multifeixe). Apesar do elevado nível de precisão e exatidão das medições, este método apresenta dificuldades logísticas, demanda tempo e esforço e as sondagens acabam sendo raras e apenas em pequenas áreas de interesse. Portanto, há uma necessidade em otimizar a obtenção dos dados batimétricos (MOBLEY *et al.*, 2005; PACHECO *et al.*, 2015; PHILPOT, 1989).

A Batimetria Derivada de Satélite (BDS) é uma técnica útil para mapear a batimetria de águas rasas, caracterizar a área costeira e monitorar as mudanças do fundo marinho que podem ter ocorrido desde o último levantamento batimétrico realizado (LYZENGA, 1978). A BDS explora o princípio físico de que os diferentes comprimentos de onda do espectro de luz são atenuados pela água em graus variados, e com isso, é possível fazer estimativas no campo da profundidade devido à inversão óptica da refletância do fundo (PHILPOT, 1989). Esse procedimento tem se mostrado eficaz, principalmente na utilização das imagens de satélites multiespectrais e apresenta vantagens como a cobertura de uma extensa área e a repetitividade (NORDMAN *et al.*, 1990).

A seleção do espectro eletromagnético ideal para a derivação batimétrica é importante para a obtenção de resultados confiáveis a partir dos dados de sensoriamento

remoto espectral (MOBLEY *et al.*, 1994). Os algoritmos de menores comprimentos de ondas utilizados para as medições batimétricas em águas claras podem não ser aplicáveis para águas turvas e produtivas, as quais alteram o comprimento de onda ideal da batimetria detectada para uma radiação mais longa longe dos 0,45 μm , que tende a ter a máxima penetração em águas claras. Nestes ambientes a profundidade da água está fortemente correlacionada com a banda vermelha (0,74-0,75 μm), mas não com a região azul do espectro (GAO, 2009).

Uma compilação de trabalhos que aplicaram a técnica de batimetria por satélite em estudos realizados no Brasil está descrita no Quadro 1, onde são apresentados os autores, local e ambiente da aplicação, o satélite utilizado, o método escolhido, a profundidade de extinção da luz (PE), e aos resultados da correlação entre os dados medidos e estimados pelo modelo (R^2).

Os métodos utilizados em cada estudo diferem, assim como os satélites escolhidos, sendo os satélites da missão Landsat os mais utilizados. Nos estudos realizados em estuários, em sua maioria, os modelos apresentaram boa correlação com os dados medidos, porém só foi possível estimar as profundidades até os primeiros metros da coluna de água. Apenas Alves *et.al.* (2018) que aplicaram a técnica para a porção mais próxima ao oceano da Lagoa dos Patos, conseguiram obter resultados até os 22 metros de profundidade e uma correlação alta de 0,96.

Alguns estudos geológicos já foram realizados na Baía da Babitonga, como de Mazzer e Gonçalves (2012), que descreveram os aspectos geomorfológicos e Vieira e Horn Filho (2017) onde caracterizaram e setorizaram a morfologia de fundo. Porém os dados batimétricos da baía disponíveis são escassos e as cartas náuticas são desatualizadas.

Quatro cartas náuticas foram elaboradas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para a região da Babitonga, conforme visualizado na Figura 1. A carta 1804 é a que apresenta os dados mais atuais de levantamentos realizados entre 2010-2017 apenas para o canal de acesso ao Porto de São Francisco do Sul, já para as áreas mais centrais da baía os levantamentos são de 2001-2003 e para as margens do canal as medições foram realizadas entre 1971-1976. Na carta 1830, que compreende a região mais oceânica, os levantamentos foram executados em 1972. E as cartas 1805 e 180501 apresentam dados de 1940 e 1996, respectivamente. Essas duas cartas compreendem as áreas mais internas da baía, assim como o canal do Palmital e o canal do Linguado e não estão mais disponíveis para download no site da Marinha do Brasil.

Quadro 1 - Revisão bibliográfica da aplicação da técnica BDS em estudos realizados no Brasil. S/I significa sem informação encontrada no trabalho.

Autor	Local	Ambiente	Satélite	Método	PE (m)	R²
Cabral e Vianna (1993)	Rio Grande do Norte	Oceano Aberto/ Plataforma Continental	Landsat-5	Polcyn <i>et al.</i> (1970)	30	0,91
Tedesco (2003)	Baía de Guaratuba (PR)	Estuário	IKONOS II	Método proposto pelo autor	5	S/I
Krug e Noernberg (2007)	Baía de Paranaguá (PR)	Estuário	Landsat-7	Philpot (1989)/ Mcfeeters (1996)	4,5	0,83
Ribeiro (2008)	Baía de Guaratuba (PR)	Estuário	IKONOS II	Redes Neurais Artificiais	3	S/I
Foerstnow e Menezes (2011)	Lagoa da Conceição, Florianópolis (SC)	Estuário	Landsat-7	Mcfeeters (1996)	5	0,66
Candela (2013)	Lagoa da Conceição, Florianópolis (SC)	Estuário	Landsat-7	Polcyn <i>et al.</i> (1970), Stumpf <i>et al.</i> (2003), Jupp (1989)	3	0,92
Pereira <i>et al.</i> (2017)	Baía de Guanabara, Niterói (RJ)	Baía	Landsat-8	Mcfeeters (1996)	8	0,21
Alves <i>et al.</i> (2018)	Lagoa dos Patos (RS)	Estuário porção oceânica	Landsat-8	Stumpf <i>et al.</i> (2003)	22	0,96
Campos (2018)	Rio Grande do Norte	Oceano Aberto	Landsat-8	Mcfeeters (1996)/ Philpot (1989)	25	0,85
Rodrigues <i>et al.</i> (2019)	Pecém (CE)	Oceano Aberto	Landsat-7	Jupp (1988)	15	S/I

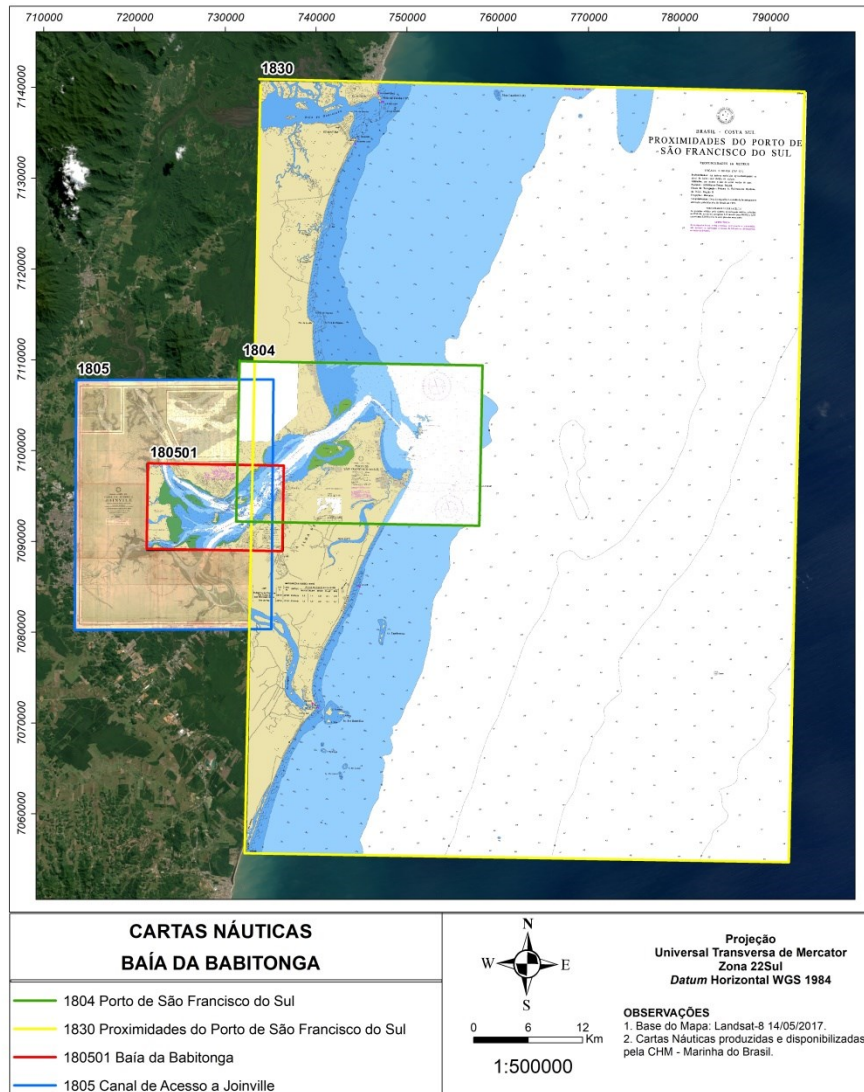


Figura 1 - Cartas Náuticas disponíveis para a região da Baía da Babitonga.

As características da baía, como a grande quantidade de ilhas e a presença de baixios, são os fatores que dificultam a navegação e obtenção dos dados nestas áreas. Portanto, o objetivo principal deste trabalho foi implementar e avaliar a técnica de Batimetria Derivada de Satélite para a região da Baía da Babitonga através do uso de imagens do satélite Sentinel-2. Diferindo dos satélites utilizados em outros estudos, este trabalho é o primeiro a aplicar o Sentinel-2 para inversão óptica em estuários brasileiros.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Aplicar e avaliar a técnica de estimação de batimetria por satélite com sensores multiespectrais para o estuário da Baía da Babitonga.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Caracterizar a morfologia de fundo da Baía da Babitonga através de um levantamento batimétrico monofeixe com escala de 1:200.000;
- 2) Definir o melhor algoritmo para estimar a batimetria da Baía da Babitonga através da inversão óptica de imagens do satélite Sentinel-2;
- 3) Determinar a exatidão da batimetria estimada por satélite em relação aos dados obtidos no levantamento monofeixe.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O complexo estuarino da Baía da Babitonga (Figura 2) está localizado ao Norte do estado de Santa Catarina e representa um dos mais importantes ambientes sociais, ambientais e econômicos do estado. Possui uma área de aproximadamente 160 km², compreendendo os municípios de Barra do Sul, Araquari, São Francisco do Sul, Joinville, Garuva e Itapoá. O estuário é caracterizado por um delta de maré, apresenta um canal principal na direção NE/SO e dois canais alongados, no sentido SE, o Canal do Linguado e no sentido NO, o Canal do Palmital, com hidrodinâmica e composição sedimentar distinta (CREMER *et al.*, 2006; DIEHL; HORN FILHO, 1996; VIEIRA *et al.*, 2008).

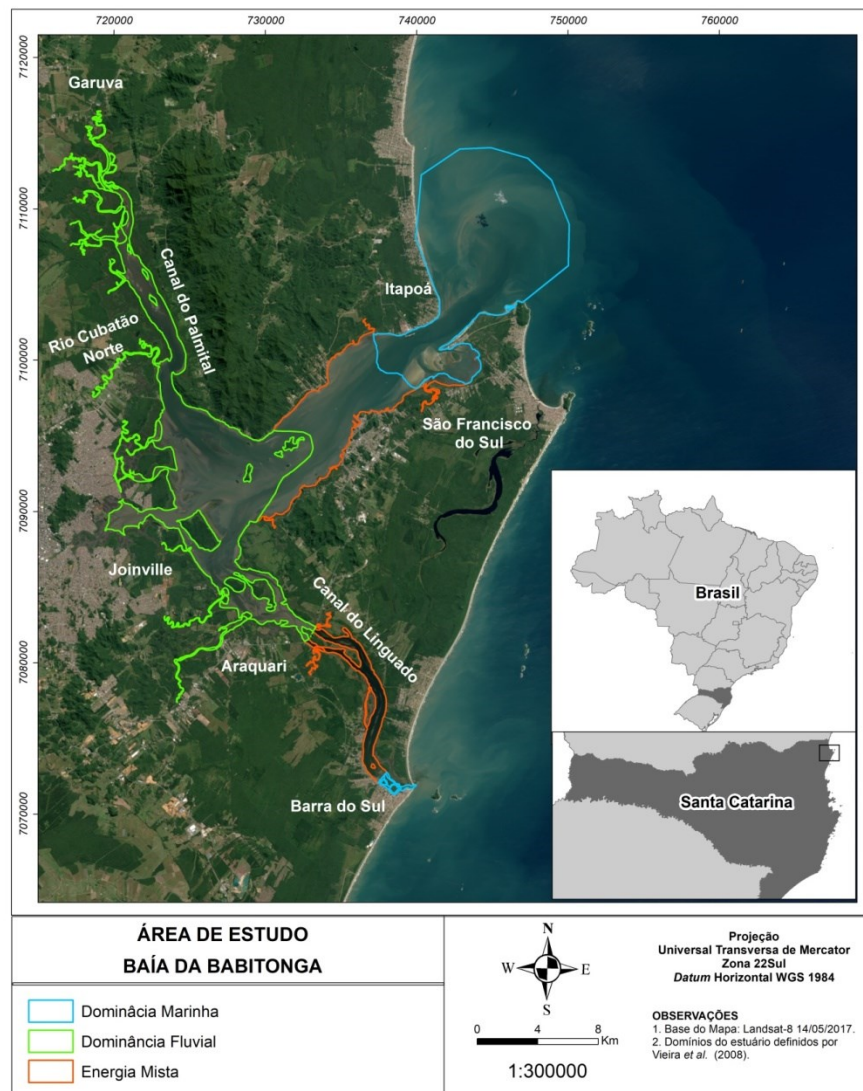


Figura 2 - Localização da área de estudo.

O Canal do Linguado é caracterizado por uma baixa hidrodinâmica e profundidades rasas decorrente do seu aterramento em 1937 para a construção da rodovia SC-280, rompendo a ligação com o mar (SILVA, 2011). Atualmente as taxas de sedimentação são elevadas e há dominância de sedimentos finos (BARBOSA; MAZZER, 2003). O Canal do Palmital é composto por sedimentos de transição e é considerado o maior exportador de sedimentos para o interior da Baía (SCHETTINI; CARVALHO, 1999).

Vieira *et al.* (2008) identificaram três grandes subambientes deposicionais que estão representados na Figura 2: um com dominância marinha, composto por areias bem selecionadas e maiores concentrações de carbonato biodetrítico; outro com dominância fluvial, composto de material mais fino, mal selecionado e rico em matéria orgânica; e o terceiro subambiente com energia mista que delimita uma zona de transição entre as áreas de influência marinha e de influência fluvial.

Em um estudo realizado por Vieira e Horn Filho (2017), a Babitonga apresentou profundidade máxima de 28 m e feições estuarinas típicas como baixios e extensas planícies de marés. No interior da baía há o desenvolvimento de canais estuarinos associados a desembocaduras fluviais e tais canais desenvolvem subsistemas estuarinos bastante significativos, como o Rio Cubatão, Rio Cachoeira, Rio Parati Mirim, entre outros (MAZZER; GONÇALVES, 2012). Oliveira (2006) quantificou que a Baía da Babitonga recebe uma descarga total de sedimentos de $7,6 \times 10^3$ t/ano, sendo a maior contribuição de descarga fluvial na baía é proveniente do rio Cubatão Norte, o qual apresenta uma área de aproximadamente 472 km² e é denominado pelo regime pluviométrico (SCHETTINI; CARVALHO, 1999).

A Babitonga apresenta um regime de micromaré com dominância de maré enchente e com amplificação da amplitude (hipersíncrona) nas áreas interiores, abrangendo os valores de amplitude média de 0,70 m na desembocadura e 1,28 m em seu interior (TRUCOLLO & SCHETTINI, 1999). Os ventos dominantes provêm do quadrante norte e os mais intensos do quadrante sul (GAPLAN, 1986), e podem ocasionar a elevação ou abaixamento do nível da água e o atraso ou adiantamento dos instantes de ocorrência das baixa-mares ou preamares (CARVALHO *et al.*, 1996).

O clima da região é caracterizado como mesotérmico sendo influenciado pelas massas de ar polar e tropical Atlântica. As temperaturas apresentam uma média anual de 20,3°C. A precipitação média é de 1.874 mm por ano, com aproximadamente 180 dias de chuva, o que representa um elevado índice pluviométrico devido à umidade marítima (GAPLAN, 1986).

A baía possui uma das maiores áreas de manguezais da porção sul da América do Sul, correspondendo a 80% da área total de manguezais do estado, com área aproximada de 6.200 hectares (MMA, 2002). No seu interior, encontram-se 24 ilhas, no trecho do Canal do Linguado existem 57 ilhas e outras 37, no Rio Palmital (FATMA, 1984). As Atividades econômicas da região estão relacionadas às atividades portuárias, a pesca e ao cultivo de organismos marinhos (TURECK *et al.*, 2004).

Com isso, destacam-se as limitações da área de estudo: a grande quantidade de ilhas e a presença de baixios, as extensas áreas de manguezais, o aporte de nutrientes na baía e as altas concentrações de material particulado em suspensão, as áreas profundas próximas aos portos e a frequente cobertura de nuvens sobre a região. Todos esses fatores foram limitantes para a aplicação do algoritmo de derivação da batimetria por satélite.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

Um levantamento batimétrico monofeixe de Categoria B de acordo com as Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos (NORMAM-25) foi realizado na Baía da Babitonga para calibrar e validar o algoritmo de derivação da batimetria. As etapas do levantamento são detalhadas nos tópicos a seguir e estão esquematizadas no fluxograma da Figura 3, onde SVP representa os dados da velocidade do som na água medidos pelo equipamento *Sound Velocity Profile*.

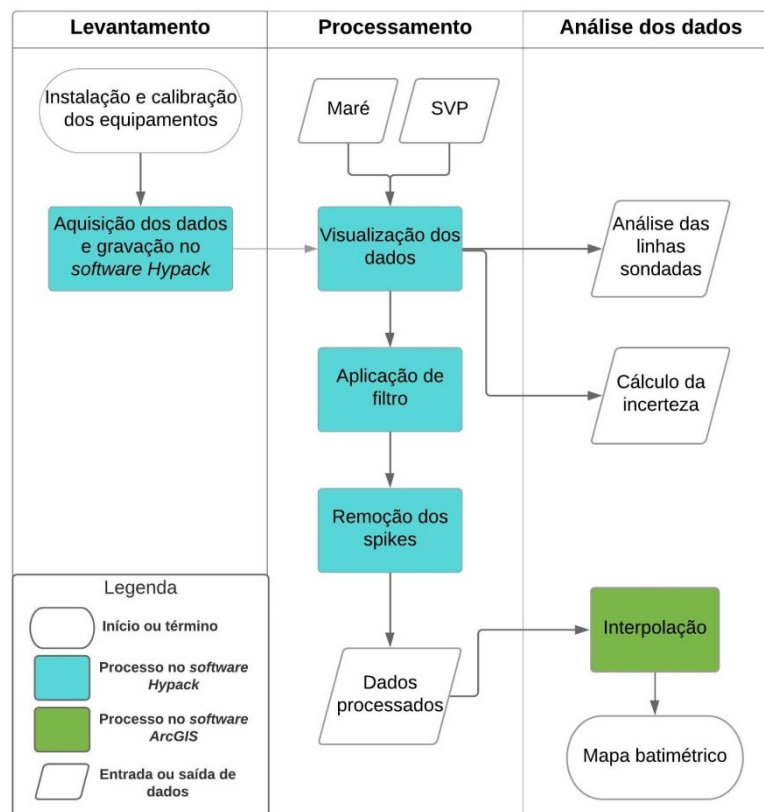


Figura 3 - Fluxograma das etapas de aquisição e processamento dos dados batimétricos.

4.1.1 Planejamento

A área sondada foi previamente determinada por linhas com espaçamento de 1 km (Figura 4), totalizando 225 km, de modo a cobrir todas as áreas navegáveis do estuário. As linhas regulares foram dispostas perpendicularmente ao canal de navegação, já as linhas de verificação, foram paralelas ao canal. O levantamento foi planejado seguindo os padrões

internacionais que constam na publicação especial nº 44 (S44 – 5a edição) da *International Hydrographic Organization* (IHO) e na NORMAM-25/Anexo J, enquadrando-se como um levantamento batimétrico de Categoria B. A data do levantamento foi escolhida para coincidir com a passagem do satélite Sentinel-2 sobre a área de estudo.

