



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ RÁURIUM BACALHAU

**CARACTERIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DE RESERVATÓRIOS POR MEIO DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

Recife

2022

JOSÉ RÁURIUM BACALHAU

**CARACTERIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DE RESERVATÓRIOS POR MEIO DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Engenharia Civil, área de concentração de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

**Orientador:** Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto

Recife  
2022

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

B116c Bacalhau, José Ráurium.  
Caracterização volumétrica de reservatórios por meio de sensoriamento remoto / José Ráurium Bacalhau. 2022.  
116 f: il., tabs., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.  
Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. Curva cota-área-volume. 3. ICESat-2. 4. Modelo digital de terreno. 5. Batimetria 3D. I. Ribeiro Neto, Alfredo (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG / 2022 - 370

JOSÉ RÁURIUM BACALHAU

**CARACTERIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DE RESERVATÓRIOS POR MEIO DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, Área de Concentração Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em 05/08/2022

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto - UFPE

**BANCA EXAMINADORA**

participação por videoconferência  
Dr. Bruno Collischonn (examinador externo)  
Agência Nacional de Águas

participação por videoconferência  
Dr. Daniel Medeiros Moreira (examinador externo)  
Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

participação por videoconferência  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Lúcia Bezerra Candeias (examinadora externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência  
Prof. Dr. José Almir Cirilo (examinador interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leidjane Maria Maciel de Oliveira (examinadora interna)  
Universidade Federal de Pernambuco

A Deus, fonte da vida;

Aos meus amados pais, Marieta e  
Pascoal Bacalhau;

À minha valiosa esposa Susi e ao meu  
amado filho Vitor;

Aos inúmeros irmãos vitimados pela  
COVID-19, dedico.

À sociedade e aos poderes constituídos,  
entrego minha contribuição, com a  
esperança de poder oferecer  
alternativas à gestão de Recursos  
Hídricos com foco em baixo custo,  
celeridade e eficiência.

## AGRADECIMENTOS

A **Deus**, Pai de infinito amor, poder e bondade “inteligência suprema e causa primária de todas as coisas”<sup>1</sup>.

Aos meus anjos encarnados, intitulados de pais, **José Pascoal Bacalhau** e **Maria Deocleciano Bacalhau “Marieta”**, aos quais devo minha existência e o exemplo dignificante de cada dia.

A minha joia preciosa, companheira e esposa, **Susi Mendes Bacalhau**, que idealizou essa jornada antes mesmo de mim, atendeu com maestria aos imperativos do nosso lar frente ao tempo subtraído, sem poupar incentivos e apoio em todos os momentos.

Ao nosso amado filho **José Vitor Mendes Bacalhau**, que como presente de cada dia, me estimulou, ainda que não soubesse, a prosseguir nesta árdua jornada todas as vezes que me interrompia: brincando de atrapalhar, passando sua mão sobre a minha escassa cabeleira, contando as novidades do seu dia e por fim, quando, mesmo sabendo, perguntava: - Tás fazendo o quê? E saía sorrindo. De todos os momentos, agradeço a um especial, quando ele me interrompia para pedir-me a benção. É quando percebíamos que devemos apreciar a jornada toda, e o fim será uma consequência.

Ao meu irmão **José Rauriano Bacalhau**, que juntamente com sua esposa **Aline Rebeca** e meus sobrinhos **Matheus e Melissa** formam uma extensão do nosso lar, vibrando a todo instante cada passo desta realização.

Ao meu orientador **Prof. Alfredo Ribeiro Neto** pela sua confiança e amizade, sempre significando um porto seguro para as angustiosas incertezas próprias desta jornada. Prestativo, dedicado e paciente na orientação deste trabalho, me ensinou a trabalhar com minhas próprias limitações e a superar novos desafios.

Aos professores **Artur Paiva Coutinho** e **José Almir Cirilo** pelas valiosas contribuições na banca de qualificação que tanto agregaram ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos **Professores do Grupo de Recursos Hídricos da UFPE (GRH/UFPE)**, pela amizade e conhecimentos transmitidos, em especial aos professores **Anderson Luiz Ribeiro de Paiva** e **Leidjane Maria Maciel de Oliveira**.

---

<sup>1</sup> KARDEC, Allan - O Livro dos Espíritos - FEB, Rio de Janeiro, 1994 – Questão Nº 1.

Aos pesquisadores **Daniel Medeiros Moreira, Jean-François Crétaux e Muriel Bergé-Nguyen** pela oportunidade de trabalharmos juntos, e prover este aluno com conhecimentos de excelência, permitindo-nos, sob a coordenação do **Prof. Alfredo Ribeiro Neto**, saborear um dos frutos desta pesquisa sob a forma do artigo publicado.

À **Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC)**, em nome da **Profa. Suzana Maria Gico Lima Montenegro** de quem guardo valiosos ensinamentos referentes ao meu período de mestrado e ao gerente de Outorga e Cobrança (GROC) **Clenio de Oliveira Torres Filho**, a quem tenho a honra de compartilhar do convívio profissional e sempre contar com sua presteza e capacidade técnica, sem deixar de lado a amizade, os saudáveis embates filosóficos e o respeito mútuo.

À **Secretaria do PPGEC/UFPE**, em nome da coordenadora **Andréa Negromonte Vieira Matoso**, pela disponibilidade, atenção e apoio nos caminhos administrativos.

Aos **membros da banca examinadora** pelo interesse e disponibilidade, que nos permitiu burilar esta tese a partir dos seus primorosos comentários e observações.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, bem como aqueles que simplesmente acreditaram em mim.

As grandes conquistas da Humanidade têm começo no esforço pessoal de cada um. Disciplinando-se e vencendo a si mesmo, o homem consegue agigantarse, logrando resultados expressivos e valiosos. Essas realizações, no entanto, têm início nele próprio (FRANCO, 2014).

## RESUMO

Os recursos hídricos são utilizados cada vez mais em condição limite. A elevação demográfica com acréscimo de demanda para consumo, produção de alimentos, navegação e geração de energia, principalmente, tem pedido respostas inovadoras e eficientes na gestão e monitoramento dos Recursos Hídricos. A região Semiárida brasileira é altamente dependente de reservatórios, e dados batimétricos precisos são essenciais para estudar a dinâmica e a variabilidade de armazenamento desses corpos hídricos. Nas últimas décadas, estudos têm usado produtos de sensoriamento remoto para calcular esses dados; no entanto, muitas vezes o nível de água *in situ* e levantamento de campo são necessários para o ajuste da curva cota-área-volume (CAV). Este estudo teve como objetivo desenvolver a aplicação do cálculo batimétrico utilizando o nível de água observado e dados de perfil de terreno do satélite ICESat-2 em reservatórios de grande e médio porte. A combinação de imagens de satélite com dados altimétricos permitiu a extração de contornos hídricos, cujos pontos contêm informações de elevação. Um Modelo Digital de Terreno (MDT) foi gerado, e a curva CAV foi calculada para dois reservatórios do Nordeste do Brasil, Sobradinho e Poço da Cruz, que possuem capacidades de 34,116 e 0,4837 km<sup>3</sup>, respectivamente. O nível de água do ICESat-2 foi comparado com os dados observados de Sobradinho, e o MDT e as curvas CAV foram analisados para os dois reservatórios. Utilizando o nível de água das estações do reservatório de Sobradinho, esse método cobriu 99% do volume útil. A aplicação utilizando dados do ICESat-2 cobriu 50% da capacidade de armazenamento em Sobradinho e 89% em Poço da Cruz. As curvas CAV baseadas em dados *in situ* e ICESat-2 mostraram volumes com correlações de Pearson iguais a 0,99 para ambos os reservatórios, e erros quadráticos médios normalizados de 2,62% e 4,13% para Sobradinho e Poço da Cruz, respectivamente. Os resultados promissores revelaram que esta estratégia pode ser uma alternativa econômica e viável, utilizando dados gratuitos disponíveis com potencial para gerar batimetria de alta resolução em reservatórios com diferentes características geométricas.

**Palavras-chave:** curva cota-área-volume (CAV); ICESat-2; modelo digital de terreno (MDT); batimetria 3D.

## ABSTRACT

The water resources are increasingly used in extreme conditions. The demographic increase with increased demand for consumption, food production, navigation and energy generation, mainly, has called for innovative and efficient responses in the management and monitoring of water resources. The Brazilian semiarid region is highly dependent on reservoirs, and accurate bathymetric data are essential to study the dynamics and storage variability of these water bodies. In recent decades, studies have used remote sensing products to calculate these data; however, in situ water level and field survey are often necessary to adjust the elevation-area-volume (EAV). This study aimed to develop the application of bathymetric calculation using the observed water level and ICESat-2 satellite terrain profile data of large and medium-sized reservoirs. The combination of satellite images with altimetric data allows for the extraction of water contours, whose points contain elevation information. A digital terrain model (DTM) was generated, and an elevation-area-volume (EAV) curve was calculated for two reservoirs in Northeast Brazil, Sobradinho and Poço da Cruz, which have capacities of 34.116 and 0.4837 km<sup>3</sup>, respectively. The water level from ICESat-2 was compared to that of the observed data from the Sobradinho, and DTM and EAV curves were analyzed for the two reservoirs. Using the water level from Sobradinho reservoir stations, this method covered 99% of the useful volume. The ICESat-2 data covered 50% of the storage capacity in the Sobradinho and 89% in Poço da Cruz. The in-situ and ICESat-2 data-based EAV curves showed volumes with Pearson's correlations equal to 0.99 for both reservoirs, and normalized root mean square errors of 2.62% and 4.13% for Sobradinho and Poço da Cruz, respectively. The results revealed that this strategy can be economic and viable, as it uses available free data with the potential to generate high-resolution bathymetry in reservoirs with different geometric characteristics.

**Keywords:** elevation-area-volume relationships; ICESat-2; digital terrain model; 3D bathymetry.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-Missões altimétricas a partir dos anos 1980 .....	27
Figura 2- Processo de aquisição do dado de altimetria espacial.....	30
Figura 3-O Satélite ICESat-2 orbitando e o perfil de terreno sendo mostrado em duas perspectivas e regiões distintas. O altímetro (ATLAS) ilumina o solo com 6 feixes.....	35
Figura 4- (a) Esquema com as grandezas envolvidas na altimetria a laser do ICESat-2 e (b) Diagrama esquemático de pegadas de laser do ICESat-2 no solo na orientação para a frente.....	36
Figura 5- Altura geométrica em relação a um elipsoide de referência, onde os semi-eixos ‘a’ e ‘b’ são parâmetros do elipsoide.....	44
Figura 6- Altura ortométrica em relação a um geoide de referência .....	44
Figura 7- Referência das altitudes .....	46
Figura 8-Esquema do método de interpolação de distância e área ponderada. $z^*$ é o ponto não amostrado e $z_i$ ( $i = 1-3$ ) são pontos amostrais. (a) Rede poligonal de Thiessen. Os polígonos de Thiessen são construídos conectando as mediatrizes perpendiculares da rede irregular triangulada; (d) Polígonos de Thiessen após a inserção de $z^*$ .....	47
Figura 9- Localização dos lagos e trilhas do ICESat-2 .....	48
Figura 10-Órbitas de Satélites usadas no estudo .....	51
Figura 11- Fluxograma da metodologia de cálculo batimétrico.....	52
Figura 12- Etapas de processamento das imagens óticas do reservatório de Sobradinho.....	56
Figura 13- Etapa preparatória para utilização da Banda BQA .....	57
Figura 14- Ilustração do processo de retirada de trechos do contorno hídrico devido à interferência de nuvens com o uso da Banda BQA .....	58
Figura 15-Interface da API do GEE .....	60
Figura 16- Detalhe da extração do NDWI com o GEE .....	61
Figura 17- Modelo construído usando o QGIS Model Builder.....	62

Figura 18-Interface do modelo para processamento individual de imagem.....	63
Figura 19-Interface do modelo para processamento em lote.....	64
Figura 20-Camada de pontos 3D do trecho ORS .....	65
Figura 21- O perfil do terreno do ICESat-2 sobreposto a um conjunto de contornos hídrico, mostrando os valores de elevação do ICESat-2 nos graus de latitude correspondentes, e o processo de obtenção da elevação média atribuída aos contornos (elevação do Perfil de Terreno Superfície Hídrica (PTSH)).....	68
Figura 22- Contorno hídrico sobreposto ao raster da ondulação geoidal, ilustrando o processo de projeção do nível de água da régua e do perfil altimétrico da trilha 581 para o mesmo geoide de referência (EGM2008).....	71
Figura 23- Níveis de água observados e ICESat-2 no Lago de Sobradinho nas estações Barramento de Sobradinho (a), Sento Sé (b) e Remanso (c).....	73
Figura 24-Localização dos feixes altimétricos das trilhas ICESat-2 sobre a superfície hídrica dos reservatórios nas datas de passagens do satélite .....	74
Figura 25- Nível diário de água e elevações dos perfis selecionados do ICESat-2 em Sobradinho .....	79
Figura 26- Funções representativas aplicadas ao trecho ORS baseadas nas estações de nível. ....	81
Figura 27- Atribuição de nível ao contorno hídrico com dados in situ no trecho ORS .....	82
Figura 28- Mapa de localização com os feixes (gt1r, gt2r e gt3r) contendo a elevação de terreno das trilhas do ICESat-2 (a) e (b) perfil de elevação dos feixes amostrais. As linhas nos perfis representam a elevação obtida pelo ICESat-2 em seus três feixes fortes. Esses perfis são as amostras usadas neste estudo para estabelecer a relação E–A. Os trechos de lago e algumas ilhas internas são destacadas nos retângulos azuis no perfil (b). ....	82
Figura 29-Nível de água observado e elevação PTSH. (a) e (b) referem-se ao trecho ORS e às oito imagens utilizadas para obter a elevação PTSH. (c) refere-se ao trecho LRS e às nove imagens utilizadas para obter a elevação PTSH. (d) ilustra as trilhas terrestres do ICESat-2 e as respectivas estações utilizadas para comparação. ....	84

Figura 30- Batimetria por imagens de satélite associadas a dois tipos de elevação: ENSH (a) e PTSH (b). A batimetria in situ não é mostrada. ....	85
Figura 31 - Curvas cota-área-volume e os gráficos comparativos de área e volume para fins de validação das curvas dos reservatórios de (a) Sobradinho a partir do nível observado (ENSH) (b) Sobradinho pelo ICESat-2 (PTSH). Os volumes possuem faixas de variação distintas por conta da amplitude de variação das altimetrias utilizadas. ....	86
Figura 32-Localização da trilha atravessando o reservatório de Poço da Cruz e (b) perfil do terreno do ICESat-2. Os trechos de lago e algumas ilhas internas são destacados nos retângulos azuis no perfil. ....	87
Figura 33- Hipsometria do Lago de Poço da Cruz .....	88
Figura 34- Batimetria calculada com a nuvem de pontos dos contornos (a) e (b) curvas CAV baseadas em levantamentos topobatimétricos e calculadas neste estudo utilizando a elevação PTSH. ....	89
Figura 35- Distribuição dos erros das elevações obtidas pelo ICESat-2 em relação às estações de referência nas datas de passagem do satélite sobre a superfície do lago de Sobradinho .....	91
Figura 36- Distribuição do erro absoluto por densidade de pontos para as trilhas do ICESat-2 (57 dias) sobre a superfície hídrica de Sobradinho. Retângulo vermelho destacando os erros absolutos maiores que 10cm. ....	92
Figura 37- Processo de coleta de elevação no trecho ORS com perfil ICESat-2 da trilha 1023 sob o contorno hídrico de 01.07.1993. Os círculos laranjas são os pontos dos feixes altimétricos do ICESat-2 e os círculos amarelos são as interseções do contorno hídrico e o raster IDW. ....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Detalhes das missões altimétricas e características dos seus produtos. ....	28
Tabela 2 - Características das barragens localizadas no Rio São Francisco .....	38
Tabela 3- Especificações dos Satélites Landsat TM, OLI e Sentinel-2.....	50
Tabela 4-Índices aplicados na extração da superfície hídrica dos lagos .....	55
Tabela 5-Estatística dos feixes altimétricos ICESat-2 sobre o lago de Poço da Cruz.....	67
Tabela 6- Análise dos perfis ICESat-2 sobre a superfície hídrica em relação às estações de referência em Sobradinho .....	77
Tabela 7- Data das imagens selecionadas para extração da máscara da superfície hídrica.....	79
Tabela 8- Imagens Landsat e Sentinel-2 usadas para extrair os contornos hídricos. São fornecidas as elevações dos contornos hídricos e o intervalo vertical entre as imagens. ....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional da Água e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ATLAS	Advanced Topographic Laser Altimeter System
BQA	Band Quality Assessment
CAV	Curva Cota-Área-Volume
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CNES	<i>Centre national d'études spatiales</i> (Centro Nacional de Estudos Espaciais da França)
CNSA	<i>China National Space Administration</i> (Agência Espacial da China)
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CSA	<i>Canadian Space Agency</i> (Agência Espacial Canadense)
CWC	Central Water Commission of India
DGPS	Differential Global Positioning System
DNOCS	Departamento Nacional de Obras contra Seca
ENVISAT	Environmental Satellite
ERS	European Remote Sensing satellite
ESA	<i>European Spatial Agency</i> (Agência Espacial Europeia)
EUMETSAT	<i>European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites</i> (Organização intergovernamental composta por 30 Estados membros Europeus)
GEE	Google Earth Engine
GLA 06	Global Land Surface Altimetry Data, Version 34
GLAS	Geoscience Laser Altimeter System
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GSW	Global Surface Water
ICESAT	Ice, Cloud and Land Elevation Satellite
IDW	Inverse Distance Weighting
JRC	Joint Research Center
LiDAR	Light Detection and Ranging

MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Agência Espacial dos Estados Unidos da América)
NDWI	Normalised Difference Water Index
NEB	Nordeste do Brasil
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica – Instituição dos Estados Unidos da América)
NRMSE	Normalized Root-Mean-Square Error
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PE 3D	Pernambuco Tridimensional
PIMOX	Perímetro Irrigado do Moxotó
PISF	Projeto de Integração do São Francisco
RMSD	Root Mean Square Deviation
RMSE	Root Mean Squared Error
RTIL	Rede Triangular Irregular Linear
SIN	Sistema Interligado Nacional
SM	Spline Mitasova
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWOT	Surface Water Ocean Topography
TIN	Rede Triangular Irregular
UHE	Usinas Hidrelétricas de Energia
UKSA	<i>United Kingdom Space Agency</i> (Agência Espacial do Reino Unido)
USGS	<i>United States Geological Survey</i> (Serviço Geológico dos Estados Unidos)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1	HIPÓTESE DA PESQUISA.....	22
1.2	OBJETIVOS.....	22
1.3	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITUAL</b> .....	<b>24</b>
2.1	SENSORIAMENTO REMOTO PARA HIDROLOGIA.....	24
<b>2.1.1</b>	<b>Imagens Óticas</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Missões Altimétricas</b> .....	<b>26</b>
<i>2.1.2.1</i>	<i>Light Detection and Ranging (LiDAR)</i> .....	<i>32</i>
2.2	TRABALHOS REALIZADOS EM RESERVATÓRIOS NO BRASIL.....	37
2.3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	43
<b>2.3.1</b>	<b>Referências Verticais</b> .....	<b>43</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Interpolação</b> .....	<b>46</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>48</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	48
3.2	DADOS UTILIZADOS.....	50
3.3	MÉTODO.....	52
<b>3.3.1</b>	<b>Máscara da Superfície hídrica</b> .....	<b>53</b>
<i>3.3.1.1</i>	<i>Técnicas aplicadas à extração da superfície hídrica</i> .....	<i>59</i>
<b>3.3.2</b>	<b>Esquema de avaliação dos dados ICESat-2</b> .....	<b>65</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Atribuição de elevação aos contornos hídricos</b> .....	<b>67</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Geração da Batimetria</b> .....	<b>69</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>70</b>
4.1	AVALIAÇÃO DOS DADOS ICESAT-2.....	70

4.2	PROCESSAMENTO NO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO .....	78
<b>4.2.1</b>	<b>Extração da Máscara da Superfície hídrica .....</b>	<b>80</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Definição da relação Elevação-Área da superfície hídrica (E-A) .....</b>	<b>81</b>
4.2.2.1	<i>Altimetria por dados in situ .....</i>	81
4.2.2.2	<i>Altimetria pelo ICESat-2.....</i>	82
<b>4.2.3</b>	<b>Batimetria .....</b>	<b>85</b>
4.3	PROCESSAMENTO NO RESERVATÓRIO DE POÇO DA CRUZ .....	87
<b>4.3.1</b>	<b>Definição da relação Elevação-Área da superfície hídrica (E-A) .....</b>	<b>87</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Batimetria .....</b>	<b>89</b>
4.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	90
<b>4.4.1</b>	<b>Avaliação dos dados ICESat-2.....</b>	<b>90</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Avaliação da relação Elevação-Área da superfície hídrica (E-A) .....</b>	<b>93</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Avaliação da restituição batimétrica.....</b>	<b>95</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>98</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>101</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água superficial é uma parte importante do ciclo hidrológico, seja pelos aspectos qualitativos ou por sua distribuição no tempo (LU *et al.*, 2011). Indispensável ao desenvolvimento de qualquer sociedade, ela é utilizada para consumo humano, atividades industriais, geração de energia, irrigação, lazer, entre outros usos (ESTIGONI, 2012). As demandas crescentes geram preocupações diversas, principalmente devido aos conflitos e restrições no consumo da água (GOES FILHO, 2012). Segundo o Banco Mundial (WORLD BANK, 2022), ao longo de 15 anos (2000-2014), o crescimento populacional global e a elevação do consumo de energia elétrica (kwh per capita) foi da ordem de 19% e 31%, respectivamente, gerando maior pressão sobre os Recursos Hídricos que afetam diretamente as atividades econômicas e interferem na qualidade de vida das pessoas.

Conhecer a extensão da influência humana no ciclo hidrológico global é essencial para a sustentabilidade dos Recursos Hídricos na Terra (COOLEY; RYAN; SMITH, 2021). Rastrear e quantificar o armazenamento global da água de superfície auxilia os planejadores e gestores hídricos a encontrar soluções para atender às crescentes demandas humanas, sem que necessariamente passe pela construção de infraestrutura (barragens, adutoras, estações de tratamento) que dominou a agenda da água do século XX, mas reavaliar os objetivos do uso da água através de instalações descentralizadas de pequena escala que complementem as estruturas existentes. Novos modelos de gestão visam melhorar a produtividade do uso da água em vez de buscar fontes infinitas de novos suprimentos, oferecer serviços de água adequados às necessidades dos usuários e aplicar ferramentas econômicas, como mercados e preços, com o objetivo de incentivar o uso eficiente, a distribuição equitativa do recurso e a operação sustentável do sistema ao longo do tempo (GLEICK, 2003).

Com essa nova abordagem para a água, o foco da gestão não é meramente a projeção de demandas, mas acreditar que as pessoas querem satisfazer as demandas de bens e serviços, e podem não se importar com a quantidade restrita de água, contanto que esses serviços sejam produzidos de maneira econômica e socialmente sustentável. No entanto, para alcançar tais objetivos, é preciso o conhecimento da dinâmica espaço-temporal e a variabilidade de corpos hídricos, uma vez que a inundação de lagos e zonas úmidas desempenham um papel importante no ciclo regional de água e energia, porém simular seus impactos na climatologia e hidrologia em escala regional ainda é um grande desafio pouco explorado (SAMUELSSON; KOURZENEVA; MIRONOV, 2010).

Apesar de lagos e reservatórios cobrirem apenas 2,4% de todos os continentes (LEHNER; DÖLL, 2004), os reservatórios são um dos mais requisitados componentes do sistema de recursos hídricos, sua utilização visa uma regularização temporal e espacial da água, pois suprem as necessidades de atendimento às demandas em períodos de escassez, e servem, em alguns casos, para contenção de cheias. Mas, para que estes reservatórios cumpram sua finalidade, os elementos que os alimentam (rios, precipitações, nascentes, lençóis subterrâneos e aquíferos) e os que ocasionam perdas de seu volume (evaporação, infiltração e sedimentação) precisam ser monitorados e estudados dinamicamente (GOES FILHO, 2012).

Percebe-se assim, que o monitoramento do reservatório é crucial para avaliar seus efeitos na hidrologia regional e para a gestão dos Recursos Hídricos. Enquanto reservatórios de importância estratégica, tipicamente grandes, são, em sua maioria, regularmente monitorados, os reservatórios pequenos carecem de atenção e monitoramento adequados em todo o mundo (LIEBE *et al.*, 2009). É comum encontrar discontinuidades e falhas recorrentes nos dados hidrológicos existentes. Apesar de sua importância para as reservas de água doce, o monitoramento sistemático desses mananciais é muito limitado (GAO, 2015). Nesse sentido, a técnica de sensoriamento remoto tem a capacidade de preencher lacunas com informações multitemporais e multiespaciais relevantes para estudos hidrológicos e abordagens de modelagem (ASADZADEH JARIHANI *et al.*, 2013). O trabalho em escala global realizado por Cooley; Ryan e Smith (2021), por exemplo, mostrou que 57% da variabilidade sazonal do armazenamento de água na superfície da Terra ocorre em reservatórios gerenciados pelo homem. Tal conclusão foi possível por conta dos dados de nível de água obtidos por altimetria de satélite para 227.386 corpos d'água no período de outubro/2018 a julho/2020.

O sensoriamento remoto ganha ainda mais importância num país com dimensões continentais como o Brasil, onde a hidrometria contínua e permanente de rios e reservatórios constitui um grande desafio. Técnicas alternativas com o uso de satélites podem alcançar várias regiões brasileiras onde a escassez hídrica constitui num fator restritivo ao desenvolvimento socioeconômico. O abastecimento de água no Nordeste do Brasil (NEB), por exemplo, depende dos reservatórios que regularizam as descargas. A capacidade de armazenamento varia desde pequenos reservatórios usados em propriedades particulares até grandes reservatórios usados para abastecimento urbano (também chamados de hidrossistemas)(NASCIMENTO; RIBEIRO NETO, 2017). Graças ao uso de sensores satelitais, Carvalho *et al.* (2009) obtiveram uma melhor noção da densidade desses pequenos reservatórios nos 1.558 milhões km<sup>2</sup> de extensão do NEB, detectando 4.989 reservatórios com espelho d'água acima de 20ha. Contudo, quando os autores consideraram o limiar da superfície hídrica a partir de 5ha, encontraram um total de

17.083 reservatórios, representando um incremento de 242,41% novos reservatórios detectados, evidenciando o impacto dos pequenos reservatórios na Região. Apesar dos efeitos na disponibilidade hídrica da bacia, esses pequenos reservatórios (com volumes menores que 3 milhões de m<sup>3</sup>) desempenham um papel relevante no abastecimento hídrico regional, na hidrologia e ecossistemas locais (KROL *et al.*, 2011).

Em relação às bacias hidrográficas brasileiras, os reservatórios estão presentes nas principais, porém sua distribuição não é homogênea (AGOSTINHO; PELICICE; GOMES, 2008). Na bacia do rio São Francisco, por exemplo, apesar do número de grandes reservatórios na bacia não ser alto, a área ocupada por eles é grande, inundando quase 6.500 km<sup>2</sup>, o que equivale a 18% da área represada brasileira. Nessa bacia encontra-se a segunda maior capacidade de geração de energia instalada do país com 10.473 MW (17,3% do total) (AGOSTINHO; GOMES; PELICICE, 2007).

Vale destacar que no Brasil 71,02% da geração elétrica é oriunda dos reservatórios, sendo 67,75% proveniente de Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE), 3,10% de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e 0,17% de Centrais Geradoras Hidrelétricas (ANEEL, 2021). É de suma importância a realização de estudos hidrológicos nos reservatórios das UHEs para o Operador Nacional do Sistema (ONS) realizar o gerenciamento e planejamento do setor elétrico. Desta forma, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 4 de dezembro de 1998 publicou a Resolução N° 396 e posteriormente a Resolução Conjunta com a Agência Nacional de Águas (ANA) N° 003/2010 que dispõem sobre os estudos hidrossedimentológicos em aproveitamentos hidrelétricos, dentre os quais prevê levantamentos batimétricos periódicos a cada dez anos (ANA/ANEEL, 2010).

A Resolução Conjunta N° 003 ANEEL – ANA versa em seu artigo 8° sobre a obrigatoriedade de avaliação do processo de assoreamento dos reservatórios, com base na atualização das curvas Cota x Área x Volume, das usinas despachadas centralizadamente pelo ONS. Entretanto, levantamentos batimétricos em reservatórios são caros. Batimetrias recentes em reservatórios da região semiárida, contratadas pela ANA, tiveram custo entre R\$ 1.200 e R\$ 4.400 por hectômetro cúbico (hm<sup>3</sup>) (COLLISCHONN; CLARKE, 2016).

Em 2013, a ANA publicou o manual de orientações para atualização das curvas cota x área x volume, visando estabelecer especificações técnicas mínimas e de atendimento obrigatório, sobre os trabalhos cartográficos que subsidiarão a elaboração das curvas. O referido manual já incorpora a possibilidade de mapeamento da área seca do reservatório (item 3.4.8 do manual) com alguns produtos de sensoriamento remoto como restituição aerofotogramétrica, imageamento por satélite, interferometria radar ou perfilamento laser.

Os normativos recentes, a exemplo do supracitado manual, traz novos padrões de exigência para gerenciamento de metas propostas, algumas ainda em fase de implementação, tal que o levantamento de dados hidrológicos e hidrométricos e as pesquisas na área de gerenciamento de recursos hídricos são necessárias, e considerando que o Brasil possui aproximadamente pouco mais de 10% do total mundial de água doce mostra-se a grande importância desses tipos de estudos (ESTIGONI, 2012).

A caracterização volumétrica de reservatórios por meio da utilização dos produtos de sensoriamento remoto tem se mostrado uma abordagem importante e cada vez mais requisitada na hidrologia espacial, uma vez que a batimetria tradicional além de onerosa, requer investigação de campo, que é trabalhosa, demorada e muitas vezes não é viável para investigações em grande escala. Por isso, através de técnicas e inovações tecnológicas de baixo custo, explorar o potencial de observação da Terra, considerando missões de satélite passadas, atuais e futuras no domínio da pesquisa de recursos hídricos de superfície tem se mostrado uma valiosa ferramenta no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, sobretudo aos tomadores de decisão.

Nesse sentido, algumas pesquisas têm sido desenvolvidas como alternativas a levantamentos batimétricos convencionais. Por exemplo, a altimetria por satélite é usada para medir os níveis de água em rios e lagos (CRÉTAUX *et al.*, 2011) e imagens ópticas estimam variações de volume de lagos e reservatórios combinando a extensão da superfície da água com base em satélite e a elevação da água (BUSKER *et al.*, 2019). Técnicas de sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizadas para gerar mapas de batimetria de águas interiores (ARMON *et al.*, 2020; ARSEN *et al.*, 2014; BRANDO *et al.*, 2009; GETIRANA; JUNG; TSENG, 2018; LI. *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2016). Alguns estudos usaram abordagens alternativas para inferir informações de geometrias de lagos e reservatórios, mas foram insuficientes para fornecer dados batimétricos 3D (GAO; BIRKETT; LETTENMAIER, 2012; LV *et al.*, 2018). Em contrapartida, outros estudos geraram com sucesso mapas batimétricos 3D (GETIRANA; JUNG; TSENG, 2018; LI. *et al.*, 2019), batimetria 3D para conjuntos de dados de reservatórios globais (LI *et al.*, 2020) e curvas cota-área-volume (CAV) obtidas de sensoriamento remoto com base em dados TanDEM-X (LI *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2016)

Deste modo, este estudo propõe a reconstituição batimétrica para aplicações em reservatórios, fazendo o uso de técnicas e produtos de Sensoriamento Remoto, visando utilizar métodos já referenciados na literatura, combinando altimetria de precisão a laser (Produto LiDAR) e dados de nível da água *in situ* para estimar elevações das superfícies hídricas,

derivadas de imagens óticas, e transformá-las em contornos de pontos 3D, gerando um Modelo Digital de Terreno (MDT), de onde se poderá calcular a curva cota-área-volume do reservatório.

## 1.1 HIPÓTESE DA PESQUISA

O trabalho parte da hipótese de que é possível utilizar os produtos de sensoriamento remoto para realização de levantamento batimétrico em reservatórios, através do desenvolvimento de metodologia que demonstre viabilidade técnica em aplicações de grande escala, capazes de produzir resultados com baixo custo, celeridade e eficiência.

## 1.2 OBJETIVOS

### *Objetivo geral*

Desenvolver metodologia de reconstituição batimétrica em reservatórios com características e dimensões distintas com uso de Sensoriamento Remoto.

### *Objetivos específicos*

- Avaliar a aplicação dos produtos de sensoriamento remoto para restituição batimétrica de reservatório, considerando o uso de satélite altimétrico com sensor ativo LiDAR (Light Detection and Ranging) e dados de nível observados;
- Desenvolver novas técnicas de geoprocessamento que visem dar celeridade e eficiência na produção de resultados;
- Aplicar a metodologia estabelecida de restituição batimétrica, incorporando elementos novos, visando o aprimoramento da técnica aplicada;
- Avaliar a adaptabilidade e adequação da metodologia desenvolvida frente a reservatórios com características geométricas e de operação distintas.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta pesquisa foi desenvolvida nos seguintes capítulos:

**CAPÍTULO 1, INTRODUÇÃO:** apresenta-se uma breve introdução com a justificativa da realização do trabalho e uma síntese da relação entre o tema do trabalho com os objetivos, metodologia e os resultados.

CAPÍTULO 2, REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: apresenta-se neste capítulo uma descrição dos principais conceitos abordados no estudo que auxiliam na compressão dos trabalhos envolvidos com esta pesquisa. São apresentadas também várias metodologias e técnicas que envolvem o uso dos produtos de sensoriamento remoto aplicadas no Brasil e no mundo.

CAPÍTULO 3, METODOLOGIA: descreve-se brevemente a região de estudo, seus aspectos fisiográficos, climáticos e hidrológicos, bem como os métodos utilizados para consecução dos objetivos da pesquisa.

CAPÍTULO 4, RESULTADOS E DISCUSSÕES: apresentam-se todos os resultados obtidos na região estudada, bem como as análises comparativas com outros estudos.

CAPÍTULO 5, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES: apresentam-se as ideias conclusivas da pesquisa e algumas recomendações para futuras pesquisas no tema.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITUAL

Vários trabalhos têm sido apresentados nas principais áreas de interesse desta tese. Abaixo são apresentados alguns separados por temática.

### 2.1 SENSORIAMENTO REMOTO PARA HIDROLOGIA

Na Hidrologia, várias componentes do ciclo hidrológico têm sido estimadas através das imagens de satélites utilizando técnicas de sensoriamento remoto. É o caso da evapotranspiração no gerenciamento de áreas irrigadas (TANG *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2008), da precipitação para monitoramento hidrometeorológico (GELLA, 2019; BAYISSA *et al.*, 2017) e das mudanças mensais do armazenamento total de água na terra (isto é, toda a neve, águas superficiais, umidade do solo e água subterrânea) através da missão GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) da NASA (TAPLEY *et al.*, 2004) que mediu por 15 anos (2002-2017) as variações temporais no campo gravitacional da Terra (CASTLE *et al.*, 2014). Esses são alguns exemplos de aplicação da hidrologia espacial que serão abordados nas seções seguintes.

#### 2.1.1 Imagens Óticas

A observação da variabilidade espacial e temporal dos recursos hídricos é crucial para as questões sociais e científicas (CRÉTAUX; BIRKETT, 2006). Em busca de soluções, as imagens óticas com a tecnologia de sensoriamento remoto vêm sendo utilizada crescentemente em diferentes aplicações, tais como mudanças no uso e cobertura do solo (SALMON *et al.*, 2013; DEMIR; BOVOLO; BRUZZONE, 2013), monitoramento de eventos extremos (VOLPI; PETROPOULOS; KANEVSKI, 2013; BRISCO *et al.*, 2013; ZHU; CAO; DAI, 2011) observações contínuas de cobertura vegetal (KALIRAJ; MUTHU MEENAKSHI; MALAR, 2012; MARKOGIANNI, DIMITRIOU; KALIVAS, 2013) e análises hidrológicas (DU *et al.*, 2012; ALSDORF; RODRÍGUEZ; LETTENMAIER, 2007).

A extração das superfícies hídricas de lagos e reservatórios consiste em uma etapa importante para análises espaciais e temporais desses mananciais. Du *et al.* (2012) estimaram quantitativamente as águas superficiais da Bacia do Rio Qingjiang, concluindo pela importância do impacto das atividades humanas na distribuição espaço-temporal das águas superficiais. Para isso, foram utilizadas imagens multiespectrais de Satélites Landsat, onde a área inundada pelo seu lago é facilmente identificada com sensores na banda do infravermelho próximo (entre 0,76 e 0,90 micrômetros), em que os corpos d'água absorvem a maior parte da radiação (COLLISCHONN; CLARKE, 2016). O índice NDWI (Normalised Difference Water Index),

proposto primeiramente por Mcfeeters (1996), foi estudado por Rokni *et al.* (2014) onde mostraram uma precisão de 98% em suas análises no Lago Urmia – Irã, demonstrando superioridade e melhor desempenho do NDWI em comparação com os outros índices estudados (NDMI, MNDWI, WRI, NDVI e AWEI). Com isso, este índice é comumente usado na delimitação de corpos d'água, valendo-se do fato que a água apresenta baixa reflectância tanto no verde (0,52 a 0,60 micrômetros) quanto no infravermelho próximo, em contraste com outras superfícies como vegetação e solo (COLLISCHONN; CLARKE, 2016).

A extração de superfície hídrica utilizando índice de diferença normalizada com um único limiar, embora seja considerado uma técnica adequada e de fácil execução, pode levar a erros inevitáveis. Foi o que constatou Reis *et al.* (2021) quando pesquisaram as incertezas envolvendo o uso de um único limiar otimizado sobre cenas de imagens multitemporais do Landsat-8 e Sentinel-2 no reservatório de Poço da Cruz. Através de uma pesquisa enumerativa para otimizar os limites sobre o índice de água de diferença normalizada modificado derivado de satélite (MNDWI), os autores empregaram uma abordagem de validação cruzada, tratando a acurácia como uma variável aleatória para entender como a precisão varia com os valores dos limites para identificar faixas menos sujeitas a erros. Após avaliar o desempenho de cada sensor comparando com um modelo digital de elevação de alta resolução, os estudos evidenciaram que existe uma região onde os valores dos limiares podem variar sem causar perda de precisão, bem como ao restringir a variação dos limiares entre esses limites, a precisão é drasticamente melhorada e supera o método Otsu (algoritmo de limiarização). Por fim, os autores recomendaram como apropriada a utilização de mais de três cenas para superajustar os valores de limiar.

Quantificar a relação entre as superfícies hídricas extraídas de imagens óticas e o nível d'água tem se mostrado uma técnica de baixo custo com resultados consistentes. Pensando nisso, Lv *et al.* (2018) propuseram um método de estimativa robusta para estudo na relação superfície/nível hídricos, onde quatro modelos (linear, exponencial, polinomial logarítmico e quadrático) foram construídos por análise de regressão e aplicados no lago Chinês Poyang no período de 2009 a 2013. Os resultados experimentais mostraram que o ajuste polinomial quadrático teve o melhor desempenho.

Nesse sentido, Li *et al.* (2016) utilizaram 81 imagens multitemporais Landsat para estimar a superfície hídrica do reservatório Chinês de Danjiangkou, no período de 1993-2015, investigando a relação entre os níveis observados e as áreas calculadas. Os resultados mostraram que as funções polinomiais podem descrever essa relação, e a avaliação quantitativa e a análise qualitativa indicaram que uma função polinomial cúbica é a relação ótima. O

coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o erro quadrático médio da função polinomial cúbica foram 0,9879 e 0,6987, respectivamente.

Baseado em dados de monitoramento, Lu *et al.* (2013) calcularam o volume de água do lago Baiyangdian, norte da China, a partir dos limites da sua superfície hídrica obtidos de imagens óticas em cada ano, combinados com os níveis d'água observados em campo para gerar a batimetria usando um modelo de volume TIN (Rede Triangular Irregular) construído através da ferramenta de geoprocessamento 3D Analyst tool do ArcMap 9.3(ESRI).

No Brasil, Rodrigues *et al.* (2012) realizaram a estimativa de volume de armazenamento em 147 pequenos reservatórios na bacia do rio Preto, localizada na porção média da bacia do rio São Francisco, utilizando um método simples com base na área de superfície hídrica do reservatório através do sensoriamento remoto com imagens Landsat. O método foi validado com um subconjunto (28% dos 147 avaliados) de reservatórios contidos na bacia, para o qual foram determinadas as áreas de superfície, formas e profundidades com levantamentos de campo. Medições de satélite das áreas avaliadas em campo foram bem correlacionadas com as áreas medidas ( $R^2$  de 0,92). A concordância entre os volumes medido e estimado foi satisfatória, indicando que imagens de satélite podem ser usadas para melhorar o gerenciamento hídrico na região do Cerrado.

### **2.1.2 Missões Altimétricas**

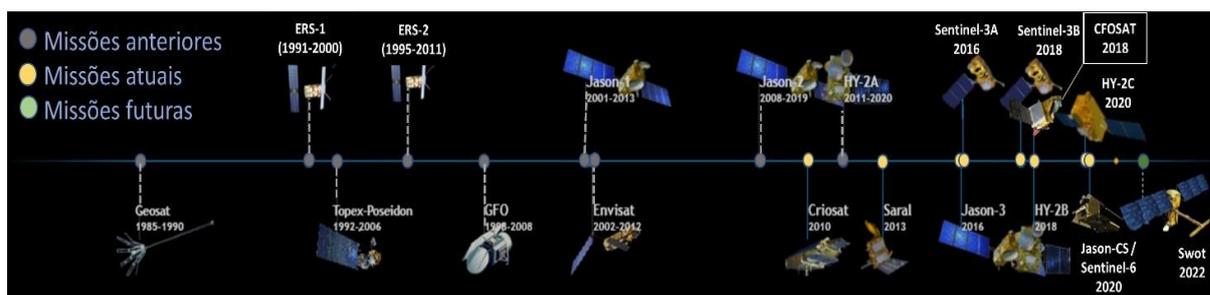
A altimetria foi anunciada como uma prioridade no Simpósio Williamstown em 1969. A década de 1970 viu o desenvolvimento de sistemas de altímetro de satélite precisos, com o Skylab (que produziu as primeiras medições de ondulações no geoide marinho devido às características do fundo do mar), Geos-3 e Seasat, cujos dados foram ampla e livremente distribuídos a cientistas de todo o mundo, lançando as bases para uma nova geração de satélites oceânicos (AVISO, 2021).

Os primeiros satélites altimétricos foram projetados para estudo dos domínios oceânicos, tendo sido utilizados para investigações oceanográficas e das calotas polares (CHU *et al.*, 2008). Desde então, o progresso nas técnicas de aquisição de dados, tais como observações repetidas globais, penetração em nuvem e observações noturnas, tem permitido o estudo da característica do nível de água dos lagos (CRÉTAUX; BIRKETT, 2006; LEE *et al.*, 2009; ZHANG, *et al.*, 2011; KROPACEK *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2013).

Entre os anos de 1980 e 2000, iniciou-se a colaboração entre agências internacionais europeias e norte americanas, como NASA e o CNES, viabilizando investimentos significativos e o lançamento de várias missões (Figura 1), iniciando pelo satélite Geosat em 1985, seguido pelo satélite TOPEX/Poseidon (TOPography EXperiment), entre 1992 e 2003 e seus sucessores

Jason-1 (2001-2013) e Jason-2 (2008-2019), esta família de satélites desenvolvida especificamente para estudos dos oceanos. Ao mesmo tempo, a Agência Espacial Europeia (European Spatial Agency - ESA) lançava uma outra família de satélites ERS (European Remote Sensing satellite) com período de duração entre 1991 e 1996 para o ERS-1 e de 1995 a 2003 para ERS-2 e finalizando com o ENVISAT (Environmental Satellite) entre 2002 e 2012, onde além das observações oceânicas e atmosféricas, permitiu sob certas condições, a aquisição de medidas mais confiáveis nos continentes e calotas polares (CARVALHO, 2020).

Figura 1-Missões altimétricas a partir dos anos 1980



Fonte: (AVISO, 2021).

As missões altimétricas atuais demonstram a evolução da altimetria ao longo dos últimos 20 anos. Os avanços sucessivos nas especificações dos altímetros e em tecnologias de posicionamento e de obtenção dos dados contribuíram substancialmente na melhoria da qualidade das medições (PEREIRA, 2018). A grande quantidade de dados gerados pela altimetria radar ao longo de todo o planeta e de rápida disponibilização permitiu que pesquisas em hidrologia tenham se valido dessa importante ferramenta para auxiliar diversos estudos relacionados à construção e calibração de modelos hidrológicos (PAIVA *et al.*, 2013; PARIS *et al.*, 2016; GARAMBOIS *et al.*, 2017), à construção de séries temporais a partir do nível e à estimativa de vazões e construção de curvas-chave (KOURAEV *et al.*, 2004; LEON *et al.*, 2006; PAPA *et al.*, 2012)

As missões mais recentes, como a CryoSat-2 (2010); SARAL (2013); a Sentinel-3A e Jason-3 iniciadas em 2016, garantiram a continuidade das medições das missões antecessoras das mesmas famílias de satélite. O Jason-CS/Sentinel-6A, por exemplo, garantiu a continuidade com Jason-3 em 2020. O Jason-CS / Sentinel faz parte do Programa Copernicus como resultado da cooperação internacional entre ESA, EUMETSAT, UNIÃO EUROPEIA, NOAA, CNES E NASA / JPL.

Há missões sendo planejadas para o futuro, algumas para dar continuidade as existentes e outras inéditas. Entre as missões aguardadas, pode-se citar a SWOT (Surface Water Ocean Topography), realizada em cooperação entre NASA, CNES, a Agência Espacial Canadense e a

Agência Espacial do Reino Unido, programada para 2022 e a missão Jason-CS/Sentinel-6B com lançamento previsto para 2026 (AVISO, 2021).

A missão Jason-CS/Sentinel-6B garantirá a continuidade das observações do nível do mar e de águas continentais da família de satélites Jason por quatro décadas. Como as medições contínuas do aumento do nível do mar global é um dos mais importantes indicadores das mudanças climáticas causadas pelo homem, os dados gerados por este satélite apoiarão a oceanografia operacional por meio de previsões aprimoradas das correntes oceânicas, bem como das condições do vento e das ondas. Esses dados permitirão melhorias tanto na previsão de curto prazo para previsões do tempo no intervalo de duas a quatro semanas (por exemplo, previsões de intensidade de furacão), quanto na previsão de longo prazo para condições sazonais (por exemplo, El Niño, La Niña)(LABORATORY, 2021).

A missão SWOT tem como objetivo atender as comunidades de hidrologia terrestre e de oceanografia, envolvendo um melhor entendimento dos oceanos e das águas continentais de superfície. Com previsão de cobertura de 90% das águas do globo, a missão é vista como um divisor de águas na observação da topografia da superfície do oceano e análise temporal das mudanças dos oceanos, lagos, rios e reservatórios. A tecnologia inovadora do SWOT contribuirá para compreender e caracterizar o ciclo da água e enfrentar o desafio das mudanças climáticas, ajudando na gestão sustentável dos recursos hídricos(AVISO, 2021). Outras informações sobre as missões altimétricas, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Detalhes das missões altimétricas e características dos seus produtos

SATÉLITE	AGÊNCIA	LANÇAMENTO	ALTÍMETRO	BANDA	REVISITA
GEOSAT	US Navy	1985	-	-	17 dias
ERS-1	ESA	1991	RA	Ku	35 dias
TOPEX/POSEIDON	NASA e CNES	1992	NRA/SSALT	Ku e C	10 dias
ERS-2	ESA	1995	RA	Ku	35 dias
GFO	US Navy e NOAA	1998	-	-	17 dias
JASON-1	CNES e NASA	2001	Poseidon-2	Ku e C	10 dias
ENVISAT	ESA	2002	RA-2	Ku	30-35 dias
ICESAT-1	NASA	2003	GLAS (Laser)	1064 nm e 532 nm	8 e 91 dias
JASON-2	CNES, NASA, EUMETSAT e NOAA	2008	Poseidon-3	Ku e C	10 dias
CRYOSAT-2	ESA	2008	Siral	Ku	369 dias
HY-2A	CAST	2011	-	Ku e C	14 dias
SARAL	CNES e ISRO	2013	AltiKa	Ka	35 dias
JASON-3	CNES, NASA, EUMETSAT e NOAA	2016	Poseidon-3B	Ku e C	10 dias
SENTINEL-3A	ESA	2016	SRAL	Ku e C	27 dias
SENTINEL-3B	ESA	2018	SRAL	Ku e C	27 dias
ICESAT-2	NASA	2018	ATLAS (Laser)	532 nm	91 dias

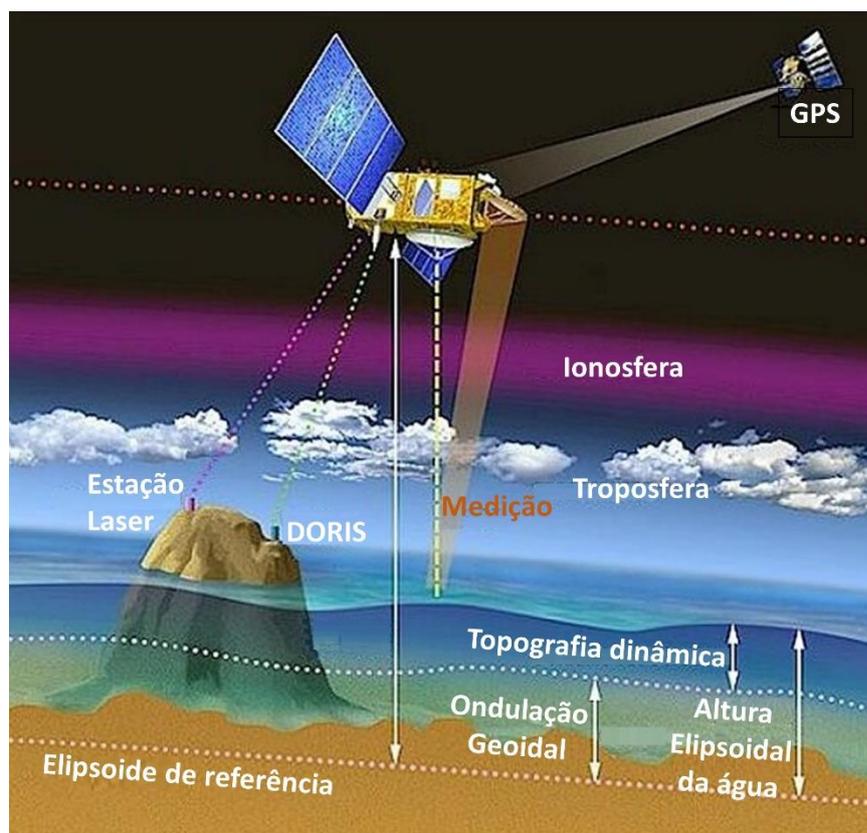
(Continuação Tabela 1)

SATÉLITE	AGÊNCIA	LANÇAMENTO	ALTÍMETRO	BANDA	REVISITA
JASON-3	CNES, NASA, EUMETSAT e NOAA	2016	Poseidon-3B	Ku e C	10 dias
SENTINEL-3A	ESA	2016	SRAL	Ku e C	27 dias
SENTINEL-3B	ESA	2018	SRAL	Ku e C	27 dias
CFOSAT	CNSA CNES	2018	SWIM / SCAT	Ku	13 dias
JASON-CS	CNES, ESA, NASA, EUMETSAT e NOAA	2020	Poseidon-4	-	10 dias
SWOT	CNES, NASA, CSA e UKSA	2022	Karin	Ka	1/21 dias
CFOSAT	CNSA CNES	2018	SWIM / SCAT	Ku	13 dias
JASON-CS	CNES, ESA, NASA, EUMETSAT e NOAA	2020	Poseidon-4	-	10 dias

Fonte: (AVISO, 2021).

Sensores de satélites altimétricos medem efetivamente a distância entre o satélite e a superfície da terra, baseado no tempo de viagem entre a transmissão do sinal e a recepção do sensor. Forma e magnitude das ondas refletidas nos diferentes tipos de cobertura da superfície contêm informações sobre as características da superfície terrestre, isto é, oceano, terra, gelo, rio e vegetação (ASADZADEH JARIHANI *et al.*, 2013). Como exemplo, a Figura 2 mostra o princípio da obtenção do dado de um radar altimétrico, onde baseia-se na determinação da órbita do satélite através de técnicas do sistema de posicionamento global (GPS - *global positioning system*), de alcance por satélite a laser (SLR - *satellite laser ranging*) e do sistema francês de órbita por sinal Doppler e posicionamento de rádio integrados por satélite (DORIS - *doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite*), permitindo, assim, a determinação da posição do centro de fase da antena do altímetro (ROSMORDUC *et al.*, 2009). O sensor radar emite ondas eletromagnéticas e, por isso, independe da energia do sol ou das propriedades termais da Terra para obter informações das superfícies. As ondas eletromagnéticas (energia) são emitidas e transmitidas em direção ao alvo onde acontece o retroespalhamento. A porção das ondas que reflete na direção da antena do satélite é registrada (JENSEN, 2009). As bandas Ku e Ka são as mais utilizadas nos altímetros a bordo dos satélites que têm por objetivo a mensuração do nível de água, pois a reflexão dessas micro-ondas pela água acontece de forma quase regular.

Figura 2- Processo de aquisição do dado de altimetria espacial



Fonte: (ROSMORDUC *et al.*, 2009).

A conjugação dos dados de satélites altimétricos com imagens óticas tem permitido restituição batimétrica de lagos e reservatórios em vários locais do mundo. Crétaux e Birkett (2006) avaliaram a utilização dos Satélites altimétricos para explorar várias situações de recursos hídricos na Ásia Central, investigando os mares de Aral e Cáspio e os Lagos Issykkul e Chade. Os resultados mostraram que a precisão altimétrica não é homogênea, mas depende dos aspectos qualiquantitativos dos dados de satélite disponíveis em cada lago ou reservatório. Observaram ainda, que o aumento de nível do Lago Issykkul com uma taxa de cerca de 10 cm por ano foi confirmado por dados de campo locais e altimetria, atestando a importância do uso desta técnica para quantificar o impacto do aquecimento global em determinadas regiões.

Considerando a importância de difundir o conhecimento sobre o monitoramento de lagos e mares interiores em regiões semi-áridas, Crétaux *et al.* (2011) estruturaram um banco de dados contendo variações de nível para cerca de 150 lagos e reservatórios, disponibilizados gratuitamente no site HYDROWEB: <http://www.legos.obs-mip.fr/soa/hydrologie/hydroweb>, e variações de volume-superfície de cerca de 50 grandes lagos também calculadas através de uma combinação de várias imagens de satélite (Modis, Asar, Landsat, Cbers) e altimetria de radar.

Visando criar uma série histórica de armazenamento para grandes reservatórios selecionados globalmente, usando apenas observações de sensoriamento remoto, Gao; Birkett

e Lettenmaier (2012) estudaram 34 reservatórios com abrangência global, inclusive seis desses no Brasil (Sobradinho, Itaparica, Três Marias, Tucuruí, Novaponte, Ilha Solteira), cujos dados de nível da superfície hídrica apresentassem boa qualidade e pudessem ser obtidos a partir de uma combinação de cinco satélites de altimetria por radar para o período de 1992 a 2010. Os autores compararam os resultados dos produtos, baseados em satélite, com os dados observados nos cinco maiores reservatórios dos Estados Unidos (Lagos Mead, Powell, Sakakawea, Oahe e Fort Peck) e concluíram que as estimativas de armazenamento foram altamente correlacionadas. Especificamente para os reservatórios brasileiros, diante da metodologia aplicada, foi encontrada uma equação que melhor descrevesse a relação nível-área de cada reservatório, concluindo que um baixo coeficiente de correlação pode ocorrer quando o reservatório tem área quase constante (paredes verticais, caso em que a área não varia muito com a mudança da elevação).

O estudo de reservatórios numa escala global deve-se, em grande medida, ao aproveitamento de algumas tecnologias. É o caso, por exemplo, do Google Earth Engine-GEE que utiliza a computação em nuvem para fornecer recursos de análise em mais de 40 anos de dados de imagens óticas. Como plataforma de sensoriamento remoto sua capacidade de analisar dados globais rapidamente se presta a ser uma ferramenta inestimável para estudar o comportamento multitemporal dos recursos hídricos.

Em 2008, o Serviço Geológico dos Estados Unidos (United States Geological Survey - USGS) abriu o acesso a seus registros de imagens do Landsat, favorecendo a incorporação dos dados da NASA pelo Google, que observou uma oportunidade para permitir que registros de imagens do Landsat fossem acessados e processados em seu sistema on-line. Isso permitiu que os usuários reduzissem os tempos de processamento em análises de imagens Landsat e tornassem os projetos Landsat em escala global mais viáveis (PATELA *et al.*, 2015). O GEE está em uso em uma ampla variedade de disciplinas, abrangendo tópicos como mudança global de florestas (HANSEN *et al.*, 2013), mudança global de superfície alagadas (PEKEL *et al.*, 2016), estimativa de rendimento de culturas (LOBELL *et al.*, 2015), mapeamento de arroz (DONG *et al.*, 2016), mapeamento urbano (HANSEN *et al.*, 2013;ZHANG *et al.*, 2015), mapeamento de inundação (COLTIN *et al.*, 2016), recuperação de fogo (SOULARD *et al.*, 2016) e mapeamento de risco de malária (SOULARD *et al.*, 2016). Também, o GEE foi empregado no monitoramento do clima (HUNTINGTON *et al.*, 2017) e avaliando a mudança no uso da terra (UNITED NATIONS FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2016).

A utilização do GEE favoreceu a formação do conjunto de dados pré-processado do Joint Research Center (JRC) Global Surface Water (GSW) - JRC GSW. O conjunto de dados do JRC GSW (PEKEL *et al.*, 2016) mapeia a dinâmica temporal e espacial das águas superficiais globais ao longo de um período de 32 anos (de 16 de março de 1984 a 10 de outubro de 2015) com resolução de 30 m, abrangendo todo o arquivo L1T Landsat 5, 7 e 8, que permite cálculos detalhados da área do lago usando o GEE. As áreas do lago e os níveis da água obtidos do DAHITI foram combinados em uma regressão para derivar a relação hipsométrica para todos os lagos. Quase todos os lagos apresentaram uma regressão linear, e 42% dos lagos mostraram uma forte relação linear com um  $R^2 > 0,8$ , um  $R^2$  médio de 0,91 e um desvio padrão de 0,05. Busker *et al.* (2019) fizeram uso dos dados do JRC GSW combinado com o banco de dados de altimetria satélite DAHITI (Banco de dados para séries temporais hidrológicas sobre águas interiores que combina diferentes missões de altímetro, como TOPEX / Poseidon, Jason-1, 2 e 3, GFO, Envisat, ERS-1 e 2, Cryosat-2 e SARAL / AltiKa) para analisar 137 lagos em todos os continentes, permitindo uma compreensão adequada da dinâmica histórica dos reservatórios como fonte hídrica.

#### 2.1.2.1 *Light Detection and Ranging (LiDAR)*

Alguns satélites altimétricos utilizam sensores óticos do tipo LiDAR. Essa tecnologia de sensoriamento remoto difere do RADAR pelo fato de que este último faz uso de ondas de rádio para localizar os objetos de interesse, enquanto o sistema LiDAR utiliza pulsos laser. Em português vem sendo utilizada a terminologia de Sistema de Varredura a Laser (CENTENO; MITISHITA, 2007) ou de Perfilamento a Laser (CASTRO; CENTENO, 2005).

O princípio de funcionamento do sistema de varredura laser consiste na emissão de um pulso laser de uma plataforma (aérea, terrestre ou orbital) com uma elevada frequência de repetição. O tempo de retorno dos pulsos laser entre a plataforma e os alvos é medido pelo sensor, permitindo a estimativa destas distâncias (BALTSAVIAS, 1999). O sistema LiDAR apresenta sua própria fonte de energia, neste caso, uma fonte de luz, o laser, a qual emite radiação eletromagnética em ondas curtas (1-10  $\mu\text{m}$ ) sendo sensível às perturbações atmosféricas (ANDERSEN; REUTEBUCH; MCGAUGHEY, 2006) e, assim, é considerado um método direto na captura de dados e classificado como um sensor ativo (GIONGO *et al.*, 2010). Uma vantagem da varredura a laser em comparação aos clássicos sensores passivos (fotografias aéreas e imagens de satélite) é que os scanners a laser não são dependentes do sol

como fonte de iluminação, conseqüentemente, a interpretação de dados do scanner a laser não são prejudicados por sombras causadas por nuvens (WAGNER *et al.*, 1999).

O LiDAR vem demonstrando grande potencial em diversas áreas de aplicação, tais como: planejamento costeiro, avaliação de risco de inundações, telecomunicações e redes de transmissão de energia, florestas, agricultura, petróleo, transportes, planejamento urbano, mineração, entre outros (GIONGO *et al.*, 2010).

Lançado pela NASA em janeiro de 2003 e operado até fevereiro de 2010, o produto LiDAR com Sistema de Altimetros a Laser (*Geoscience Laser Altimeter System- GLAS*) no satélite ICESat (*Ice, Cloud e Land Elevation Satellite*) tem fornecido dados de elevação com potencial para muitas aplicações, sendo utilizado para estudar a hidrologia de ambientes lacustres como a depressão hiper-árida de Toshka no sul do Egito, onde uma combinação de múltiplos métodos de sensoriamento remoto por satélite e a utilização de 145 imagens de satélite MODIS e AVHRR possibilitaram monitorar as mudanças na superfície hídrica do lago e estimar seu volume (CHIPMAN; LILLESAND, 2007). As mudanças nos níveis de água de 111 lagos do Tibetan Plateau na Asia Central relativas ao período 2003-2009 também foram objeto de análise utilizando-se os dados altimétricos do ICESat (ZHANG, *et al.*, 2011).

Baghdadi *et al.* (2011) avaliaram o ICESat para rios na França e descobriu que o RMSE (Raiz do erro quadrático médio) de medidas de elevação da água foi de 1,14 m para rios estreitos. Isso foi reduzido para <0,15 m para rios com mais de 1,5 km, devido ao maior número de pontos amostrais. Hall *et al.* (2012) investigaram a precisão dos dados ICESat dos rios Mississippi e Danúbio. A diferença média entre os dados do ICESat e as medições para 85 observações foi registrada como  $0,16 \text{ m} \pm 0,73 \text{ m}$  com um erro absoluto médio de 0,54 m. Excluindo as observações que necessitaram da correção de saturação, os resultados melhoraram para  $-0,10 \text{ m} \pm 0,27 \text{ m}$  com um erro absoluto médio de 0,19 m. Em todos esses estudos, as precisões obtidas estão diretamente relacionadas ao tamanho do corpo hídrico, porque a medição de satélite em comparação com a realidade do solo é geralmente obtida pela média pontual individual da medição ao longo das faixas. Portanto, os rios parecem mais difíceis de estudar devido a sua largura (HALL *et al.*, 2012).

Avaliando a utilidade do ICESat em aplicações hidrológicas, Passaia e Paiva (2017) desenvolveram um software para processar os dados de altimetria do ICESat, através de uma rotina de linguagem de programação em Matlab. O código e a interface resultantes provaram ser ferramentas eficazes para processar dados ICESat. Para validar os dados de satélite, foi feita uma comparação entre os níveis de água obtidos por sensoriamento remoto e os registros de nível da ANA na região da Ilha do Bananal, no Estado do Tocantins. Os autores perceberam

que a variação do nível de água estimada em relação aos dados aferidos pela ANA, apresentou um erro médio quadrático menor que 30 cm, concluindo que o ICESat possui outras aplicações potenciais: declividade média da linha de água; monitoramento de planícies de inundação; calibração de modelos hidrodinâmicos; nivelamento de estações de medição.

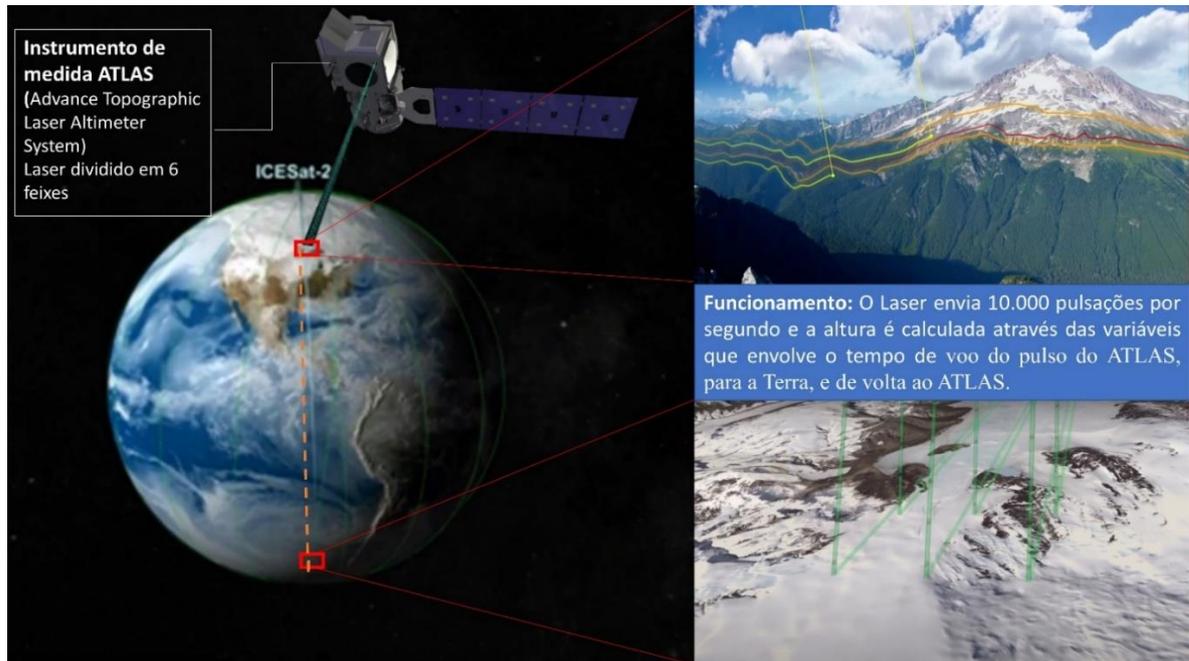
Estudando diferentes ambientes geográficos e relacionando antropismo e mudanças climáticas, Ye *et al.* (2017) utilizaram os dados do ICESat Release 33 GLA14 para analisar a variação do nível de água dos lagos e reservatórios de Xinjiang (China) de 2003 a 2009. Usando imagens Landsat, lagos e reservatórios com área maior que 1 km<sup>2</sup> foram numericamente delineados. Com base nas observações do ICESat foram analisadas as características da variação do nível de água e investigados seus motivos. Os resultados indicaram que o aquecimento climático contribuiu para o aumento dos níveis de água dos lagos em áreas montanhosas, especialmente para lagos que são recarregados pela neve e derretimento glacial.