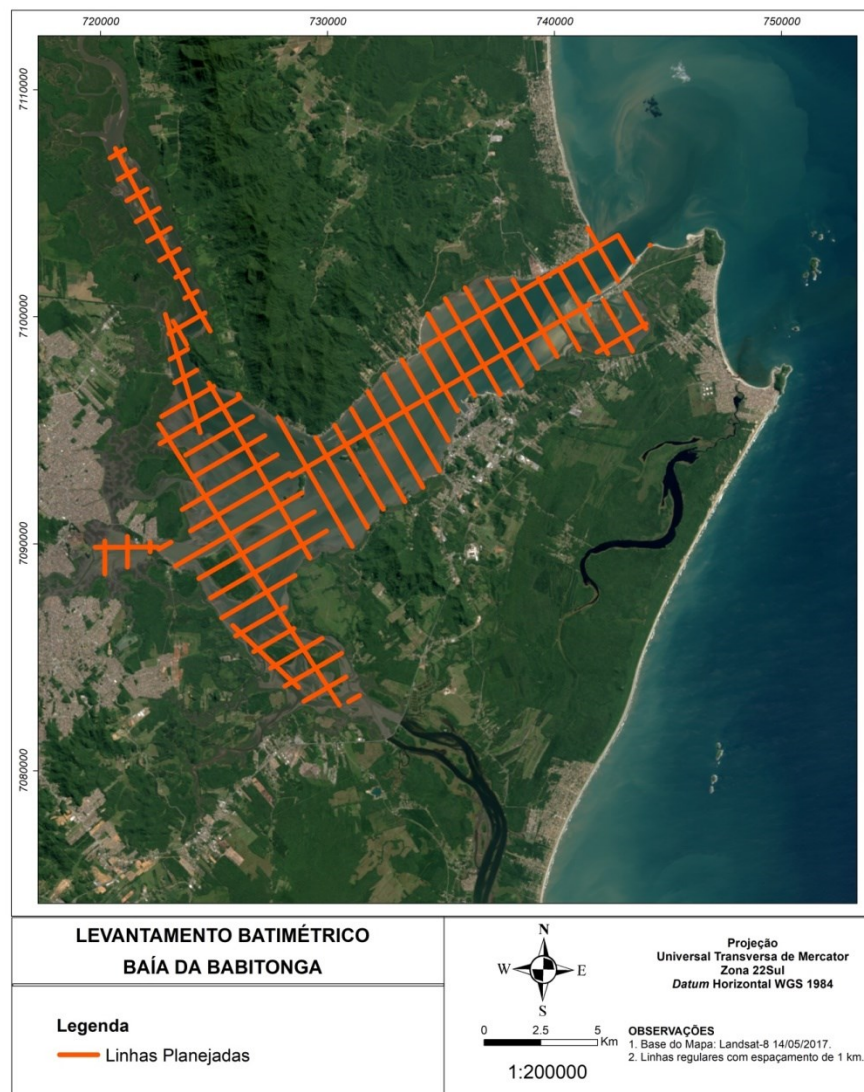


Figura 4 - Linhas planejadas para o levantamento batimétrico.

4.1.2 Sondagem

O levantamento ocorreu no período entre 14 e 24 de Maio de 2018 e foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Ecobatímetro monofeixe *Odom Teledyne Hydrographic Echotrac CV100* com resolução de 0,01 m e precisão de $0,1 \text{ m} \pm 0,1\%$ da profundidade;

- Transdutor monofeixe *Odom Hydrographic* modelo OTSBB200-9 de alta frequência 200 kHz;
- Compensador de movimentos MRU *Teledyne TSS/DMS-25*;
- Perfilador da velocidade do som na coluna d'água *Odom Digibar Pro* com precisão da velocidade com $\pm 0,3$ m/s;
- Sistema de posicionamento DGPS (em modo RTK) *Trimble R6* com precisão vertical de 15 mm + 1 ppm e horizontal de 8 mm + 1 ppm;
- Estação de trabalho e armazenamento de dados *Toughbook* com o *software Hypack*;
- Lancha Hidrográfica CBI Brasil I.

As distâncias (offsets) entre os equipamentos foram medidas de forma precisa para corrigir o posicionamento do Differential Global Positioning System (DGPS) e *Motion Reference Unit* (MRU) com relação à superfície. O MRU foi escolhido como centro de referência, adotando assim as medidas de X (*Starboard*) e Y (*Forward*) como zero e a medida vertical Z foi mensurada até a linha d'água. Os valores dos offsets estão representados na

Tabela 1 e esquematizados na Figura 5. Após as medições, os valores foram inseridos no *software Hypack*.

Tabela 1 - Offsets dos equipamentos utilizados.

Offsets	X	Y	Z
1 - Transdutor	-0,43 m	-1,86 m	0 m
2 - MRU	0 m	0 m	-0,07 m
3 - DGPS-RTK	0,75 m	-0,54 m	-2,23 m

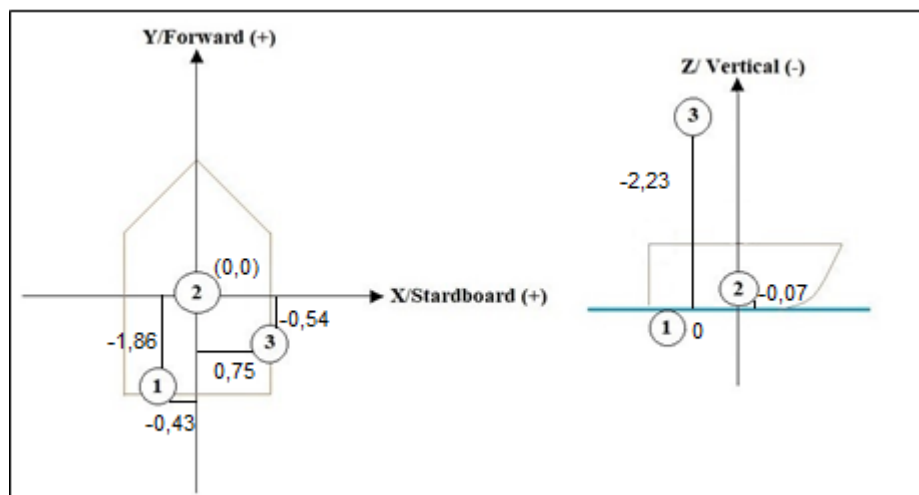


Figura 5 - Esquema representativo da localização dos equipamentos na embarcação.

O ecobatímetro foi acoplado a uma estação de aquisição de dados de bordo e navegação, a qual permite o registro digital dos dados para posterior processamento, sendo assim gravados nos arquivos brutos do *software Hypack*. O controle dos parâmetros da sonda foi realizado através do *software Echart*. O compensador de movimentos MRU foi utilizado para eliminar os efeitos dos movimentos sofridos pela embarcação, como o *pitch* (deslocamento no eixo x), *roll* (deslocamento no eixo y) e *heave* (deslocamento no eixo z).

A velocidade do som foi medida através do *Sound Velocity Profile (SVP)*, aparelho que determina o perfil de velocidade do som na coluna de água. Essa velocidade pode variar de acordo com a densidade do local. Portanto, quando o levantamento é realizado em estuários é necessário realizar medições do SVP em áreas distintas durante a sondagem, pois a velocidade do som na água pode variar devido ao gradiente de salinidade presente nesses ambientes (IHO, 2008).

A aquisição dos dados de posicionamento foi através do sistema DGPS, o qual permite realizar as correções em tempo real com o *Real Time Kinematic (RTK)*, fornecendo um nível de precisão centimétrico. No *software Hypack* também foi realizada a sincronização das profundidades com o posicionamento horizontal e correção da maré em tempo real usando o sistema *RTK-Tide*.

4.1.3 Processamento

Os dados de marés e velocidade do som adquiridos foram adicionados aos dados batimétricos. O processamento foi realizado no *software Hypack* e consistiu na aplicação do filtro *smooth* para suavização do perfil e a retirada de *spikes*, erros que ocorrem durante a sondagem e são representados na forma de picos fora do normal ou com valores nulos.

O *RTK-Tide* mede a elevação do mar em relação ao Nível Médio do Mar (NM), com isso, foi realizada uma redução das profundidades para o Nível de Redução (NR) da DHN, referenciada ao RN-4 da Estação Maregráfica Clube Náutico Cruzeiro do Sul, localizado Baía da Babitonga. Como representado no diagrama do ANEXO A, o NM está 0,885 m acima do NR. Portanto, após o processamento da batimetria, para todas as profundidades foi subtraído 0,885 m, tornando assim os dados referenciados a DHN.

Posteriormente, os dados foram interpolados no *software ArcGIS* através do método *Nearest Neighbor* para a confecção de um mapa batimétrico. O interpolador *Nearest Neighbor* foi escolhido porque assume o valor do ponto da malha de dados mais próximo para cada um dos pontos de valores do *grid*, sendo recomendado para uma base de dados disposta

regularmente espaçada em uma malha (BULHOES; DRUMOND, 2012). Então, os dados medidos no levantamento e os dados interpolados foram comparados através de validação cruzada para verificar os erros gerados pela interpolação.

4.1.4 Incertezas do Levantamento

O monitoramento de altitude da embarcação não é perfeito e os dados batimétricos gerados apresentam incertezas relacionadas às profundidades (Incerteza Vertical Total - IVT) e ao posicionamento (Incerteza Horizontal Total – IHT). É necessário, portanto, o cálculo destas incertezas e sua posterior verificação para enquadramento da ordem do levantamento de acordo com a tabela de Requisitos Mínimos (Tabela 2) (IHO, 2008).

Segundo a NORMAM-25/DHN (2017), a IVT é caracterizada pela dispersão máxima associada a uma dada profundidade e é calculada através da Equação 1.

$$IVT = \pm \sqrt{a^2 + (b \cdot d)^2} \quad (1)$$

Onde a representa a parcela da incerteza que não varia de acordo com a profundidade, b é um coeficiente da parcela de incerteza que varia com a profundidade e d é a profundidade. Os dados utilizados para o cálculo da IVT foram obtidos através da intersecção entre as linhas regulares e as linhas de verificação no *software Hypack*.

A IHT é atribuída a três fatores: o posicionamento da embarcação, a sincronização entre a aquisição do dado e os sensores auxiliares, e a determinação dos erros de calibração, e é quantificada através do cálculo dos erros embutidos nos equipamentos utilizados e nos testes de calibração.

Tabela 2 - Requisitos Mínimos para a validação dos levantamentos da categoria B.

Categoria	IVT máxima permitida - Coeficientes		IHT máxima
	a	b	
B	0,50 m	1,3%	5 m + 10% da profundidade

Fonte: IHO (2008).

4.1.5 Comparação com Dados Pretéritos

Dados batimétricos compilados por Silva (2011) de levantamentos batimétricos monofeixe realizados entre os anos de 2003 e 2005 foram comparados com os dados medidos no levantamento executado no presente estudo, de forma a identificar mudanças da morfologia da Babitonga ao longo destes anos. Estes dados também foram interpolados no *software ArcGIS* através do método *Nearest Neighbor* para a confecção de um mapa batimétrico.

Apesar de ambos os levantamentos utilizarem um ecobatímetro de alta frequência (200 kHz), o modelo dos equipamentos são diferentes, e com isso a acurácia das medições também será diferente. E cada levantamento utilizou um plano de linhas distinto, por este motivo só foi possível fazer comparações nos mesmos pontos medidos.

4.2 BATIMETRIA DERIVADA DE SATÉLITE

Para a estimação da batimetria através de imagens de satélite, foram realizadas as seguintes etapas: (1) download das imagens; (2) processamento das imagens; (3) identificação da profundidade de extinção; (4) análise do Material Particulado em Suspensão, (5) aplicação do algoritmo de derivação batimétrica; (6) cálculo da exatidão do modelo. As etapas são detalhadas nos tópicos a seguir e estão esquematizadas no fluxograma da Figura 6.

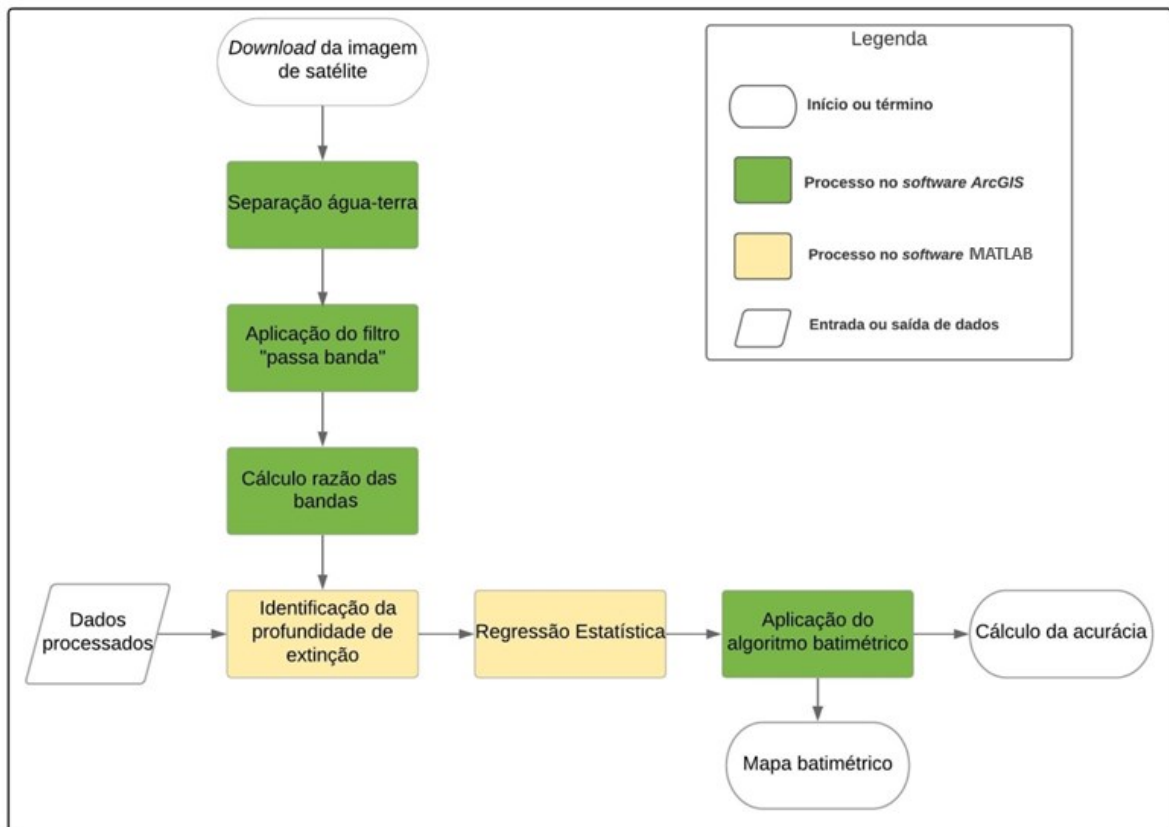


Figura 6 - Fluxograma dos procedimentos para extração da batimetria derivada de satélite

4.2.1 Download de Imagens

O Sentinel-2 é uma missão de imageamento multiespectral com alta resolução e alta frequência de revisitação desenvolvida pela Agência Espacial Europeia (ESA). As imagens são disponibilizadas gratuitamente para download através do site <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. O Sentinel-2 consiste em dois idênticos satélites Sentinel-2A e Sentinel-2B, acoplados com o sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI). Com um tamanho de faixa de 290 km, aquisita imagens a cada cinco dias e apresenta uma resolução radiométrica de 12-bits. O satélite possui quatro bandas com 10 m de resolução espacial, seis bandas com 30 m e três bandas com 60 m, conforme detalhados na Tabela 3 (DRUSCH *et al.*, 2012).

Em comparação com o satélite Landsat-8 desenvolvido pelo *United States Geological Survey* (USGS), o Sentinel-2 apresenta maior resolução espacial e espectral, sendo três bandas espectrais a mais do que o Landsat-8, dentro da região do infravermelho próximo, as quais permitem mais detalhes sobre a qualidade da água em águas costeiras opticamente complexas, como clorofila e turbidez (CABALERRO; STUMPF, 2019).

Tabela 3 - Resolução espectral para cada banda do satélite Sentinel-2 MSI.

Sentinel-2 MSI		
Banda	Comprimento de onda (μm)	Resolução (m)
1 - Aerossol Costeiro	0,433 – 0,453	60
2 - Azul	0,458 – 0,523	10
3 - Verde	0,543 – 0,578	10
4 - Vermelho	0,650 – 0,680	10
5 - Red Edge 1	0,698 – 0,713	20
6 - Red Edge 2	0,733 – 0,748	20
7 - Red Edge 3	0,773 – 0,793	20
8 - Near Infrared (NIR)	0,785 – 0,900	10
8b - Near Infrared Narrow (NIR)	0,855 – 0,875	60
9 - Vapor D'água	0,935 – 0,955	60
10 - Cirrus	1,360 – 1,390	60
11 - Shortwave Infrared 1 (SWIR1)	1,565-1,655	20
12 - Shortwave Infrared 2 (SWIR2)	2,100 – 2,280	20

Fonte: (DRUSCH *et al.*,2012).

Foi realizado o download da imagem (*Level 1C*), já com o processamento para o Topo da Atmosfera (TOA) e correção radiométrica, para a área de interesse e com excelentes condições atmosféricas, ou seja, ausência de nuvens. A imagem obtida para o dia 20 de Maio de 2018 compreende o período em que o levantamento batimétrico foi realizado, entre 14 e 24 de Maio de 2018. A imagem foi aquisitada às 15:12 (UTC) em condição de maré enchente sendo registrada a altura de 1,38 m.

4.2.2 Processamento

A imagem de satélite baixada inicialmente foi convertida para a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) Zona 22S / *World Geodetic System 1984* (WGS84). Em seguida, a correção atmosférica consistiu na conversão das imagens de TOA para reflectância da superfície (*Level 2*) através do *software* ACOLITE.

O ACOLITE foi desenvolvido pelo *Royal Belgian Institute of Nature Sciences* (RBINS) especificamente para o processamento de imagens em ambientes aquáticos. A correção atmosférica suporta os satélites Landsat (5/7/8) e Sentinel-2(A/B). O produto final gerado é a reflectância da superfície da água, além de outros dados derivados como

estimativas de material particulado em suspensão, turbidez e clorofila (VANHELLEMONT; RUDDICK, 2016).

Para a correção atmosférica foi implementado o algoritmo *Dark Spectrum Fitting* (DSF) através do ACOLITE, com correção para aerossol marinho. O DSF foi desenvolvido originalmente para aplicações em satélites ópticos de alta resolução, mas mostrou potencial para a aplicação ao MSI devido à sua melhor cobertura espectral. (VANHELLEMONT, 2019). Neste estudo, também foi aplicado uma correção do *sunlint*, entregando a imagem de reflectância da superfície com correção atmosférica para todas as bandas visíveis e infravermelho próximo (NIR).

No *software* ArcGIS foi realizada a separação entre os pixels de água e terra na imagem através do cálculo do *Normalized Difference Water Index* (NDWI) proposto por McFeeters (1996), o qual é calculado através da Equação 2.

$$NDWI = \frac{B3 - B8}{B3 + B8} \quad (2)$$

Onde, *NDWI* é o resultado contendo apenas os pixels identificados como água na imagem, *B3* representa a reflectância da banda verde e *B8* a reflectância da banda infravermelho próximo. O *NDWI* serviu como máscara para recorte das regiões que representavam água para todas as bandas da imagem. Após este procedimento, foi aplicado o filtro passa banda baixa da *toolbox Spatial Analyst* do ArcGIS para reduzir a variação local e remover *outliers* de cada banda.