Especificamente em levantamentos batimétricos com o uso do ICESat, Arsen *et al.* (2014) realizaram a batimetria do Lago Poopó na Bolívia, aproveitando os níveis mais baixos do lago para medir alturas verticais com alta precisão sobre a terra seca. Essas alturas foram usadas para estimar elevações de contornos de água obtidos com imagens do Landsat. Pontos de contorno com elevação atribuída são filtrados e agrupados em uma nuvem de pontos. A rede da malha e a função de interpolação são então aplicadas para construir a batimetria 3D.

Como o primeiro altímetro a laser para satélites, o ICESat coletou dados de elevação dentro de uma pegada de aproximadamente 70 m de diâmetro com observações a cada 170 m (espaçamento) ao longo da trilha. Essa pegada é o diâmetro da área da superfície da terra visível pelo satélite e está relacionada às emissões e às características dos equipamentos (NASA, 2020). A partir do ICESat-2, lançado em setembro de 2018, houve uma diminuição da pegada e do espaçamento ao longo da trilha, para 17 e 0,7 m, respectivamente, melhorando assim sua capacidade de obter informações topográficas de alta qualidade.

Os dados de elevação obtidos pelo ICESat-2 advêm do altímetro ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) (Figura 3), que usa um sistema de contagem de fótons e sistemas auxiliares (ou seja, GPS e câmeras estelares) para fazer três medições primárias: o tempo de voo de um fóton do ATLAS, para a Terra, e de volta ao ATLAS; o vetor apontando no momento em que um fóton é transmitido pelo ATLAS; e a posição no espaço do ICESat-2 no momento em que um fóton é registrado pelo ATLAS.

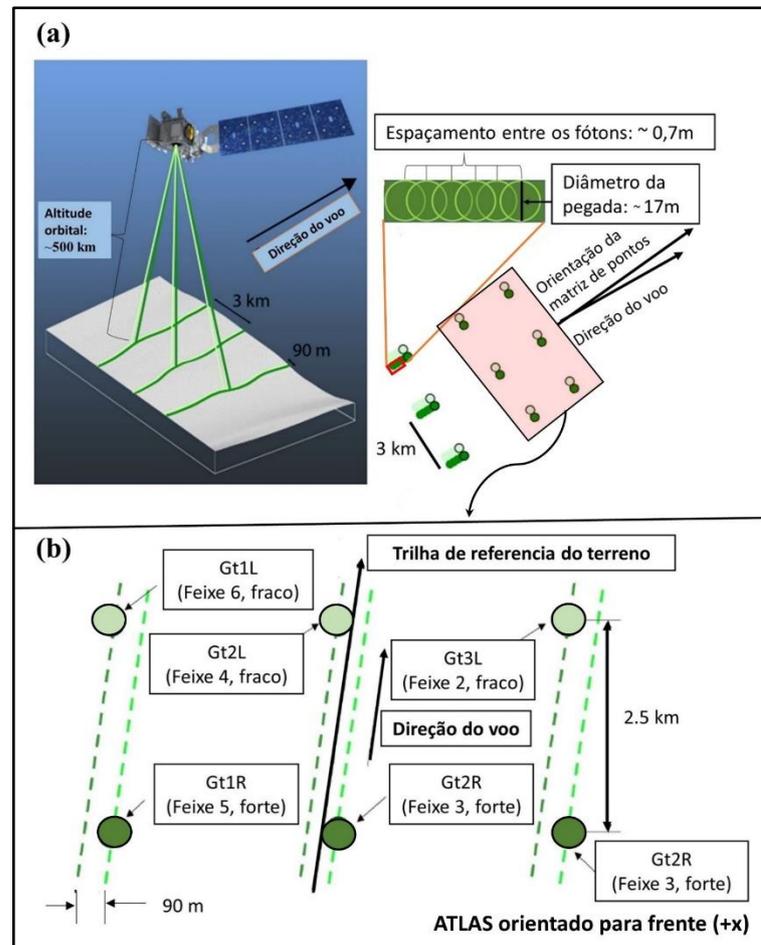
Figura 3-O Satélite ICESat-2 orbitando e o perfil de terreno sendo mostrado em duas perspectivas e regiões distintas. O altímetro (ATLAS) ilumina o solo com 6 feixes



Fonte: (NASA, 2022).

O instrumento ATLAS transmite pulsos a laser no comprimento de onda do verde (532 nm) a frequência de 10 kHz; a velocidade de deslocamento do ICESat-2 a partir de uma altitude orbital nominal de ~500km produz um pulso laser transmitido a cada 0,7 metro (espaçamento dos fótons ao longo das trilhas terrestres). Cada pulso laser transmitido é dividido por um elemento óptico difrativo no ATLAS para gerar seis feixes individuais, dispostos em três pares (Figura 4a). O padrão do feixe a laser é uma matriz  $3 \times 2$  onde cada par é separado por ~3 quilômetros na direção transversal da trilha e têm diferentes energias de transmissão ('fracas' e 'fortes') com uma relação de energia entre elas de aproximadamente 1:4. Os feixes fortes e fracos que compõem o par são separados por 90 metros na direção transversal da trilha e por ~2,5 quilômetros na direção longitudinal. Quando o satélite viaja ao longo da coordenada + x (para frente), os feixes direitos (R) são os mais fortes e estão associados às trilhas no terreno (Ground track – Gt ) 1R, 2R e 3R, conseqüentemente, os feixes esquerdos (L) são os mais fracos (Gt1L, Gt2L e Gt3L), conforme pode ser visto na Figura 4b. Com a passagem do satélite na coordenada -x (para trás), o feixe esquerdo (L) passa a ser o mais forte. (NEUMANN *et al.* 2020).

Figura 4- (a) Esquema com as grandezas envolvidas na altimetria a laser do ICESat-2 e (b) Diagrama esquemático de pegadas de laser do ICESat-2 no solo na orientação para a frente



Fonte: (adaptado de Neumann et al. 2020).

Embora o ICESat-2 seja uma missão subsequente do ICESat, ele difere do antecessor em sua dependência apenas da tecnologia de detector de 532 nm de comprimento de onda e detector de contagem de fótons. Esses dois recursos permitem a penetração da luz na subsuperfície e a alta resolução espacial necessária para a amostragem batimétrica (LI *et al.* 2019).

Dedicada à altimetria a laser global com foco em observações criosféricas, o mapeamento de solo, vegetação e estudos atmosféricos constituem objetivos secundários do ICESat-2, não havendo antes do seu lançamento uma abordagem específica para obter restituições batimétricas (BABBEL; PARRISH; MAGRUDER, 2021). No entanto, estudos de pré-lançamento do satélite identificaram o potencial para estimar batimetria em zonas costeiras voltadas para a ciência bentônica (FORFINSKI-SARKOZI; PARRISH, 2016; JASINSKI *et al.*, 2016). Posteriormente, Parrish *et al.* (2019) realizaram uma validação do altímetro ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) do ICESat-2, cujos resultados indicaram o grande potencial para mapeamento batimétrico. Também por meio da fótons-contagem do

ATLAS, Li *et al.* (2019) estudaram o potencial de gerar uma batimetria de alta resolução em escala global, desenvolvendo um algoritmo que foi validado no lago Mead, EUA. Baseado nesses resultados, outras análises revelaram a capacidade do ICESat-2 de fornecer dados de elevação como fonte potencial para batimetria com imagens de satélite (ALBRIGHT; GLENNIE, 2021; MA *et al.*, 2020; XU *et al.*, 2020).

Apesar dos resultados promissores, a maioria dessas pesquisas se restringiram à aplicação do produto ICESat-2/ATL03 em zonas costeiras rasas. Pesquisas outras são necessárias para desenvolver e quantificar o desempenho das restituições batimétricas a partir de imagens óticas auxiliadas por outros produtos fornecidos pelo ICESat-2. O presente trabalho explorou os dados de elevação de terreno do produto ICESat-2/ATL08 aplicando-os para calcular a batimetria de corpos d'água interiores.

## 2.2 TRABALHOS REALIZADOS EM RESERVATÓRIOS NO BRASIL

Alguns trabalhos importantes que envolvem a temática aqui abordada foram realizados em todo Brasil, Zhang *et al.* (2016) geraram Modelos Digitais de Elevação (MDEs) em 5 reservatórios localizados na bacia representativa de Madalena, no Estado do Ceará, a partir de dados de passagem única TanDEM-X adquiridos em modelos biestáticos. A validação dos dados com GPS de precisão (*DGPS-Differential Global Positioning System*) nas medições de campo indicou uma precisão de elevação absoluta de aproximadamente 1 m para os MDEs extraídos do TanDEM-X (TDX DEMs). Os MDEs extraídos dos dados TanDEM-X adquiridos em níveis baixos de água apresentaram vantagens significativas sobre os mapas batimétricos derivados do levantamento de campo. Assim, os autores concluíram que o método é superior a outras abordagens de mapeamento batimétrico existentes, considerando que os MDEs gerados a partir de dados TanDEM-X, obtidos em períodos de baixa vazão hídrica constituem uma fonte de dados útil e eficiente para extrair a batimetria de reservatório.

Nascimento e Ribeiro Neto (2017) efetuou a caracterização de reservatórios de abastecimento de água no Semiárido pernambucano fazendo uso da tecnologia LiDAR do projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D). O PE3D foi um projeto do Governo do Estado de Pernambuco que mapeou, durante os anos de 2014 e 2016, todo o território do Estado usando levantamento digital aéreo e perfilamento de relevo a laser (CIRILO *et al.*, 2015). Os produtos do PE3D foram aplicados pelo método dos autores de forma exitosa na Bacia do Rio Pajeú, abrangendo duas áreas: a identificação de pequenos reservatórios na Bacia do riacho Quixaba, onde foi possível detectar reservatórios com bacias hidráulicas menor que 1 hectare; e a estimativa da capacidade de armazenamento dos reservatórios pertencentes aos hidrossistemas

da Bacia do Rio Pajeú, que permitiu perceber os processos de sedimentação e avaliar a confiança e precisão do método aplicado.

Uma melhor compreensão acerca das mudanças ocorridas com a implantação do reservatório de Sobradinho no rio São Francisco se faz necessária, pois ressalta a importância dos trabalhos desenvolvidos com sensoriamento remoto na região. Nesse sentido, Martins *et al.* (2011) avaliou a alteração do regime de vazões no baixo curso do Rio São Francisco devido à implantação de Sobradinho. A regularização de vazões ao longo do trecho estudado pelos autores (da estação de Piranhas, em Alagoas, até a foz do oceano atlântico, com 197 km de extensão) ocorreu pela operação de vários complexos hidrelétricos instalados em série, cujas modificações mais significativas se deram a partir da operação das hidroelétricas de Três Marias (1952) e Sobradinho (1979), que têm as funções de geração de energia e controle de cheias. Também estudando o impacto hidrológico no rio São Francisco devido à construção de Sobradinho, Pereira *et al.* (2009) estimaram a evaporação líquida no lago de Sobradinho e calcularam a redução média anual das vazões a jusante do reservatório. O complexo de Sobradinho está posicionado a 748 km da foz, sendo o quarto colocado em potência instalada e o primeiro no quesito capacidade de acúmulo de água, conforme se observa na Tabela 2.

Tabela 2 - Características das barragens localizadas no Rio São Francisco

Complexo	Inauguração	Região fisiográfica	Potência instalada (MW)	Volume reservatório (m <sup>3</sup> )	
				Total	Útil
Três Marias	1952	Alto	396	19 bilhões	15 bilhões
Sobradinho	1979	Médio	1050	34 bilhões	28 bilhões
Luiz Gonzaga	1988	Sub-Médio	1500	10 bilhões	3 bilhões
Moxotó	1977	Sub-Médio	400	1,2 bilhões	180 milhões
Paulo Afonso I	1954	Sub-Médio	180		
Paulo Afonso II	1961	Sub-Médio	445	26 milhões	9,8 milhões
Paulo Afonso III	1971	Sub-Médio	864		
Paulo Afonso IV	1979	Sub-Médio	2460	127,5 milhões	29,5 milhões
Xingó	1994	Baixo	3000	3,8 bilhões	41 milhões

Fonte: (MARTINS. *et al.*, 2011; ANA, 2009).

Syvitski *et al.* (2005), Song *et al.* (2007), Stevaux, Martins e Meurer (2009), Zahar, Ghorbel e Albergel (2008) abordam as mudanças quali-quantitativas da água e da sazonalidade dos eventos de vazões devido aos impactos da construção de barragens em um rio. Os efeitos diretos a jusante dos reservatórios são a redução do número de espécies de peixes e invertebrados, redução da transposição de sedimentos e nutrientes na planície de inundação, impedimentos à navegação, alterações nos processos biofísicos dos estuários, redução da

recarga subterrânea e comprometimento da disponibilidade hídrica para os múltiplos usos. Mudanças no escoamento superficial afetam o agente de transporte da carga fluvial, promovem o desvio de águas superficiais, mudanças de volume de lagos interiores, desertificação, drenagem de terras úmidas, armazenamento de reservatórios de solo e desmatamento (VOROSMARTY; SAHAGIAN, 2000).

Com o uso das ferramentas de geoprocessamento, Lopes, Ribeiro Neto e Cirilo (2013) determinaram o MDT do reservatório de Sobradinho a partir de dados obtidos com levantamento batimétrico, onde foram avaliadas técnicas de interpolação espacial, sendo testado seis interpoladores e avaliados em função de estatísticas descritivas, erro médio, coeficiente de correlação e raiz do desvio médio quadrático - RMSD. Para a validação das superfícies interpoladas, foram separados 10% das amostras. Os interpoladores que apresentaram melhores desempenhos estatísticos foram a Rede Triangular Irregular Linear (RTIL) e o Spline Mitasova (SM). Para esses interpoladores, o coeficiente de correlação foi de 0,92 para o RTIL e 0,91 para o SM. Em relação ao RMSD, a superfície gerada a partir do RTIL obteve valor de 2,07 m enquanto a superfície obtida pelo interpolador SM apresentou valor de 2,16 m.

Modificações das condições naturais dos cursos d'água através da construção de barragens e conseqüentemente, a formação de lagos artificiais afeta diretamente os processos hidrossedimentológicos naturais, que reduzem a velocidade de fluxo e, assim, resultam na deposição gradual de sedimentos (VOROSMARTY; SAHAGIAN, 2000). A gradual e contínua deposição de sedimentos ao longo do tempo provoca o assoreamento do reservatório e reduz a capacidade de armazenamento, bem como a disponibilidade hídrica (ARAÚJO; GÜNTNER; BRONSTERT, 2006), podendo também reduzir a vida útil do reservatório e também causar problemas com a qualidade da água (HABETS *et al.*, 2018; ANDRADE *et al.*, 2007).

Com foco em avaliar a evolução do volume de armazenamento e taxas de sedimentação no reservatório de Sobradinho como importantes variáveis para um programa de gestão ambiental, Lopes, Ribeiro Neto e Cirilo (2015) realizaram a modelagem desses dois parâmetros por meio de técnicas de geoprocessamento. Foram georreferenciadas e digitalizadas 76 cartas topográficas com equidistância das curvas de nível de 2,5 m da década de 1970. Em seguida, foi gerado o banco de dados altimétrico do fundo do reservatório e determinado o MDE por meio do interpolador RTIL, mesmo método aplicado aos dados da batimetria. Utilizando as duas superfícies, batimétrica e topográfica, foi gerado o raster da diferença do relevo do reservatório entre os anos de 1978 e 2009. O volume de armazenamento com base nas cartas topográficas em 1978 foi de 34,11 km<sup>3</sup> (ANA, 2020) e o calculado em Lopes, Ribeiro Neto e

Cirilo (2015) foi de 34,62 km<sup>3</sup> considerando a cota de 392,5 metros. O valor atual baseado na batimetria considerando o interpolador RTIL foi de 31,29 km<sup>3</sup> (LOPES; RIBEIRO NETO; CIRILO, 2013),consequentemente, o volume de sedimento acumulado foi de 3,33 km<sup>3</sup>, correspondendo a uma taxa de sedimentação no período avaliado de 8,25%. Considerando a média de todos os interpoladores o valor médio geral da taxa de sedimentação foi de 7,47 %.

Um dos principais obstáculos do uso de técnicas de sensoriamento remoto para gerar um MDE em reservatórios é a presença de macrófitas (COELHO *et al.*, 2017), um problema abordado com sucesso por Zhang *et al.* (2018) que utilizaram uma série temporal de dois anos do satélite radar TerraSAR-X (TSX) para monitorar as áreas efetivas de superfície hídrica em nove reservatórios do Estado do Ceará no Nordeste do Brasil. As áreas de superfície hídrica dos lagos continham tanto as águas cobertas por vegetação quanto as águas calmas e abertas, sendo mapeadas através das imagens TSX com precisão maior que 77%. A partir dos padrões de mudança temporal e espacial das superfícies hídricas nos nove reservatórios ao longo de duas estações secas e chuvosas consecutivas, verificou-se que as mudanças na umidade do solo relacionadas à precipitação, topografia e densas copas de macrófitas são as principais fontes de erros na extração das superfícies hídricas. O estudo mostrou o grande potencial do sensoriamento remoto no monitoramento de superfícies hídricas de diferentes complexidades e cobertura de macrófitas.

Além da importância dos aspectos quantitativos trazidos pelo conhecimento da morfologia dos reservatórios, os aspectos qualitativos também precisam ser estudados, haja vista a existência de uma nova dinâmica biológica ocorrida com a formação de um lago artificial. Nesta lógica, Moura, Santos e Henry-Silva (2015) calcularam o volume total de água dos reservatórios de Santa Cruz (295 hm<sup>3</sup>) e Umari (114 hm<sup>3</sup>), localizados na região semiárida do Rio Grande do Norte, a partir de um levantamento batimétrico com o auxílio de um ecobatímetro acoplado ao DGPS, coletando dados por navegação em linhas perpendiculares às margens dos reservatórios, extraindo 35.971 pares de pontos em Santa Cruz e 26.575 em Umari. As curvas hipsométricas mostraram que em Umari há um aumento do volume de água a baixas profundidades, facilitando a entrada de luz e proporcionando maior suporte à produtividade biológica, em comparação com Santa Cruz.

Destacando a importância de aperfeiçoar uma metodologia de fácil aplicação para levantamento batimétrico, Lopes e Araújo (2019) propuseram um método simplificado utilizando sensoriamento remoto para atualização dos parâmetros morfológicos dos reservatórios. O reservatório Pentecoste (360 hm<sup>3</sup>) localizado no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil, foi estudado e os resultados foram comparados com o levantamento batimétrico

convencional. O assoreamento avaliado pelo método proposto foi quase duas vezes maior que o observado nas pesquisas convencionais. Os parâmetros morfológicos extraídos de ambos os métodos foram utilizados para avaliar o balanço hídrico a longo prazo do reservatório. Os resultados mostraram que a retirada divergiu 30%, enquanto o volume evaporado e a disponibilidade hídrica divergiram 10% entre os métodos. Os autores concluíram que nas condições da região semiárida brasileira, o método simplificado é suficiente para avaliar a disponibilidade hídrica de reservatórios afetados pelo assoreamento.

Focando os aspectos de celeridade e baixo custo, Alcântara *et al.* (2010) propuseram um método para estimar a batimetria de reservatórios hidrelétricos. A abordagem metodológica baseou-se na integração de dados topográficos históricos e extraídos de satélites (Shuttle Radar Topography Mission-SRTM e Landsat) para estimar as profundidades dentro do reservatório e restituir a batimetria do reservatório de Itumbiara. Como o trabalho envolveu um levantamento de campo que coletou a profundidade do lago em 100 estações de medições, foi possível avaliar os resultados do método com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) = 0,98 e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) = 3,78 m. Os autores concluíram que o método proposto pode fornecer uma alternativa simples e rápida a métodos mais intensivos de dados, recomendando-o para desenvolvimento de mapas batimétricos em reservatórios de hidrelétricas.

Ainda nessa linha, buscando a praticidade de métodos para atualização de curva cota-área, Abreu e Maillard (2014) determinaram a curva “cota x área” do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Três Marias, localizado no alto rio São Francisco, Estado de Minas Gerais, onde apresentaram um método que combina a altimetria radar (Envisat e Saral) e imagens (Landsat), ambos gerados por satélite, visando estimar variação de nível e área e criar um modelo de curva “Cota x Área” obtido totalmente através de sensoriamento remoto, no qual um valor possa ser derivado do outro (nível pela área da superfície do lago ou área pelo nível de água). Os resultados do modelo a partir das regressões realizadas mostraram-se exitosos quando comparados com os dados medidos *in situ* pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

Também fazendo uso de imagens óticas, Andrade *et al.* (2019) apresentaram uma nova abordagem para estimar a batimetria do reservatório de Sobradinho e extrair sua curva cota-volume. A metodologia tem como base o nível da água e a frequência de água aberta no reservatório. Essa base de dado corresponde a imagens mensais, classificadas em água/não-água/sem-dado que foram elaboradas a partir de três milhões de imagens da série Landsat com resolução espacial de 30m e 32 anos de dados (PEKEL *et al.*, 2016). Isto é, observa-se que a curva da frequência acumulada do nível da água em ordem decrescente (curva de permanência)

e a curva da frequência de inundação versus a cota de fundo do reservatório são idênticas. Assim, a partir de um mapa de frequência de inundação e a série temporal do nível da água, ambos os dados para o mesmo período, a cota de fundo pode ser estimada em regiões onde a frequência de inundação é inferior a 100%. Os resultados indicaram uma boa concordância entre a curva cota-volume estimada e observada.

No Semiárido brasileiro, historicamente, as administrações públicas procuraram resolver o problema da escassez hídrica através da construção de reservatórios (MOLLE; CADIER, 1992). Toledo, Araújo e Almeida (2014) estudaram o impacto da alta densidade de reservatórios na Bacia do Reservatório de Orós (BRO), onde mapearam e avaliaram a distribuição espacial dos 25.000 km<sup>2</sup> da BRO. Utilizando imagens do LANDSAT 5 do final da estação chuvosa de 2011 da BRO, a técnica de sensoriamento remoto permitiu a identificação de 6002 polígonos, o que correspondeu a apenas 4717 reservatórios (implicando em uma identificação errônea de 21%). Analisando a área de superfície dos reservatórios estratégicos, os resultados mostraram que a estimativa da área de superfície (de sensoriamento remoto com ajuste manual de polígonos) rendeu valores muito próximos aos das áreas monitoradas no local, com  $R^2 = 0,99$  e índice de diferença normalizado de área-NDAI (Índice resultante da diferença entre áreas de superfície hídrica medidas e estimadas por sensoriamento remoto) variando de  $-0,02$  a  $+0,09$ . Foi constatado na pesquisa duas grandes falhas: a identificação errônea das sombras como reservatórios e a incapacidade de identificar a presença de macrófitas, que afetaram negativamente o número e a área de superfície dos reservatórios-alvo. Apesar desses problemas, o sensoriamento remoto mostrou-se uma técnica de grande potencial no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos em regiões com densas redes de reservatórios.

Também estudando a densidade de reservatórios no nordeste brasileiro, Pereira *et al.* (2019) conseguiram avaliar a geometria e o volume de 312 pequenos reservatórios usando atributos de terreno e forma adquiridos por sensoriamento remoto. Modelos de regressão e classificação de dados foram usados para prever os volumes, em diferentes estágios da água, de 312 reservatórios com informações topográficas disponíveis. A função de potência usada para descrever as formas do reservatório tendeu a superestimar os volumes, sendo proposto no estudo, uma equação de forma modificada. Dentre os métodos testados, quatro foram recomendados com base no desempenho e na simplicidade, para os quais os erros percentuais absolutos foram reduzidos em um terço em comparação com o método tradicional. Apesar do resultado positivo dessas iniciativas, persiste a necessidade de melhorias. Na região em foco, por exemplo, a ocorrência simultânea de céu nublado e de processos hidrológicos relevantes durante a breve estação chuvosa levanta desafios para as técnicas de sensoriamento remoto.

Ainda no Nordeste do Brasil, Ribeiro Neto *et al.* (2021) avaliou a variação de nível de água em 20 pequenos reservatórios utilizando a altimetria radar dos satélites Envisat, SARAL, Sentinel-3A/-3B, Jason-2/-3. O Sentinel-3B superou os outros altímetros com um RMSE máximo de 0,21 m. A partir de uma análise em sete reservatórios com as curvas CAV atualizadas foi possível comparar o volume obtido pelos dados de nível do satélite com o volume obtido dos dados *in situ*, utilizando a mesma curva CAV como referencial. Os resultados mostraram que, no caso de pequenos reservatórios, a precisão das séries temporais de nível de água derivadas da altimetria de satélite é regida principalmente pela variabilidade sazonal do armazenamento de água especialmente no final do período de seca 2012-2017.

## 2.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

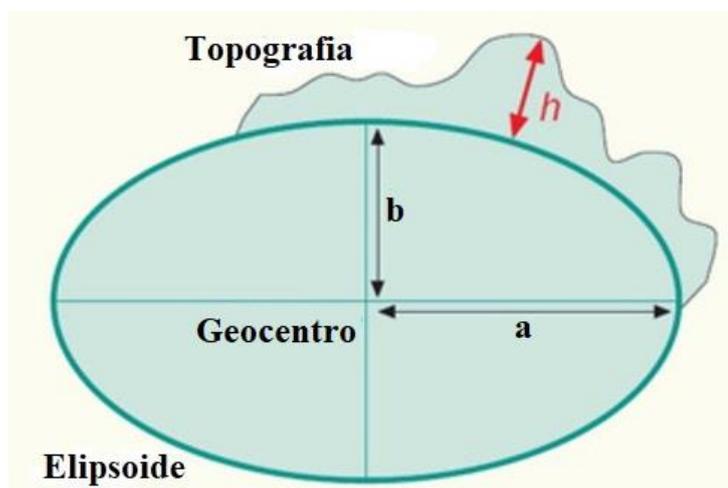
Nesta seção são apresentadas informações conceituais de sistemas geodésicos, significado de altitude, conversões e correções. Posteriormente, discorre-se sobre a interpolação aplicada às batimetrias obtidas por este estudo. A partir desses conceitos, podem ser aperfeiçoadas as avaliações e aplicações dos dados da forma mais adequada à melhoria dos resultados.

### 2.3.1 Referências Verticais

O entendimento dessas referências será importante para estabelecer a comparação entre os dados *in situ* (obtidos das réguas dos reservatórios) e do ICESat-2 (Obtidos do satélite). A altitude elipsoidal (**h**) utilizada pelo ICESat-2, conhecida também como geométrica ou geodésica representa a separação entre a superfície física e a superfície elipsoidal ao longo da normal (

Figura 5). Pode ser calculada a partir das coordenadas geodésicas convenientemente referidas ao elipsoide de referência, obtidas por meio de receptores GNSS (Global Navigation Satellite Systems)(FREITAS; BLITZKOW, 1999). No entanto, por não possuir uma representação adequada dos processos físicos, uma superfície equipotencial como um lago, pode ter diferentes valores de altitude elipsoidal em seus pontos; da mesma forma, pode-se encontrar superfícies com diferentes potenciais, mas com o mesmo valor de altitude elipsoidal (MOREIRA, 2016). Por isso a obtenção de valores de altitude com significado físico é fundamental para o correto mapeamento da superfície terrestre, e aplicações de altitudes puramente geométricas em obras de engenharia devem ser vistas com restrições(FREITAS; BLITZKOW, 1999).

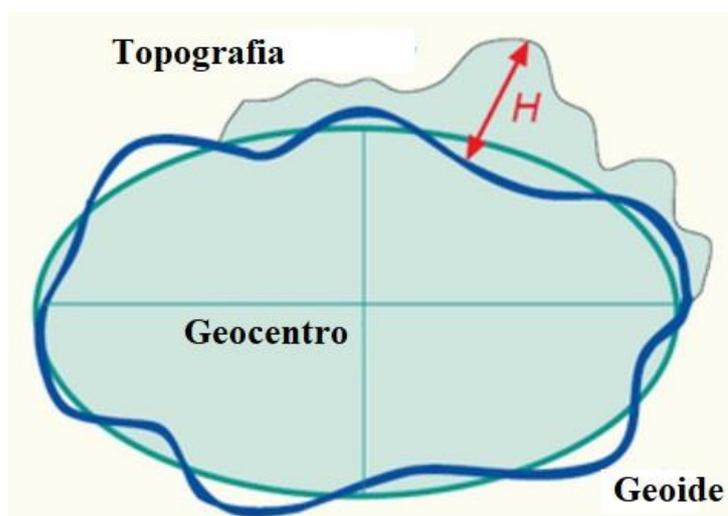
Figura 5- Altura geométrica em relação a um elipsoide de referência, onde os semi-eixos 'a' e 'b' são parâmetros do elipsoide



Fonte: (RUBIRA; MELO; FONSECA, 2016).

A adoção de um sistema de altitudes com significado físico é comum no Brasil e na maioria dos países. Tendo como referencial o geoide, essas altitudes são chamadas de ortométricas (**H**), sendo definidas pela distância ao longo da vertical do ponto da superfície terrestre até a superfície geoidal. O geoide é, por sua vez, definido como um corpo cuja superfície é equipotencial, que melhor se ajusta ao nível médio não perturbado dos mares. O nível médio dos mares é escolhido como uma superfície de referência que melhor define a forma da Terra por ser uma superfície de equilíbrio hidrostático e estar sempre procurando adequar-se às forças atuantes sobre o nosso planeta, além da maior parte da superfície terrestre ser coberta pelos oceanos(MOREIRA, 2016).

Figura 6- Altura ortométrica em relação a um geoide de referência

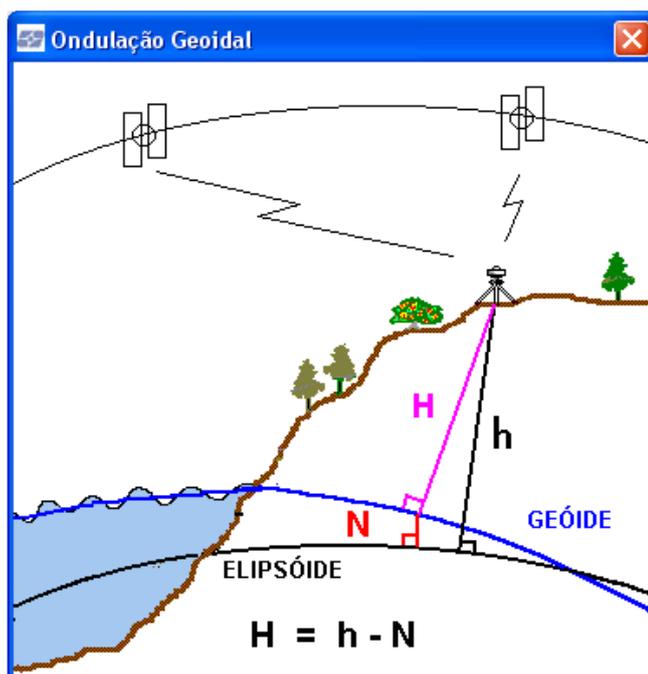


Fonte: : (RUBIRA; MELO; FONSECA, 2016).

Diante da necessidade de dar um caráter físico as altitudes elipsoidais, diversos modelos do geopotencial foram desenvolvidos com o avanço da geodésia. Os primeiros possuíam pequeno número de coeficientes (grau), em função da pouca quantidade de dados gravitacionais do planeta. Um dos modelos mais usados foi o EGM96 (Earth Gravitational Model of 1996), que possui ordem 360. Em abril de 2008, foi publicado o modelo EGM2008, de grau 2190, ou seja, mais refinado com maior e melhor resolução. Segundo (PAVLIS *et al.*, 2012), o EGM2008 começou a ser desenvolvido no ano 2000, quando a Agência Nacional de Inteligência Geoespacial (National Geospatial-Intelligence Agency - NGA) decidiu desenvolver um modelo para substituir o EGM96 e que suportasse uma grande quantidade de dados gravitacionais advindos da missão gravitacional dos satélites GRACE, que seria lançado em 2002. Sua versão final trouxe informações da anomalia de gravidade global com resolução de 5' x 5'. Em áreas cobertas com dados gravimétricos de alta qualidade, as discrepâncias entre alturas geoidais calculadas com o EGM2008 e aquelas derivadas de dados GNSS/Nivelamento independentes são da ordem de  $\pm 5$  a  $\pm 10$  cm. Nesse sentido, Moreira (2010) testou a eficiência do uso de modelos do geopotencial na região Amazônica, em que a aplicação do modelo EGM2008 permitiu representar, de forma apropriada, informações de níveis de água na região de estudo e forneceu bons indícios de qualidade nas comparações em regiões com superfícies de água equipotenciais ou de baixíssima declividade.

Portanto, considerando que os dados do ICESat-2 foram aplicados em uma superfície equipotencial de um lago grande, adotou-se nesse trabalho o modelo do geopotencial EGM2008 para conversão dos dados *in situ* e do ICESat-2 no reservatório de Sobradinho. Para os dados *in situ* serem projetados ao geoide de referência fez-se necessário adicionar 1,7743m. Em relação aos dados do ICESat-2, a Figura 7 ilustra como foi obtido a altura ortométrica (**H**) a partir do conhecimento das alturas elipsoidal (**h**) obtida pelo ICESat-2, e da diferença entre as superfícies do geoide e do elipsoide, isto é, a altura (ou ondulação) geoidal (**N**) obtida pelo modelo EGM2008 específico para o lago de Sobradinho(ver item 3.2.)

Figura 7- Referência das altitudes



Fonte: Modelo MAPGEO2010.

### 2.3.2 Interpolação

Os efeitos dos métodos de interpolação na precisão das batimetrias interpoladas foram estudados por Glenn *et al.* (2016) que testou quatro interpoladores (Krigagem Ordinária, Triangulação Delaunay, Linear Simples e vizinho natural) e concluiu que a precisão do MDT não é influenciada pelo método de interpolação específico, mas sim pelo sistema de coordenadas para o qual o método de interpolação é aplicado. A mesma percepção teve Bobach *et al.* (2009) que propôs uma estrutura de extrapolação de dados utilizando o interpolador vizinho natural em uma abordagem específica (pontos fantasma dinâmicos). O Vizinho Natural com coordenadas cartesianas foi um dos sete métodos de interpolação que apresentou melhor desempenho no trabalho de Merwade, Maidment e Goff (2006) para interpolar a batimetria do canal do rio Brazos (Texas-EUA).

A interpolação de vizinhos naturais foi introduzida pela primeira vez por Sibson (1981) e posteriormente desenvolvida por Owen (1992) e Watson (1994). O interpolador usa pesos obtidos com áreas proporcionais dos polígonos de Voronoi (Thiessen) vizinhos ao ponto não amostrado em seus algoritmos, criando uma superfície contínua sem picos, depressões, cristas ou vales. Este método fornece uma interpolação suave mesmo com triângulos mal formados na malha de fundo (OWEN; SAIGAL, 2000). Para entender melhor este conceito, considere um conjunto de polígonos de Thiessen para alguns pontos com medidas de elevação (Figura 8a). Se um ponto não amostral ( $z^*$ ) for adicionado ao conjunto, os polígonos de Thiessen para

pontos ( $z_1, z_2, \dots, z_N$ ) ao redor de  $z^*$  serão reduzidos (Figura 8b). Se  $p_i$  e  $q_i$  são as áreas dos polígonos de Thiessen de um ponto amostral ( $z_i$ ) antes e depois da inserção de  $z^*$ , respectivamente, então o peso para o ponto amostral  $z_i$  é dado pela Equação 9 (MERWADE; MAIDMENT; GOFF, 2006).

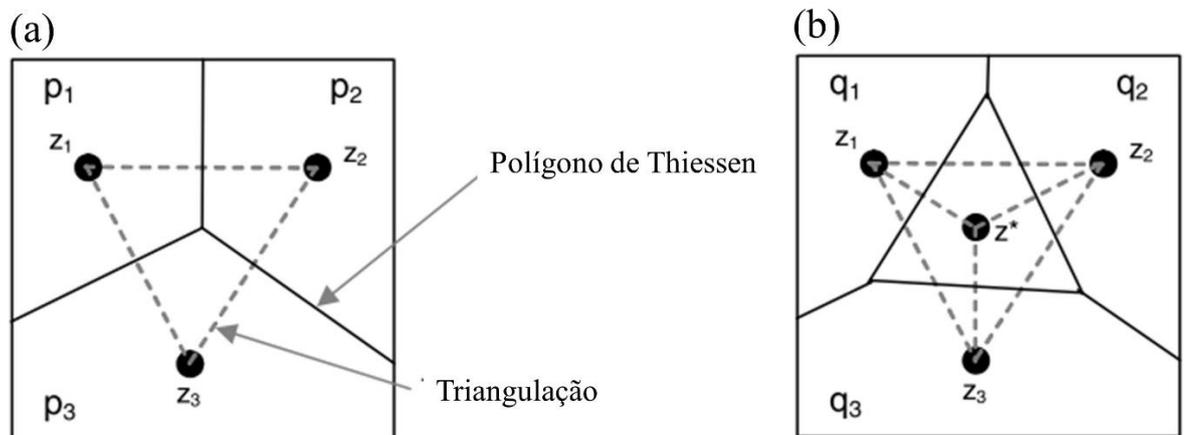
$$\lambda_i = \frac{p_i - q_i}{p_i} \quad (9)$$

A estimativa em  $z^*$  para o ponto não amostral é então calculado usando a Equação 10.

$$Z^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_i \quad (10)$$

onde  $z_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) são as elevações observadas em  $N$  pontos

Figura 8-Esquema do método de interpolação de distância e área ponderada.  $z^*$  é o ponto não amostrado e  $z_i$  ( $i = 1-3$ ) são pontos amostrais. (a) Rede poligonal de Thiessen. Os polígonos de Thiessen são construídos conectando as mediatrizes perpendiculares da rede irregular triangulada; (d) Polígonos de Thiessen após a inserção de  $z^*$



Fonte: (MERWADE; MAIDMENT; GOFF, 2006).

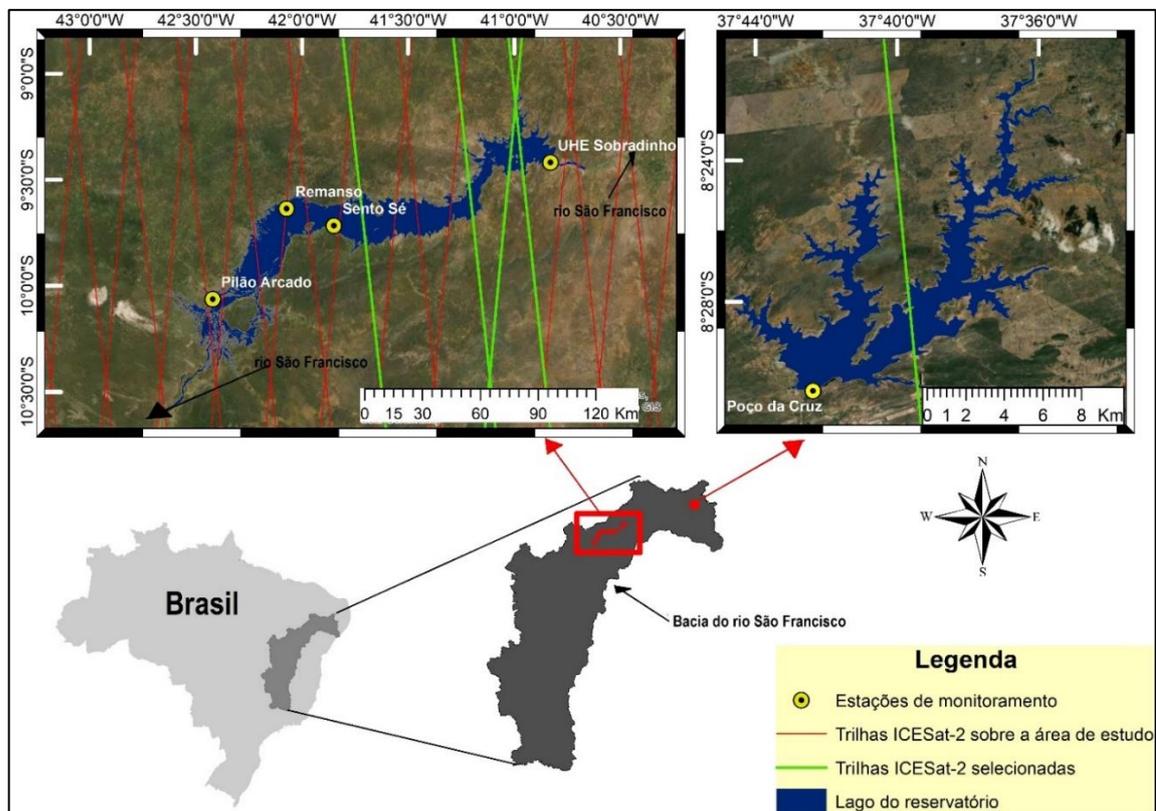
### 3 METODOLOGIA

Neste estudo, buscando o efetivo uso do sensoriamento remoto foi realizada a reconstituição batimétrica de reservatórios de grande e médio porte a partir de Arsen *et al.* (2014).

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A metodologia desenvolvida será aplicada no Nordeste do Brasil através dos reservatórios de Sobradinho e Poço da Cruz com volumes de 34,11 km<sup>3</sup> (CHESF, 2020), e 0,484 km<sup>3</sup> (ANA, 2020), respectivamente. Os reservatórios foram escolhidos por suas características variáveis, incluindo tamanho, geometria e morfologia, bem como por sua capacidade de fornecer uma série histórica de nível de água e batimetria atualizada para avaliar a técnica utilizada. As estações e trilhas do ICESat-2 sobre os lagos são mostrados na Figura 9, onde as trilhas verdes foram selecionadas para representar o perfil do terreno. Em Sobradinho a metodologia foi aplicada com o uso de duas fontes altimétricas (Dados de nível *in situ* e altimetria do ICESat-2). A partir dos resultados obtidos, foi aplicada a metodologia no reservatório de Poço da Cruz, onde se utilizaram as características do ICESat-2 para gerar a sua batimetria.

Figura 9- Localização dos lagos e trilhas do ICESat-2



Fonte: O autor (2022).

Situado na calha do médio rio São Francisco, o reservatório de Sobradinho teve o início de sua construção em 1973, mas o barramento propriamente dito começou em 1976, atingindo capacidade máxima em 1979. Construído prioritariamente para fins hidrelétricos, hoje serve a usos múltiplos. A capacidade total da barragem, formando um lago de 4.214,31 km<sup>2</sup> com 280 km de comprimento e largura variando de 5 a 50 km, pode armazenar 34 bilhões de m<sup>3</sup> de água. As estações de Pilão Arcado, Remanso, Sento Sé e Sobradinho são responsáveis pelo monitoramento hidrológico ao longo do maior lago artificial do país, possuindo registros diários de nível observado relativos ao período de 1980 até os dias atuais. Com nível observado na barragem variando de 380,76 m a 393,47 m, a Usina Hidrelétrica de Sobradinho contribui para o Sistema CHESF com uma potência instalada de 1.050 MW.

A região apresenta um clima tipicamente semiárido, topografia irregular e precipitação total que ocorrem de novembro a abril com contrastes marcantes quanto à sua distribuição distinta, apresentando valores máximos de 800 mm nos morros que fazem fronteira com o estado do Ceará e valores abaixo de 400 mm na região Petrolina-Juazeiro (CORREIA; SILVA DIAS; SILVA ARAGÃO, 2006). A temperatura do ar média é de 27°C e evaporação potencial anual em torno de 3.000 mm. A cobertura vegetal predominante na região do entorno é a caatinga juntamente com áreas de agricultura irrigada (LOPES; RIBEIRO NETO; CIRILO, 2015).

O reservatório Poço da Cruz, cujo nome oficial é Engenheiro Francisco Saboia, está situado no município de Ibimirim, na bacia hidrográfica do rio Moxotó, que possui 89,2% da sua área de drenagem (9.744,01 km<sup>2</sup>) pertencente ao Estado de Pernambuco, estendendo-se na sua porção sudeste ao estado de Alagoas até o rio São Francisco. Poço da Cruz teve a sua construção concluída pelo Departamento Nacional de Obras contra Seca (DNOCS) em 1957 e integra um dos reservatórios abastecidos pelo eixo norte do Projeto de Integração do São Francisco-PISF. Com capacidade máxima de 483.72 hm<sup>3</sup>, o reservatório possui seu nível monitorado na barragem, apresentando variação de 398,29m a 435,96m relativa ao período de 1994 até 2020, porém com muitas falhas na série histórica. A irrigação é sua principal finalidade de uso, sobretudo a agricultura praticada no Perímetro Irrigado do Moxotó (PIMOX). Situado a jusante do reservatório, o PIMOX abrange uma área total de 12.395,96 ha, estendendo-se por cerca de 40 km, de um e de outro lado do Rio Moxotó, até chegar nas proximidades da cidade de Inajá. O clima da região, segundo a classificação de Thornthwaite, é semiárido megatérmico, com excesso de água nulo e pequena concentração térmica estival. A precipitação média anual é de 418 mm, com grande variabilidade interanual (valores extremos 156 e 814 mm). A

temperatura média anual é de 25°C alcançando, no mês mais quente do ano, uma média de 27,8°C. Os solos predominantes são de origem sedimentar (aluviões)(DNOCS, 2020).

### 3.2 DADOS UTILIZADOS

A geração dos resultados das batimetrias neste estudo baseou-se em informações de três fontes de dados: Imagens óticas (Landsat-5, -8 e Sentinel-2), nível de água das estações e perfil do terreno do ICESat-2. As imagens óticas foram obtidas do banco de dados USGS Earth Explorer para o período 1988–2019 armazenados no GEE. Foi priorizado o uso das imagens Landsat devido a existência de uma série de dados extensa com uma resolução espacial adequada para o trabalho proposto. Por sua vez, as imagens Sentinel possuem uma resolução espacial melhor, no entanto mais recentes, tendo uma série temporal curta de dados. Todas as cenas selecionadas possuem correção de terreno padrão (nível 1T). Projeção de imagem é a zona UTM 24S com as características dos satélites utilizados neste estudo mostradas na Tabela 3

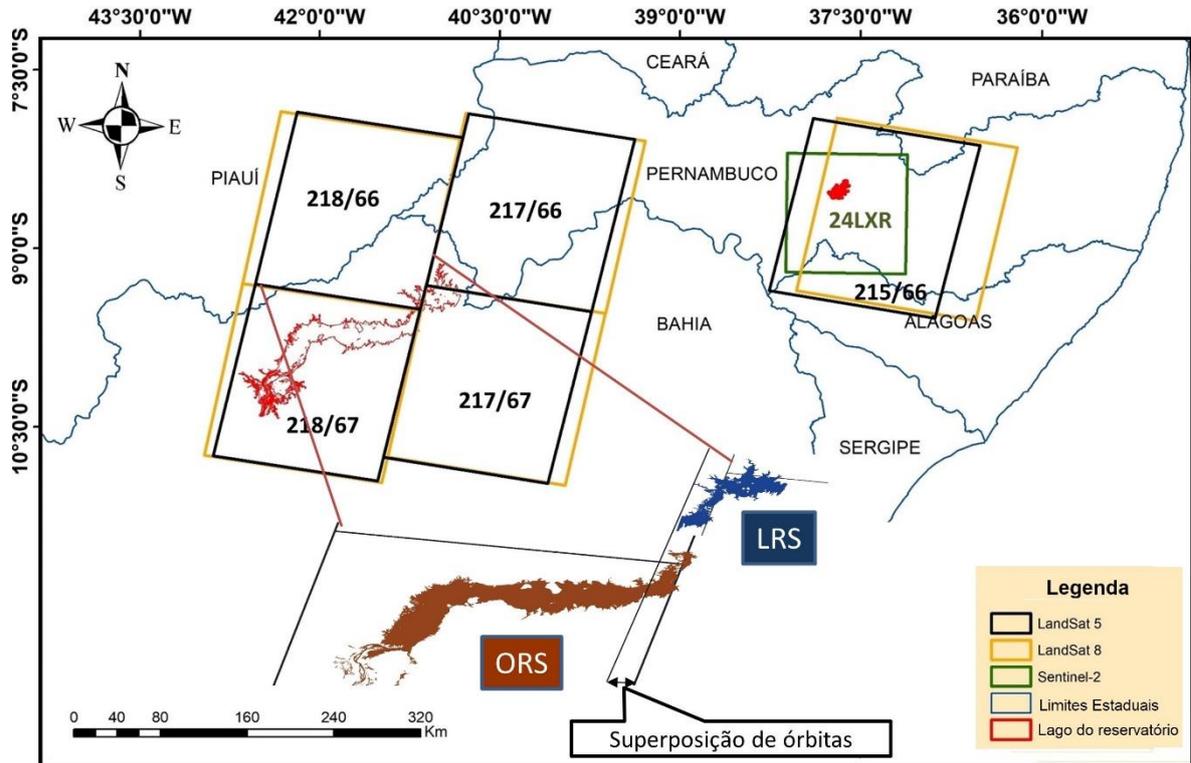
Tabela 3- Especificações dos Satélites Landsat TM, OLI e Sentinel-2

Satélite	Sensor	Operação	Resolução Espacial (m)	Período de revisita (dias)	Comprimento de onda (µm)
Landsat-5	TM	1984-2011	30	16	Banda 1: 0.45–0.52 Banda 2: 0.52–0.60 Banda 3: 0.63–0.69 Banda 4: 0.76–0.90 Banda 5: 1.55–1.75 Banda 7: 2.08–2.35
Landsat-8	OLI	2013-dias atuais	30	16	Banda 1: 0.435–0.451 Banda 2: 0.452–0.512 Banda 3: 0.533–0.590 Banda 4: 0.636–0.673 Banda 5: 0.851–0.879
Sentinel-2	MSI	2015-dias atuais	10	5 (equador) 2-3(média latitude)	Banda 2: 0.490–0.463 Banda 3: 0.560–0.595 Banda 4: 0.665–0.695 Banda 8: 0.842–0.957

Fonte: O autor (2022).

As localizações das órbitas e os pontos das imagens utilizadas são mostrados na Figura 10. Duas órbitas cobrem porções diferentes do grande reservatório de Sobradinho (217 e 218) que possuem datas de aquisição distintas, exigindo a divisão do lago em duas partes. A parte oriental (Leste do Reservatório de Sobradinho -LRS) compreende as imagens obtidas pela órbita 217 (pontos 66 e 67), e a parte ocidental (Oeste do Reservatório de Sobradinho -ORS) corresponde à órbita 218 (pontos 66 e 67).

Figura 10-Órbitas de Satélites usadas no estudo



Fonte: O autor (2022).

Os dados diários de nível nos reservatórios de Sobradinho e Poço da Cruz, foram obtidos da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) e da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), respectivamente. Para Sobradinho, os dados das estações de nível utilizadas compreenderam o período 1980-2020.

O presente trabalho utilizou o conjunto de dados ATL08 adquirido pelo ATLAS/ICESat-2 L3A Land and Vegetation Height, V3, contendo os dados de elevação sobre o elipsoide WGS84 para as superfícies de solo e cobertura vegetal, processados em segmentos de dados fixos de 100 m com mais de 100 fótons de sinal (NEUMANN *et al.*, 2020). Os dados foram obtidos da NASA através da plataforma de ciberinfraestrutura Openaltimetry (<https://openaltimetry.org>).

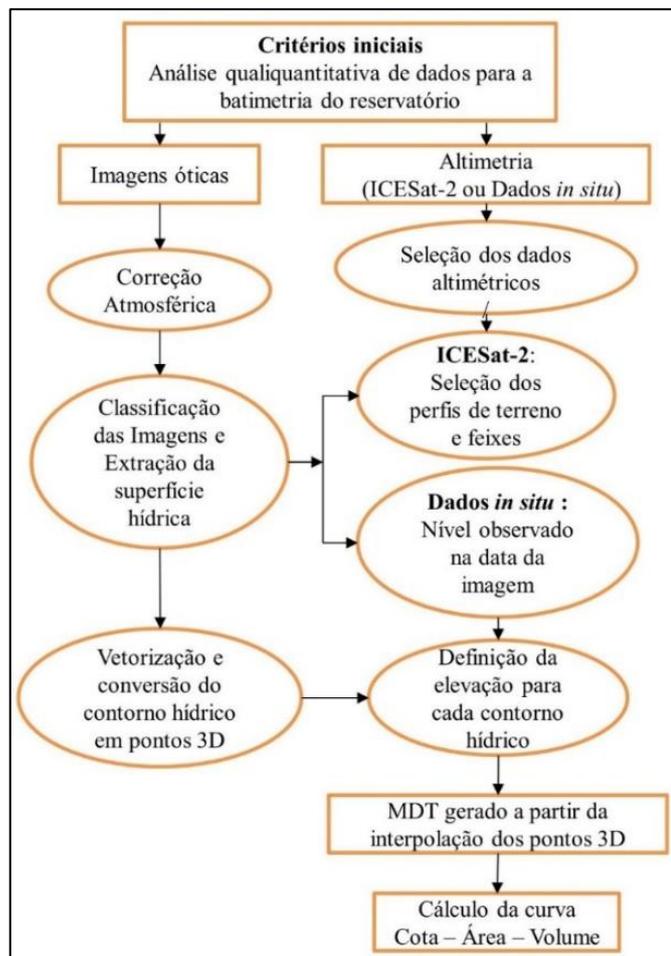
A avaliação dos dados do satélite ICESat-2 requereu a utilização do modelo geopotencial EGM2008, no formato de dados raster, daqui por diante denominado raster da ondulação geoidal. O modelo foi calculado para converter os dados altimétricos do elipsoide WGS84 para o geóide EGM2008 ao longo do lago de Sobradinho. O levantamento do modelo ocorreu em novembro de 2018 e foi disponibilizado pelo projeto Dinâmica Fluvial apoiado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em parceria com o Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Tal projeto permitiu o aprimoramento de tecnologias de sensoriamento remoto aplicadas ao monitoramento hidrológico, apresentando um novo cenário para a área de hidrometria, onde

dados satelitais pudessem suprir a carência de informações e melhorar a correspondente qualidade, custos associados e tempo de obtenção de dados básicos para subsidiar estudos hidrológicos(CPRM, 2007).

### 3.3 MÉTODO

O método proposto acopla dados altimétricos e imagens ópticas para o cálculo da batimetria, utilizando o fluxograma resumo mostrado na Figura 11, que é composto por quatro etapas: 1) análise qualitativa e quantitativa dos dados e definição das fontes altimétricas; 2) realizar a correção atmosférica para amenizar os principais efeitos atmosféricos da radiação refletida das imagens ópticas; 3) processamento das imagens ópticas para extração das superfícies hídras visando a obtenção de um conjunto de pontos 3D que representam os contornos da batimetria; e 4) estabelecer a relação elevação-área combinando a área da imagem com os valores de elevação das fontes altimétricas selecionadas na etapa 1. Esta informação foi então usada para identificar e atribuir valores de elevação aos contornos e gerar o MDT a partir da interpolação dos pontos 3D, para caracterização da geometria e cálculo da curva CAV.

Figura 11- Fluxograma da metodologia de cálculo batimétrico



Fonte: O autor (2022).

Os critérios iniciais verificam até que ponto o volume operacional pode ser representado de acordo com a disponibilidade e qualidade dos dados existentes. O método considera a possibilidade de utilizar duas fontes de dados altimétricos: o perfil do terreno levantado pelo sensor LiDAR ICESat-2 / ATLAS e a elevação *in situ* da água. O objetivo é converter a combinação de dados de elevação e superfícies hídrica obtidas a partir de imagens óticas em contornos hídricos com altimetria.

### 3.3.1 Máscara da Superfície hídrica

Para extrair as superfícies de água das imagens foram necessárias várias etapas. A primeira delas, a correção atmosférica, visa minimizar os principais efeitos observados nas imagens orbitais multiespectrais que são: a diminuição da faixa de valores digitais registrados pelo sensor; e a redução do contraste entre superfícies e alteração do brilho de cada ponto da imagem. Os gases, principalmente vapor de água, oxigênio, ozônio, dióxido de carbono e os aerossóis, influenciam diretamente nos referidos efeitos, pois refletem, refratam, absorvem e espalham a radiação refletida pelo solo desde a atmosfera até fora da mesma (SONG et al., 2001).

A correção atmosférica torna-se necessária, principalmente, com trabalhos que utilizaram imagens de diferentes sensores, em diferentes datas ou épocas do ano, transformando na imagem, os Números Digitais (ND) para reflectância na superfície. O processo consiste em duas etapas: conversão dos valores de ND para radiância espectral ( $L\lambda_i$ ) e, em seguida, para reflectância. Para essa transformação foi utilizando o software de geoprocessamento gratuito Quantum Gis (QGIS) versão 2.18.24 através dos seus complementos “RS&GIS versão 17” (para as imagens Landsat-5 e 8) e “Semi-Automatic Classification Plugin-SCP” para a imagem Sentinel-2. Os modelos existentes usam parâmetros associados a cada sensor.

a) Em imagens Landsat 5

As imagens foram processadas por meio da equação 1, proposta por (MARKHAM; BARKER, 1987),

$$L\lambda_i = \frac{ai + (bi - ai)}{255} \times ND \quad (1)$$

onde:  $L\lambda_i$  ( $Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ) é a radiância espectral de cada Banda; a e b são radiâncias espectrais mínima e máxima ( $Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ), obtidas de acordo com Chander, Markham e Barsi (2007); ND é a intensidade do pixel (número inteiro entre 0 e 255); e i representa cada Banda do TM-Landsat 5.

A reflectância ( $\rho_{\lambda i}$ ) corresponde à razão entre o fluxo de radiação refletida por cada Banda e o fluxo de radiação incidente, e foi obtida conforme (SILVA; LOPES; AZEVEDO, 2005) e (BEZERRA; SILVA; BEZERRA, 2011), pela equação 2.

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} * \cos \theta_{sz} * d_r} \quad (2)$$

onde:  $L_{\lambda i}$  ( $Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ) é a radiância espectral de cada Banda;  $k_{\lambda i}$  ( $Wm^{-2} \mu m^{-1}$ ) é a irradiância solar espectral de cada Banda, no topo da atmosfera, obtida de acordo com Chander e Markham (2003);  $\theta_{sz}$  é o ângulo zenital solar; e  $d_r$  é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol ( $r_0$ ) e a distância Terra-Sol ( $r$ ), em dado dia do ano.

b) Em imagens Landsat 8

O processamento das imagens Landsat 8 OLI se deu em conformidade com Silva *et al.* (2016): para converter os valores quantizados e calibrados (ND) do sistema sensor Landsat 8 OLI para reflectância espectral, utilizaram-se coeficientes radiométricos disponibilizados no arquivo de metadados das imagens. Maiores detalhes podem ser obtidos em USGS (2019).

A reflectância planetária no topo da atmosfera ( $\rho'\lambda$ ) é calculada a partir da Equação 3.

$$\rho'\lambda = M\rho \times Qcal + A\rho \quad (3)$$

onde  $\rho'\lambda$  não apresenta correção para o ângulo solar.  $M\rho$  corresponde ao fator multiplicativo de reescalonamento para cada Banda (disponível nos metadados da imagem),  $Qcal$  o número digital para cada pixel e  $A\rho$  corresponde ao fator aditivo de reescalonamento para cada Banda (disponível nos metadados da imagem). Para corrigir a reflectância em função do ângulo solar e da distância astronômica Terra-Sol ( $d$ ) foi usada a Equação 4.

$$\rho\lambda = \frac{\rho'\lambda}{\cos(\theta_{sz}) \frac{1}{d^2}} = \frac{\rho'\lambda}{\sin(\theta_{se}) \frac{1}{d^2}} \quad (4)$$

onde  $\rho\lambda$  corresponde a reflectância planetária no topo da atmosfera corrigida,  $\theta_{se}$  corresponde ao ângulo de elevação solar (disponível nos metadados da imagem) e  $\theta_{sz}$  corresponde a ângulo zenital solar local (calculado a partir de  $\theta_{sz} = 90^\circ - \theta_{se}$ ).

c) Em imagens Sentinel 2

Para transformação dos dados Sentinel-2 para reflectância no topo da atmosfera os dados foram divididos por 10.000, conforme especificado no guia técnico do Sentinel-2(ESA, 2020).

A reflectância de superfície foi obtida aplicando o método de correção atmosférica DOS (dark-object subtraction) (CHAVEZ, 1988) em cada Banda espectral. Assume-se que o pixel

escuro possui reflectância zero para todas as Bandas espectrais e que valores diferentes de zero são devido ao efeito de espalhamento da atmosfera.

Concluída as correções atmosféricas, as máscaras da superfície hídrica foram obtidas através da classificação dos pixels de água para cada um dos conjuntos de dados das imagens óticas. Aplicaram-se os índices de diferença normalizados que se ajustam aos reservatórios, utilizando os limiares listados na Tabela 4, que foram definidos, no caso de Sobradinho, testando diferentes valores e comparando as estimativas de superfície das imagens e as curvas CAV *in situ*. Para Poço da Cruz, os valores foram definidos em outro estudo que investigou as incertezas envolvidas no uso de limiares para obter a extensão da água no reservatório (REIS *et al.*, 2021). Devido aos resultados promissores do NDWI em Sobradinho, a análise e comparação de outros índices no reservatório não foram o foco da presente pesquisa, tal como ocorreu com os estudos realizados por Reis *et al.* (2021) em Poço da Cruz. Isso explica a aplicação de diferentes índices nos reservatórios, mas não elide o aprimoramento desta etapa em novos estudos.

Tabela 4-Índices aplicados na extração da superfície hídrica dos lagos

Índice	Reservatório	Equação	Satélite	Limiares
NDWI (MCFEETERS, 1996)	Sobradinho	$(\text{GREEN}-\text{NIR}) / (\text{GREEN} + \text{NIR})$	LandSat-5 LandSat-8	>0,3 >0,1
MNDWI (XU, 2006)	Poço da Cruz	$(\text{GREEN}-\text{IR}) / (\text{GREEN} + \text{IR})$	LandSat-5 LandSat-8 Sentinel-2	>-0,31 >-0,37 >-0,21

Fonte: O autor (2022).

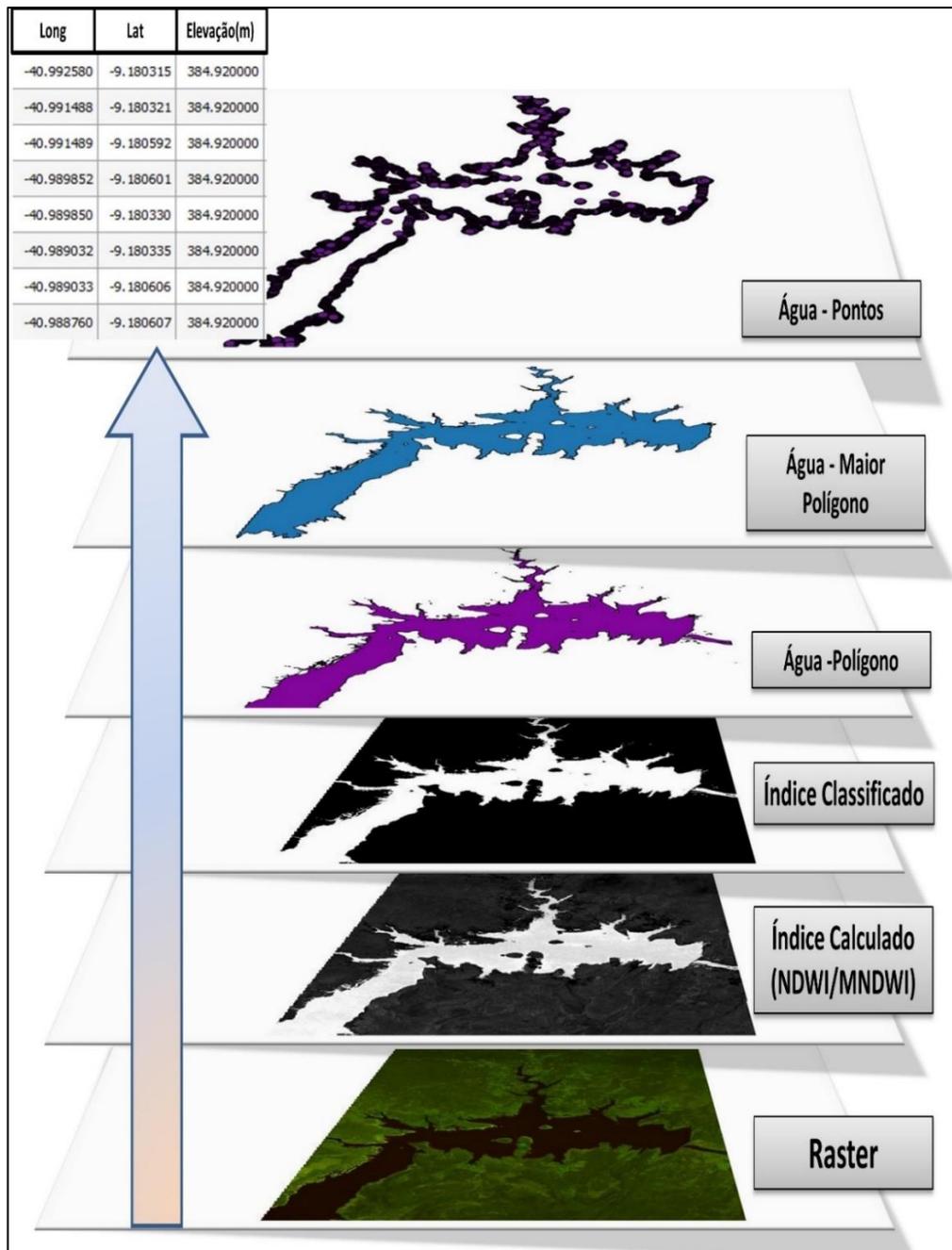
Onde: GREEN corresponde ao comprimento de onda do verde, NIR e IR ao infravermelho próximo e infravermelho, nas equações.

As imagens selecionadas foram mosaicadas (junção de duas ou mais imagens orbitais), quando necessário, recortadas e processadas. Obtendo como saída a reflectância, radiância e os índices de normalização calculados. A partir da vetorização da imagem classificada foi selecionado o maior polígono representativo da máscara de água. As máscaras de água são ordenadas pela ordem decrescente da superfície e então superpostas. Quaisquer incoerências entre as máscaras consecutivas, por exemplo, quando um contorno da superfície inferior excede um maior contorno de superfície, fazendo-se necessário corrigir essas geometrias para deixar pelo menos um pixel de espaçamento entre as máscaras. Os contornos das diferentes imagens foram convertidos em dois conjuntos de dados: um representando os principais contornos da

massa de água, o outro representando os principais detalhes internos, como ilhas ou bancos de areia.

Todas as imagens seguiram as etapas da Figura 12, onde ao final foi inserido o dado altimétrico correspondente à imagem processada. Assim foi possível definir a camada de pontos com a elevação representativa do contorno da superfície hídrica, possuindo cada ponto suas coordenadas e o nível adotado (observado ou coletado do perfil ICESat-2).