Apesar da remoção dos *outliers*, os dados ainda apresentaram ruídos e quando correlacionados com a batimetria medida em campo, observou-se valores diferentes de profundidade para o mesmo valor de reflectância, o que pode gerar erros no modelo batimétrico. Por este motivo, em ambiente MATLAB foi aplicado um filtro de mediana espacial com janela móvel de 15 x 15 pixels para as bandas aerossol costeiro (B1), azul (B2), verde (B3), vermelho (B4) e *Red Edge 1* (B5), com o objetivo de remover o ruído especular (ruído digital) identificado na bandas da imagem.

4.2.3 Identificação da Profundidade de Extinção

Os valores da reflectância da imagem processada foram extraídos nos mesmos pontos das linhas de sondagens realizadas no levantamento batimétrico monofeixe, a fim de

verificar o comportamento da refletância com o aumento da profundidade. Com isso, foi identificada a profundidade de extinção (PE), profundidade a partir da qual deixa de existir uma relação entre a razão das refletâncias e as profundidades medidas no levantamento.

4.2.4 Análise do Material Particulado em Suspensão

Devido ao fato da área de estudo ser um estuário com uma importante presença de sedimentos em suspensão, causado pelo grande aporte fluvial (OLIVEIRA, 2006), foi utilizado um produto adicional do ACOLITE que identifica a concentração de sedimentos em suspensão. O Material Particulado em Suspensão (MPS) foi estimado através do algoritmo proposto por Nechad *et al.* (2016).

A análise do MPS permite entender como este influencia na absorção da radiação da coluna de água, e conseqüentemente, na derivação da batimetria. Após a análise dos dados de MPS, foi estipulado um limiar válido para a aplicação do algoritmo, de modo que os pixels contaminados com material em suspensão fiquem de fora da análise.

4.2.5 Aplicação do Algoritmo Batimétrico

Foram testados dois métodos para a estimativa da batimetria da Baía da Babitonga através de satélite: a Transformação da Razão de Bandas e a equação NDWI. Ambos os métodos abordam a Lei de Beer, a qual considera que a atenuação da luz na coluna de água aumenta exponencialmente à medida que a profundidade aumenta (Gao, 2009).

O algoritmo da Transformação da Razão de Bandas (Equação 3) desenvolvido por Stumpf *et al.* (2003), estima a profundidade através da razão do logaritmo natural entre a refletância de duas bandas, assumindo que ambas as bandas são afetadas igualmente pela atmosfera, coluna de água e contribuição do albedo de fundo.

$$ST = \left(\frac{\ln(nR_w(\lambda_i))}{\ln(nR_w(\lambda_j))} \right) \quad (3)$$

Onde ST é o modelo proposto pro Stumpf ainda sem referência vertical, n é uma constante para garantir que a razão permaneça positiva em todos os valores (neste caso foi utilizado 1000), $R_w(\lambda_i)$ é a refletância da superfície da banda i e $R_w(\lambda_j)$ é a refletância da

superfície da banda j . Foram então testadas duas combinações de bandas: B2/B4 (i : banda 2 – azul, j : banda 4 – vermelho) e B3/B4 (i : banda 3 – verde, j : banda 4 – vermelho).

Foi utilizado também o método *Normalized Difference Water Index* (NDWI) proposto por McFeeters (1996) para delinear feições aquáticas neste trabalho e também testado para a inversão batimétrica. Este algoritmo (Equação 4) realça a presença da água nas imagens, eliminando a influência do solo e vegetação.

$$NDWI = \frac{R_w(\lambda_i) - R_w(\lambda_j)}{R_w(\lambda_i) + R_w(\lambda_j)} \quad (4)$$

Onde, NDWI é o modelo proposto pro McFeeters ainda sem referência vertical, $R_w(\lambda_i)$ é a refletância da superfície da banda i e $R_w(\lambda_j)$ é a refletância da superfície da banda j . Foram então testadas duas combinações de bandas: NDWI B1 e B5 (i : banda 1 – aerossol costeiro, j : banda 5 – *Red Edge* 1), NDWI B2 e B4 (i : banda 2 – azul, j : banda 4 – vermelho) e NDWI B5 e B3 (i : banda 5 – *Red Edge* 1, j : banda 3 – verde).

Para a referência vertical, foi utilizada uma relação entre os dados de batimetria medidos em campo e os valores gerados por cada algoritmo, sendo eles: B2/B4, B3/B4, NDWI B1 e B5, NDWI B2 e B4, NDWI B5 e B3. Com isso, os coeficientes de ajuste para cada algoritmo foi encontrado através de regressão polinomial de segundo grau (Equação 5) assim como utilizado por Vilar *et al.* (2018), e a equação foi aplicada para as estimativas da batimetria.

$$Z_{sat} = m_2(ALG)^2 + m_1(ALG) + m_0 \quad (5)$$

Onde, Z_{sat} é a profundidade estimada pelo satélite, ALG é o resultado do algoritmo proveniente da Equação 3 ou Equação 4, m_1 e m_2 são os coeficientes de ajuste da curva que dimensionam a profundidade de referência e m_0 é o offset de ajuste da maré.

Após estes testes e definição do melhor algoritmo para estimação batimétrica, a baía foi separada em zonas entremarés e zonas permanentemente submersas, seguindo a metodologia utilizada por Bué *et al.* (2020) para identificar estas zonas. O objetivo desta separação foi verificar se os algoritmos gerados por zonas na baía melhoram os resultados.

A separação foi realizada através do NDWI com as bandas verde e infravermelho próximo (Equação 1) e foi observado que áreas de bancos que sofrem influência da maré apresentam um comportamento espectral diferente de outras áreas, com isso, possibilitou a

separação em duas zonas. Este resultado de máscara para recortar as áreas das duas zonas, sendo assim, os mesmos procedimentos anteriores de aplicação dos algoritmos batimétrico foram implementados para cada zona, originando novas equações.

4.2.6 Cálculo da Exatidão¹

Os parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o desempenho do algoritmo em recuperar as profundidades foram o Coeficiente de Determinação (R²), o Bias e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE). O Coeficiente de Determinação (Equação 6) mede o quanto da variável a ser estimada é explicada pela variável explicativa. O Bias (Equação 7) representa o viés dos dados e mede o desvio entre as variáveis através da diferença entre as médias. O RMSE (Equação 8) quantifica a diferença entre o estimador e o verdadeiro valor da quantidade estimada, inclui erros aleatórios que afetam a precisão das medições e erros sistemáticos que afetam a exatidão das medidas (BRANDO *et al.*, 2009). Os cálculos foram realizados através das equações estatísticas utilizadas por Silva (2014).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 + (x_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

$$Bias = \bar{x} - \bar{y} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (8)$$

Onde, x é o dado medido pelo ecobatímetro no levantamento e y é a profundidade estimada pelo satélite.

¹ Sinônimo de acurácia, representa o quanto o modelo representa os dados reais.

5 RESULTADOS

5.1 LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

Foram sondados 206 km de linhas, conforme apresentado na Figura 7. A profundidade máxima obtida no levantamento batimétrico monofeixe foi 28 m, na região do canal de navegação próximo ao Porto de Itapoá, e a mínima foi 0,10 m em baixios compreendendo grande parte da região interna da baía. A profundidade média encontrada foi de 6,5 m, com uma mediana de 5,3 m.

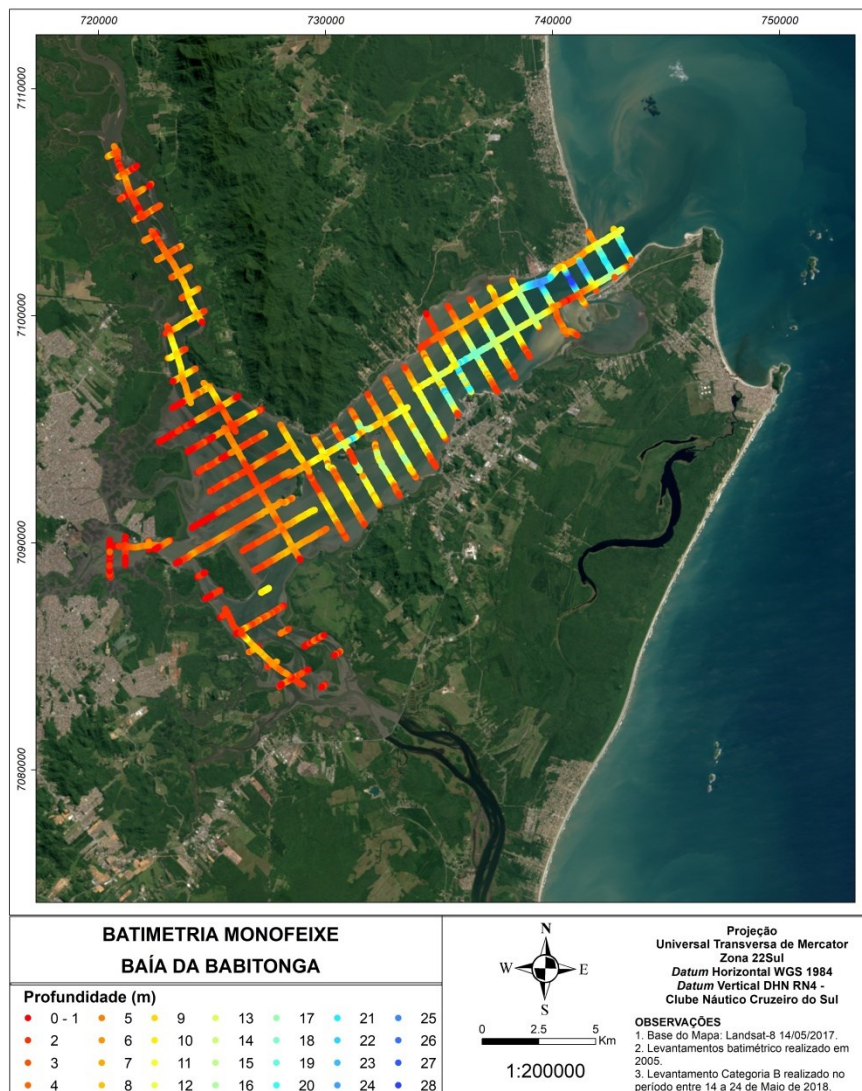


Figura 7 - Batimetria obtida no levantamento monofeixe. Fonte da Imagem de Satélite: Landsat-8 (14/05/2017).

A Incerteza Vertical Total do levantamento foi calculada e está de acordo com os requisitos para a classificação do levantamento como categoria B segundo a NORMAM-25.

Na Figura 8 são apresentados os valores da IVT e comparados com o máximo estipulado pela NORMAM-25 para cada profundidade. O erro máximo foi 0,3 m e o mínimo foi de 0,001 m, e o erro médio para todo o levantamento foi 0,05 m.

Já a Incerteza Horizontal Total está atribuída ao método de posicionamento, sendo quantificada pelas incertezas verificadas no equipamento utilizado. Durante o levantamento o DGPS-RTK apresentou a incerteza de 2,422 m e compreende o limite estipulado pela NORMAM-25, que para a categoria B, seria de 5 m + 10% da profundidade.

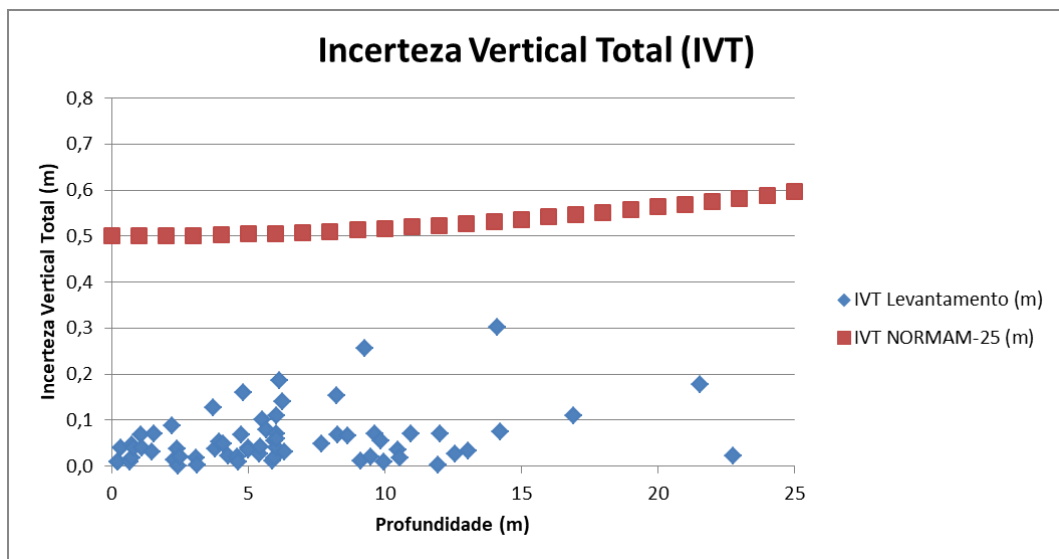


Figura 8 - Gráfico das Incertezas Verticais do levantamento

Para fins de visualização espacial, a batimetria foi interpolada através do método *Natural Neighbor* no *software* ArcGIS para facilitar a identificação de morfologias características de estuários. Na Figura 9 podem-se visualizar as maiores profundidades no canal de navegação próximo aos portos de Itapoá e São Francisco do Sul, e os canais que levam ao Palmital e o Linguado são fracamente identificados devido ao distanciamento das linhas de sondagens. Em uma comparação entre os dados medidos em campo e os dados interpolados foi obtido um R^2 de 0,99, porém o erro máximo da interpolação foi de 5,9 m em algumas regiões. Devido à elevada complexidade morfológica da baía, foram identificados algumas imprecisões na caracterização espacial da batimetria, e por este motivo os dados interpolados não foram utilizados para a calibração do modelo estatístico de inversão batimétrica.

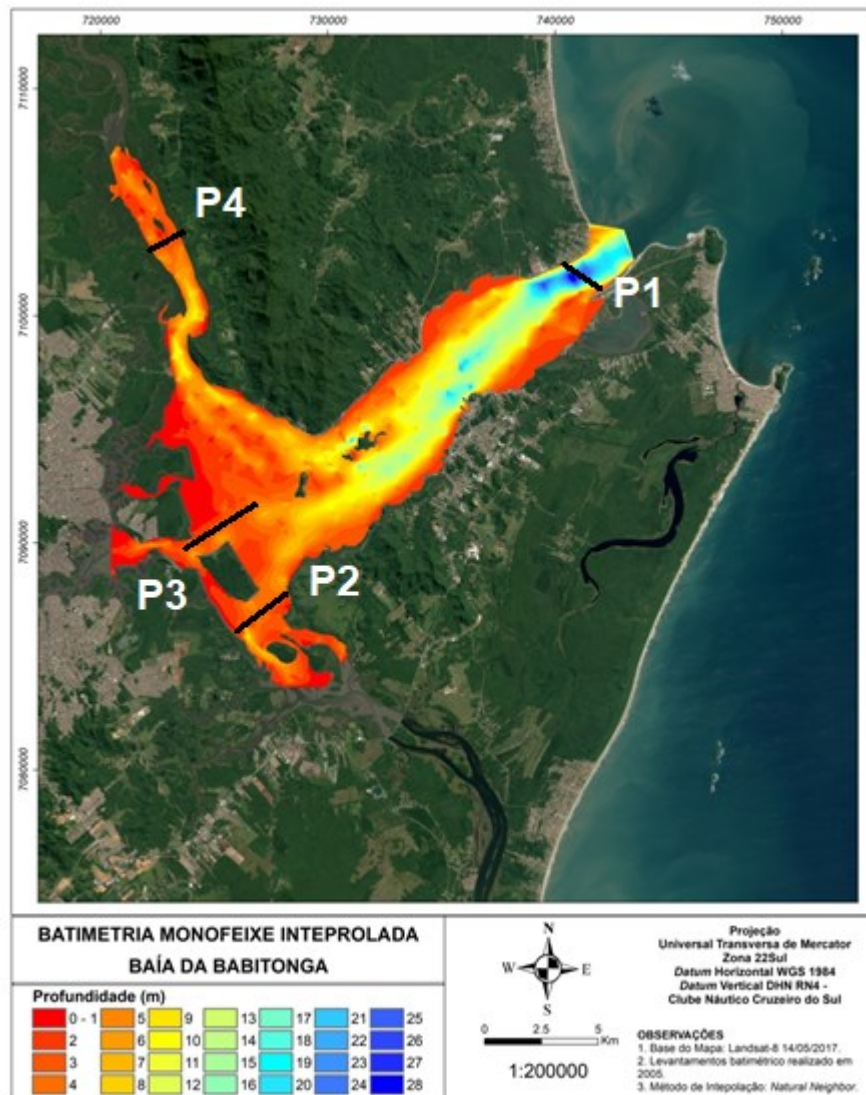


Figura 9 - Mapa batimétrico gerado com o interpolador *Nearest Neighbor* no *software* ArcGIS. As linhas em preto representam os transectos para comparação entre as batimetrias.

Os dados pretéritos da Baía da Babitonga, uma compilação de dados obtidos entre 2003 e 2005, apresentaram profundidade máxima de 26 m e mínima de 0,3 m. A média das profundidades foi de 2,8 m e uma mediana de 1,6 m. Estes dados também foram interpolados utilizando o *Natural Neighbor* no *software* ArcGIS e o resultado é apresentado na Figura 10. Por possuir um malha amostral com menor espaçamento, neste mapa é possível uma melhor visualização dos dados, permitindo a identificação mais clara dos canais do Palmital e Linguado do que a batimetria medida no presente estudo.

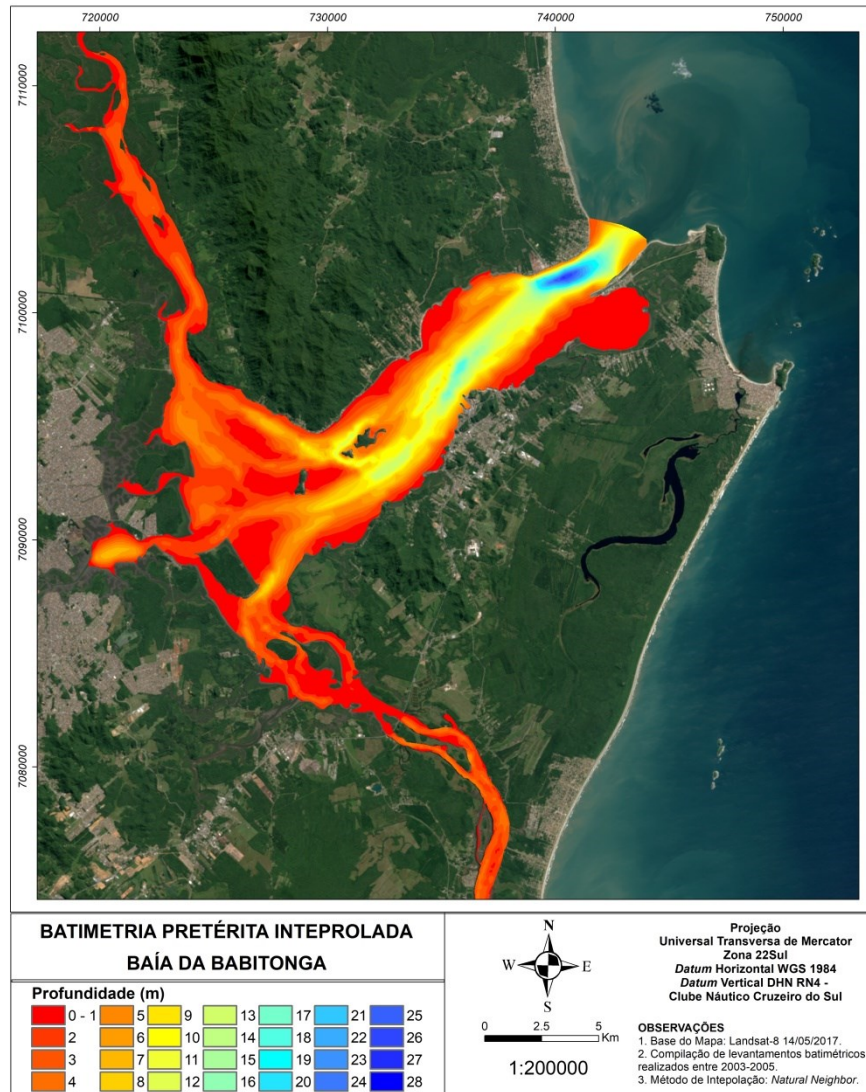


Figura 10 - Mapa da batimetria, compilada por Silva (2011) de levantamentos entre 2003 e 2005, gerado com o interpolador *Nearest Neighbor* no *software* ArcGIS.

Por serem levantamentos batimétricos com espaçamentos diferentes, não é possível realizar uma comparação entre o mapa batimétrico medido e o mapa da batimetria pretérita. Com isso, a comparação foi realizada apenas nos mesmos pontos medidos em ambos os levantamentos através de transectos, como identificados na Figura 10. A Figura 11 apresenta os transectos traçados para os dados da batimetria medida, batimetria interpolada e batimetria pretérita.

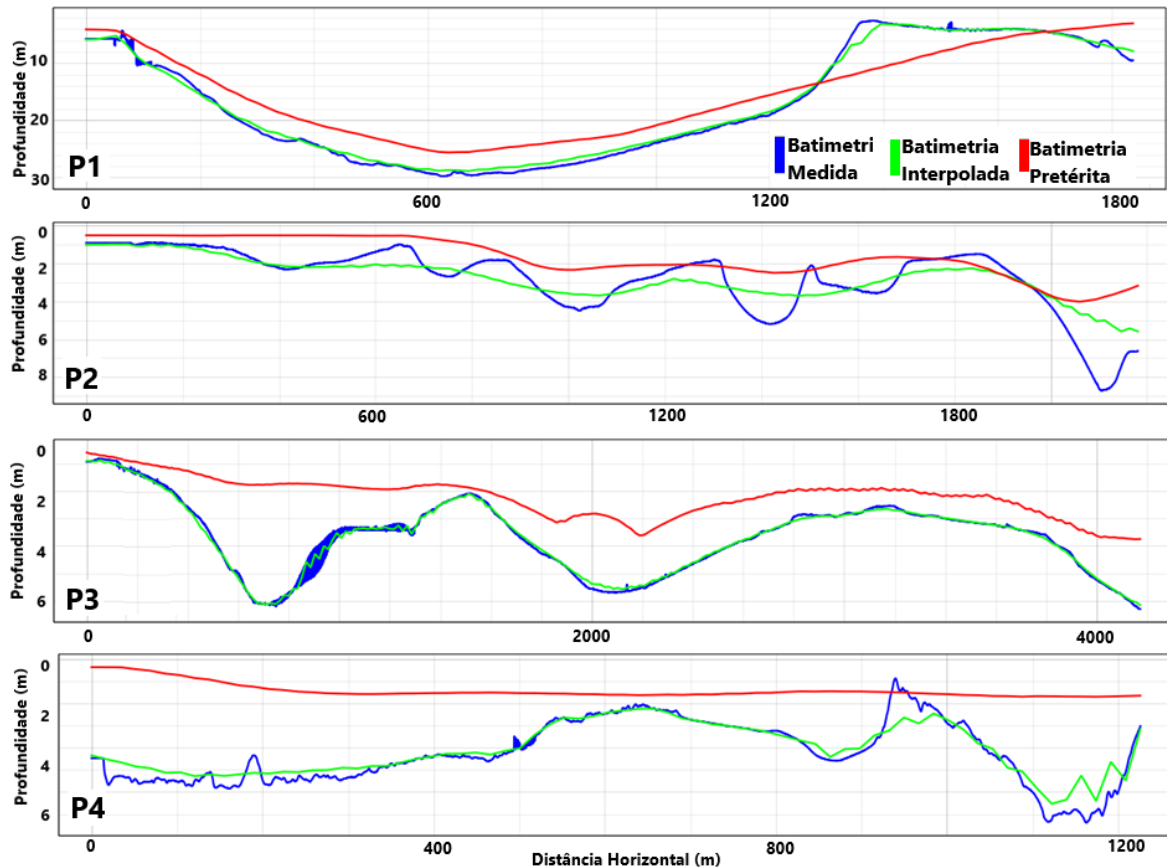


Figura 11- Perfis de comparação entre a batimetria medida (azul), batimetria interpolada (verde) e a batimetria pretérita (vermelho).

O transecto P1 está localizado no canal de acesso aos portos, local mais profundo da baía. É possível verificar que a batimetria obtida neste trabalho está mais profunda do que a batimetria pretérita, podendo indicar atividades de dragagem realizadas na área para permitir a navegação de embarcações até os portos.

O transecto P2 está localizado no canal do Linguado, característico de profundidades rasas, a batimetria medida apresentou bancos e um canal mais profundo no final do transecto, o que foi suavizado pela batimetria interpolada e também não identificado na batimetria pretérita.

O transecto P3 está localizado na região interna da Babitonga, próximo à cidade de Joinville. A batimetria pretérita esteve mais rasa novamente e a batimetria medida e a interpolada identificaram dois canais mais profundos ao longo do transecto. Estes canais podem ter se formado nestes últimos 13 anos, ou a batimetria pretérita pode não ter captado esta morfologia através das linhas de sondagem.

O transecto P4 está localizado no canal do Palmital, o qual também apresenta rasas profundidades. A batimetria medida se mostrou mais profunda na maior parte do transecto e apresentou algumas irregularidades do fundo que foram suavizadas pela interpolação. Já a

batimetria pretérita esteve mais rasa, não ultrapassando os 2 m, e apresentou uma morfologia de fundo suave.

Após a análise dos transectos, não foi possível afirmar se as diferenças encontradas entre os levantamentos identificam mudanças na morfologia da batimetria ao longo destes 13 anos, ou se são atribuídas aos erros da aquisição e interpolação dos dados.

5.2 BATIMETRIA DERIVADA DE SATÉLITE

São apresentados a seguir os resultados da derivação batimétrica para a Baía da Babitonga utilizando a imagem do satélite Sentinel-2 adquirida no dia 20 de Maio de 2018, às 15:12 (UTC) com uma altura de maré de 1,38 m, sob condição de maré de quadratura.

5.2.1 Definição do Melhor Algoritmo

Os dados de batimetria medidos em campo foram correlacionados com os valores de reflectância gerados por cada algoritmo: B2/B4, B3/B4, NDWI B1 e B5, NDWI B2 e B4, NDWI B5 e B3. Para análise dos resultados foram representados os diagramas entre a batimetria medida em campo pelo ecobatímetro (eixo x) e a reflectância do algoritmo (eixo y), conforme apresentado na Figura 12. As correlações foram avaliadas através das estatísticas descritas na metodologia.

Os valores da reflectância gerados pelos algoritmos apresentaram uma grande dispersão dos dados, verificado através da equação de regressão polinomial de segundo grau (em vermelho na imagem) e pela baixa correlação variando de 0,48 a 0,53 entre os algoritmos. O bias também apresentou valores altos, entre 5,47 e 6,73, assim como o RMSE que variou entre 2,76 e 2,93. Entre os dados desta primeira análise, o algoritmo B2/B4 apresentou os menores valores do bias e do RMSE, já o algoritmo com maior correlação foi o NDWI B1 e B5.

Foi possível observar em todos os gráficos que após os 20 m de profundidade, os dados se apresentam mais dispersos, podendo ser identificada um afastamento entre as curvas da equação da regressão polinomial (vermelho) e o perfil médio dos dados (preto). Com isso, a profundidade de extinção do modelo foi estipulada como 20 m e todos os dados acima desta profundidade foram removidos para diminuir os erros na aplicação dos algoritmos.

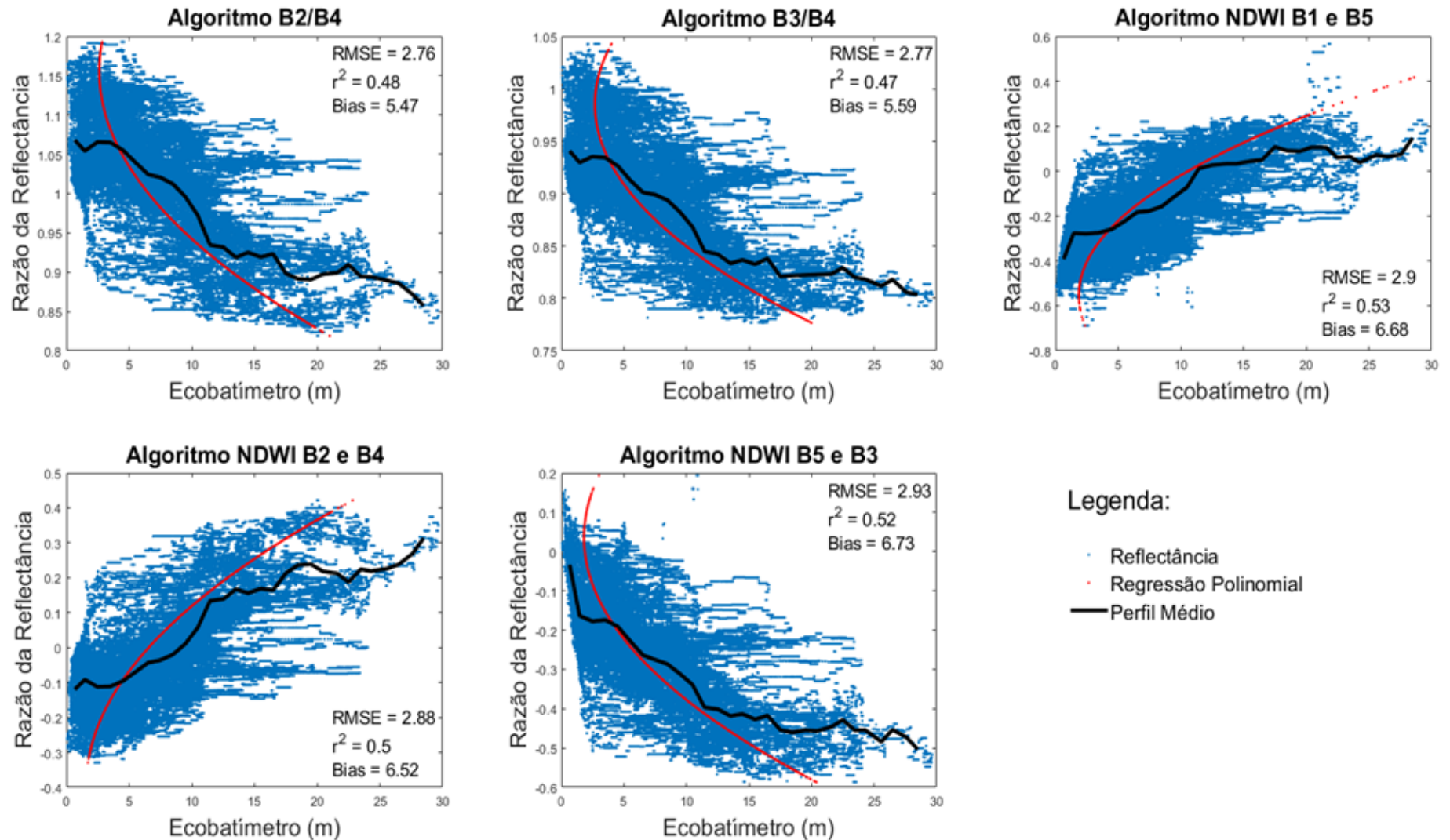


Figura 12 - Gráficos da reflectância dos algoritmos para todas as profundidades. Em azul estão correlacionados os índices da reflectância de cada algoritmo com a profundidade medida com o ecobatímetro. Em preto é a média dos dados de reflectância. Em vermelho é uma curva polinomial de segundo grau ajustada aos dados.

5.2.1.1 Reamostragem dos Dados

A partir dos gráficos também é evidente o problema das diferentes resoluções espaciais entre a batimetria e imagem de satélite, algumas linhas horizontais contínuas indicam para o mesmo valor de reflectância diferentes profundidades medidas. Por este motivo, foi realizada uma reamostragem nos dados de batimetria e reflectância, como descrita na metodologia.

Na Figura 13 são apresentados os resultados da reamostragem e a relação com a correlação e na Figura 14 a reamostragem com relação ao RMSE. Foi possível observar que a estatística (R e RMSE) melhorou com a reamostragem e os melhores resultados foram obtidos com a reamostragem de 230 pontos. De todos os algoritmos, o NDWI B5 e B3 e o NDWI B1 e B5 obtiveram as maiores correlações e menores erros, já os algoritmos B3/B4, B2/B4 e NDWI B2 e B4 apresentaram os piores resultados.

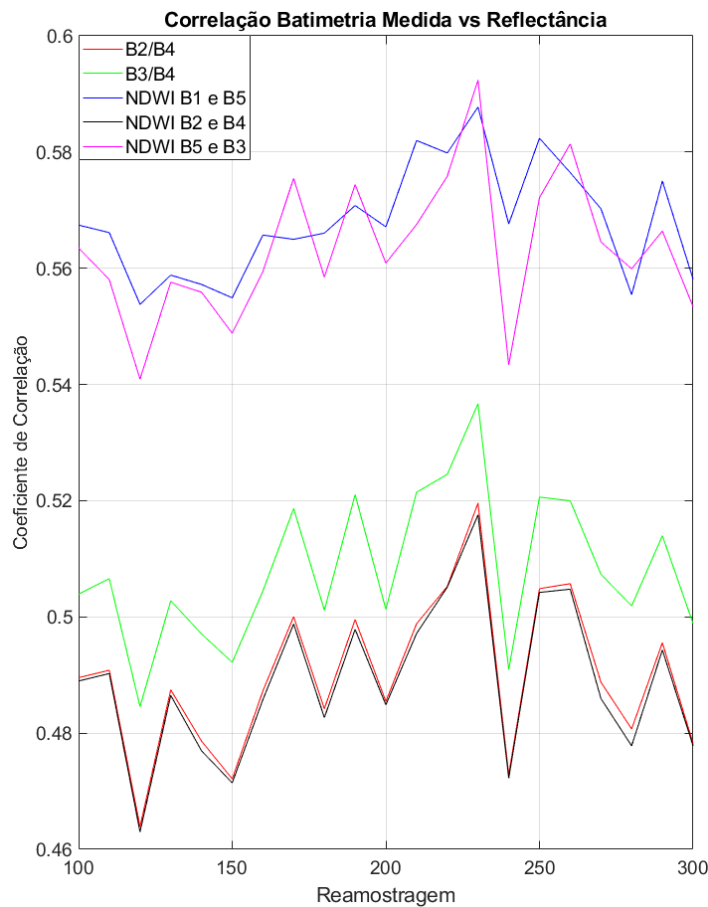


Figura 13 - Testes da reamostragem dos dados (eixo x) e relação com a correlação (eixo y).

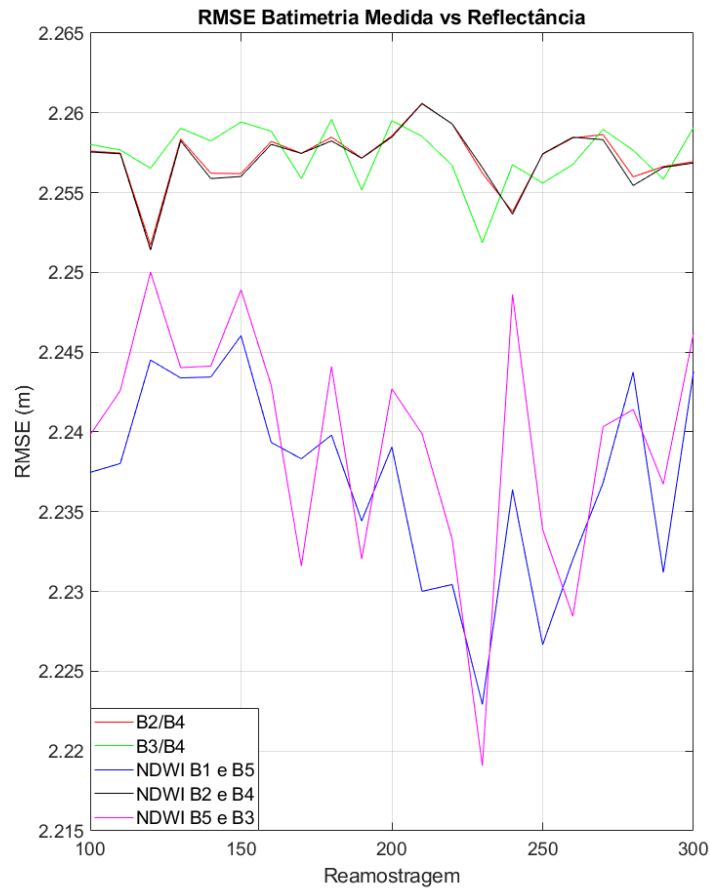


Figura 14 - Testes da reamostragem dos dados (eixo x) e relação com o RMSE (eixo y).

5.2.1.2 Influência do Material em Suspensão

A distribuição espacial do Material Particulado em Suspensão (MPS) estimado através da imagem de satélite é apresentada na Figura 15. As áreas com as maiores concentração de MPS (entre 16-40 g/cm³) estão associadas aos bancos próximos aos portos, áreas marginais ao canal central de navegação e nas proximidades de Joinville. As menores concentrações (0-10 g/cm³) foram encontradas nas regiões mais profundas do canal de navegação, e algumas áreas de canais internos da Babitonga em direção ao Palmital e ao Linguado.

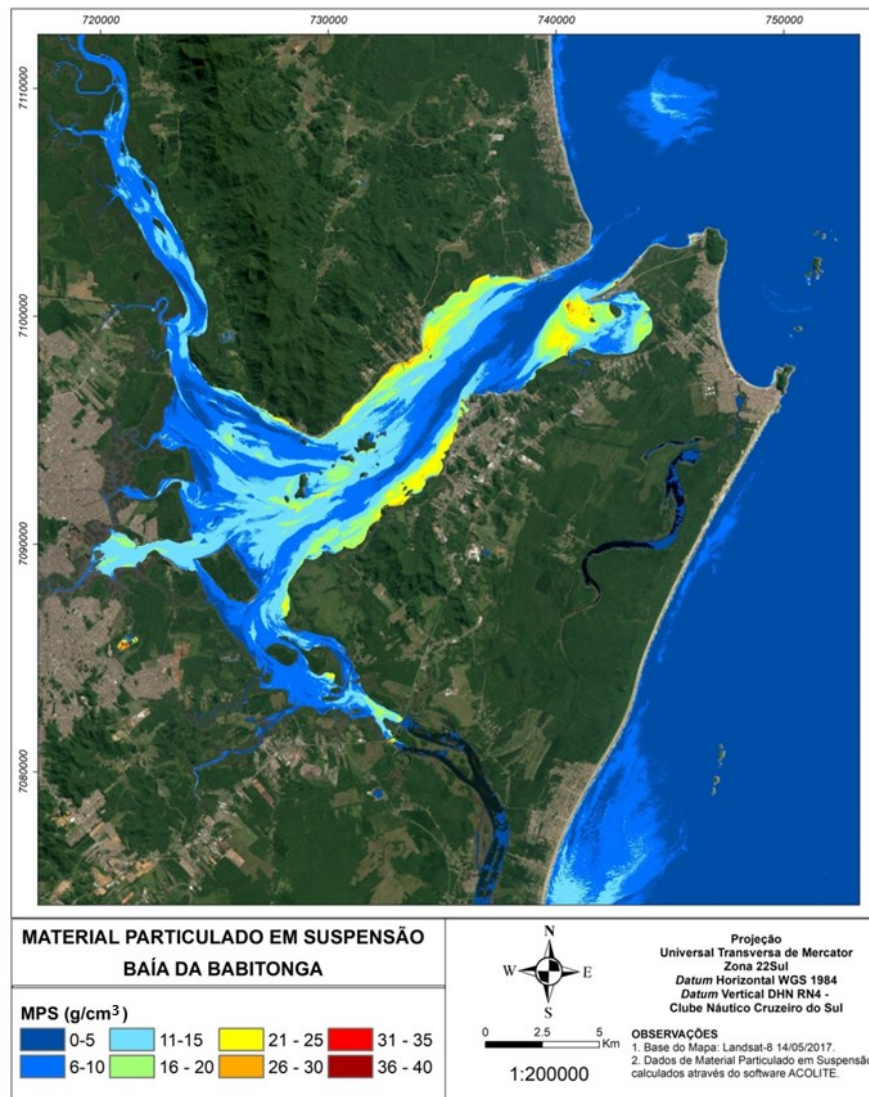


Figura 15 - Distribuição espacial do MPS na Baía da Babitonga estimado através da imagem de satélite.