Figura 12- Etapas de processamento das imagens óticas do reservatório de Sobradinho

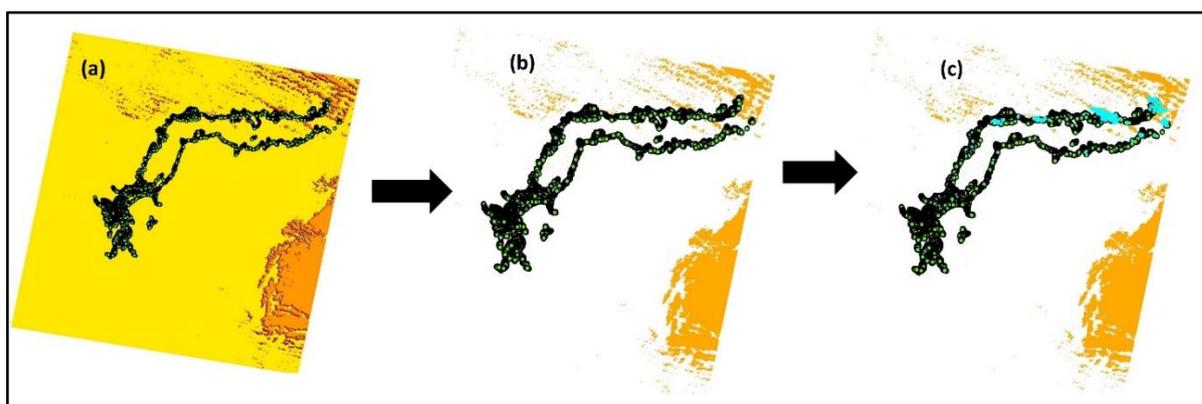


Fonte: O autor (2022).

Vale salientar que para cada uma das etapas do processo mostrado na Figura 12 foi preciso avaliar a área alagada em diferentes níveis, uma vez que as características de ocupação das margens, como a presença de cultura irrigada ao redor do reservatório, e a presença de ilhas em seu interior, combinadas com os aspectos qualitativos da água armazenada, podem dificultar a definição exata de classes e ocupação, em particular com corpos de água e vegetação.

A presença de nuvens, sombras, neblinas e nevoeiros constitui uma das interferências mais frequentes em imagens de sensoriamento remoto. A utilização eficaz da Banda BQA (Banda Quality Assessment), disponível nas imagens Landsat, pode auxiliar no controle de qualidade e ajudar a melhorar a integridade das investigações científicas, indicando quais pixels podem ser afetados pelas condições da superfície, contaminação da nuvem ou condições do sensor (USGS, 2022). Por exemplo, o NDWI calculado sobre pixels contendo nuvens e sombras mostrará valores anômalos. Se tais pixels fossem incluídos no processamento para extração da superfície hídrica, os resultados poderiam não mostrar as verdadeiras características do contorno hídrico. Os pixels contaminados pelas nuvens e sombras colocariam como não água, aquilo que seria água ou vice-versa. A Figura 13a mostra o contorno hídrico sobreposto a Banda BQA. Os tons laranja mais intensos são as interferências ocorridas na imagem. Em seguida na Figura 13b, a Banda BQA é convertida em polígonos, visando a seleção dos pontos do contorno hídrico que coincidam com as interferências. A Figura 13c mostra os pontos do contorno selecionados (azul claro).

Figura 13- Etapa preparatória para utilização da Banda BQA

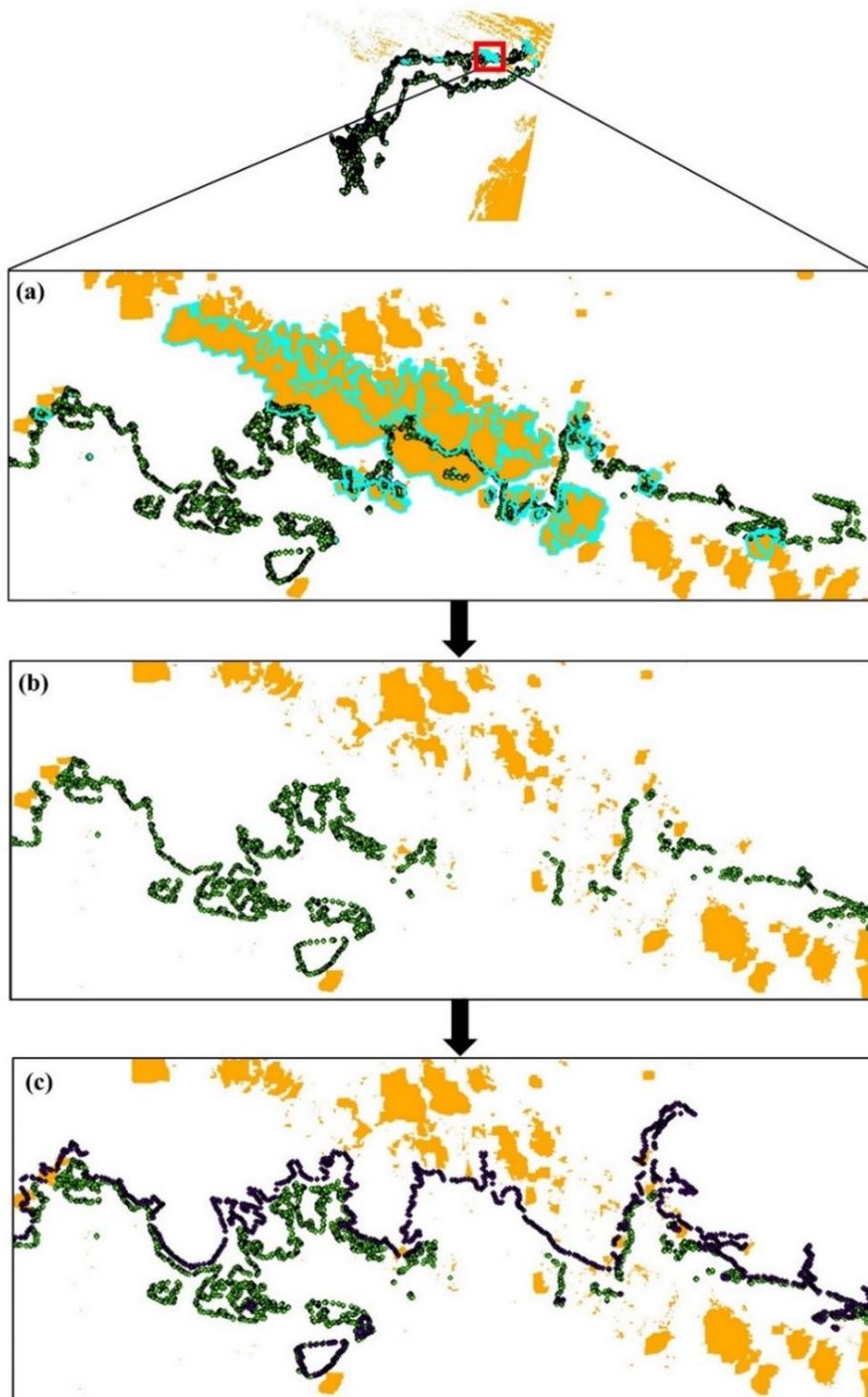


Fonte: O autor (2022).

Nessa etapa preparatória é importante uma análise criteriosa dos pontos que foram selecionados, onde além de consultar a Banda de nuvem BQA do contorno hídrico analisado (27/07/1985), deve-se comparar com imagens de outros contornos hídricos em períodos diferentes e ajustar os limiares de classificação do índice, visando validar a geometria final do

contorno hídrico. O ajuste no contorno hídrico aplicando a Banda BQA é mostrado na Figura 14.

Figura 14- Ilustração do processo de retirada de trechos do contorno hídrico devido à interferência de nuvens com o uso da Banda BQA



Fonte: O autor (2022).

A partir da seleção dos trechos do contorno hídrico que sofreram interferência das anomalias (Figura 14a), todos os pontos selecionados são excluídos (Figura 14b). O objetivo é retirar os pontos do contorno que não correspondam a superfície hídrica, deixando esses trechos sem delimitação. A ideia é que o contorno hídrico de outra imagem (com nível diferente) preencha essa lacuna através da interpolação, uma vez que dificilmente haverá coincidência de nuvens afetando o mesmo trecho em todas as datas de extração da superfície hídrica. A Figura 14c mostra o contorno hídrico (pontos azul marinho) com nível de água mais elevado (392,54 m) que o contorno analisado (391,71 m), representando a superfície hídrica que comporá, por interpolação, o valor de nível para preenchimento do trecho excluído.

### *3.3.1.1 Técnicas aplicadas à extração da superfície hídrica*

As operações com as imagens selecionadas para o trecho LRS de Sobradinho ocorreram de forma sequenciada, sendo recortadas, corrigidas dos efeitos atmosféricos e o NWDI calculados. Todas as imagens seguiram as etapas descritas em 3.3.1.

Já no trecho ORS, as técnicas aplicadas se deram através da combinação de ferramentas que auxiliaram no processamento de imagens em lote. Utilizou-se primeiro o GEE para selecionar as imagens do trecho ORS, acessando diretamente o catálogo do USGS. Baseado em parâmetros estabelecidos por linguagem de programação em JavaScript em uma Interface de Programação de Aplicativos (API em Inglês) do próprio GEE (Figura 15) foi possível ter relacionadas todas as imagens (item 5 da Figura 15) com no máximo 10% de nuvens na área de interesse. Em seguida, foram selecionadas as imagens segundo os critérios pré-definidos em 3.3.

Figura 15-Interface da API do GEE

Ítems	Objetos
1	Scripts de simulação salvos em pasta criada pelo usuário
2	Geometria (espacial e Script) utilizada para busca das imagens
3	JavaScript para busca das imagens Landsat 8 no catálogo do USGS com no máximo 10% de nuvem
4	Relação das imagens disponíveis e bloco espacial de imagens
5	Total de imagens encontradas

Fonte: O autor (2022).

Através de script escrito no GEE foi realizado o cálculo do NDWI (segunda etapa da Figura 12) de todas as imagens selecionadas, considerando apenas a geometria delimitada (item 4. da Figura 16). O Script previa que após o processamento de cada imagem, seu arquivo NDWI ficasse disponível para transferir ao Google drive do usuário e posteriormente estar disponível para download.

Figura 16- Detalhe da extração do NDWI com o GEE

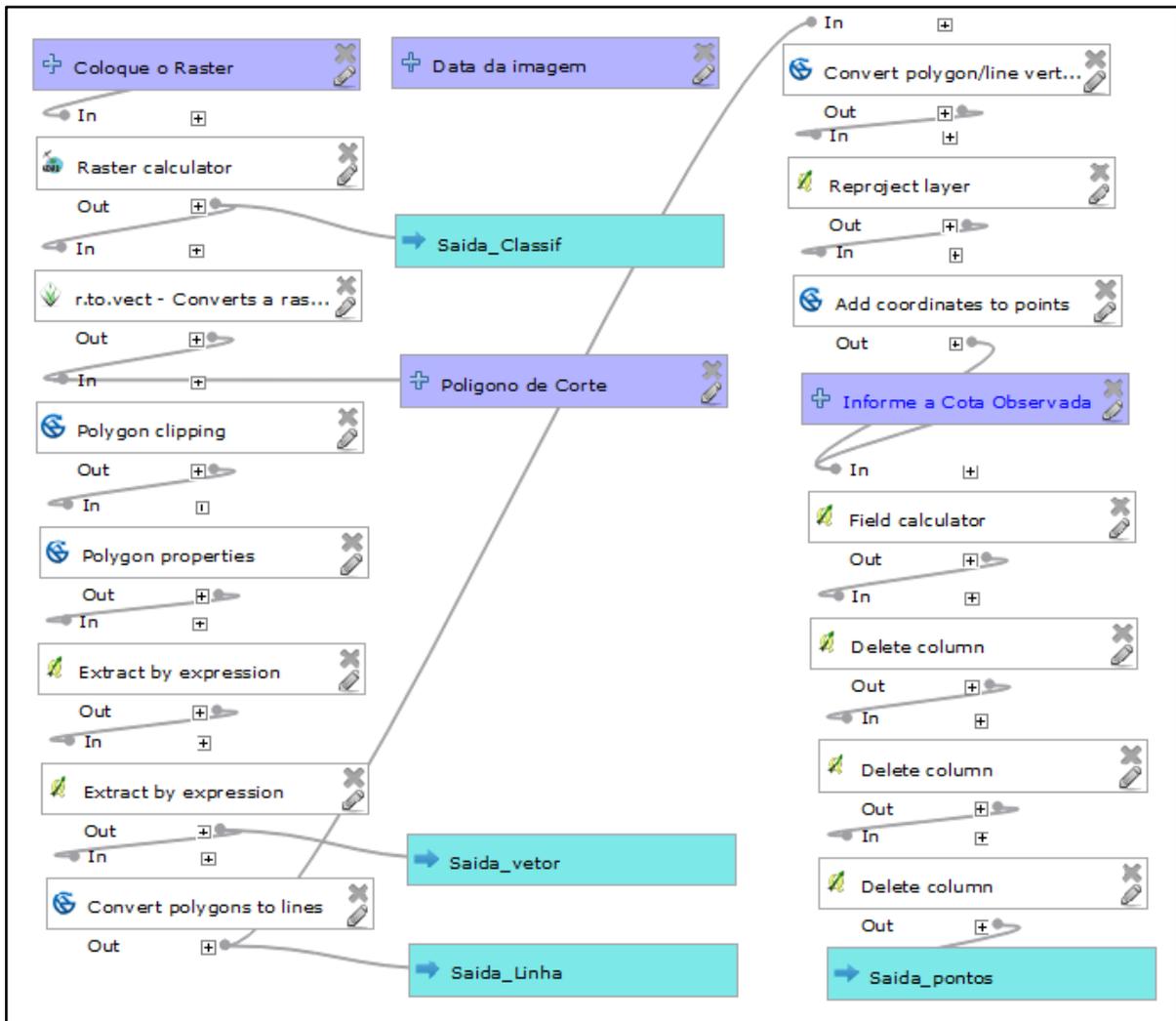
Ítems	Objetos
1	Executa o Script
2	Script com Parâmetros da imagem a ser processada
3	Imagens já processada , apta para transferência ao google drive
4	Geometria criada para delimitar a área de processamento das imagens
5	NDWI Calculado

Fonte: O autor (2022).

Concluída a etapa de extração do NDWI com o GEE, fez-se necessária a validação das imagens calculadas pelo GEE em relação ao método tradicional realizado no trecho LRS, inclusive buscando por comparação, encontrar o valor correspondente para classificação das imagens NDWI geradas pelo GEE. A validação se deu por comparação da geometria de áreas vindas de uma mesma imagem processada pelas duas técnicas (tradicional e GEE), sendo comparadas visualmente e pelo cálculo das áreas, buscando encontrar um valor de classificação para o limite de água no GEE adequado para a região em estudo.

Após a validação, a partir das imagens NDWI geradas no GEE, uma segunda ferramenta foi aplicada. Trata-se de um modelo desenvolvido para ser executado no QGIS, juntamente com as ferramentas GRASS, GDAL/OGR e SAGA (Figura 17). Este modelo é composto por uma série de rotinas computacionais, estruturadas logicamente para incorporar, processar e fornecer dados. Basicamente, é construído sobre a base de dados raster do NDWI vindas do GEE associados a operações matriciais e vetoriais para processamento automatizado em lote, visando a execução das tarefas até a etapa final da Figura 12. Por fim, o modelo realiza a formatação das tabelas de atributos dos arquivos vetoriais, tornando o resultado mais amigável.

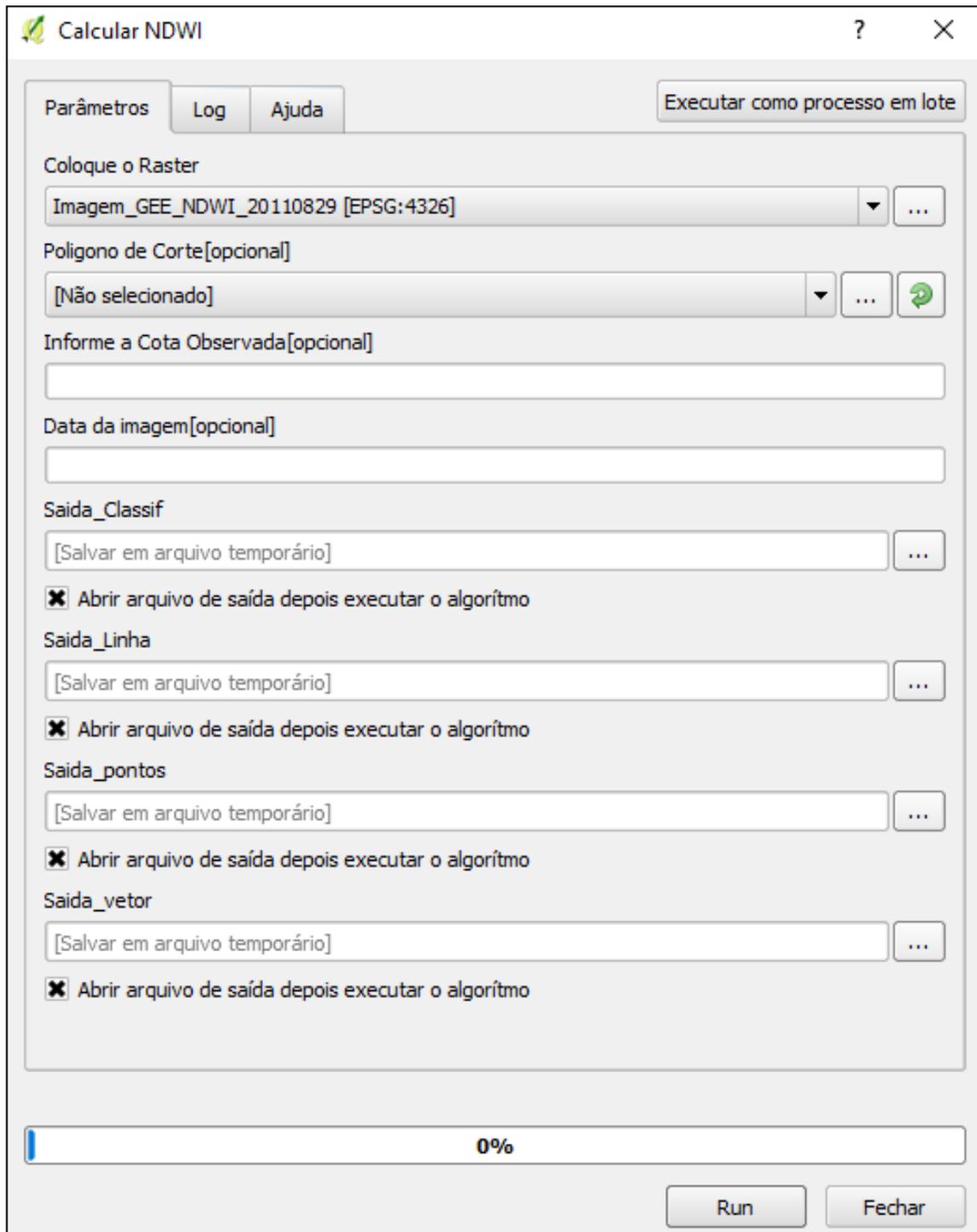
Figura 17- Modelo construído usando o QGIS Model Builder



Fonte: Autor (2022).

Algumas peculiaridades do trecho ORS foram inseridas no modelo, visando uma melhor discretização do início do reservatório de Sobradinho, dada a sua complexidade em retratar os inúmeros detalhes, foram considerados os polígonos com área acima de 0,5 km<sup>2</sup> na vetorização do lago. A Figura 18 mostra a interface do modelo para processar a imagem individualmente e a Figura 19 mostra a tabulação para processamento em lote, mostrando as entradas requeridas e produtos de saída. Os dados de entrada são o raster do NDWI vindo do GEE, a data da imagem, o polígono de corte e a cota observada (para os casos de dados *in situ*), sendo o dado raster o único dado obrigatório. Como saída do modelo tem-se o NDWI classificado, os maiores polígonos de cada imagem, os contornos hídricos e a conversão nos pontos com a respectiva elevação. Todas as saídas são armazenadas numa pasta criada pelo modelo.

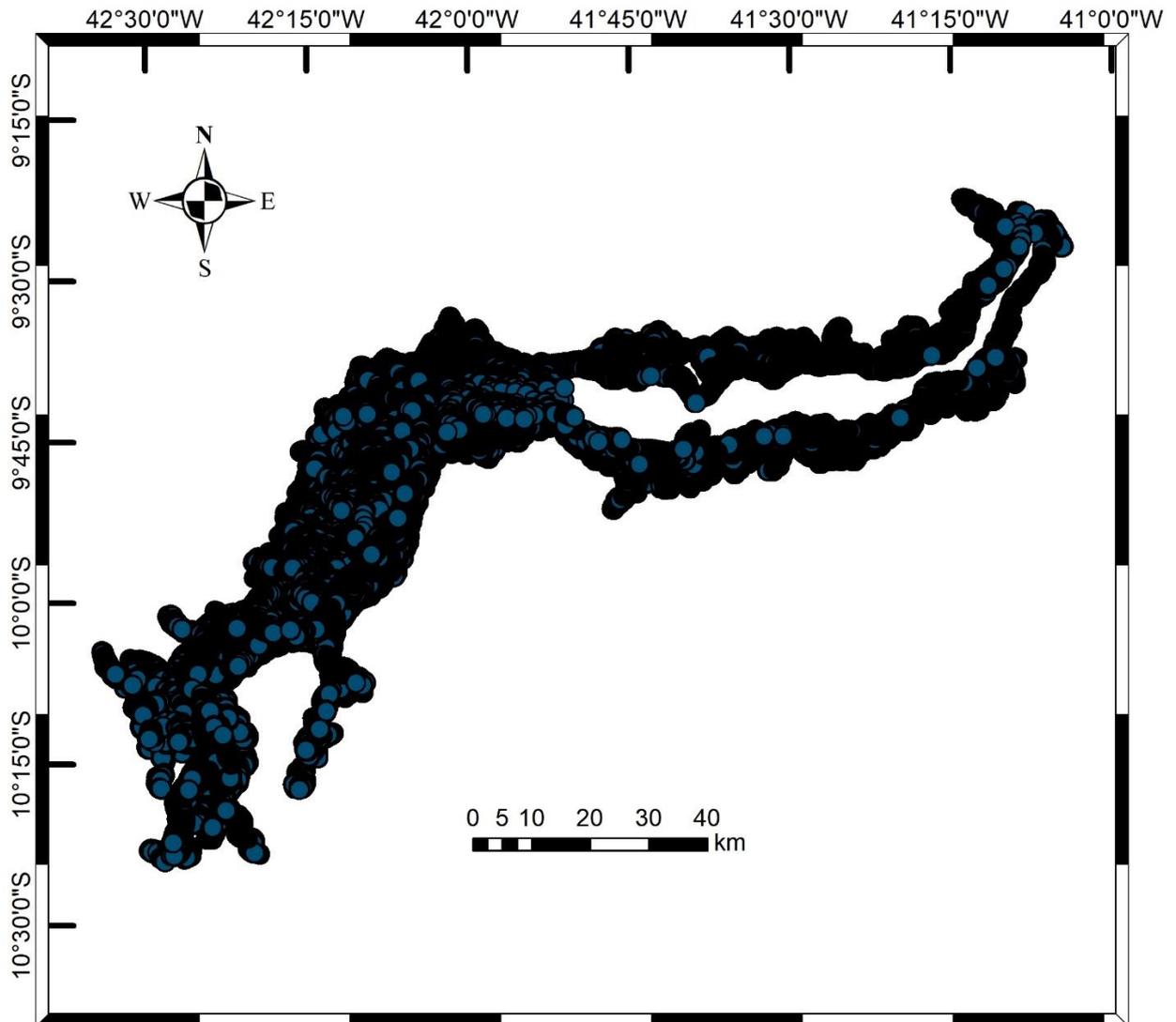
Figura 18-Interface do modelo para processamento individual de imagem



Fonte: O autor (2022).



Figura 20-Camada de pontos 3D do trecho ORS



Fonte: O autor (2022).

### 3.3.2 Esquema de avaliação dos dados ICESat-2

Os dados do ICESat-2 foram comparados com os níveis de água *in situ* de quatro estações no reservatório de Sobradinho e uma estação no reservatório de Poço da Cruz. No caso de Sobradinho, foram realizadas comparações entre os valores dados pelo satélite e os da estação mais próxima da trilha disponibilizada. Assumiu-se que a parte plana do perfil medido pelo ICESat-2 representava a superfície da água do reservatório. A avaliação foi realizada usando o coeficiente  $r$  de Pearson (Equação 5), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 6), o erro quadrático médio normalizado (NRMSE) (Equação 7) e o erro percentual (EP) (Equação 8). A correlação de Pearson é uma medida da força de uma associação linear entre duas variáveis, enquanto RMSE reflete o erro absoluto. O erro percentual reflete a proporção de um erro encontrado num comparativo entre os valores reais e estimados.

$$r = \frac{\rho y_i \hat{y}_i}{\rho y_i \rho \hat{y}_i} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (6)$$

$$NRMSE (\%) = \frac{RMSE}{\bar{y}_i} \times 100 \quad (7)$$

$$EP (\%) = \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

$y_i, \hat{y}_i$  são os valores das dimensões (área e volume) reais e estimados, respectivamente;

$\rho y_i \hat{y}_i$  é a covariância entre as dimensões medidas e estimadas;

$\rho y_i \rho \hat{y}_i$  é o desvio padrão das dimensões.

$\bar{y}_i$  é a média das dimensões (área e volume) reais

Já no caso do reservatório de Poço da Cruz, devido à falha de dados observados e menor disponibilização de trilhas do ICESat-2, não foi possível avaliar os dados do ICESat-2 sobre a superfície hídrica. No entanto, avaliou-se o desempenho dos dados ICESat-2 através da comparação entre as curvas CAV gerada pelo satélite e as obtidas pelo levantamento topobatimétrico realizado em 2017 pela Agência Nacional de Águas (ANA), no âmbito de um projeto de atualização das curvas CAV para 30 reservatórios localizados no semiárido do Brasil. As curvas *in situ* foram atualizadas por meio de levantamentos aerofotogramétricos da porção terrestre e levantamentos batimétricos da porção aquática. Especificamente em Poço da Cruz, foram confeccionadas duas curvas CAV, sendo uma delas atrelada ao Sistema de Referência empregado no apoio Geodésico de campo, usado pela empresa contratada pelo levantamento topobatimétrico, e outra ao Sistema de Referência altimétrico local (nível do vertedor)(ANA, 2017). Portanto, diante da ausência de informações para converter o nível d'água para o geoide de referência adotado (EGM2008), a solução foi estimar a diferença sistemática entre a estação do reservatório e o ICESat-2 com base nas três datas em que ocorreram as duas medições. A Tabela 5 mostra a estatística das amostras do ICESat-2 sobre a superfície hídrica do lago, onde as diferenças entre a estação e o ICESat-2 resultaram no valor médio de 7,03m adotado para converter a elevação do ICESat-2 para a mesma referência da estação.

Tabela 5-Estatística dos feixes altimétricos ICESat-2 sobre o lago de Poço da Cruz

Trilha	Data	Nº de pontos sobre o lago	Valor mínimo (m)	Valor máximo (m)	Desvio Padrão (m)	A-Elevação média (m)	B-Nível da estação (m)	Diferença Sistemática (B-A) (m)
	13/12/2018	36	411,13	412,77	0,34	411,29	418,31	7,02
1160	14/03/2019	21	410,40	413,52	0,63	410,71	417,72	7,01
	11/03/2020	17	411,89	412,09	0,05	412,02	419,07	7,05

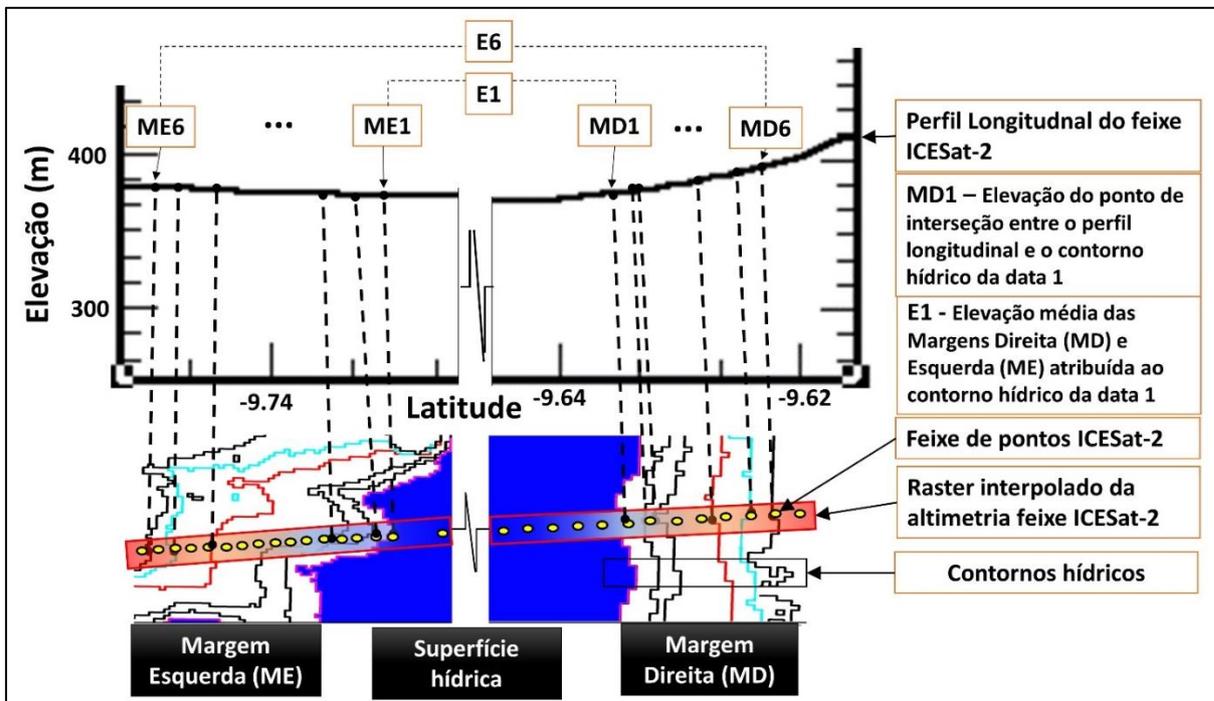
Fonte: O autor (2022).

As batimetrias calculadas com produtos de sensoriamento remoto foram comparadas com as curvas CAV previamente estabelecidas para ambos os reservatórios.

### 3.3.3 Atribuição de elevação aos contornos hídricos

A relação Elevação-Área da superfície hídrica (E-A) é um elemento essencial da caracterização batimétrica (LI *et al.*, 2019) que pode variar ao longo do tempo em um corpo d'água (CRÉTAUX *et al.*, 2016). Os contornos da superfície hídrica obtidos das imagens óticas podem ser convertidos em pontos, aos quais podem ser atribuídas elevações usando duas fontes de dados. A primeira foi do ICESat-2/ATL08, daqui por diante denominada elevação Perfil de Terreno Superfície Hídrica (PTSH). O processo usado para obter a elevação PTSH é mostrado na Figura 21, onde para cada contorno de corpo d'água principal, um método algébrico simples foi usado para determinar as coordenadas nas quais o contorno da água e os perfis de terreno ICESat-2 se cruzaram. Para cada interseção, os valores de elevação foram interpolados usando um raster gerado pelo método inverso da distância ponderada (IDW) com base nos pontos dos perfis de terreno ICESat-2. Em geral, o valor encontrado em uma margem (ME1 da Figura 21) foi diferente do valor da outra margem (MD1 da Figura 21). O valor médio das duas margens (E1 da Figura 21) foi a cota final dos contornos dentro da mesma camada (ilhas e restingas).

Figura 21- O perfil do terreno do ICESat-2 sobreposto a um conjunto de contornos hídrico, mostrando os valores de elevação do ICESat-2 nos graus de latitude correspondentes, e o processo de obtenção da elevação média atribuída aos contornos (elevação do Perfil de Terreno Superfície Hídrica (PTSH))



Fonte: O autor (2022).

O nível de água observado das estações *in situ* foi o segundo método de atribuição de elevação aos contornos, referido como elevação da Estação de Nível Superfície Hídrica (ENSH). No trecho LRS (localização na Figura 10), a cota atribuída aos pontos que formam os contornos foi a do nível d'água medido na estação da barragem de Sobradinho (ver localização na Figura 9). Para o trecho ORS, devido à longa extensão longitudinal do Sobradinho, observou-se um declive no espelho d'água, que deve ser considerado para evitar erros no cálculo do volume armazenado e na avaliação da superfície hídrica (CIRILO, 1994). Para tanto, foram utilizadas equações para representar a variação longitudinal do nível d'água ao longo do reservatório na região ORS, o que permitiu definir a relação entre o nível d'água e a posição das estações. Usando essas equações e a longitude dada, o nível da água pode ser estimado em cada ponto do contorno hídrico. Os contornos dos dados de nível de água das estações receberam a elevação correspondente ao valor registrado nas datas das imagens.

Duas batimetrias foram criadas em Sobradinho, considerando os intervalos de elevação: uma do PTSH (385,59–391,88 m) e outra do ENSH (380,90–392,62 m). Em Poço da Cruz, foi criada uma batimetria utilizando a elevação PTSH, que variou entre 419,03 m e 434,03 m.

### 3.3.4 Geração da Batimetria

O cálculo da batimetria foi realizado utilizando o conjunto de contorno hídrico convertido em pontos para as diferentes elevações e aplicando o interpolador vizinho natural da ferramenta “3D Analyst” do ArcGis (ESRI).

A batimetria foi gerada com um tamanho de pixel de 5 metros para uma melhor representação da variação do relevo. O procedimento permitiu calcular as batimetrias dos reservatórios de Sobradinho e Poço da Cruz, bem como as variações no armazenamento de água. Para os contornos hídricos abaixo da menor área inundada, os volumes foram obtidos a partir da curva CAV *in situ* dos reservatórios.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A metodologia aplicada no estudo utilizando diferentes fontes altimétricas requereu uma observação cuidadosa dos seus critérios iniciais, pois a disponibilidade de dados altimétricos e as imagens apropriadas que reflitam as mudanças visíveis na superfície da água e detecção precisa dos contornos são imprescindíveis para obtenção de um levantamento batimétrico exitoso.