A partir desta análise, verificou-se que quanto maior a concentração do MPS, maiores serão os erros na estimativa batimétrica, portanto foi definido um limiar de 10 g/cm^3 para realizar a aplicação dos algoritmos apenas nas áreas com concentrações de MPS estimadas abaixo deste limiar.

Os resultados da relação entre os diferentes algoritmos e a batimetria medida, reamostrados de forma a reduzir as incertezas, compreendendo apenas áreas com profundidade menor do que 20 m e concentração de MPS menor do que 10 g/cm^3 são apresentadas na Figura 16. Para todos os algoritmos o RMSE (os valores variaram entre 2,39-2,49) e os bias (os valores variaram entre 5,02-6,28) diminuíram, e a correlação aumentou, variando de 0,53 a 0,64 entre os algoritmos. Estes resultados indicam a interferência dos fatores citados acima para a estimativa da batimetria.

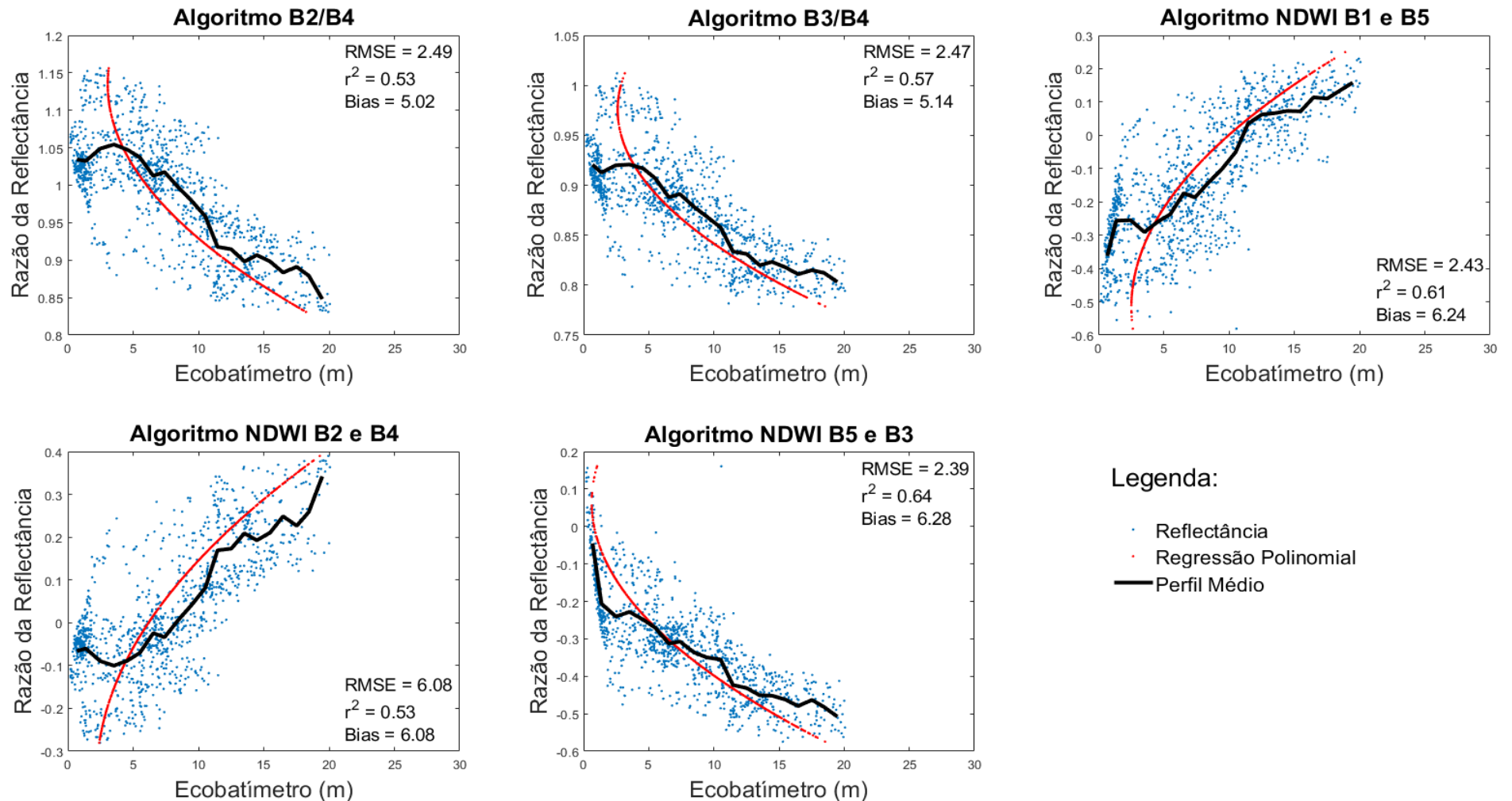


Figura 16- Gráficos da reflectância dos algoritmos para até 20 m, áreas com MPS menor que 10 g/cm^3 e reamostragem dos dados. Em azul estão correlacionados os índices da reflectância de cada algoritmo com a profundidade medida com o ecobatímetro. Em preto é a média dos dados de reflectância. Em vermelho é uma curva polinomial de segundo grau ajustada aos dados.

Dentre todos os algoritmos, o NDWI B5 e B3 apresentou o menor valor de RMSE (2,39) e a maior correlação (0,64). Já o B2/B4 apresentou o resultado do menor bias (5,02) entre todos os algoritmos. A partir destas análises, foram encontradas as equações representadas na Tabela 4, e estas foram aplicadas para os respectivos algoritmos a fim de obter a batimetria estimada pelo satélite.

Tabela 4 - Equações para aplicação da batimetria, onde Z_{eco} é a batimetria medida em campo e Z_{sat} a batimetria a ser estimada pelo satélite.

Algoritmo	Equação	Coefficiente de correlação
NDWI B5 e B3	$Z_{sat} = 43,66 Z_{eco}^2 - 5,72 Z_{eco} - 0,38$	0,77
NDWI B2 e B4	$Z_{sat} = 29,98 Z_{eco}^2 + 1,89 Z_{eco} + 4,99$	0,74
NDWI B1 e B5	$Z_{sat} = 27,63 Z_{eco}^2 + 28,70 Z_{eco} + 8,78$	0,77
B3/B4	$Z_{sat} = 408,74 Z_{eco}^2 - 768,39 Z_{eco} + 390,69$	-0,74
B2/B4	$Z_{sat} = 163,94 Z_{eco}^2 - 372,13 Z_{eco} + 13,04$	-0,73

Os resultados dos algoritmos aplicados são apresentados das Figura 17 a Figura 21, onde o primeiro gráfico representa a comparação entre a batimetria medida em campo (eixo x) e batimetria estimada pelo satélite (eixo y), o segundo gráfico é o histograma do residual (batimetria medida menos a batimetria estimada) e o terceira gráficos representa a distribuição espacial do residual pela baía. Os parâmetros estatísticos calculados para os resultados dos algoritmos estão detalhados no APÊNDICE A.

O RMSE entre a batimetria em medida e estimada esteve entre 2,37 e 2,51 e a correlação variou de 0,57 a 0,68 entre os algoritmos. O bias calculado apresentou um valor muito baixo e não conseguiu ser representado com duas casas decimais, isto para todos os algoritmos.

No gráfico de histograma dos residuais, pode-se observar que a maior frequência de erros compreendeu entre -5 m e 5 m. O NDWI B5 e B3 se destaca por apresentar uma distribuição das frequências do histograma diferentes dos outros algoritmos, sendo caracterizado por uma distribuição simétrica uni modal.

Em relação ao erro espacial, os algoritmos apresentaram semelhanças nas regiões dos maiores e menores erros. Os valores positivos do residual indicam áreas onde a batimetria estimada foi menor do que a batimetria medida em campo. Os valores positivos do residual indicam áreas onde a batimetria estimada é maior do que a batimetria medida. Os resultados

mostraram os maiores erros de subestimação do satélite na área central do canal de navegação e em alguns pontos ao longo do canal do Palmital, e os erros de superestimação do satélite foram encontrados nas proximidades dos Portos (águas mais profundas) e também no interior da baía próximo a Joinville (águas mais rasas e com bancos característicos).

Após a análise de todos os dados estatísticos, o NDWI B5 e B3 foi definido como o melhor algoritmo para estimação da Baía da Babitonga, dentre os avaliados.

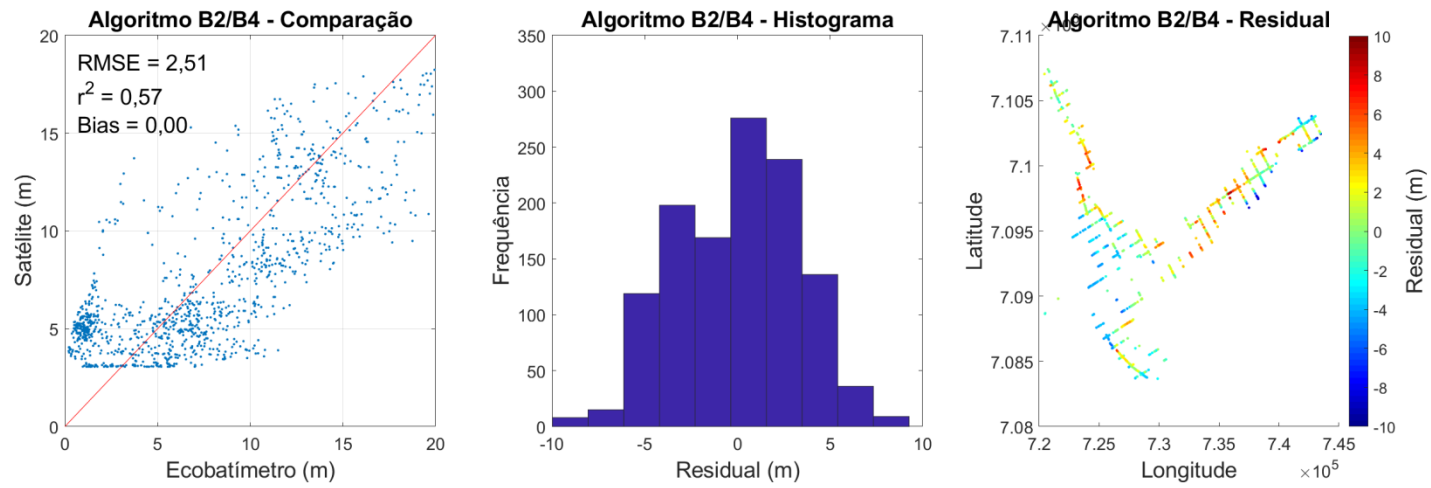


Figura 17 - Resultados da derivação batimétrica para o algoritmo B2/B4.

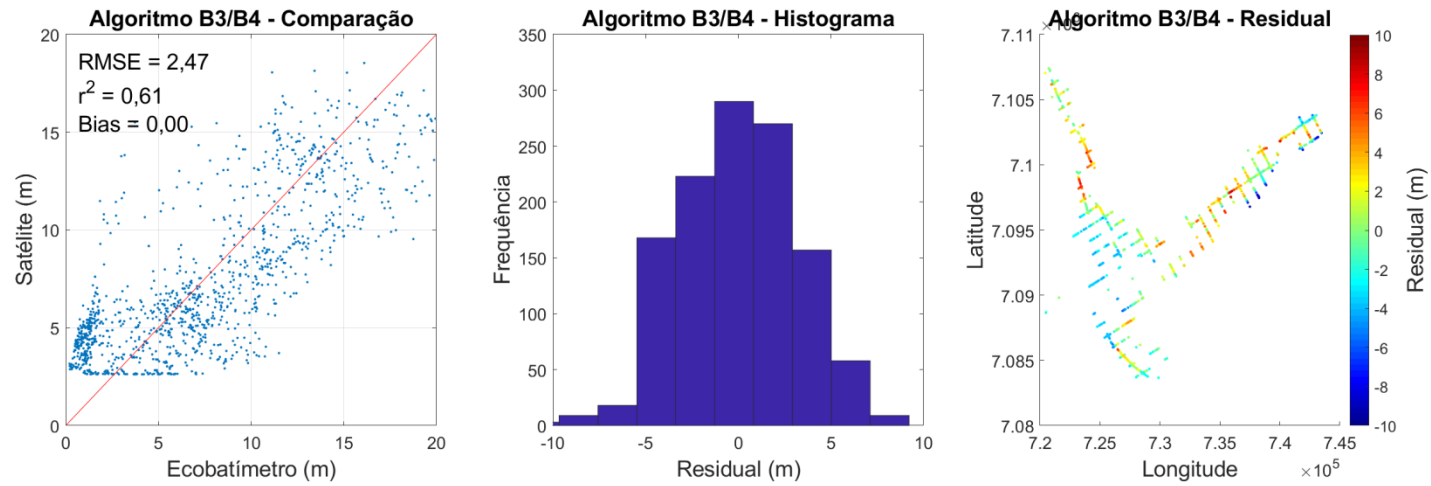


Figura 18- Resultados da derivação batimétrica para o algoritmo B3/B4.

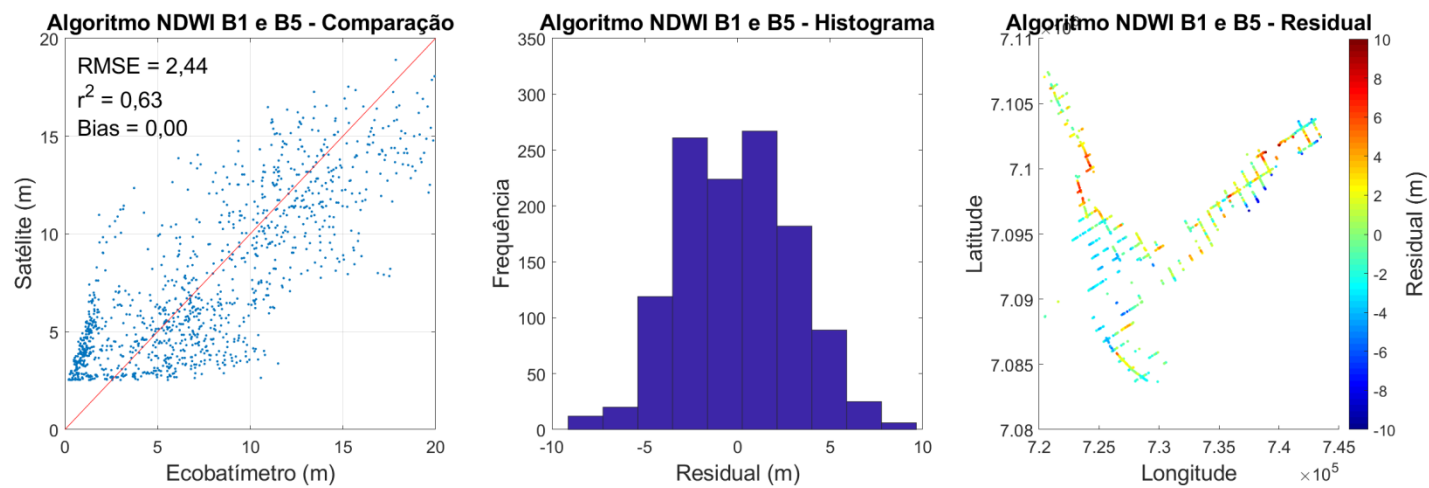


Figura 19 - Resultados da derivação batimétrica para o algoritmo NDWI B1 e B5.

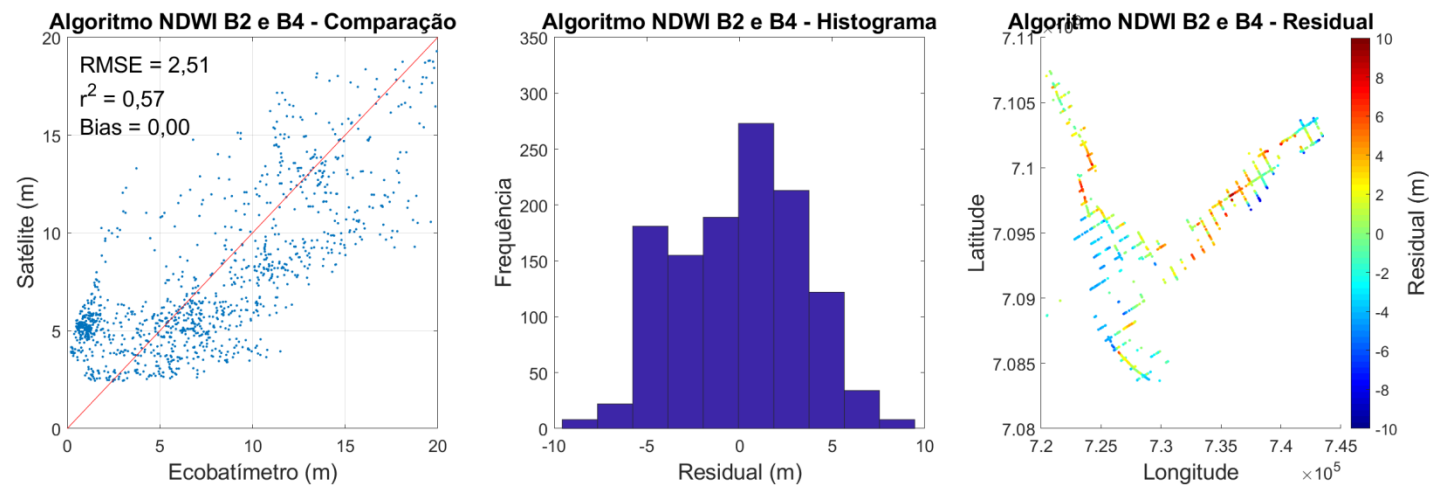


Figura 20 - Resultados da derivação batimétrica para o algoritmo NDWI B2 e B4.

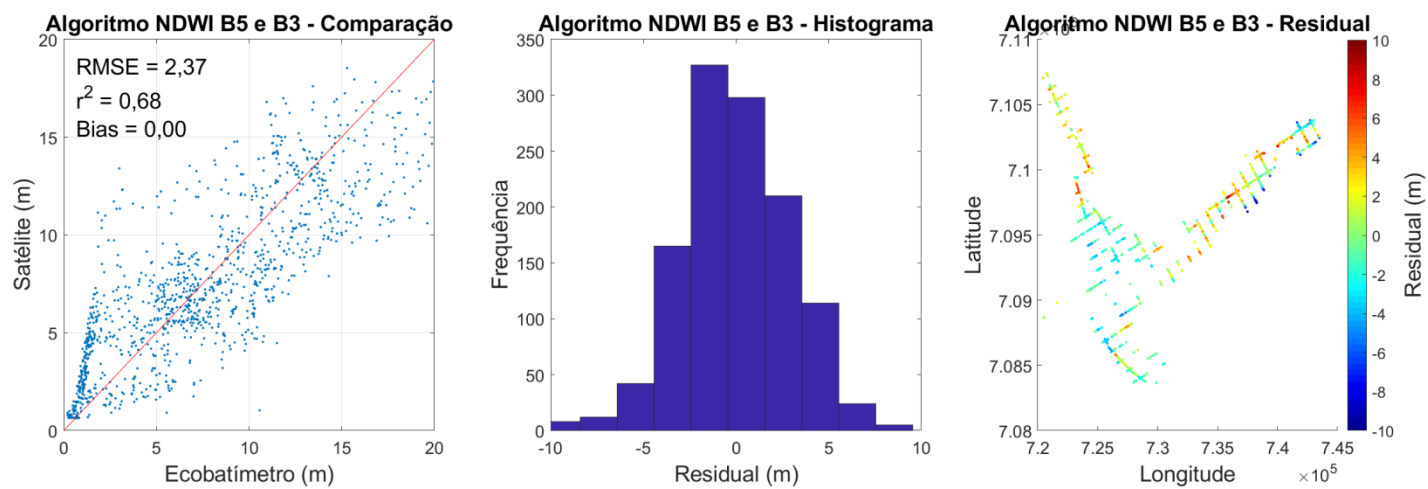


Figura 21 - Resultados da derivação batimétrica para o algoritmo NDWI B5 e B3.

Os dados batimétricos estimados através do algoritmo NDWI B5 e B3 estão representados na Figura 22. A profundidade máxima estimada foi de 18 m e a mínima de 0,6 m, com uma média de 7,3 m e mediana de 6,8 m. A equação definida pelo algoritmo NDWI B5 e B3 foi aplicada para todos os pixels da imagem (10 m de tamanho) que apresentam MPS calculado menor que 10 g/cm^3 , este resultado é apresentado na Figura 23. Esta aplicação serve apenas para a visualização espacial dos dados e identificação de morfologias.

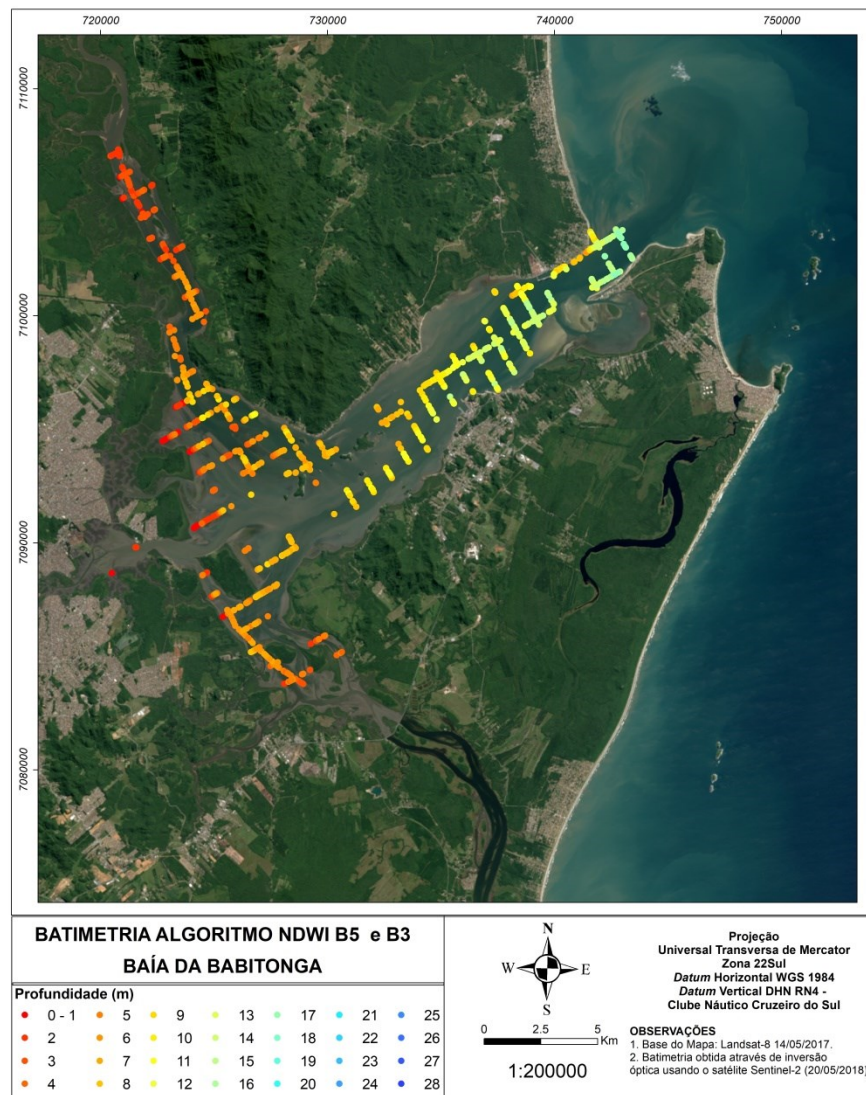


Figura 22- Batimetria estimada pelo satélite Sentinel-2 através do algoritmo NDWI B5 e B3.

Apesar do algoritmo não ter conseguido recuperar profundidades maiores do que 18 m, a áreas do canal de navegação e próxima aos portos apresentou as maiores profundidades estimadas pelo modelo. Os baixios e áreas mais rasas foram bem representados, como exemplo o banco característico na frente da Ilha do Mel, à esquerda do P2 na Figura 23.

Canais interiores na região do Linguado também foram representados visualmente, assim como o canal em direção ao Palmital.

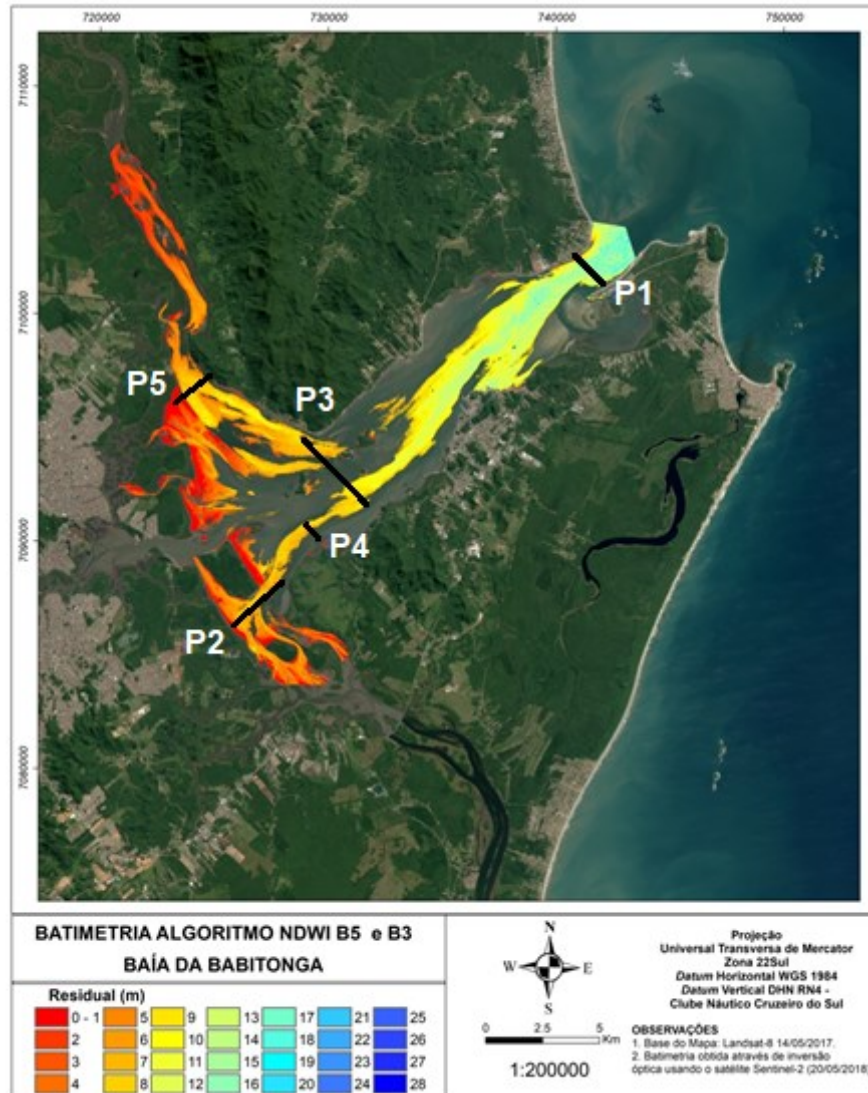


Figura 23 - Mapa batimétrico do algoritmo NDWI B5 e B3 aplicado a todos os pixels da imagem que apresentam MPS calculado menor que 10 g/cm^3 . As linhas em preto representam os transectos para comparação entre as batimetrias.

Uma comparação entre os dados medidos em campo e os estimados pelo algoritmo NDWI B5 e B3 foi realizada nos mesmos pontos através de transectos, os resultados são apresentados na Figura 24. De forma geral, a batimetria estimada apresentou comportamento menos suavizado do que a batimetria medida, isto pode ser causado pela turbidez da coluna de água e do fundo e os diferentes tipos de sedimentos de fundo.

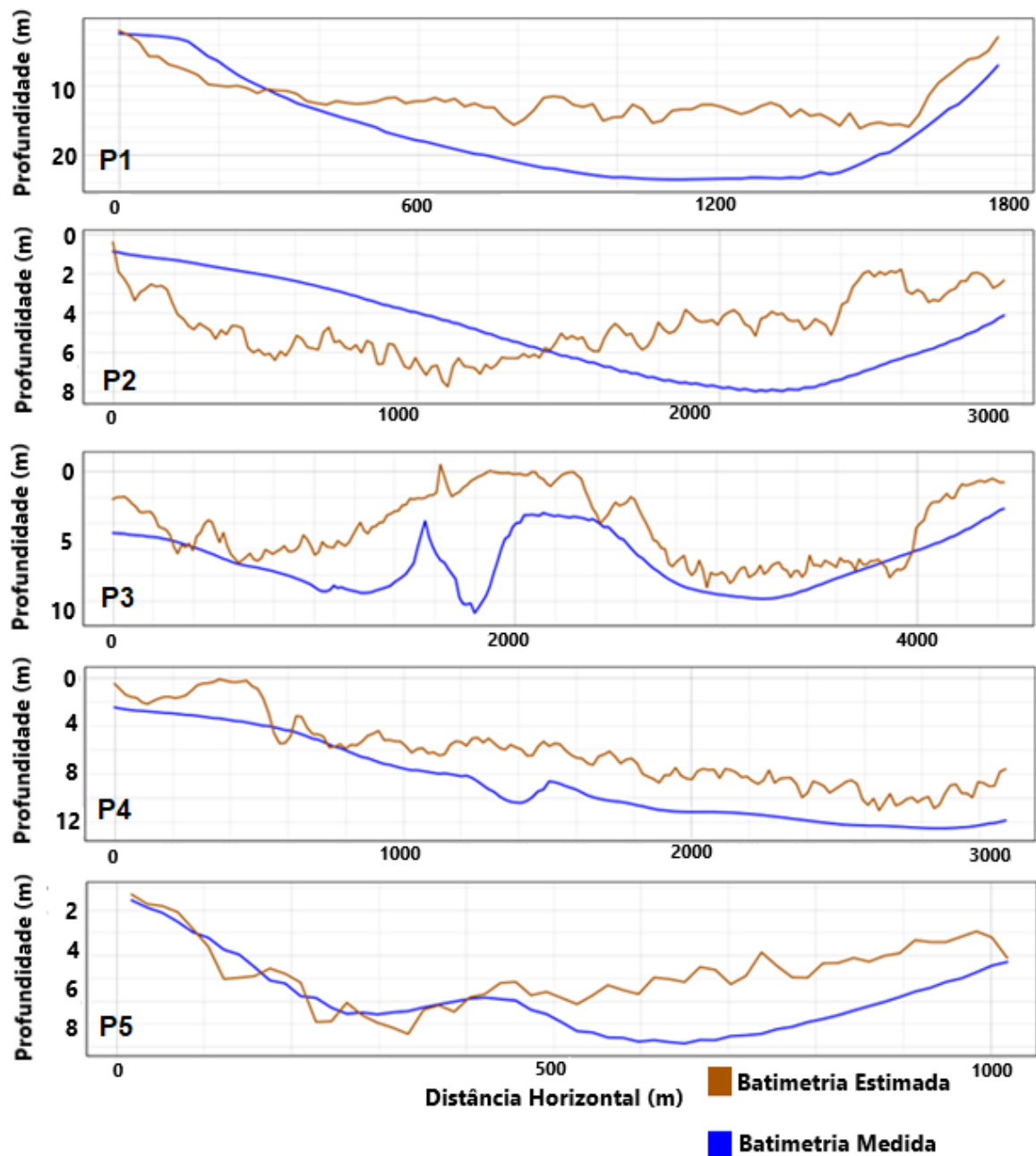


Figura 24- Perfis de comparação entre as batimetria medida e a estimada pelo algoritmo NDWI B5 e B3.

Através do transecto P1, localizado no canal de navegação, pode-se observar que a batimetria estimada pelo satélite não consegue representar as altas profundidades do canal, apesar de acompanhar a batimetria medida diminuindo a profundidade em direção ao centro do transecto.

No transecto P2, localizado no canal do Linguado, a batimetria estimada não foi capaz de representar a batimetria, apresentando um comportamento inverso da batimetria medida, mais rasa no canal e mais fundo no banco.

Já no transecto P3, localizado na parte central da baía, a batimetria estimada conseguiu acompanhar bem as variações da morfologia, apesar de alguma diferença vertical. Este mesmo comportamento também pode ser observado nos transectos P4 e P5, localizados no canal que vai em direção ao Linguado e o canal que vai em direção ao Palmital, respectivamente.

Portanto, após esta análise, foi possível estabelecer que o algoritmo encontrado para a Baía da Babitonga representou a área central da baía e os canais em direção ao Palmital. Porém, o canal mais próximo ao Linguado não foi representado com o algoritmo, assim como a área mais profunda da baía, o canal de navegação próximo aos portos.

5.2.2 Separação por Zonas

Este item apresenta uma separação entre zonas entremarés e zonas permanentemente submersas da baía. Com o objetivo de verificar se a separação por zonas na baía melhora os resultados, foi feita uma análise por regiões da Baía da Babitonga, como descrito na metodologia. O mapa da Figura 25 apresenta a separação das áreas como zona entremarés e a zona permanentemente submersa.

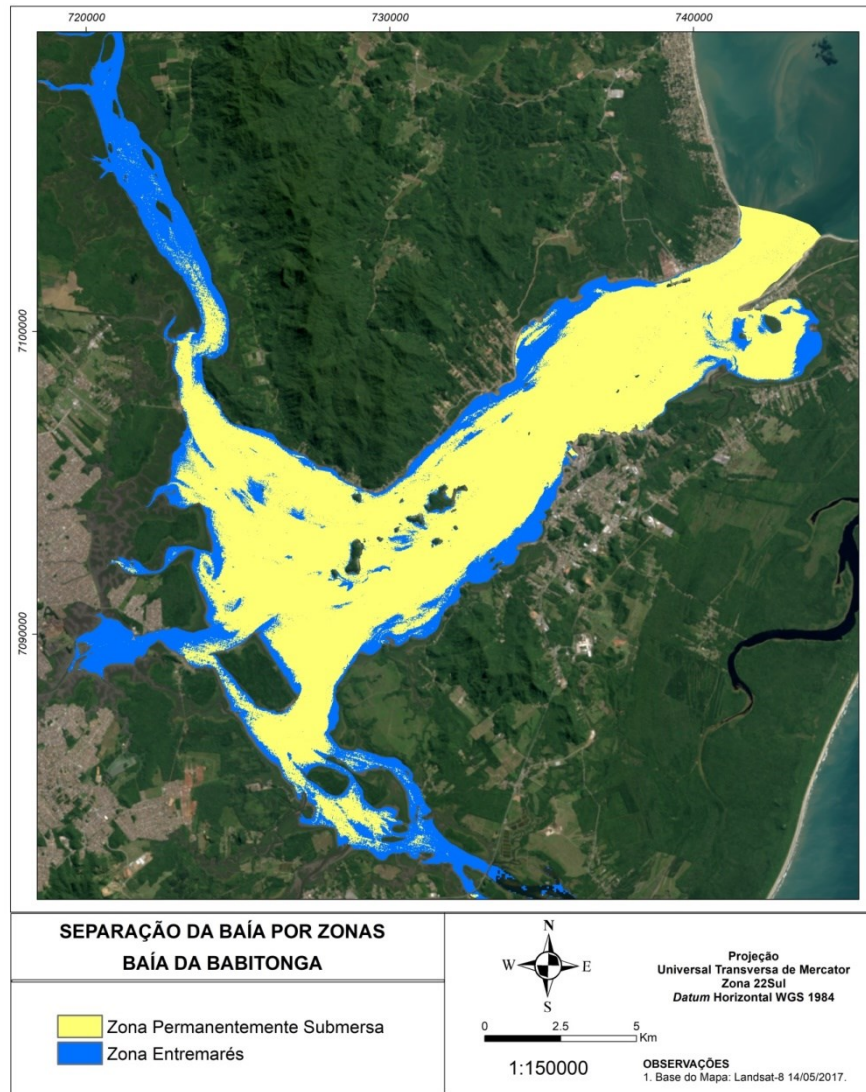


Figura 25 - Mapas da Bábítonga com a separação entre a zona entremarés e a zona permanentemente submersa.

5.2.2.1 Zona Entremarés

Para as áreas definidas como zona entremarés, foram relacionados os dados de batimetria medidos com a reflectância dos algoritmos, os dados foram reamostrados e limitados a áreas com profundidade menor que 20 m e concentração de MPS calculado menor que 10 g/cm^3 de MPS. Os diagramas entre a batimetria medida em campo pelo ecobatímetro (eixo x) e a reflectância do algoritmo (eixo y), conforme apresentado na Figura 26.

Apesar da diminuição do RMSE (variando de 1,81 a 2,03) em relação aos resultados anteriores, os dados apresentaram grande dispersão e uma correlação muito baixa (variando de 0,03 a 0,53). O único algoritmo que apresentou um ajuste da regressão polinomial foi o NDWI B5 e B3, com uma correlação moderada de 0,53, foi o algoritmo escolhido para derivar a batimetria da zona entremarés.

Os resultados encontrados com a aplicação da equação (Tabela 5) são apresentados na Figura 27, onde o primeiro gráfico representa a comparação entre a batimetria medida em campo (eixo x) e batimetria estimada pelo satélite (eixo y), o segundo gráfico é o histograma do residual (batimetria medida menos a batimetria estimada) e o terceiro gráfico representa a distribuição espacial do residual pela baía.

O RMSE entre a batimetria medida e estimada esteve entre foi 1,34 m e com uma correlação 0,60. O bias calculado apresentou um valor de 3,09. No gráfico de histograma dos residuais, pode-se observar que a maior frequência de erros compreendeu entre -3 m e 3 m. Em relação ao erro espacial, no canal do Palmital foi observado o maior erro de subestimação do satélite, e na área interna da baía nas proximidades de Joinville foram encontrados superestimação dos valores estimados pelo satélite em comparação com os dados medidos em campo.

Tabela 5 – Equação gerada pelo algoritmo NDWI B5 e B3 para a zona entremarés, onde Z_{eco} é a batimetria medida em campo e Z_{sat} a batimetria a ser estimada pelo satélite.