A avaliação dos dados altimétricos do ICESat-2 também consiste num aspecto importante a ser analisado, haja vista que a aplicação dos perfis estratégicos na obtenção da relação E-A definirá a acurácia do produto.

### 4.1 AVALIAÇÃO DOS DADOS ICESAT-2

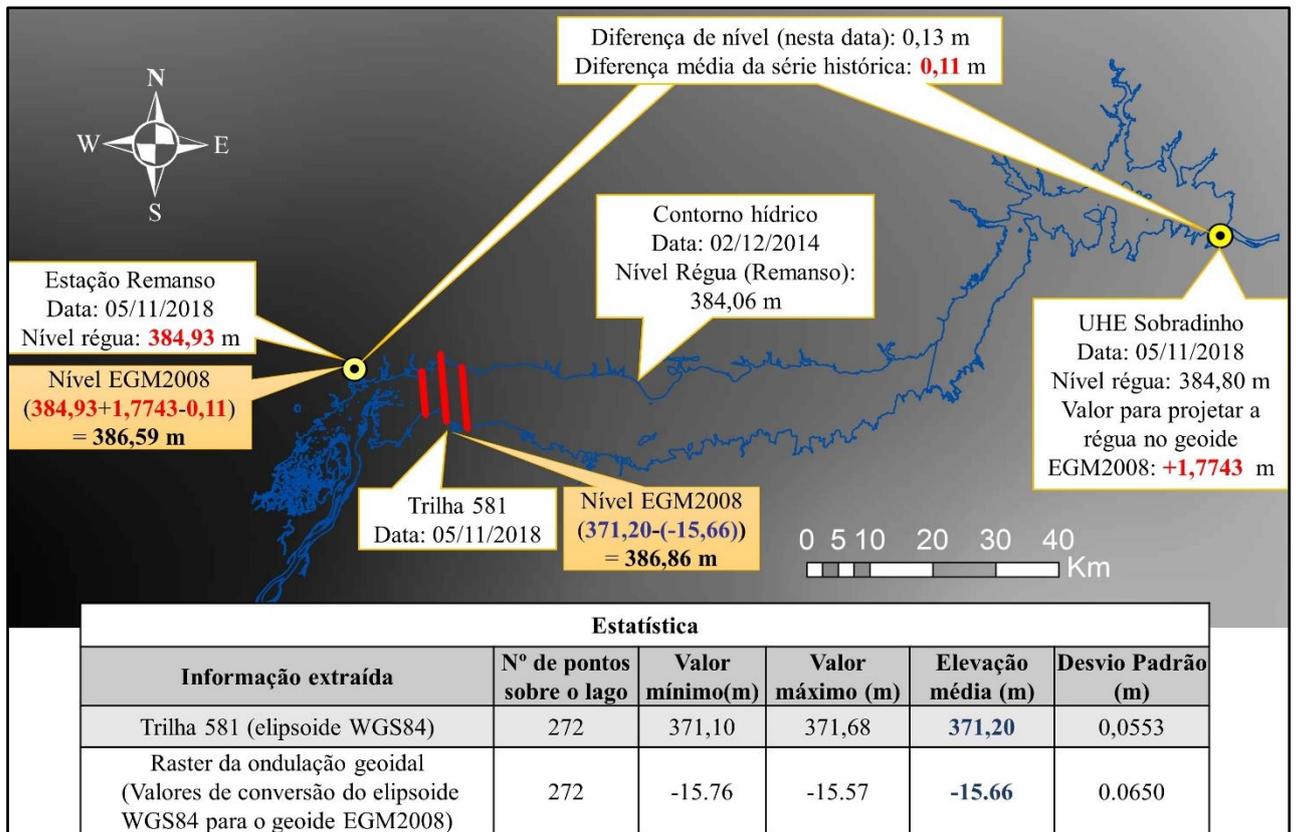
Os dados do ICESat-2 foram avaliados comparando-se os níveis de água das estações com os estimados a partir da amostra de pontos do satélite localizado no corpo hídrico, que foi calculada como a média da elevação dos pontos. Para garantir que os valores discrepantes (outliers) causados por recuperações insatisfatórias do ICESat-2 fossem eliminados, apenas as elevações que estavam dentro do desvio padrão foram consideradas. Métodos mais apurados de tratamento de outliers não foram adotados, uma vez que o desvio padrão das elevações obtidas pelas trilhas do ICESat-2 apresentaram valores de 6,62 cm e 21,1 cm, médio e máximo, respectivamente, sendo mais rigoroso que o trabalho apresentado por Cooley; Ryan e Smith (2021) que removeu as observações de corpos d'água com os desvios padrão maiores que 25 cm.

Extraír as informações do raster da ondulação geoidal para todos os pontos de cada passagem do ICESat-2 sobre o reservatório de Sobradinho consistiu no primeiro passo para aplicar à altimetria dos pontos os valores de ajuste para o geoide EGM2008. A conversão da altimetria dos pontos ICESat-2 será a diferença entre o valor do ponto ICESat-2 (no elipsoide WGS84) e o valor extraído do raster da ondulação geoidal.

Em relação aos dados de nível de água das estações, importante elucidar que as réguas no lago de Sobradinho estão na mesma referência de altitude do datum vertical brasileiro, que é diferente da referência vertical que é utilizada nos dados de satélite (elipsoide WGS84). Assim, foi necessário utilizar um valor de ajuste (+1,7743 m) para colocar o nível da régua no geoide EGM2008. A determinação dessa diferença dos referenciais verticais foi realizada mediante a ocupação de referência de nível da régua do barramento de sobradinho por um receptor GPS geodésico para assim obter a altitude no EGM2008. Com isso, para converter a elevação da régua nas demais estações para o EGM2008, se fez necessário, além do ajuste (+1,7743 m),

subtrair a diferença média entre os valores de nível das estações Sento Sé e Remanso em relação a do barramento de Sobradinho. Anular essas diferenças visa simular o lago como uma superfície sem declividade, colocando todas as estações no mesmo geóide de referência. A Figura 22 ilustra o processo de projeção dos dados altimétricos para o geóide EGM2008.

Figura 22- Contorno hídrico sobreposto ao raster da ondulação geoidal, ilustrando o processo de projeção do nível de água da régua e do perfil altimétrico da trilha 581 para o mesmo geóide de referência (EGM2008)



Fonte: O autor (2022).

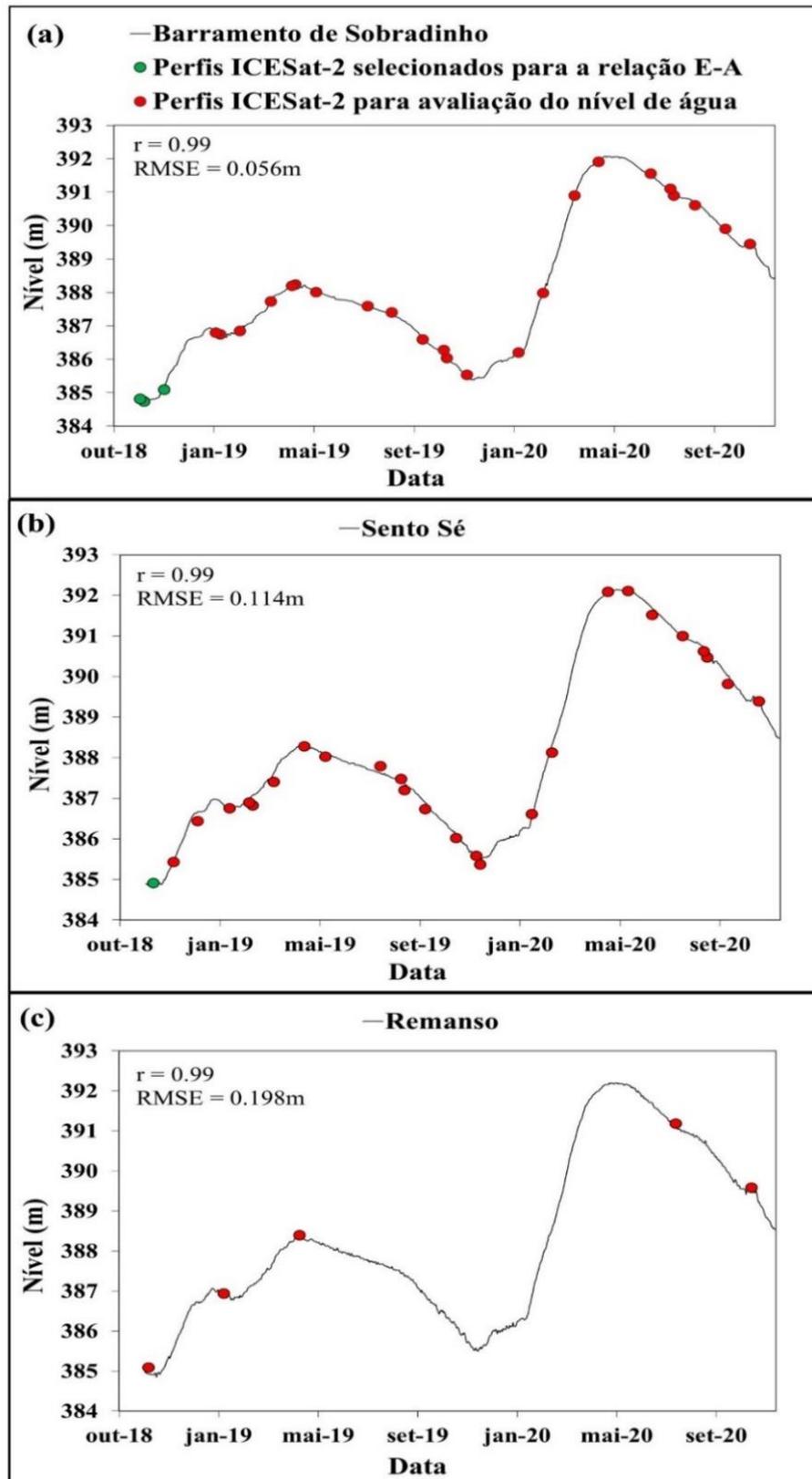
Vale observar na Figura 22, que a estatística das informações extraídas (272 pontos) da trilha 581 (Valor de elevação) e do raster da ondulação geoidal (valor digital) apresentam desvio padrão da ordem de 5,5 e 6,5 cm, respectivamente, sinalizando que os pontos de elevação coletados podem ser assumidos como superfície hídrica e que tais diferenças podem ser frutos de erros de leitura do satélite, da presença de ondas, vento etc.

Importante destacar no exemplo dado, que como a seleção dos pontos altimétricos sobre o lago é efetuada mediante a interseção geométrica com o polígono da superfície hídrica, o registro do nível de água (384,06 m) na estação de Remanso na data de aquisição da imagem do corpo hídrico (02/12/2014) deve possuir o nível abaixo do nível registrado (384,93 m) na

data da passagem da trilha do satélite ICESat-2 sobre o lago (05/11/2018). Com isso, garante-se que os pontos selecionados estão inclusos na superfície hídrica.

A extensão do reservatório de Sobradinho permitiu um número considerável de trilhas, facilitando a seleção apenas dos feixes fortes, aumentando assim a precisão dos dados. A Figura 23 mostra os valores dos níveis de água nas estações de referência em Sobradinho (57 dias) e os níveis estimados pelo ICESat-2. Os perfis selecionados para aplicação na relação E-A encontram-se em destaque (pontos verdes) na Figura 23. O número de valores é limitado pelo número de ciclos (tempo de revisita do satélite) disponíveis.

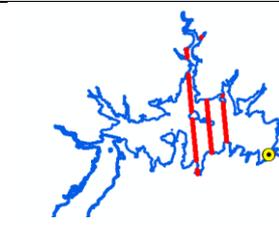
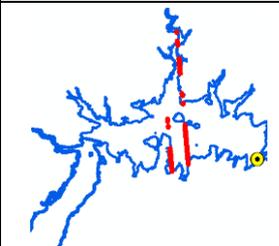
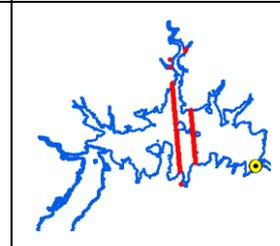
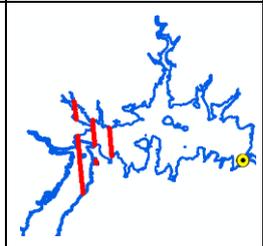
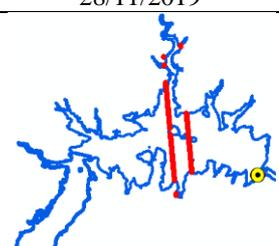
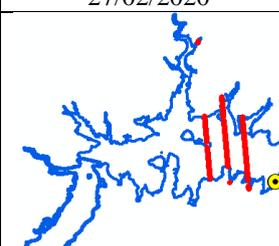
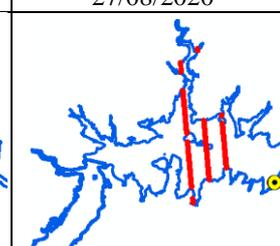
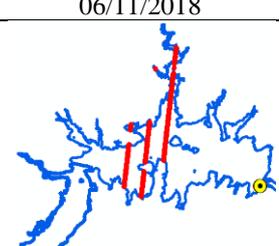
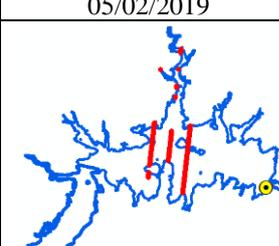
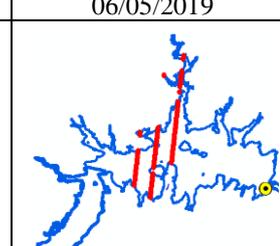
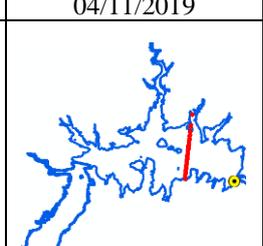
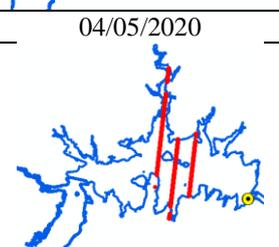
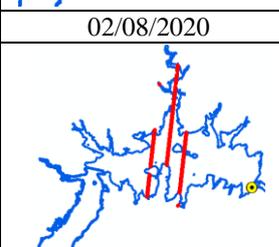
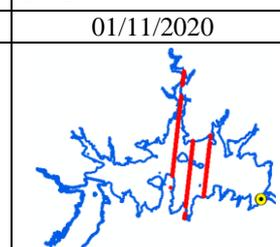
Figura 23- Níveis de água observados e ICESat-2 no Lago de Sobradinho nas estações Barramento de Sobradinho (a), Sento Sé (b) e Remanso (c)



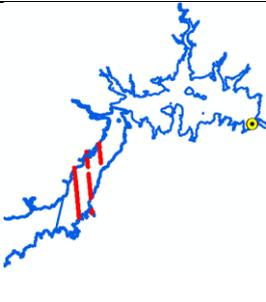
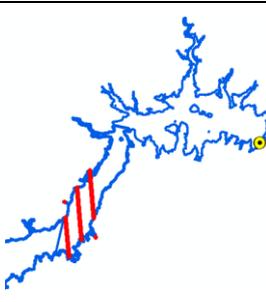
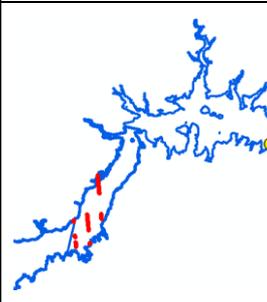
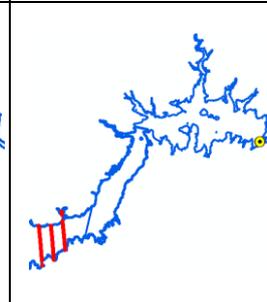
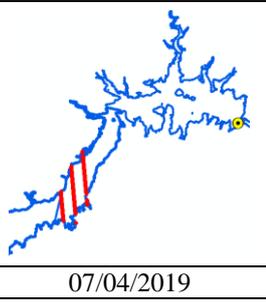
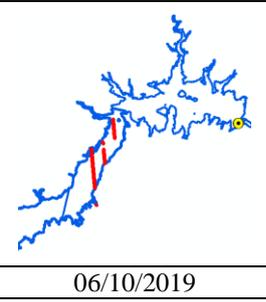
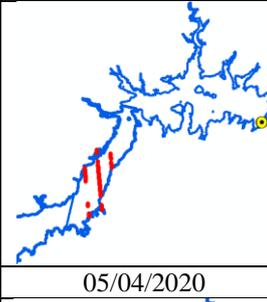
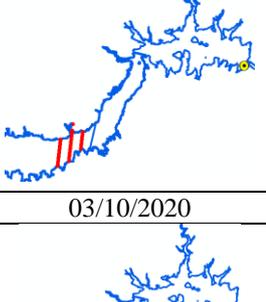
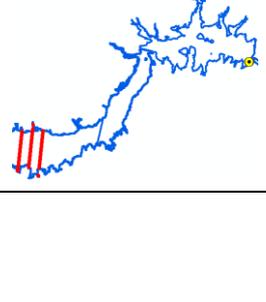
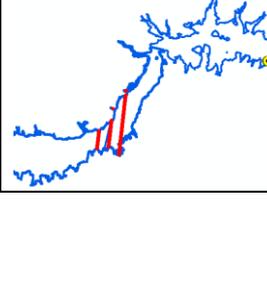
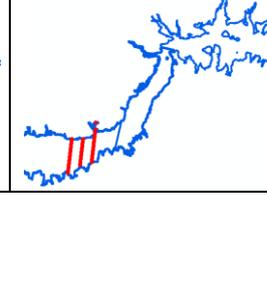
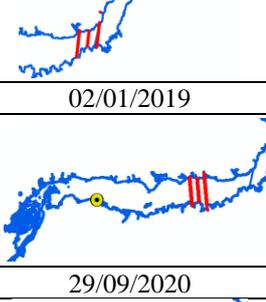
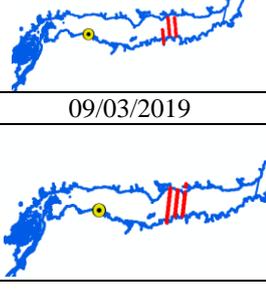
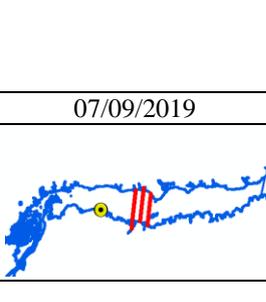
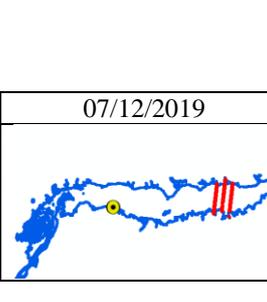
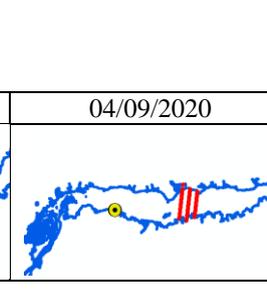
Fonte: O autor (2022).

A localização dos feixes em relação à estação de referência e a análise das trilhas em Sobradinho são mostradas na Figura 24 e Tabela 6. Os erros apresentados na Tabela 6 credenciam a utilização dos perfis altimétricos para a obtenção da relação E-A. Para garantir melhor representação da geometria do lago foram selecionados e destacados em amarelo na Tabela 6 os perfis de terreno do ICESat-2 correspondentes ao menor nível de água disponível e com localização que abrangesse a maior extensão do lago.

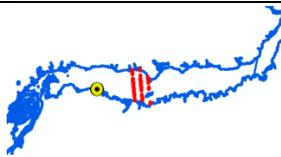
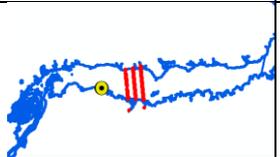
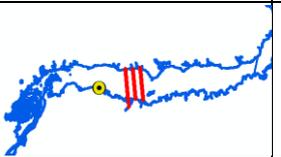
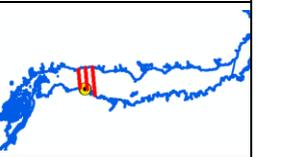
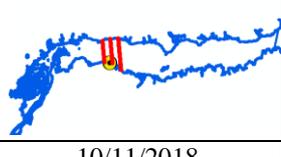
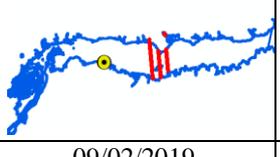
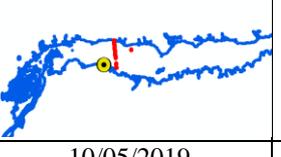
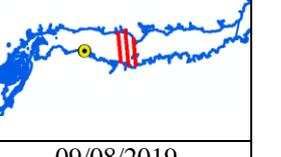
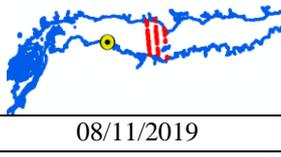
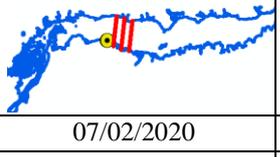
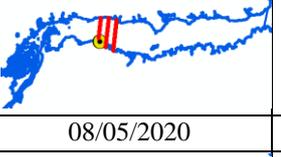
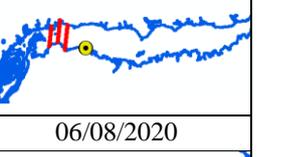
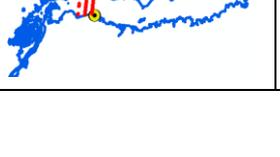
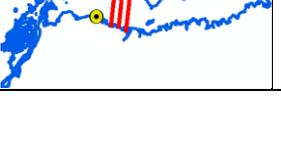
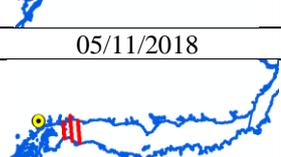
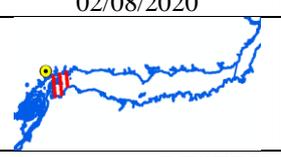
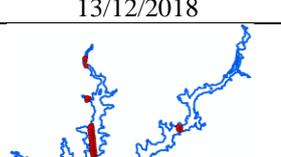
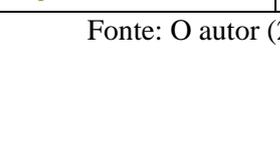
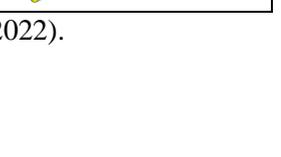
Figura 24-Localização dos feixes altimétricos das trilhas ICESat-2 sobre a superfície hídrica dos reservatórios nas datas de passagens do satélite

RESERVATÓRIO SOBRADINHO				
Trilha	Data de passagem do satélite ICESat-2			
962	30/11/2018	01/03/2019	31/05/2019	30/08/2019
				
	28/11/2019	27/02/2020	27/08/2020	
				
	06/11/2018	05/02/2019	06/05/2019	04/11/2019
				
589	04/05/2020	02/08/2020	01/11/2020	
				

(Continuação Figura 24)

<b>RESERVATÓRIO SOBRADINHO</b>				
<b>Trilha</b>	<b>Data de passagem do satélite ICESat-2</b>			
520	01/11/2018	31/01/2019	02/05/2019	01/08/2019
				
	31/10/2019	29/01/2020	29/07/2020	
				
	07/04/2019	06/10/2019	05/04/2020	05/07/2020
				
147	03/10/2020			
				
78	02/01/2019	03/04/2019	02/10/2019	30/06/2020
				
	29/09/2020			
				
1092	09/03/2019	07/09/2019	07/12/2019	04/09/2020

(Continuação Figura 24)

<b>RESERVATÓRIO SOBRADINHO</b>				
<b>Trilha</b>	<b>Data de passagem do satélite ICESat-2</b>			
1023	04/12/2018	05/03/2019	04/06/2019	03/09/2019
				
	02/12/2019	02/03/2020	01/06/2020	31/08/2020
				
650	10/11/2018	09/02/2019	10/05/2019	09/08/2019
				
	08/11/2019	07/02/2020	08/05/2020	06/08/2020
				
	05/11/2020			
				
581	05/11/2018	04/02/2019	06/05/2019	01/11/2020
				
	02/08/2020			
				
<b>RESERVATÓRIO POÇO DA CRUZ</b>				
<b>Trilha</b>	<b>Data de passagem do satélite ICESat-2</b>			
1160	13/12/2018	14/03/2019	11/03/2020	
				

Fonte: O autor (2022).

Tabela 6- Análise dos perfis ICESat-2 sobre a superfície hídrica em relação às estações de referência em Sobradinho

Trilha	Data	DP (m)	Elevação média estimada (m)	Elevação observada (m)	Estação de referência	Erro (m)	Erro Percentual EP
962	30/11/2018	0,047	386,975	386,904	Barramento	-0,070	-0,018%
	01/03/2019	0,116	388,634	388,684	Barramento	0,050	0,013%
	31/05/2019	0,055	389,785	389,814	Barramento	0,029	0,007%
	30/08/2019	0,048	389,178	389,094	Barramento	-0,084	-0,022%
	28/11/2019	0,064	387,320	387,294	Barramento	-0,026	-0,007%
	27/02/2020	0,054	389,761	389,774	Barramento	0,013	0,003%
	27/08/2020	0,066	392,385	392,464	Barramento	0,080	0,020%
589	06/11/2018	0,107	386,614	386,554	Barramento	-0,060	-0,015%
	05/02/2019	0,069	388,523	388,524	Barramento	0,001	0,000%
	06/05/2019	0,080	390,018	389,984	Barramento	-0,034	-0,009%
	04/11/2019	0,059	387,822	387,824	Barramento	0,002	0,001%
	04/05/2020	0,090	393,688	393,734	Barramento	0,046	0,012%
	02/08/2020	0,058	392,677	392,734	Barramento	0,057	0,015%
	01/11/2020	0,076	391,223	391,164	Barramento	-0,059	-0,015%
520	01/11/2018	0,211	386,684	386,614	Barramento	-0,070	-0,018%
	31/01/2019	0,054	388,577	388,584	Barramento	0,008	0,002%
	02/05/2019	0,038	389,976	389,964	Barramento	-0,012	-0,003%
	01/08/2019	0,132	389,369	389,354	Barramento	-0,015	-0,004%
	31/10/2019	0,083	388,059	387,904	Barramento	-0,155	-0,040%
	29/01/2020	0,055	387,989	388,004	Barramento	0,015	0,004%
	29/07/2020	0,053	392,878	392,804	Barramento	-0,074	-0,019%
147	07/04/2019	0,048	389,515	389,504	Barramento	-0,011	-0,003%
	06/10/2019	0,095	388,382	388,414	Barramento	0,033	0,008%
	05/04/2020	0,047	392,683	392,684	Barramento	0,002	0,000%
	05/07/2020	0,062	393,332	393,284	Barramento	-0,048	-0,012%
	03/10/2020	0,084	391,680	391,604	Barramento	-0,076	-0,019%
78	02/01/2019	0,076	388,215	388,364	Sento Sé	0,150	0,039%
	03/04/2019	0,068	389,185	389,304	Sento Sé	0,120	0,031%
	02/10/2019	0,049	388,510	388,584	Sento Sé	0,074	0,019%
	30/06/2020	0,057	393,297	393,394	Sento Sé	0,097	0,025%
	29/09/2020	0,068	391,599	391,724	Sento Sé	0,126	0,032%
1092	09/03/2019	0,028	388,607	388,774	Sento Sé	0,167	0,043%
	07/09/2019	0,077	388,980	389,074	Sento Sé	0,095	0,024%
	07/12/2019	0,058	387,146	387,174	Sento Sé	0,028	0,007%
	04/09/2020	0,027	392,249	392,354	Sento Sé	0,105	0,027%
1023	04/12/2018	0,036	387,210	387,144	Sento Sé	-0,066	-0,017%
	05/03/2019	0,066	388,677	388,694	Sento Sé	0,018	0,005%
	04/06/2019	0,044	389,805	389,804	Sento Sé	-0,001	0,000%
	03/09/2019	0,051	389,258	389,104	Sento Sé	-0,154	-0,039%
	02/12/2019	0,158	387,359	387,204	Sento Sé	-0,155	-0,040%
	02/03/2020	0,053	389,906	390,014	Sento Sé	0,109	0,028%
	01/06/2020	0,033	393,882	393,814	Sento Sé	-0,067	-0,017%
31/08/2020	0,038	392,404	392,424	Sento Sé	0,021	0,005%	

(Continuação Tabela 6)

Trilha	Data	DP (m)	Elevação média estimada (m)	Elevação observada (m)	Estação de referência	Erro (m)	Erro Percentual EP
650	10/11/2018	0,044	386,683	386,534	Sento Sé	-0,149	-0,039%
	09/02/2019	0,044	388,535	388,484	Sento Sé	-0,051	-0,013%
	10/05/2019	0,043	390,060	389,994	Sento Sé	-0,066	-0,017%
	09/08/2019	0,107	389,574	389,324	Sento Sé	-0,249	-0,064%
	08/11/2019	0,068	387,799	387,834	Sento Sé	0,035	0,009%
	07/02/2020	0,042	388,385	388,184	Sento Sé	-0,200	-0,052%
	08/05/2020	0,030	393,862	393,774	Sento Sé	-0,088	-0,022%
	06/08/2020	0,098	392,771	392,674	Sento Sé	-0,096	-0,025%
	05/11/2020	0,048	391,167	391,114	Sento Sé	-0,052	-0,013%
581	05/11/2018	0,055	386,865	386,594	Remanso	-0,271	-0,070%
	04/02/2019	0,065	388,720	388,554	Remanso	-0,166	-0,043%
	06/05/2019	0,071	390,169	390,014	Remanso	-0,155	-0,040%
	01/11/2020	0,060	391,359	391,174	Remanso	-0,184	-0,047%
	02/08/2020	0,065	392,958	392,764	Remanso	-0,194	-0,049%

DP- Representa o desvio padrão

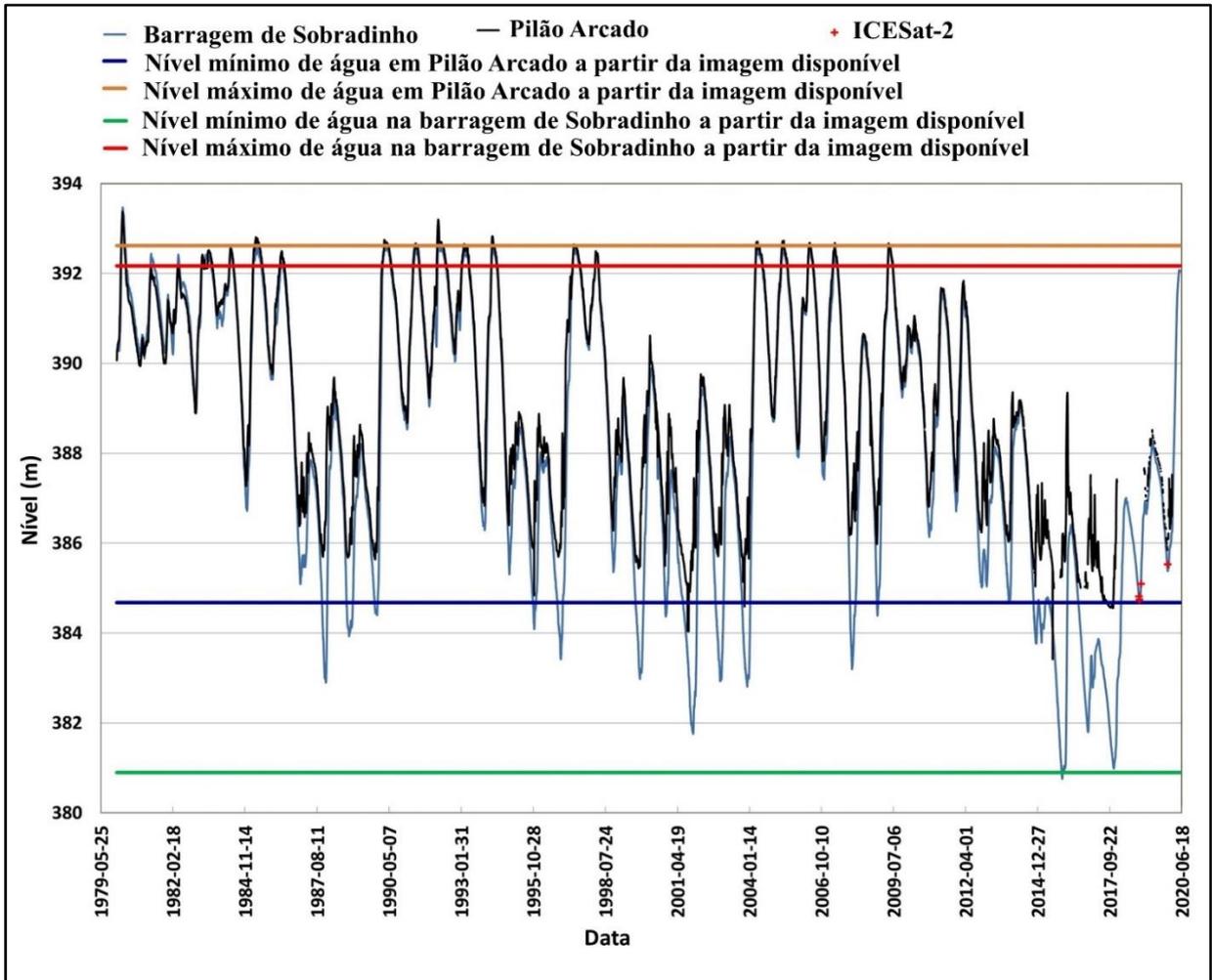
Destaque Amarelo – Perfis selecionados para estabelecer a relação E-A

Fonte: O autor (2022).