Algoritmo	Equação	Coefficiente de Correlação
NDWI B5 e B3	$Z_{sat} = 38,45 Z_{eco}^2 - 10,26 Z_{eco} + 0,02$	0,77

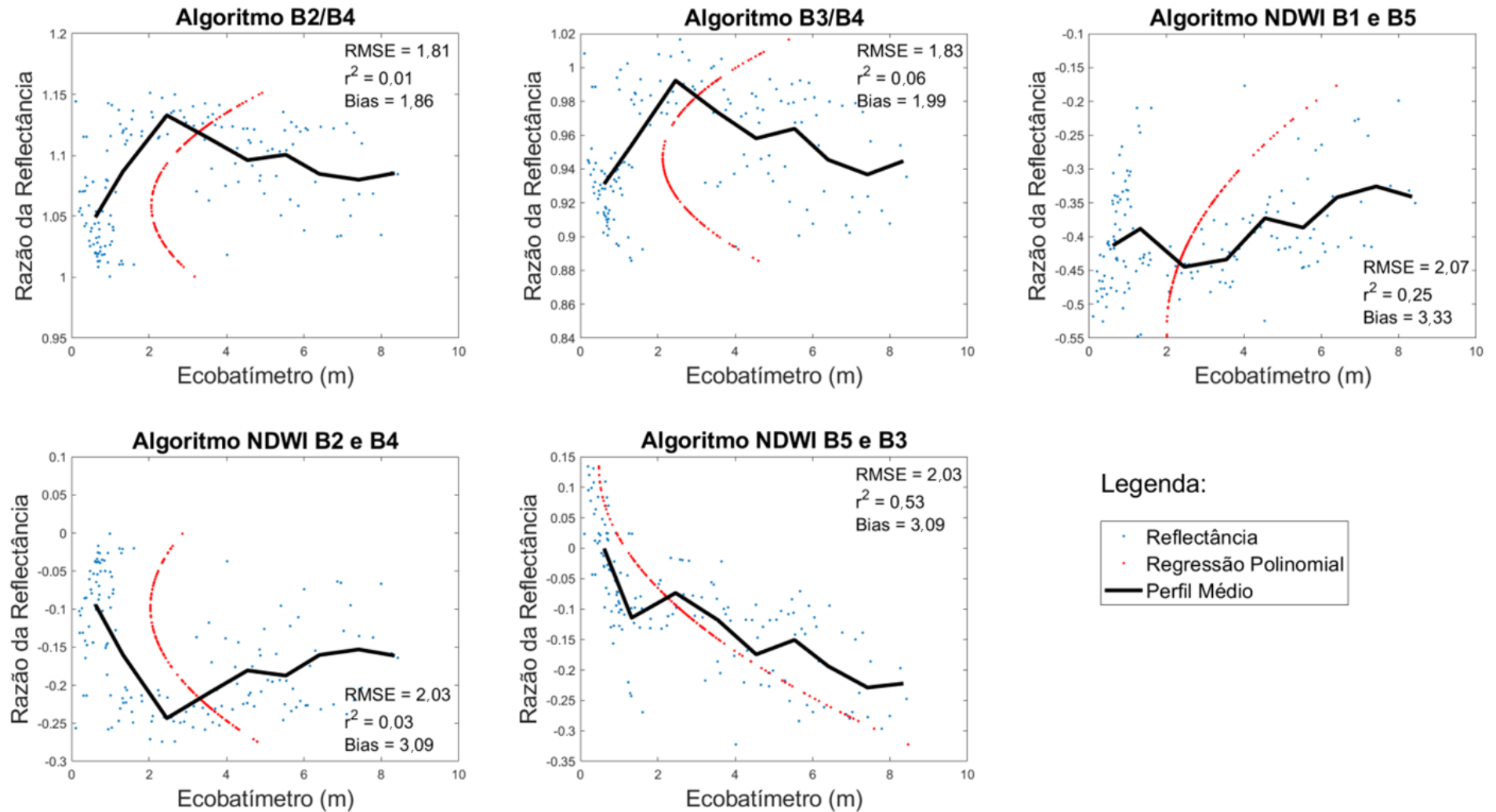


Figura 26 - Gráficos da reflectância dos algoritmos para a zona entremarés com MPS menor que 10 g/cm^3 e reamostragem dos dados. Em azul estão correlacionados os dados da reflectância de cada algoritmo com a profundidade medida com o ecobatímetro. Em preto é a média dos dados de reflectância. Em vermelho é uma curva polinomial de segundo grau ajustada aos dados.

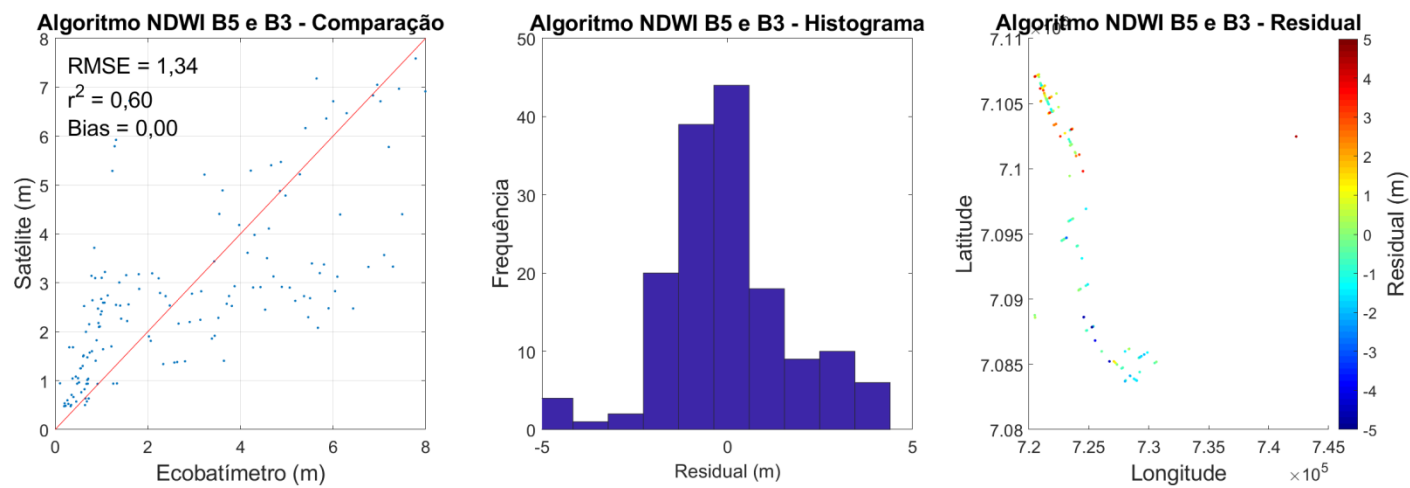


Figura 27 - Resultados da derivação batimétrica para o algoritmo NDWI B5 e B3 para a zona entremarés com MPS menor que 10 g/cm^3 .

5.2.2.2 Zona Permanentemente Submersa

A zona permanentemente submersa representou 78 % da área total da baía. Foram relacionados os dados de batimetria medidos com a reflectância dos algoritmos, os dados foram reamostrados e limitados a áreas com profundidade menor que 20 m e concentração de MPS calculado menor que 10 g/cm^3 de MPS. Os diagramas entre a batimetria medida em campo pelo ecobatímetro (eixo x) e a reflectância do algoritmo (eixo y), conforme apresentado na Figura 28.

O RMSE (variou de 3,15 a 3,32) e o bias (variou de 7,9 a 9,12) apresentaram altos valores para todos os algoritmos. Porém, a correlação foi considerada moderada e apresentou resultados melhores dos que os algoritmos aplicados para a zona entremarés, com variação de 0,51 a 0,58. Dentre os algoritmos avaliados, apenas o NDWI B5 e B3 apresentou um ajusta da curva polinomial possível para a derivação da batimetria.

Os resultados encontrados com a aplicação da equação (Tabela 6) são apresentados na Figura 29, onde o primeiro gráfico representa a comparação entre a batimetria medida em campo (eixo x) e batimetria estimada pelo satélite (eixo y), o segundo gráfico é o histograma do residual (batimetria medida menos a batimetria estimada) e o terceiro gráfico representa a distribuição espacial do residual pela baía.

O RMSE entre a batimetria medida e estimada foi 2,91 m e com uma correlação 0,59. O bias calculado apresentou um valor muito baixo e não conseguiu ser representado com duas casas decimais, No gráfico de histograma dos residuais, pode-se observar que a maior frequência de erros compreendeu entre -5 m e 5 m. As áreas que apresentaram os maiores erros da estimação compreenderam as regiões do Porto de Itapoá e São Francisco do Sul. Já os canais mais internos da baía apresentaram os menores erros.

Tabela 6 - Equação gerada pelo algoritmo NDWI B5 e B3 para a zona permanentemente submersa, onde Z_{eco} é a batimetria medida em campo e Z_{sat} a batimetria a ser estimada pelo satélite.

Algoritmo	Equação	Coefficiente de Correlação
NDWI B5 e B3	$Z_{sat} = 39,49 Z_{eco}^2 - 14,76Z_{eco} + 0,318$	0,71

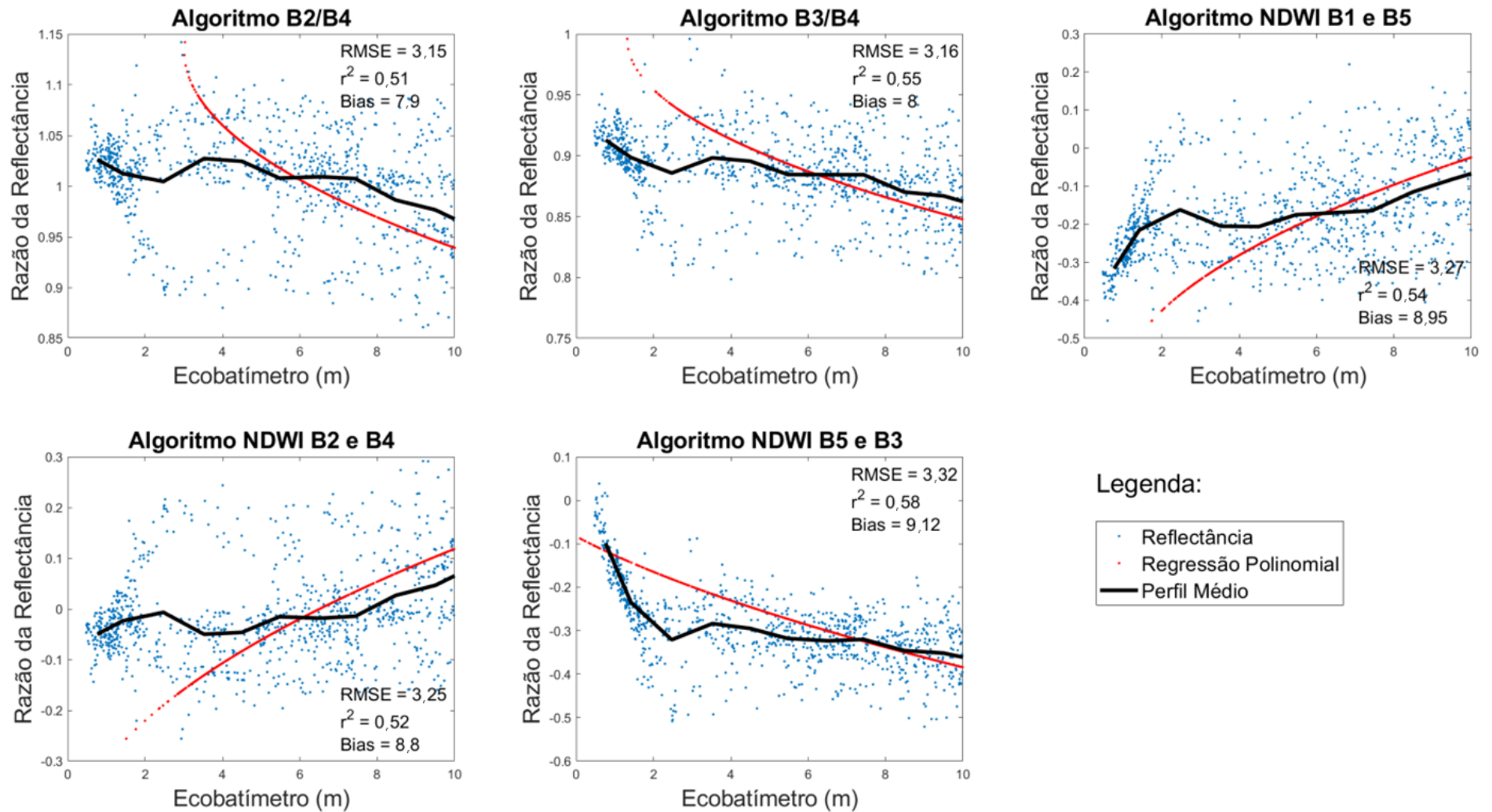


Figura 28 - Gráficos da reflectância dos algoritmos para a zona permanentemente submersa com MPS menor que 10 g/cm^3 e reamostragem dos dados de 230 m. Em azul estão correlacionados os dados da reflectância de cada algoritmo com a profundidade medida com o ecobatímetro. Em preto é a média dos dados de reflectância. Em vermelho é uma curva polinomial de segundo grau ajustada aos dados.

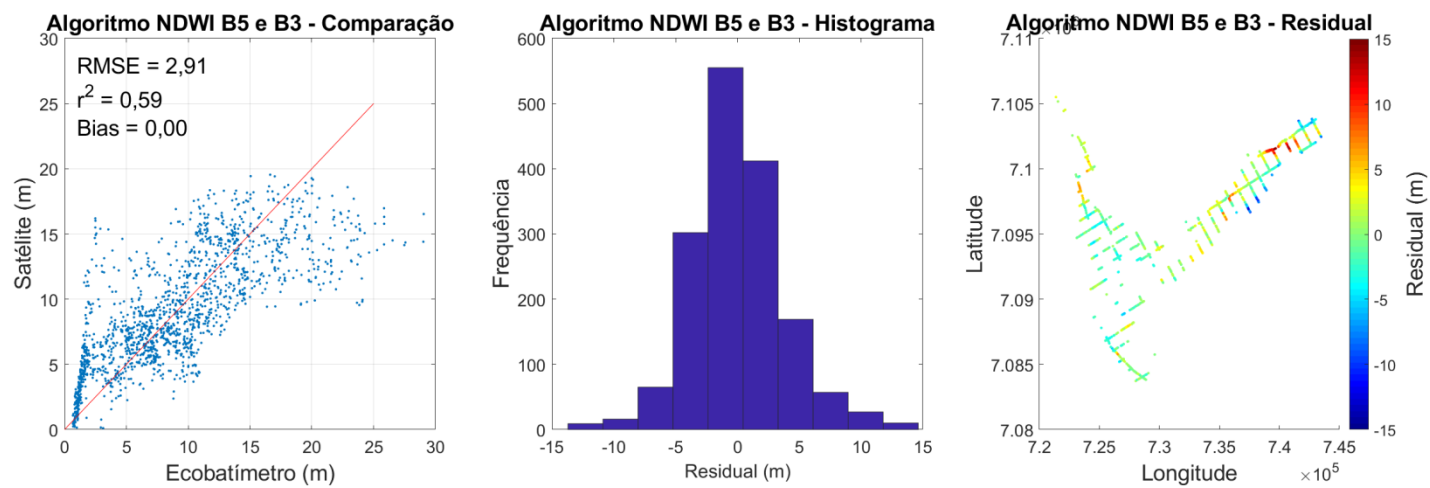


Figura 29 - Resultados da derivação batimétrica para o algoritmo NDWI B5 e B3 para a zona permanentemente submersa com MPS menor que 10 g/cm^3 .

6 DISCUSSÃO

A caracterização da batimetria através do levantamento monofeixe realizado identificou feições como canais e bancos. Os resultados obtidos no processamento dos dados batimétricos estão de acordo com os resultados encontrados por Vieira *et al.* (2008), onde a profundidade máxima obtida foi 27 m e a média 6 m, e foram classificadas cinco zonas fisiográficas na Babitonga: planícies de maré, bancos sublitorâneos, terraços submarinos, lajes rochosos e canais. Mazzer e Gonçalves (2012) também identificou a expressiva ocorrência dos bancos sublitorâneos entre as profundidades de 0 e 2 m, e Vieira e Horn Filho (2017) concluíram que as profundidades até 5 m representam 74,4% da área de estudo.

Para aplicação da Batimetria Derivada de Satélite (BDS), a área de estudo apresentou alguns fatores limitantes como as áreas profundas e a alta concentração de material particulado em suspensão. Em relação à profundidade de penetração da luz, os algoritmos foram aplicados para áreas até 20 m. Em estudos realizados em estuários brasileiros utilizando a BDS, Tedesco (2003) conseguiu obter profundidade de até 5 m para a Baía de Guaratuba, Krug e Noernbeg (2007) estimaram a batimetria até 4,5 m para a Baía de Paranaguá e Candela (2013) obteve profundidades até 3 m para a Lagoa da Conceição.

Alves *et al.* (2018) conseguiram gerar estimativas até os 22 m para a porção oceânica da Lagoa dos Patos. Os resultados obtidos no presente estudo mostraram-se eficientes ao compreender as maiores profundidades de um estuário. Diferente dos trabalhos já realizados, o presente estudo foi o primeiro a utilizar o satélite Sentinel-2, que possui bandas de até 10 m de resolução, para avaliar a estimação da batimetria em estuários.

Diversos métodos são utilizados na BDS, neste estudo foram testados os algoritmos propostos por Stumpf *et al.* (2003) e por McFeeters (1996), sendo eles: B2/B4, B3/B4, NDWI B1 e B5, NDWI B2 e B4 e NDWI B5 e B3. Alves *et al.* (2018) utilizaram o algoritmo NDWI B1 e B5 e obtiveram ótimos resultados com uma correlação de 0,96. Krug e Noernberg (2007) testaram os algoritmos B2/B4, B3/B4 e NDWI B2 e B4, e conseguiram uma correlação de 0,86, 0,84 e 0,82, respectivamente, para profundidades entre 0,36 m e 4,1 m. Campos (2018), dentro vários métodos testados, concluiu que o NDWI B5 e B3 foi o melhor algoritmo de estimação batimétricos para seus dados. Todos os trabalhos acima utilizaram o sensor Landsat, porém a resolução espectral do Landsat e do Sentinel é similar, diferindo apenas na terceira casa decimal.

A banda azul das imagens de satélite é a mais utilizada nos estudos de derivação batimétrica (CABALLERO; STUMPF, 2019; CASAL *et al.*, 2018; EVAGOROU, 2019),

devido à maior capacidade de penetração da água por apresentar um menor comprimento de onda. Diferente do oceano aberto onde a suspensão é limitada, em zonas estuarinas a contribuição fluvial e das margens compostas por sedimentos finos provocam deslocamento do espectro para a região do verde. Assim como Candela (2013) identificou em seu trabalho, o algoritmo utilizando a banda verde apresentou os melhores resultados para estuários. Esse efeito foi confirmado também neste trabalho utilizando o algoritmo NDWI B5 e B3.

Muitos estudos na literatura utilizam uma regressão linear para obtenção da batimetria, porém, no presente trabalho foi inicialmente verificado que os dados de reflectância eram melhores descritos por uma equação polinomial de segundo grau. Vilar *et al.* (2018) comparou resultados de estimativas batimétricas geradas por uma equação linear e uma equação polinomial de segundo grau. Os resultados apresentados pela função quadrática obtiveram os menores erros e uma correlação de 0,80, enquanto a função linear apresentou uma correlação de 0,67.

Outro fator que gerou erros na estimação foi a grande dispersão observada nos dados de reflectância, assim como a diferenças da resolução espacial entre os dados batimétricos medidos e da imagem de satélite. Este problema foi resolvido com a reamostragem dos dados, a qual eliminou a dispersão e padronizou os dados para o mesmo tamanho de pixel.

Por fim, os algoritmos divididos entre zona entremarés e zona permanentemente submersas enfatizaram a contribuição das áreas que sofrem influência da maré na derivação batimétrica. O algoritmo da zona entremarés reduziu em 1 m os erros obtidos do algoritmo aplicado para a baía inteira. Já o algoritmo da zona permanentemente submersa obteve um erro 0,5 m maior do que o algoritmo da baía inteira. Portanto, a zona entremarés tem importância significativa na acurácia da estimação de batimetria em estuários.

Estes resultados podem ser justificados devido a zona entremarés apresentar uma coluna de água mais curta, na qual a penetração da luz será superior, mesmo que exista alguma turbidez. Já em águas mais profundas, como identificado na zona permanentemente submersa, além da turbidez ocorre a dispersão natural da luz em profundidade, o que pode ser observado também nos trabalhos já citados realizados em estuários que conseguiram aplicar o algoritmo apenas para áreas rasas.