#### 4.2 PROCESSAMENTO NO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO

O método foi aplicado primeiro no reservatório de Sobradinho, utilizando os dados de nível observados como altimetria, seguindo os critérios iniciais descritos em 3.3. As imagens foram selecionadas com base na série histórica do nível d'água, tendo as estações do barramento de Sobradinho e Pilão Arcado como referências para os trechos LRS e ORS, respectivamente. A série histórica do nível d'água para o período 1980-2020 e a elevação da água nos perfis do terreno do ICESat-2 são mostradas na Figura 25. Com base nesses dados, procuraram-se imagens correspondentes a níveis próximos ao normal de operação (entre 380,5 e 392,0 m). A Figura 25 mostra os níveis mínimo e máximo de água representando os limites do reservatório nas imagens (linhas verde, azul, vermelha e laranja), com mais de 99% de operação no intervalo normal, representando 84% da capacidade do reservatório.

Figura 25- Nível diário de água e elevações dos perfis selecionados do ICESat-2 em Sobradinho



Fonte: O autor (2022).

O próximo passo foi selecionar imagens de satélite na faixa de 380,90 a 392,62m que foram espaçados verticalmente em intervalos de aproximadamente 1m. Os dados das 28 imagens selecionadas e a altimetria aplicada são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7- Data das imagens selecionadas para extração da máscara da superfície hídrica

Data da Imagem	Nível (UHE Sobradinho) (m)	Nível (Pilão Arcado) (m)	Intervalo (m)	Satélite	Altimetria	Trecho
14/12/2015	380,90	x		Landsat 8	Nível	LRS
30/11/2016	381,87	x	0,97	Landsat 8	Nível	LRS
04/10/2001	382,76	x	0,89	Landsat 5	Nível	LRS
09/05/2017	383,63	x	0,87	Landsat 8	Nível	LRS
02/04/2015	384,38	x	0,75	Landsat 8	Nível	LRS
07/06/2016	385,42	x	1,04	Landsat 8	Nível e ICESat-2	LRS

(Continuação Tabela 7)

Data da Imagem	Nível (UHE Sobradinho) (m)	Nível (Pilão Arcado) (m)	Intervalo (m)	Satélite	Altimetria	Trecho
06/07/2003	387,16	x	0,8	Landsat 5	Nível e ICESat-2	LRS
08/05/1999	388,40	x	1,24	Landsat 5	Nível e ICESat-2	LRS
09/08/1998	389,34	x	0,94	Landsat 5	Nível e ICESat-2	LRS
29/08/2011	389,71	x	0,37	Landsat 5	Nível e ICESat-2	LRS
22/01/2007	390,34	x	0,63	Landsat 5	Nível e ICESat-2	LRS
30/07/2006	391,11	x	0,77	Landsat 5	Nível e ICESat-2	LRS
08/02/1990	392,17	x	1,06	Landsat 5	Nível e ICESat-2	LRS
19/11/2015	381,04	385,42		Landsat 8	Nível	ORS
23/10/2017	381,33	384,68	0,29	Landsat 8	Nível	ORS
12/11/2001	381,84	385,4	0,51	Landsat 5	Nível	ORS
11/10/2001	382,39	384,98	0,55	Landsat 5	Nível	ORS
02/12/2014	383,77	386,02	1,38	Landsat 8	Nível	ORS
29/09/2014	385,92	386,34	2,15	Landsat 8	Nível e ICESat-2	ORS
28/08/2014	386,92	387,15	1	Landsat 8	Nível e ICESat-2	ORS
27/07/2014	387,7	387,93	0,78	Landsat 8	Nível e ICESat-2	ORS
09/06/2014	388,59	388,78	0,89	Landsat 8	Nível e ICESat-2	ORS
03/09/1993	389,33	389,58	0,74	Landsat 5	Nível e ICESat-2	ORS
22/08/2006	390,29	390,51	0,96	Landsat 5	Nível e ICESat-2	ORS
01/07/1993	391,31	391,49	1,02	Landsat 5	Nível e ICESat-2	ORS
27/07/1985	391,71	392	0,4	Landsat 5	Nível	ORS
09/05/1991	392,54	392,62	0,83	Landsat 5	Nível e ICESat-2	ORS

Fonte: O autor (2022).

#### 4.2.1 Extração da Máscara da Superfície hídrica

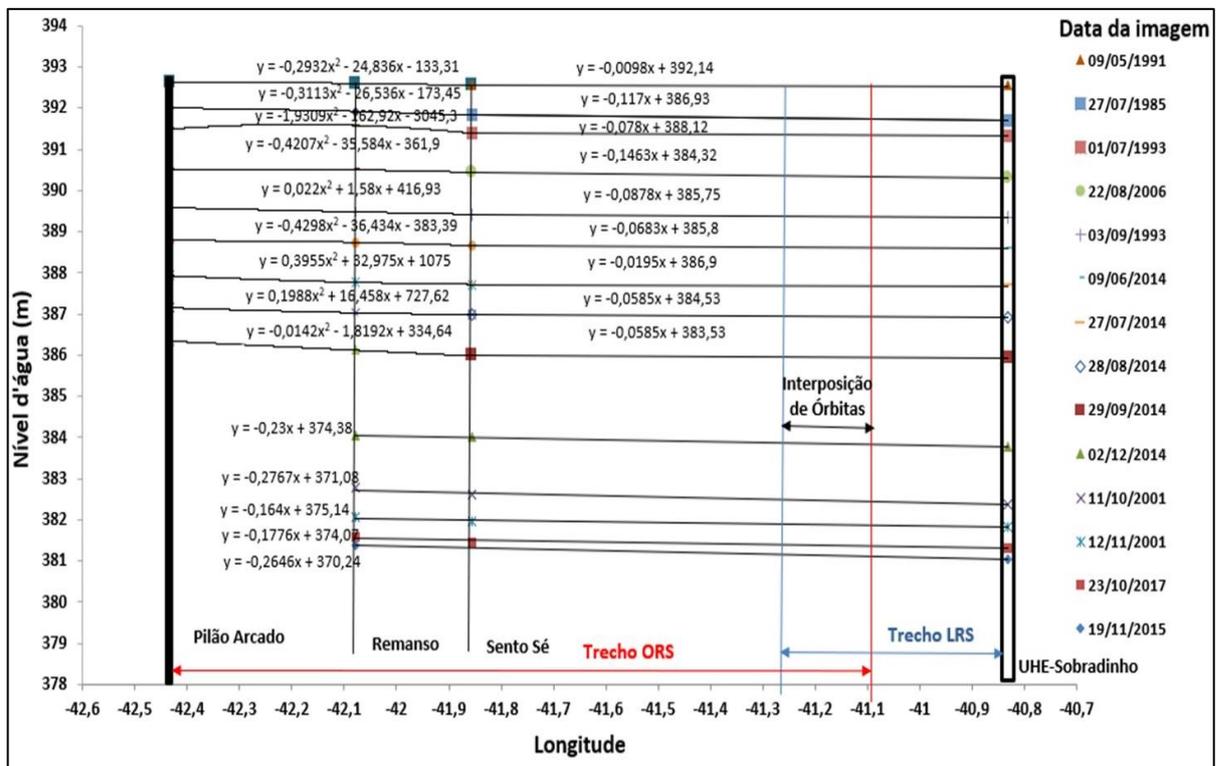
A seleção das imagens óticas e a extração dos seus contornos hídricos foram realizadas em dois momentos distintos. Primeiro foi realizado o processamento das imagens do trecho LRS da Tabela 7, e em seguida o restante do lago (Trecho ORS da Tabela 7). Para cada momento, foram desenvolvidas diferentes técnicas no processamento de imagem para extração da máscara da superfície hídrica (seção 3.3.1.1). O processamento das imagens do LRS se deu sob a forma tradicional, compondo uma série de operações matriciais e vetoriais até a consecução do contorno hídrico. Essa forma demanda tempo e pode resultar em erros sistemáticos, pois desde a obtenção das imagens até o seu produto final tudo é realizado manualmente. O aprendizado ocorrido no trecho LRS permitiu o desenvolvimento de técnicas e inovações, buscando celeridade e eficiência nos resultados do trecho ORS. As diferentes técnicas aplicadas foram avaliadas e não interferiram nos resultados apresentados. Ao final, os trechos se complementam com a realização da batimetria de todo o reservatório de Sobradinho.

## 4.2.2 Definição da relação Elevação-Área da superfície hídrica (E-A)

### 4.2.2.1 Altimetria por dados *in situ*

A atribuição da elevação ENSH ao conjunto de pontos que representam os contornos para o trecho LRS foi a mesma da estação do barramento de Sobradinho, e para o trecho ORS, a elevação foi estimada usando funções ajustadas (Figura 26) pelo nível de água medido nas estações, pois a superfície da água não pode ser considerada horizontal. Percebe-se na Figura 26 que abaixo do nível 386,34m os ajustes foram dados por uma única função, não sendo considerados os registros da Estação Pilão Arcado. Isso ocorreu devido à redução da superfície do lago nesses estágios inferiores, onde o mesmo passa a se comportar como rio. Estas funções permitiram o estabelecimento de uma relação entre as elevações e longitudes medidas das estações ao longo do lago. O valor da elevação atribuído dependia da localização do ponto (uma função de sua longitude).

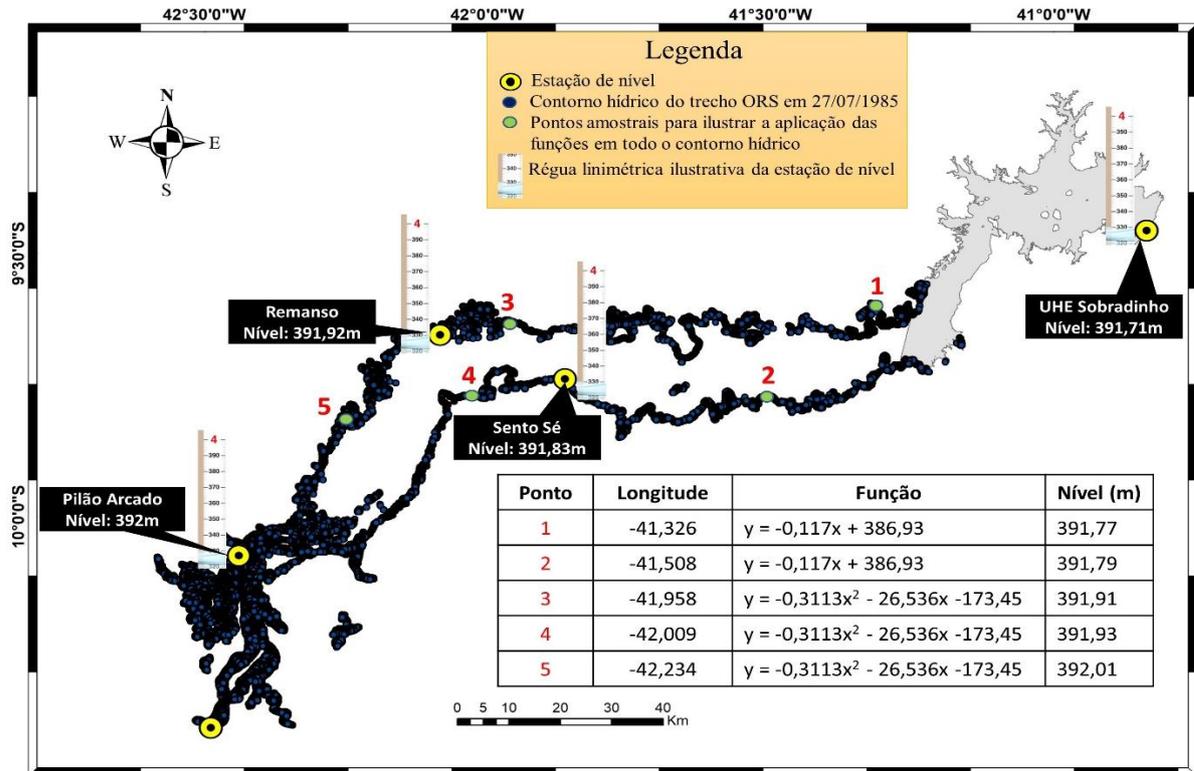
Figura 26- Funções representativas aplicadas ao trecho ORS baseadas nas estações de nível.



Fonte: O autor (2022).

Para melhor ilustração do processo de atribuição da elevação *in situ* nos pontos de contorno hídrico no trecho ORS, a Figura 27 mostra a aplicação das funções na imagem obtida em 27/07/1985.

Figura 27- Atribuição de nível ao contorno hídrico com dados *in situ* no trecho ORS



Fonte: O autor (2022).

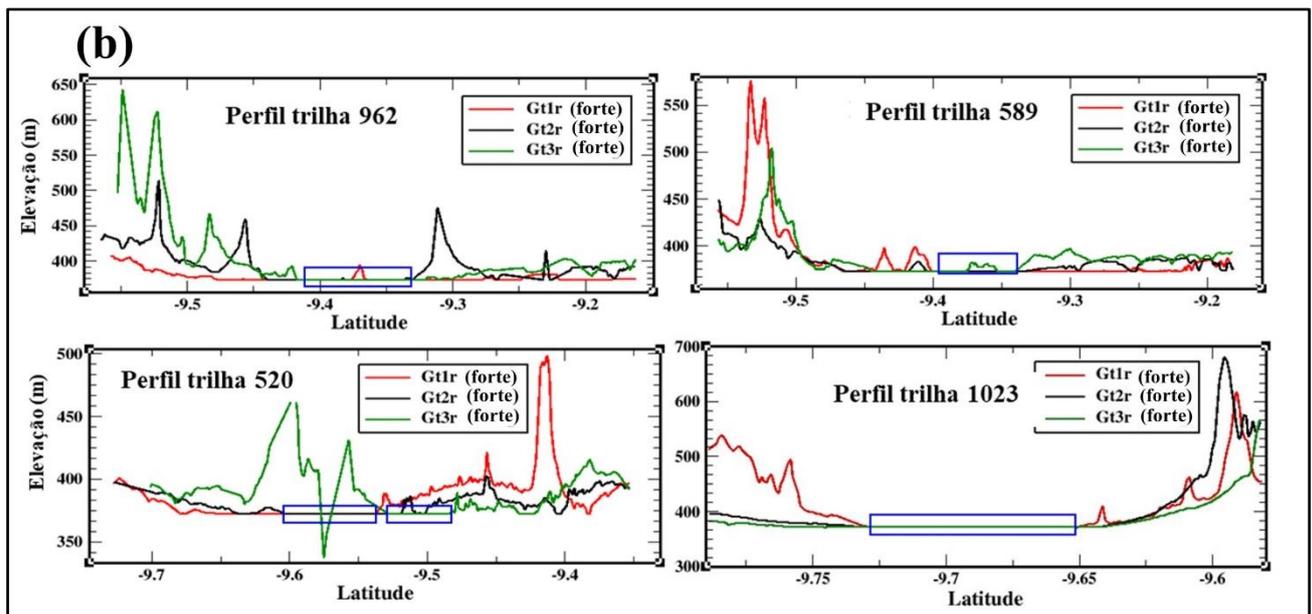
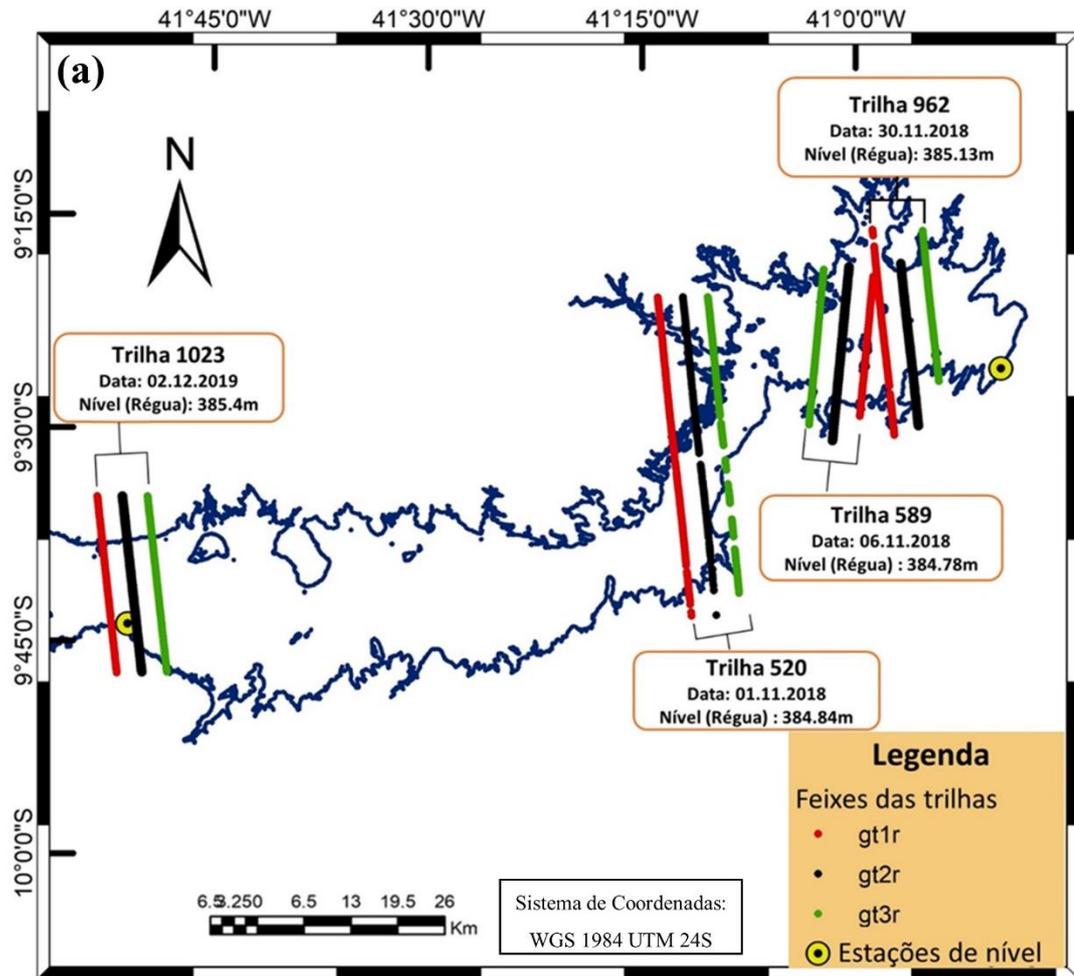
As funções aplicadas aos pontos amostrais 1 e 2 da Figura 27 foram obtidas a partir função linear estabelecida entre a longitude e o registro de nível (na data do contorno hídrico) das estações Sobradinho e Senso Sé. O nível estimado nos pontos de 3 a 5 foi obtido a partir da função quadrática estabelecida entre a longitude e os registros de nível (na data do contorno hídrico) das estações Sento Sé, Remanso e Pilão Arcado. Todos as elevações dos pontos do contorno hídrico no trecho ORS seguiram as funções estabelecidas na Figura 26, conforme ilustrado nos pontos amostrais de 1 a 5.

#### 4.2.2.2 Altimetria pelo ICESat-2

A atribuição da elevação PTSH ao conjunto de pontos se deu conforme descrito na seção 3.3.3, abrangendo o intervalo 385,59-391,88 m. A localização e os perfis aplicados na relação E-A são mostrados na Figura 28.

Figura 28- Mapa de localização com os feixes (gt1r, gt2r e gt3r) contendo a elevação de terreno das trilhas do ICESat-2 (a) e (b) perfil de elevação dos feixes amostrais. As linhas nos perfis representam a elevação obtida pelo ICESat-2 em seus três feixes fortes. Esses perfis são as amostras usadas neste

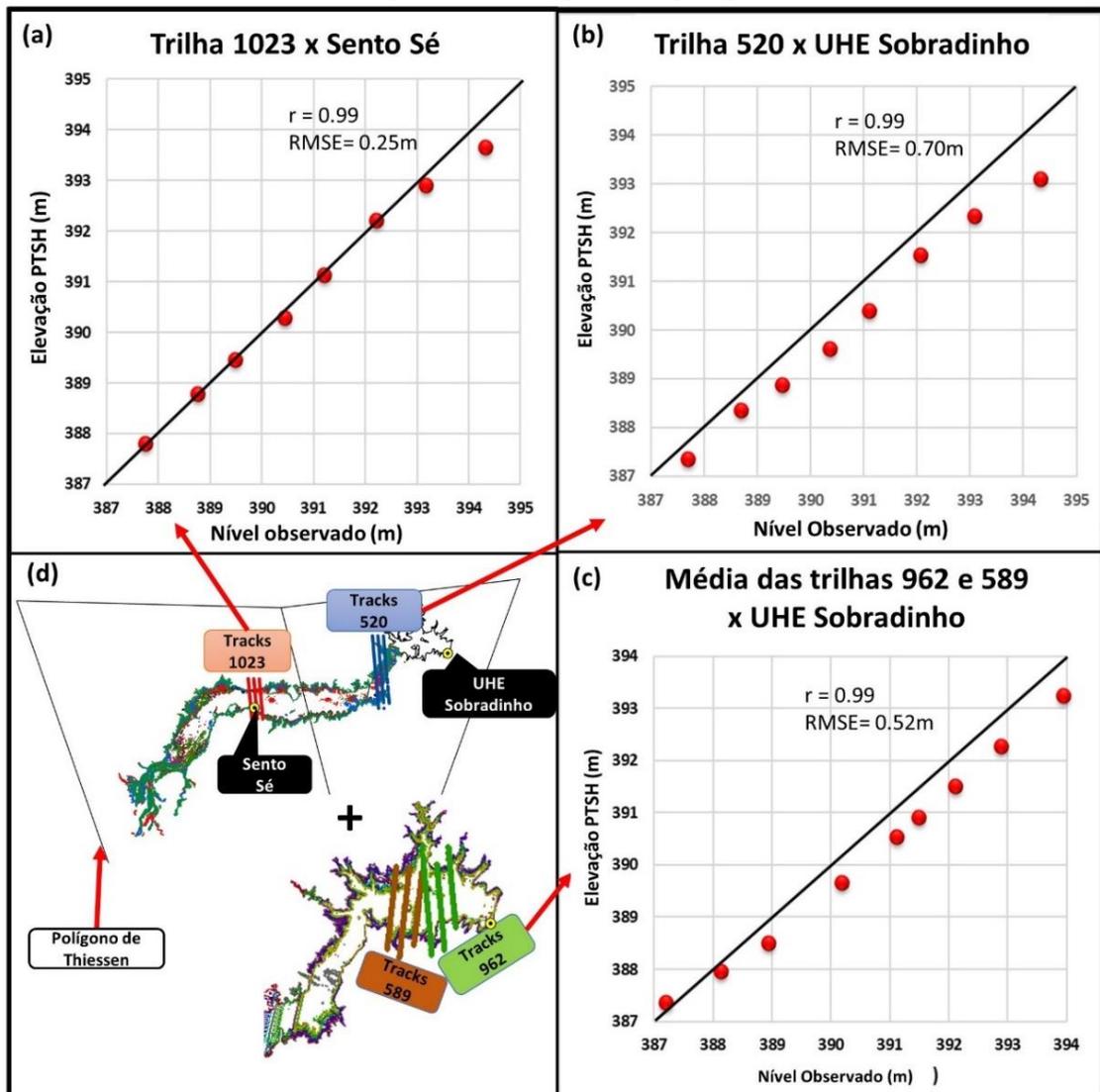
estudo para estabelecer a relação E–A. Os trechos de lago e algumas ilhas internas são destacadas nos retângulos azuis no perfil (b).



Fonte: O autor (2022).

O nível de água observado pode ser comparado com o nível obtido a partir da intersecção entre as imagens e a elevação do perfil do terreno ICESat-2, conforme descrito na Figura 21 (elevação PTSH). O nível da água foi atribuído aos contornos separadamente, dependendo da localização dos pontos desses contornos, que eram das trilhas 520 e 1023 para os contornos ORS e das trilhas 962 e 589 para os contornos LRS. A região de influência de cada trilha foi determinada usando o polígono de Thiessen (Figura 29d). As elevações do ICESat-2 foram comparadas com os níveis de água observados, considerando as estações mais próximas das trilhas (Figura 29a, Figura 29b e Figura 29c).

Figura 29-Nível de água observado e elevação PTSH. (a) e (b) referem-se ao trecho ORS e às oito imagens utilizadas para obter a elevação PTSH. (c) refere-se ao trecho LRS e às nove imagens utilizadas para obter a elevação PTSH. (d) ilustra as trilhas terrestres do ICESat-2 e as respectivas estações utilizadas para comparação.

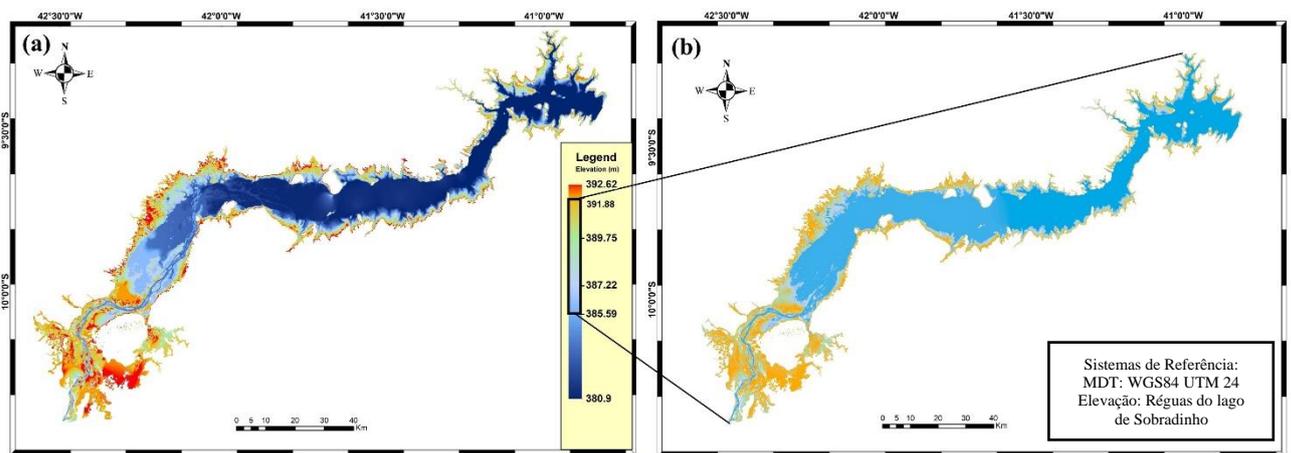


Fonte: O autor (2022).

### 4.2.3 Batimetria

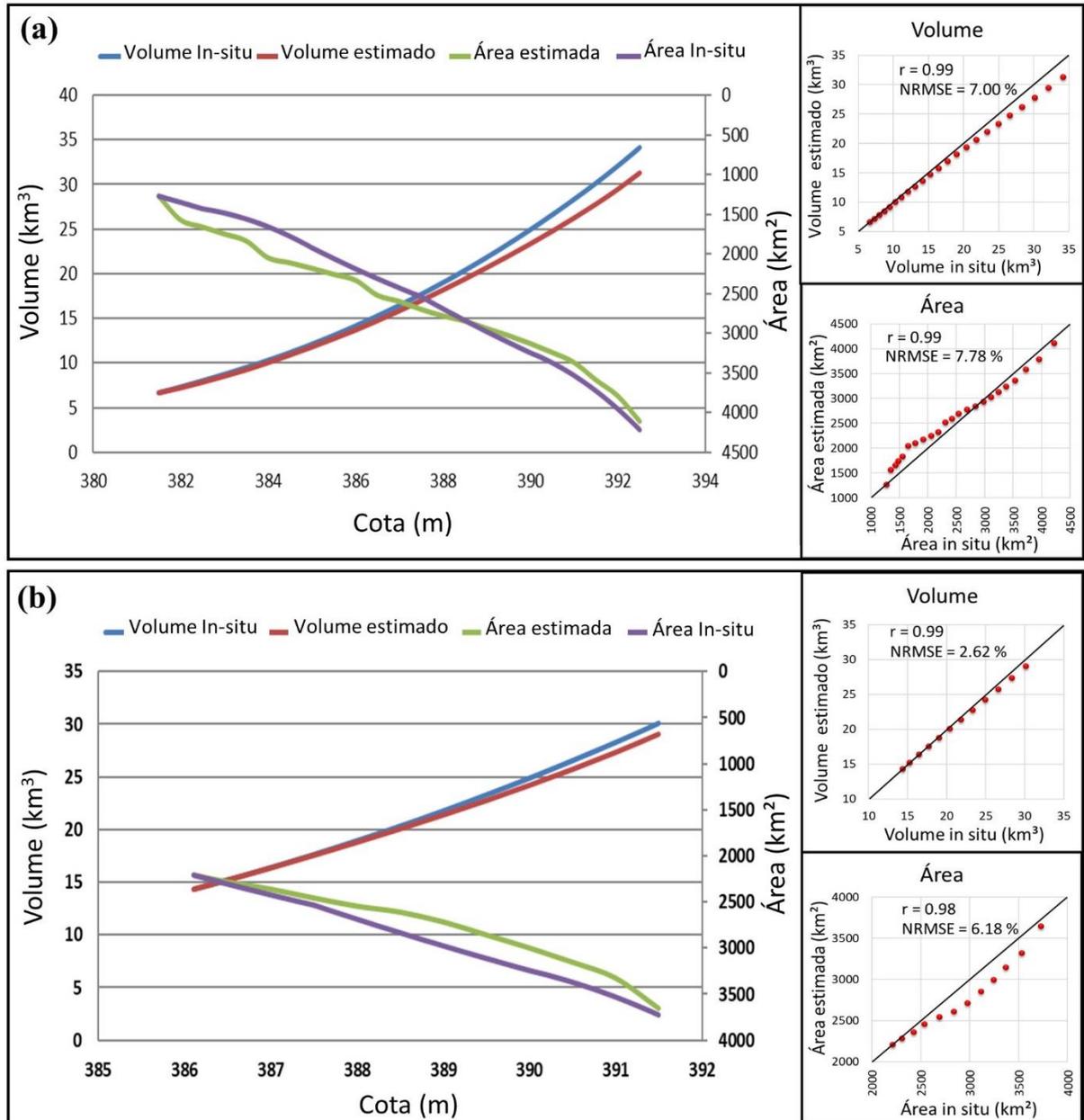
A batimetria foi processada a partir da nuvem de pontos tridimensionais formada pelos contornos das imagens. A Figura 30 mostra o MDT de Sobradinho obtido usando o ENSH e elevações PTSH. A diferença de amplitude foi devido ao intervalo de elevação usado no processo de atribuição (maior amplitude com elevações ENSH). Depois de calcular o MDT do reservatório de Sobradinho, as curvas CAV foram extraídas para níveis acima de 381,5 m (para a elevação ENSH) e acima de 386,1 m (para elevação PTSH), conforme mostrado na Figura 31. Abaixo dessas elevações, volumes de 6,63 e 14,34 km<sup>3</sup>, respectivamente, foram obtidos a partir da curva CAV *in situ*.

Figura 30- Batimetria por imagens de satélite associadas a dois tipos de elevação: ENSH (a) e PTSH (b). A batimetria *in situ* e a parte submersa das batimetrias calculadas não são mostradas.



Fonte: O autor (2022).

Figura 31 - Curvas cota-área-volume e os gráficos comparativos de área e volume para fins de validação das curvas dos reservatórios de (a) Sobradinho a partir do nível observado (ENSH) (b) Sobradinho pelo ICESat-2 (PTSH). Os volumes possuem faixas de variação distintas por conta da amplitude de variação das altimetrias utilizadas.



Fonte: O autor (2022).

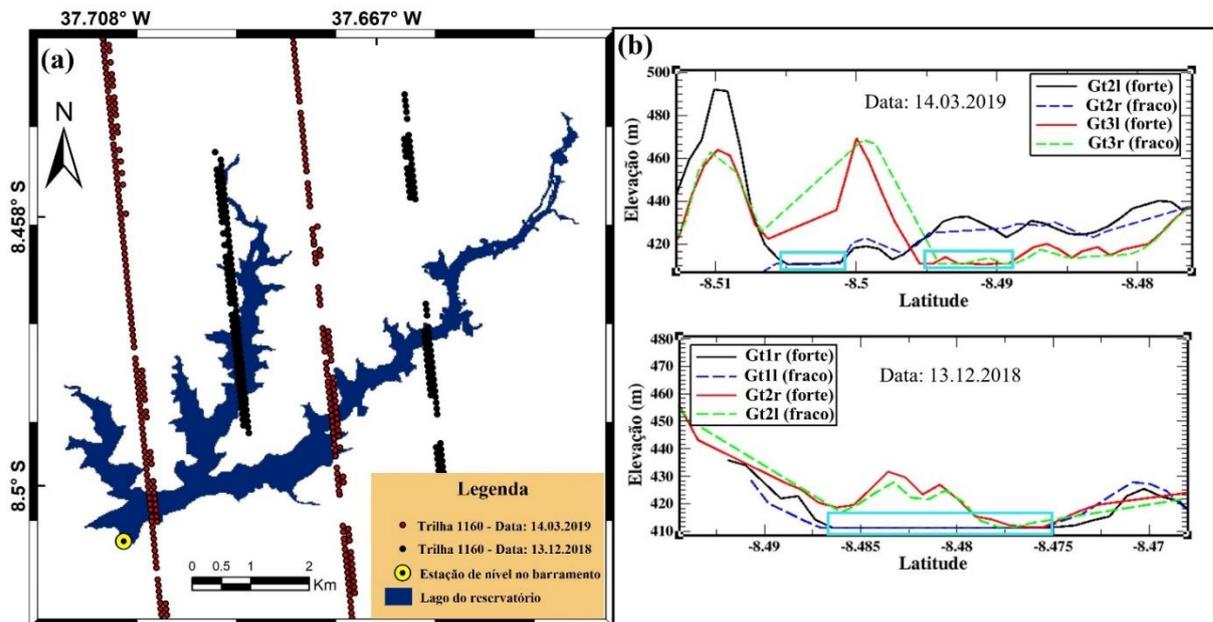
### 4.3 PROCESSAMENTO NO RESERVATÓRIO DE POÇO DA CRUZ

Em Poço da Cruz, devido ao seu menor tamanho, todas os feixes (fortes e fracos) foram utilizados para aumentar o número de pontos com valores de elevação. Os pontos 3D foram interpolados, e o método para o reservatório de Poço da Cruz seguiu os mesmos passos aplicados em Sobradinho. No entanto, apenas a elevação PTSH foi incluída devido a uma quantidade considerável de dados ausentes na série histórica do nível de água observado.