O conhecimento das propriedades ópticas da água é fundamental para a aplicação da Batimetria Derivada de Satélite. Como sugestão para futuros trabalhos, recomenda-se medições *in-situ* da reflectância da superfície do corpo de água e medições *in-situ* do MPS da superfície e ao longo da coluna de água, para comportamentos dos dados e implementar estas

informações ao modelo batimétrico, e com isso, fazer estimações de profundidade mais acuradas.

7 CONCLUSÃO

A Baía da Babitonga, através de um levantamento batimétrico monofeixe, apresentou profundidade máxima de 28 m e uma profundidade média de 6,5 m. A incerteza total deste levantamento compreendeu os limites estipulados pela NORMAM-25, enquadrando-se como levantamento hidrográfico de Categoria B.

O Material Particulado em Suspensão na baía dificultou a estimação da batimetria por satélite, sendo apenas aplicado o algoritmo para áreas com concentração menor que 10 g/cm^3 e profundidades até 20m, devido à limitação da penetração da luz. Dentre os métodos testados, o algoritmo NDWI utilizando as banda 5 (*Red Edge 1*) e banda 3 (verde), respectivamente, do satélite Sentinel-2 apresentaram os melhores resultados de estimação da batimetria, obtendo uma correlação de 0,68 e um RMSE de 2,4 m. Foi possível a identificações de feições morfológicas através do algoritmo aplicado, com bancos característicos da baía.

Para as zonas entremarés, a correlação foi de 0,60 e o RMSE do algoritmo diminuiu 1,06 m, já o algoritmo aplicado para zonas permanentemente submersas apresentou os maiores erros, o RMSE aumentou 0,5 m e a correlação foi de 0,59. Portanto, a zona entremarés contribuiu significativa na acurácia da estimação de batimetria em estuários.

REFERÊNCIAS

- ALVES, D. C. L.; ESPINOZA, J. M. A.; ALBUQUERQUE, M. G.; 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**, v. 85, p. 51-55, 2018.
- BARBOSA, A.; MAZZER, A. M. Mudanças geomorfológicas ocorridas na desembocadura no sul do canal do Linguado no período de 1938-1989. **Revista da Univille**, p. 117-124, 2003.
- BRANDO, V.; ANSTEE, J.M.; WETTLE, M.; DEKKER, A.G.; PHINN, S.R.; ROELSFSEMA, C. A. Physics Based Retrieval and Quality Assessment of Bathymetry from Suboptimal Hyperspectral Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 4, p. 755–770, 2009.
- BUÉ, I.; CATALÃO, J.; SEMEDO, A. Intertidal bathymetry extraction with multispectral images: a logistic regression approach. **Remote Sensing**, v.12, 2020.
- BULHOES, E.M.R.; DRUMMOND, M.K. Análises e testes de métodos de interpolação para dados batimétricos e granulométricos: estudo de caso em Armação dos Búzios, Rio de Janeiro, Brasil. **Caderno de Estudos Geoambientais – CADEGEO**, v. 3, n. 1, p. 5-31, 2012.
- CABALLERO, I.; STUMPF, R. P. Retrieval of nearshore bathymetry from Sentinel-2A and 2B satellites in South Florida coastal waters. **Estuarine, Coastal And Shelf Science**, v. 226, 2019.
- CABRAL, A. P.; VIANNA, M. L. **Extração da batimetria através de dados TM-Landsat**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, ed. 7, p. 94-104, 1993.
- CAMPOS, P. H. P. **Análise estatística de métodos de interpolação espacial e técnicas de sensoriamento remoto usando imagem de satélite na caracterização batimétrica da bacia potiguar**. 2018. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.
- CANDELA, C. R. L. **Estimativa da profundidade de corpos de água com o uso de dados de sensoriamento remoto**. 2013. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- CARVALHO, J. L. B.; KLEIN, A. H. F.; SCHETTINI, C. A. F.; JABOR, P. **Marés meteorológicas em Santa Catarina: Influência do vento e determinação de parâmetros de projeto para obras costeiras**. In: 3º Simpósio sobre Oceanografia, 1996, São Paulo. Resumos, p. 380, 1996.
- CASAL, G.; MONTEYS, X.; HEDLEY, J.; HARRIS, P.; CAHALANE, C.; MCCARTHY, T. Assessment of empirical algorithms for bathymetry extraction using Sentinel-2 data. **International Journal of Remote Sensing**, 2018.
- CREMER, M. J.; MORALES, P. R. D.; OLIVEIRA, T. M. N. **Diagnóstico Ambiental da Baía da Babitonga**. Joinville: Editora Univille, 2006.

DALRYMPLE, R. W.; ZAITLIN, B. A.; BOYD, R. Estuary facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. **J Sediment Petrol**, n. 62, p. 1130–1146, 1992.

DHN. **Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos – NORMAM-25**. Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil, 2017.

DIEHL, F. L.; HORN FILHO, N. O. **Compartimentação geológico-geomorfológica da zona litorânea e planície costeira do Estado de Santa Catarina**. Notas Técnicas FACIMAR, p. 39-50, 1996.

DRUSCH, M.; GASCON, F.; BERGER, M. **ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services**. ESA, SP-1322/2, 2012.

EVAGOROU, E.; METTAS, C.; AGAPIOU, A.; THEMISTOCLEOUS, K.; HADJIMITSIS, D. Bathymetric maps from multi-temporal analysis of Sentinel-2 data: the case study of Limassol, Cyprus. **Advances in Geosciences**, ed. 45, p. 397-407, 2019.

FATMA. **FUNDAÇÃO DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SANTA CATARINA: A Baía da Babitonga**. Florianópolis: FATMA, p.35, 1984.

FOERSTNOW, L. P.; MENEZES, J. T. **Aplicabilidade de imagens de satélite utilizando NDWI na determinação da batimetria da Lagoa da Conceição, Florianópolis, SC**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto XV-SBSR, Curitiba, 2011.

GAPLAN. **Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral**. Rio de Janeiro. Aerofoto Cruzeiro, p. 173, 1986.

GAO, J. Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. **Progress in Physical Geography**, v. 33, p. 103-116, 2009.

IHO. **International Hydrographic Organization standards for hydrographic survey: Special Publication**. International Hydrographic Bureau, Monaco, n. 44, ed. 5, p. 36, 2008.

KRUG, L. A.; NOERNBERG, M. A. O sensoriamento remoto como ferramenta para determinação de batimetria de baixios na Baía das Laranjeiras, Paranaguá - PR. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, p. 101-105, 2007.

JUPP, D. L. B. Background and extensions to depth of penetration (DOP) mapping in shallow coastal waters. **Proceedings of the Symposium on Remote Sensing of the Coastal Zone**, Gold Coast, vol. IV2, n. 19, 1989.

LYZENGA, D. R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. **Applied Optics**, v. 17, n. 3, p. 379-383, 1978.

MAZZER, A. M.; GONÇALVES, M. L. Aspectos geomorfológicos da Baía da Babitonga, Santa Catarina, Brasil: caracterização morfométrica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, 2012.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

MMA. Avaliação e Ações Prioritárias para Conservação da Biodiversidade das Zonas Costeira e Marinha. **Ministério do Meio Ambiente**, Brasília: MMA/SBF, 2002.

MOBLEY, C.D. **Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters**. Academic Press: San Diego, CA, USA, 1994.

MOBLEY, C. D.; BOWLES, J. H.; DOWNES, T.; LEATHERS, R. A. Interpretation of hyperspectral remote-sensing imagery by spectrum matching and look-up tables. **Applied Optics**, v. 44, n. 17, p. 3576-3637, 2005.

McFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **Int. Journal of Remote Sensing**, v.17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

NECHAD, B.; RUDDICK, K.; SCHROEDER, T.; OUBELKHEIR, K.; BLONDEAU-PATISSIER, D.; CHERUKURU, N.; BRANDO, V.; DEKKER, A.; CLEMENTSON, L.; BANKS, A.C. Coast Colour Round Robin data sets: a database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters. **Earth System Science Data**, vol. 7, n. 2, p. 319–348, 2016.

NORDMAN, M. E.; WOOD, L.; MICHALEK, J. L.; CHRISTY, J. J. Water depth extraction from Landsat- 5 imagery. **Proceedings of the Twentythird International Symposium on Remote Sensing of Environment**, p. 1129–1139, 1990.

OLIVEIRA, F. A. **Estudo do aporte sedimentar em suspensão na Baía da Babitonga sob a ótica da Geomorfologia**. 2006. 286 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2006.

PACHECO, A.; HORTA, J.; LOUREIRO, C.; FERREIRA, Ó. Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat-8 images: A tool for coastal monitoring in shallow waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 159, p. 102-115, 2015.

PEREIRA, R. S.; SOUZA, A. S.; SANTOS, P. R. A. **Índice de diferença normalizada da água - NDWI para a obtenção da morfologia do canal de acesso e bacia de evolução portuária – Porto de Niterói (RJ)**. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Santos-SP, 2017.

PHILPOT, W. D. Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. **Applied Optics**, p. 1569-1578, 1989.

POLCYN, F. C.; BROWN, W. L.; SATTINGER, I. J. **The measurement of water depth by remote sensing techniques**. Report No. 8973-26-F., Willow Run Laboratories of the Institute of Science and Technology, The University of Michigan: Ann Arbor, MI, USA, 1970.

RODRIGUES, L. I. C.; NASCIMENTO, M. P. M.; DUARTE, C. R. **Mapeamento batimétrico da área do terminal portuário do Pecém/CE, a partir de dados de**

sensoriamento remoto óptico.In: XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos-SP, 2019.

RIBEIRO, S.R.A.; CENTENO, J. A. S.; KRUEGER, C. P. Estimativa de profundidade a partir de levantamento batimétrico e dados IKONOS II mediante Redes Neurais Artificiais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, p.35 - 48, 2008.

SCHETTINI, C. A. F.; CARVALHO, J. L. B. **Caracterização hidrodinâmica do estuário do Rio Cubatão, Joinville.** Notas Técnicas FACIMAR, Itajaí, v. 3, p. 87-97, 1999.

SILVA, L. F. **Alterações morfodinâmicas no canal do linguado pela remoção do dique que o separa da Baía da Babitonga (SC).** 2011. 201 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SILVA, P. G. **Exposição à inundação costeira nas praias dos Ingleses, Moçambique e Barra da Lagoa, Florianópolis, SC.** 2014. 237 f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

STUMPF, R. P.; HOLDERIED, K.; SINCLAIR, M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. **Limnology And Oceanography**, v. 48, n. 12, p. 547-556, 2003.

TEDESCO, A. **Estimativa de profundidades utilizando imagens de alta resolução apoiadas por dados de levantamento batimétrico.** 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

TRUCCOLO, E. C.; SCHETTINI, C. A. F. **Marés astronômicas na Baía da Babitonga, SC.** Notas Técnicas FACIMAR, Itajaí, v. 3, p. 57-66, 1999.

TURECK, C. R.; OLIVEIRA, T. M. N.; CREMER, M. J.; BREITER, R.; NEESSE, T.; TORRENS, B. M. O.; MARCUCCI, A.; AMARAL, E. B. Avaliação do crescimento em *Crassostrea gigas* (molusca, bivalve) cultivada na baía da Babitonga, litoral norte do Estado de Santa Catarina. **Revista da Univille**, ed. 9, p. 17-26, 2004.

VANHELLEMONT, Q.; RUDDICK, K. **Acolite for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery.** In Proceedings of the ESA Living Planet Symposium, Prague, Czech Republic, 2016.

VILAR, P.; MOURA, A.; LAMAS, L.; PINTO, J. P. **Derivação de batimetria a partir de imagens multiespectrais de detecção remota numa perspectiva operacional – diferentes abordagens de modelação e calibração.** In:IX Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Lisboa, 2018.

VANHELLEMONT, Q.; RUDDICK, K. **Acolite for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery.** Eur. Sp. Agency (Special Publ.), ESA SP, v. 740, p. 9–13, 2016.

VANHELLEMONT, Q. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. **Remote Sensing of Environment**, v. 225, p. 175–192, 2019.

VIEIRA, C. V.; HORN FILHO, N. O.; BONETTI, C. V. D. H. C.; BONETTI, J. Caracterização morfosedimentar e setorização do complexo estuarino da Baía da Babitonga/sc. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 62, p.85-105, 2008.

VIEIRA, C. V.; HORN FILHO, N. O. Paisagem marinha da Baía da Babitonga, nordeste do estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 5, p.1677-1689, 2017.

APÊNDICE A – Parâmetros estatísticos da Batimetria Estimada pelo Satélite

Tabela 7 - Parâmetros estatísticos calculados para os resultados dos algoritmos aplicados para toda baía.

Estatística	Batimetria Medida	B2/B4	B3/B4	NDWI B1 e B5	NDWI B2 e B4	NDWI B5 e B3
TODOS OS DADOS (N AMOSTRAL = 549017)						
Profundidade Máxima	29,70	20,99	20,00	37,44	22,82	20,39
Profundidade Mínima	0,05	2,61	2,68	1,87	1,72	1,81
Média	6,49	6,49	6,49	6,49	6,49	6,49
Mediana	5,37	5,30	5,25	5,43	5,38	5,53
Desvio Padrão	5,22	3,79	3,83	3,95	3,78	3,96
Variância	27,29	14,34	14,64	15,58	14,31	15,65
Correlação	-	-0,70	-0,68	0,73	0,71	-0,72
Bias	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dif Median	-	0,07	0,11	-0,06	-0,02	-0,16
RMSE	-	3,60	3,56	3,42	3,60	3,41
R²	-	0,48	0,47	0,53	0,50	0,52
Residual Máximo	-	18,69	19,21	17,65	18,52	18,37
Residual Mínimo	-	-11,73	-13,56	-15,65	-11,33	-13,51
REAMOSTRAGEM 230 E ATÉ 20 M DE PROFUNDIDADE (N AMOSTRAL = 2324)						
Profundidade Máxima	20,07	17,73	17,83	18,92	18,97	17,90
Profundidade Mínima	0,05	2,55	2,67	2,19	1,76	1,77
Média	6,04	6,04	6,04	6,04	6,04	6,04
Mediana	5,20	5,12	5,07	5,10	5,19	5,29
Desvio Padrão	4,51	3,25	3,31	3,46	3,25	3,47
Variância	20,38	10,59	10,94	11,98	10,55	12,08
Correlação	-	0,72	0,73	0,77	0,72	0,77
Bias	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dif Median	-	0,08	0,13	0,10	0,01	-0,09
RMSE	-	3,13	3,07	2,90	3,14	2,88
R²	-	0,52	0,54	0,59	0,52	0,59
Residual Máximo	-	14,49	15,01	13,65	14,36	14,44
Residual Mínimo	-	-9,87	-11,39	-9,09	-9,56	-10,23
REAMOSTRAGEM 230, E ATÉ 20 M DE PROFUNDIDADE E LIMITE DE 10 g/cm³ DE MPS (N AMOSTRAL = 1205)						
Profundidade Máxima	20,01	19,55	18,88	18,20	20,97	18,39
Profundidade Mínima	0,11	3,34	2,97	2,53	2,76	0,68
Média	7,38	7,38	7,38	7,38	7,38	7,38
Mediana	6,78	5,82	6,03	6,14	5,98	6,84

Desvio Padrão	5,00	3,78	3,90	3,98	3,75	4,10
Variância	25,04	14,27	15,18	15,83	14,09	16,83
Correlação	-	0,76	0,78	0,80	0,75	0,82
Bias	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dif Median	-	0,95	0,74	0,64	0,80	-0,06
RMSE	-	3,28	3,14	3,03	3,31	2,86
R²	-	0,57	0,61	0,63	0,56	0,67
Residual Máximo	-	9,62	9,26	10,00	9,81	8,26
Residual Mínimo	-	-9,71	-10,90	-11,84	-9,30	-10,54

ANEXO A – F-41 Descrição da Estação Maregráfica Clube Náutico Cruzeiro do Sul


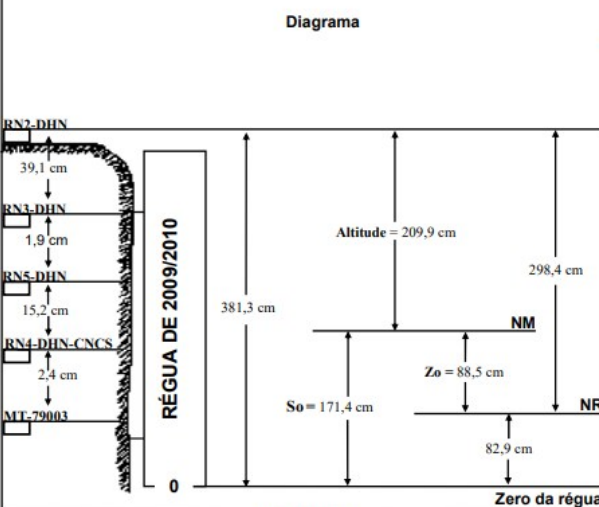

 60 225 F-41		F-41 – Padrão – Clube Náutico Cruzeiro do Sul – 60225 – Versão 1/2013	
DESCRIÇÃO DE ESTAÇÃO MAREGRÁFICA		F-41- 1805 - 001/09	
Estação Clube Náutico Cruzeiro do Sul		Estado SC	
Localidade São Francisco do Sul		Localidade São Francisco do Sul	
LH-FC/2009		Carta N°. 1805 – Baía da Babitonga	
Navio DHN-20		Ano 2009	
Coordenadas geográficas Lat 26° 14',7 S Long 048° 38',5 W Datum WGS-84 Fuso +3		O nível de redução está <u>82,9</u> centímetros acima do zero da régua de 2001. Fonte de informação: Análise estatística e harmônica de 366 dias de observação da maré. Tipo de marégrafo: Kalesto - OTT Zero do marégrafo: Coincide com o zero da régua.	
Descrição das régua de marés Régua de alumínio padrão DHN, graduada de 2 em 2 cm nas cores branca e encarnada, medindo 400 cm de comprimento, afixada no cais do Clube Náutico Cruzeiro do Sul, junto à estação maregráfica. As medições foram realizadas tomando como origem um parafuso afixado a 295 cm do zero da régua. Esta ficha foi compilada das F-41-1804-001/01, F-41-1804-001/02, F-41-1804-004/04, F-41-1805-001/09. Atualizada em 30/08/2012.		Descrição das referências de nível RN2-DHN – Encravada ao lado do Mastro da Bandeira, na Delegacia da Capitania dos Portos em São Francisco do Sul. Implantada em 1996. RN3-DHN – Encravada no cais ao lado do guindaste do Pier da Delegacia da Capitania dos Portos em São Francisco do Sul. Lat. 26°14'40",2989 S – Long. 048° 38'27",1390 W – (F-21-1804-015/01). Implantada em 1996. RN4-DHN-CNCS – Está fixada no Clube Náutico Cruzeiro do Sul. Implantada em 2001. RN5-DHN – Localizada no final do refeitório das Praças, dentro da Delegacia, à esquerda de quem olha para a porta de entrada. Implantada em 2009. MT-79003 – Está situado próximo ao pier da Delegacia, aproximadamente a meio caminho entre a RN3-DHN e a RN5-DHN. Citado a partir de 2009.	
Arquivo Técnico a ser preenchida no CHM Recebida em: DHN-6016-A Documento de referência: LH-011/01 – RA-006/02 LH-FC/09 – RA-010/10		Pessoal que tomou parte na montagem Equipe de 2001: CAHO - 2001 Chefe da equipe: Prof. Geraldo Equipe de 2009: CC Babinsk - Prof. Geraldo – CT Borba 1ºT Antonio – 1ºT Fernandes 1ºT Nascimento – 1ºT Neves 3º SG-HN Silvio – CB-HN Hélio Chefe da equipe: CF José Manoel	
Diagrama 		Esquema 	
Observações 1. Período de observação para obtenção dos elementos de maré: 01/12/2009 a 01/12/2010. 2. A análise foi efetuada usando o método harmônico, sendo os dados processados pelo BNDO.			

Figura 30 - Descrição da Estação Maregráfica Clube Náutico Cruzeiro do Sul, localizada na Baía da Babitonga.