#### 4.3.1 Definição da relação Elevação-Área da superfície hídrica (E-A)

A aplicação das elevações obtidas pelos feixes altimétricos do ICESat-2 às imagens selecionadas se deu conforme seção 3.3.3. A localização e os perfis aplicados são mostrados na Figura 32. Os dados das imagens selecionadas e a elevação obtida pelo ICESat-2 são mostrados na Tabela 8.

Figura 32-Localização da trilha atravessando o reservatório de Poço da Cruz e (b) perfil do terreno do ICESat-2. Os trechos de lago e algumas ilhas internas são destacados nos retângulos azuis no perfil.



Fonte: O autor (2022).

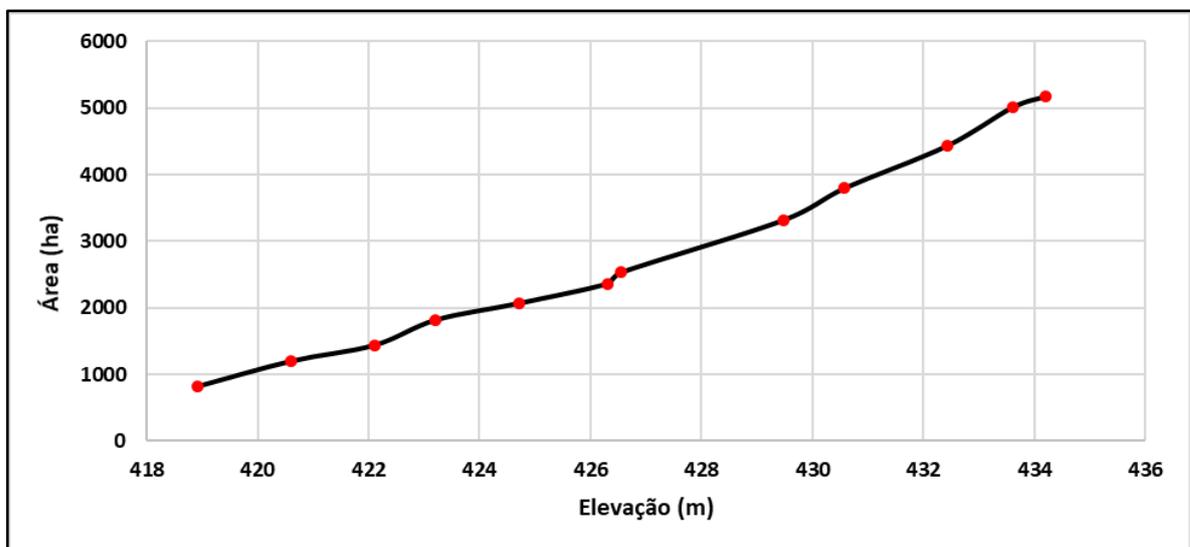
Tabela 8- Imagens Landsat e Sentinel-2 usadas para extrair os contornos hídricos. São fornecidas as elevações dos contornos hídricos e o intervalo vertical entre as imagens.

Data da Imagem	Nível Observado (m)	Elevação PTSH (m)	Intervalo (m)	Satélite
05/04/2004	Falha	434,21		Landsat 5
27/08/2004	Falha	433,6	0,61	Landsat 5
02/11/2005		432,43	1,17	Landsat 5
07/12/2006		431,14	1,85	Landsat 5
27/12/1990	Falha	429,47	1,11	Landsat 5
27/09/1992	Falha	426,55	2,92	Landsat 5
26/01/2002	Falha	426,3	0,25	Landsat 5
28/11/1991	Falha	424,71	1,59	Landsat 5
25/08/2003	Falha	423,21	1,5	Landsat 5
04/08/2013		422,1	1,11	Landsat 8
22/03/2018	Falha	420,6	1,5	Sentinel 2
22/12/2018		418,91	1,69	Sentinel 2

Fonte: O autor (2022).

Vale ressaltar que em razão da ausência de dados observados para a maioria das datas, considerou-se necessário calcular a área da superfície hídrica e observar o comportamento da relação E-A. A hipsometria do Lago de Poço da Cruz é apresentada na Figura 33. A superfície mais baixa atribuída à elevação de 418,91 m (ICESat-2 em 22 de dezembro de 2018) é de 818,56 ha, enquanto o ponto mais alto da curva tem 434,21 m de elevação para uma superfície de 5.182,24 ha, obtendo-se um coeficiente de Pearson  $r = 0,98$ .

Figura 33- Hipsometria do Lago de Poço da Cruz

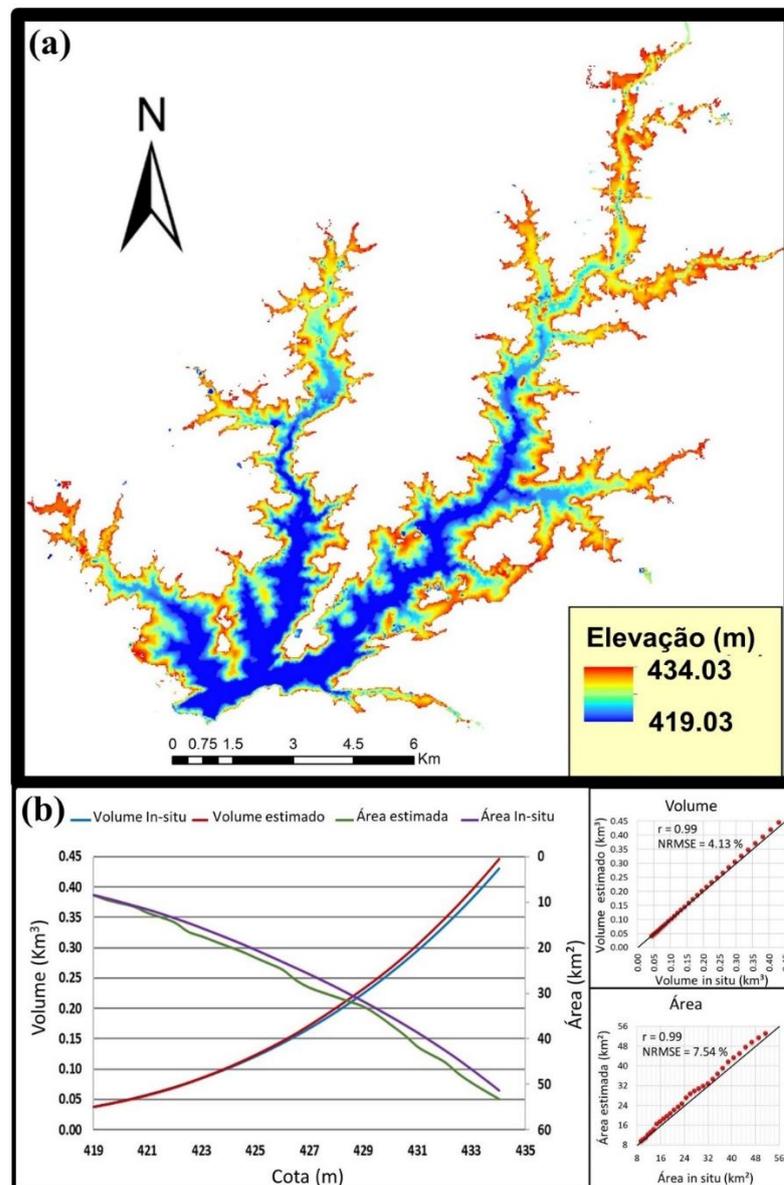


Fonte: O autor (2022).

### 4.3.2 Batimetria

Os pontos tridimensionais dos contornos hídricos foram interpolados, e a aplicação do método para o reservatório de Poço da Cruz seguiu os mesmos passos aplicados em Sobradinho. O MDT resultante é mostrado na Figura 34a. A curva CAV do reservatório foi calculada em elevações acima de 419,03 m, com o volume correspondente de 0,0381 km<sup>3</sup> extraído da curva CAV *in situ* atualizada em 2016 após um levantamento topo-batimétrico. A Figura 34 mostra uma comparação entre as curvas CAV calculadas por batimetria e as curvas *in situ*.

Figura 34- Batimetria calculada com a nuvem de pontos dos contornos (a) e (b) curvas CAV baseadas em levantamentos topobatimétricos e calculadas neste estudo utilizando a elevação PTSH.



Fonte: O autor (2022).

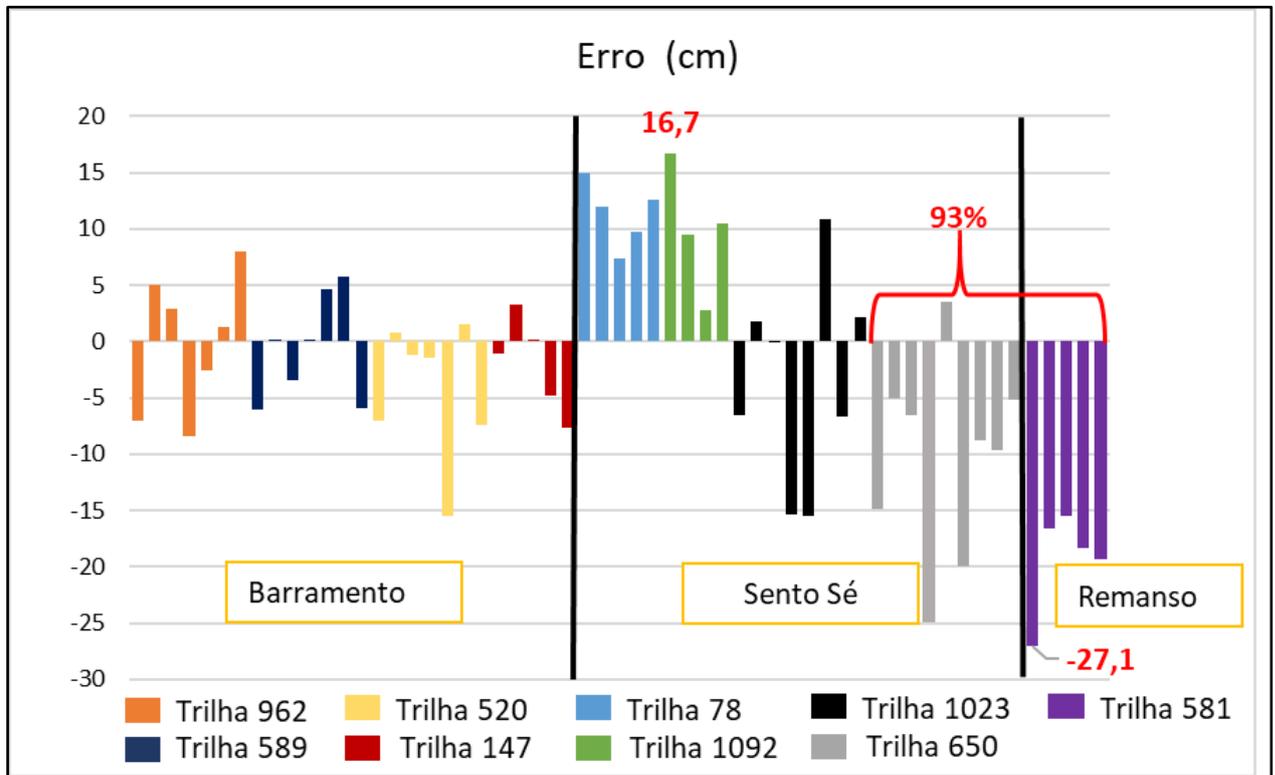
## 4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.4.1 Avaliação dos dados ICESat-2

O potencial do ICESat-2 como fonte de altimetria foi promissor para a geração da batimetria dos reservatórios estudados. A avaliação dos perfis do ICESat-2 sobre o Lago de Sobradinho (Figura 23 e Tabela 6) mostrou que o erro variou de +16,7 a -27,1cm (*in situ* menos ICESat-2) e o desvio padrão das amostras ficou entre 2,65 e 21,13 cm. Os valores médios foram 8,14 e 6,62 cm, respectivamente, para erro e desvio padrão. Essa precisão vertical converge com o estudo de Brunt; Neumann e Smith (2019) que mediram exatidão e precisão inferiores a 5 e 13 cm, respectivamente, utilizando o produto ICESat-2 / ATL03. Observou-se ainda na Figura 23, o bom desempenho do ICESat-2 através dos RMSEs (5,6cm; 11,4cm e 19,8cm) obtidos em relação aos níveis de água observados, quando comparados com os RMSEs (40cm; 36cm e 76cm) encontrados por Ribeiro Neto *et al.* (2021) utilizando a altimetria dos radares Envisat, SARAL e Sentinel-3A, respectivamente, aplicada ao reservatório de Poço da Cruz.

Baseado na Tabela 6, a Figura 35 mostra os erros, cujos valores negativos das trilhas 650 e 581 apontam que o satélite ICESat-2 sobrestimou 93% dos valores de nível em relação às estações de referência Sento Sé e Remanso, respectivamente. Observando o posicionamento dessas trilhas em relação à geometria do reservatório (Figura 24), percebe-se que nas datas de passagem do satélite, a maioria dos feixes dessas trilhas alcançam o início do reservatório, cuja região com ilhas, bancos de areia e restingas gera dificuldades na interpretação das imagens óticas em relação à superfície hídrica do reservatório. Isso contribui para que pontos de terreno sejam erroneamente considerados superfície hídrica, elevando a estimativa média de nível nessas trilhas. A trilha 581, situada numa região ainda mais crítica, apresentou os maiores erros em relação à estação Remanso, corroborando com a percepção da importância da localização dos feixes altimétricos na definição do nível da superfície hídrica. Os menores erros ocorreram nas trilhas comparadas à estação do barramento de Sobradinho (trilhas 962, 589,520 e 147), pois trata-se de uma área com maior superfície hídrica, cuja amostra de pontos das trilhas situam-se totalmente inserida no reservatório. Já as elevações das trilhas 78 e 1092 apresentaram uma subestimativa em relação à estação de Sento Sé, onde observa-se na Figura 24 que as distâncias entre seus feixes e a estação de referência permitem que a declividade da superfície hídrica possa ter contribuído com os erros encontrados. Nesse sentido, devido a sua proximidade com a estação de Sento Sé, a trilha 1023 demonstrou equilíbrio na distribuição dos erros.

Figura 35- Distribuição dos erros das elevações obtidas pelo ICESat-2 em relação às estações de referência nas datas de passagem do satélite sobre a superfície do reservatório de Sobradinho



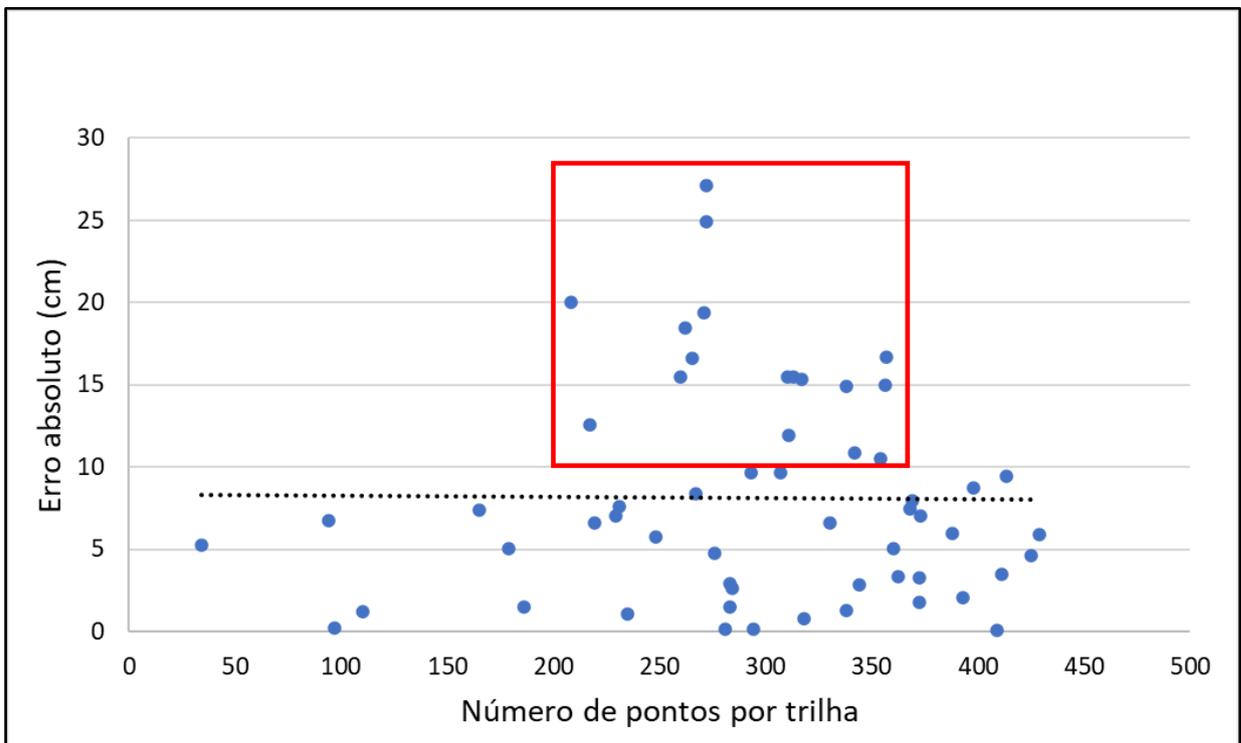
Fonte: O autor (2022).

Vale ressaltar que devido à ação dos ventos, diferenças de densidade entre o ar e a água, variação de profundidades, entre outras causas, as variações naturais como ondas superficiais, correntes, ondas internas, giros e turbulência são alguns tipos de movimentos encontrados em um lago (RIO, 2003). É possível, por exemplo, que reservatórios extensos como Sobradinho sejam estudados segundo a limnologia, onde a zona de influência fluvial assemelha-se a ambientes lóticos; a bacia mais larga e profunda com velocidade e renovação de água mais baixas são as zonas de transição; e a zona lacustre (próxima a barragem) que é a mais ampla e profunda, comportando-se como um ambiente lêntico (HENRY, 1999). Assim, percebe-se que além das possíveis causas de erros identificadas na presente análise, inúmeras outras variáveis atuam no reservatório, podendo interferir nos registros altimétricos capturados na superfície da água. Nesse sentido, Dandabathula *et al.* (2020) avaliou o nível de água obtido pelo produto ICESat-2/ ATL08 em 5 reservatórios no subcontinente indiano. Os autores constataram variações do nível da água (diferença entre a mínima e a máxima elevação dos pontos de uma trilha ICESat-2 sobre a superfície hídrica) na faixa de 1cm a 50cm, com variação média de 28,1cm, sintonizada com a média de 36 cm do presente estudo. Numa análise comparativa com

os dados monitorados da agência indiana de recursos hídricos (CWC- Central Water Commission of India), o ICESat-2 variou seus erros absolutos na faixa de 2 a 39 cm, concordando com os erros aqui apresentados (0,06 a 27,1 cm). As elevações obtidas pelo ICESat-2 /ATL08 em 4.178 corpos hídricos no estudo de Cooley; Ryan e Smith (2021) mostraram que a grande maioria (97%) dos lagos avaliados no mesmo dia têm um desvio padrão inferior a 10 cm, convergindo com os 89% das avaliações (em 57 dias) ocorridas em Sobradinho.

A relação entre o número de pontos amostrais do ICESat-2 sobre a superfície hídrica e o erro apresentado em cada trilha também foi avaliado neste estudo. A densidade de pontos depende da altitude do sensor, velocidade da plataforma, campo de visada do sistema e frequência de amostragem (AXELSSON, 1999). Na Figura 36, pretendeu-se analisar se existia uma tendência de assertividade das elevações em razão da densidade de pontos na trilha.

Figura 36- Distribuição do erro absoluto por densidade de pontos para as trilhas do ICESat-2 (57 dias) sobre a superfície hídrica de Sobradinho. Retângulo vermelho destacando os erros absolutos maiores que 10cm.



Fonte: O autor (2022).

Percebe-se na Figura 36, que os erros acima de 10 cm estiveram concentrados nas trilhas que continham entre 208 e 354 pontos (retângulo vermelho), representando 30% das trilhas avaliadas. No entanto, trilhas cujos feixes possuíam igual ou maior número de pontos

apresentaram erros abaixo de 10cm, o que se infere, conforme a estabilidade da linha de tendência dos erros (linha preta tracejada), que não existe uma relação direta entre densidade de pontos de uma trilha e erros de estimativa. Isso ratifica a importância da observação de outras variáveis físicas na avaliação dos dados do satélite.

#### **4.4.2 Avaliação da relação Elevação-Área da superfície hídrica (E-A)**

Essencial para o ajuste da relação E-A em ambos os reservatórios, a extração da superfície hídrica provou ser uma fonte viável de dados para geração do MDT por meio da interpolação dos contornos hídricos. A identificação de um índice normalizado que defina o corpo d'água e a avaliação dos limiares para as classificações que melhor se ajustam aos contornos hídricos se revelaram como etapas importantes no processo. Estudos anteriores mostraram que 90% da variação de armazenamento pode ser explicada pela extensão da superfície hídrica do lago (XAVIER *et al.*, 2020).

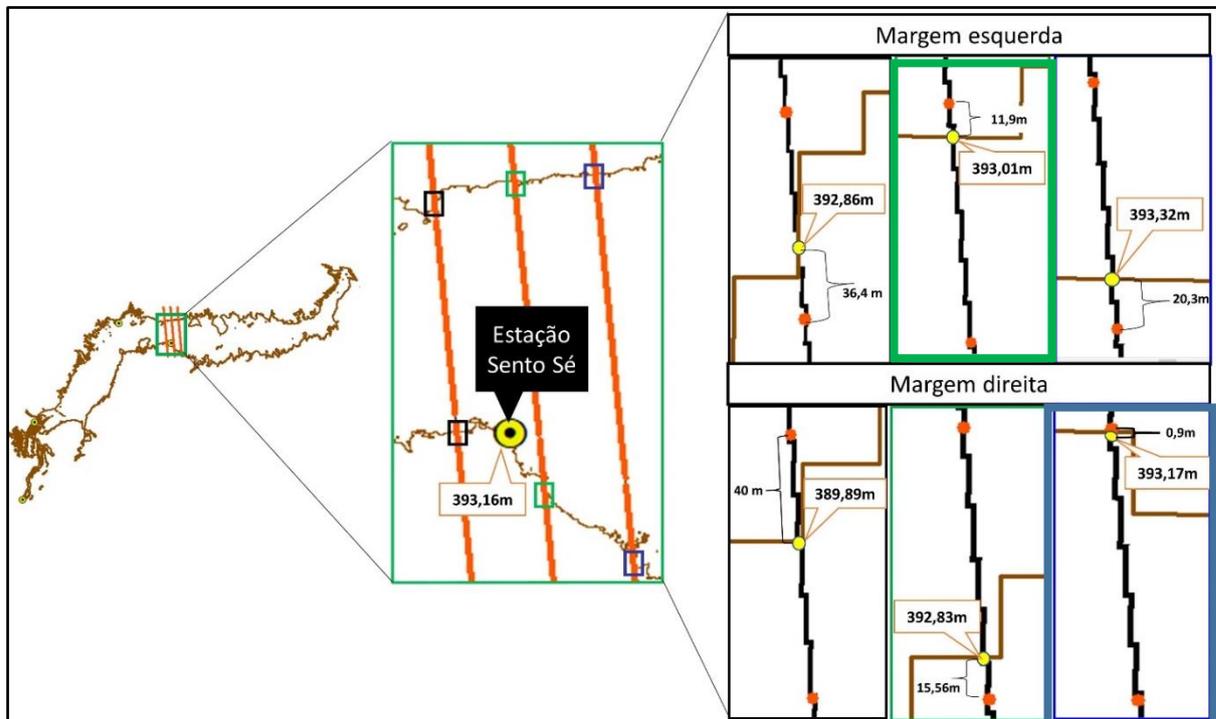
A avaliação das elevações obtidas a partir do PTSH em Sobradinho (Figura 29) revelou que a trilha 1023 sobre a estação Sento Sé (Figura 29a) apresentou a melhor precisão altimétrica, enquanto as demais trilhas (Figura 29b e Figura 29c) subestimaram a elevação. Esse comportamento pode ser influenciado pela localização das estações utilizadas para comparação, o que poderia ser impactado pela inclinação da superfície da água, ou uma imprecisão no modelo geoide induzindo uma inclinação incorreta do nível da água. No entanto, as elevações exibiram alta correlação (0,99) e um RMSE variando entre 0,25 e 0,70 m, corroborando Parrish *et al.* (2019), que comparou LiDAR e ICESat-2 com um RMSE variando entre 0,43 e 0,60 m, e Ma *et al.*, (2020) que apresentou RMSE superior a 0,5 m.

O processo de coleta das elevações PTSH constitui numa etapa importante na definição da relação E-A. A interpolação desses valores de elevação em algumas regiões do lago pode dar resultados incoerentes (área inclinada, contorno de nuvens e sombras tido como água, falhas de imagem vetorizadas sobre os lagos, curso de afluentes interpretados como lago) e deve ser analisada com cuidado. Também em terrenos acidentados nas florestas Boreal ao sul da Finlândia, Neuenschwander *et al.* (2020) validaram medições de terreno e altura do dossel da vegetação a partir de 11 meses (outubro de 2018–setembro de 2019) utilizando dados do produto ICESat-2/ATL08. No geral, as alturas do terreno do ICESat-2 concordaram com o LiDAR aéreo (com precisão vertical de 15 cm) obtido do Serviço Nacional de Levantamento de Terras da Finlândia (NLS - National Land Survey of Finland) com erros verticais inferiores a 75 cm e RMSE = 0,73 m. Tais resultados convergem com os erros verticais médios de 43 cm (diferença média entre as elevações da Figura 29) e 50cm (diferença média entre as elevações

da Tabela 8) com RMSE médio de 0,49m e 0,51m encontrados nas elevações PTSH em relação aos níveis observados em Sobradinho e Poço da Cruz, respectivamente.

Num primeiro momento, utilizou-se um dado raster interpolado pelo método IDW a partir dos pontos de elevações dos feixes, sendo percebido distorções significativas nos valores de elevações quando o ponto estava a grande distância do contorno hídrico. Essa percepção é mostrada na Figura 37 onde os valores de elevação no raster IDW (linha preta ligando os pontos do feixe ICESat-2 no detalhe das margens) coletados sobre o contorno hídrico variam em razão da distância entre o ponto de interseção do contorno hídrico (ponto em amarelo) e o ponto do feixe (ponto vermelho) mais próximo. No caso ilustrado a elevação obtida que mais se aproximou do nível monitorado da Estação Sento Sé (393,16m) foi a da margem direita no detalhe retangular azul (393,17m) devido a sua diminuta distância (0,9 m) entre a interseção do contorno hídrico e o ponto mais próximo do feixe. Todas as elevações foram projetadas para o geoide EGM2008.

Figura 37- Processo de coleta de elevação no trecho ORS com perfil ICESat-2 da trilha 1023 sob o contorno hídrico de 01.07.1993. Os círculos laranjas são os pontos dos feixes altimétricos do ICESat-2 e os círculos amarelos são as interseções do contorno hídrico e o raster IDW.



Fonte: O autor (2022).

A partir dessa observação, aprimorou-se o processo de coleta de elevação utilizando-se apenas a amostra de pontos que estivessem num raio de 3, 6, 9 ou 12m do contorno hídrico, a depender da realidade amostral de cada contorno hídrico analisado. Considerando tais

condições, na ilustração da Figura 37 só seriam aproveitadas as elevações obtidas nos retângulos verde da margem esquerda (393,01 m) e o azul da margem direita (393,17 m), resultando numa elevação média de 393,09 m. Ao passo que se todas as elevações fossem consideradas teríamos uma elevação média de 392,51 m. A diferença das elevações médias coletadas de 0,65 m (todas as coletas) se contrapondo a 0,07 m (apenas 2 coletas) em relação ao nível observado (393,16 m) permite-nos adotar tais condições em favor da melhor precisão. Constatou-se que como a distância longitudinal à trilha do satélite entre os pontos do feixe é de 100m, quanto maior o raio de afastamento, mais pontos amostrais e menor precisão. Essas restrições e a necessidade de uma inspeção cuidadosa podem limitar a aplicabilidade deste método.

Outro aspecto importante é a quantidade de trilhas do ICESat-2 utilizadas para obtenção da elevação. Arsen *et al.* (2014) verificaram que a precisão da elevação diminuía à medida que aumentava o número de perfis usados nos cálculos. Isso também foi verificado neste estudo. Onde os perfis mais baixos funcionaram como estações virtuais para atribuição de elevação média no trecho ORS mediante aplicação do polígono de Thiessen. Percebeu-se que a seleção dos perfis deve ir além dos que possuem elevação mais baixa, mas também da sua localização em relação ao reservatório estudado.

#### **4.4.3 Avaliação da restituição batimétrica**

A batimetria calculada com a elevação da ENSH no reservatório de Sobradinho teve a maior amplitude devido à extensão dos dados de monitoramento. Uma comparação das curvas calculadas e *in situ* mostradas na Figura 31a demonstra um ajuste satisfatório. Além disso, as correlações de Pearson para volume e área de superfície foram, respectivamente, 0,99 e 0,98, e os valores de RMSE Normalizado (NRMSE) foram 7,00% e 7,78%, respectivamente.

Importante ressaltar que a aplicação das funções (Figura 26) na utilização dos dados *in situ* contribuiu para dar uniformidade na distribuição das elevações ao longo do eixo longitudinal do trecho ORS em Sobradinho. Para maior assertividade da curva CAV, nesses casos de lagos extensos que abranjam imagens orbitais de períodos distintos, o cálculo da curva deve abranger o intervalo de elevações comum aos trechos estudados.

A área e o volume estimados em Sobradinho usando a elevação PTSH (Figura 31b) mostraram uma aproximação razoável com as medições *in situ*, apresentando r iguais a 0,99 e 0,98 e NRMSE iguais a 2,62% e 6,18%, respectivamente, convergindo com o estudo realizado por Duan e Bastiaanssen (2013) que estimaram as variações do volume de água em 3 lagos ( Mead, Tana e IJssel ) com diferentes características a partir de quatro diferentes bancos de dados de altimetria por satélite e dados de imagens de satélite, apresentando NRMSE de 5,00%

em relação a área superficial e NRMSE variando de 4,62% a 13,08% em relação aos volumes estimados comparados com as medições *in situ* em dois lagos ( Mead e Tana). A área superficial de Sobradinho foi subestimada ao longo da curva (Figura 31b), com diferença máxima de 8,77% na cota 389m. O perfil do terreno ICESat-2 inferior foi obtido em 6 de novembro de 2018 (386,52 m), que cobria 50% da capacidade de Sobradinho. Em Poço da Cruz (Figura 32b), o perfil do terreno em 14 de março de 2019 (418,75 m) representou 89% do volume total. A exigência de um perfil de terreno que coincida com o estágio mínimo do reservatório é uma importante limitação deste método.

As curvas CAV obtidas pela elevação PTSH (Figura 31b e Figura 34b) demonstraram que a área e o volume estimados ajustaram-se satisfatoriamente com as curvas *in situ*. O volume estimado em Poço da Cruz correspondeu ao volume *in situ* com  $r$  e NRMSE de 0,99 e 4,13%, respectivamente. Percebe-se na Figura 34b, que a capacidade de armazenamento foi subestimada até a cota 422,53m com variação do erro percentual de volume entre 0,26% a 1,33%. Para as demais cotas, os volumes foram superestimados com diferença máxima (volume estimado menos *in situ*) de 16,47 hm<sup>3</sup> no nível 434,53m.

Percebe-se na Figura 31a que o volume estimado em Sobradinho na cota 392.5m (31.3 km<sup>3</sup>) ficou abaixo do volume *in situ* (34.1 km<sup>3</sup>). Esta subestimativa (8,21%) foi observada desde o início da curva, tornando-se mais visível a partir da cota 389m quando a área passa a ser subestimada. As irregularidades da área são percebidas ao longo de toda curva, mas alcança maior valor na cota 384m, cuja área superestimada atinge 392,32 km<sup>2</sup> de diferença. Isso geralmente ocorre por conta dos desafios na interpretação das imagens devido aos efeitos prejudiciais de nuvens, sombras e qualidade da água (JI; ZHANG; WYLIE, 2009) que podem dificultar a definição exata das classes e a identificação dos corpos hídricos e da vegetação.

Outra possível explicação para as diferenças de volume seriam as mudanças na geometria do reservatório de Sobradinho ao longo do tempo. Lopes, Ribeiro Neto e Cirilo (2015) calcularam a deposição de sedimentos ao longo de 32 anos (1978–2009) atingindo uma taxa de sedimentação de 8,25% causando uma redução no volume do reservatório na cota 392,50m para 31,4 km<sup>3</sup>, valor próximo ao encontrado neste estudo. Essa semelhança de volumes pode ser explicada pelo uso de imagens recentes neste estudo, que refletem a geometria das condições atuais. Também usando imagens orbitais, Andrade et al. (2019) encontrou um volume de 34,73 km<sup>3</sup> na cota 393m do reservatório de Sobradinho, o que correspondeu a uma redução de 4,15% em relação ao volume oficial (36,27 km<sup>3</sup>).

Em uma análise comparativa utilizando diferentes altímetros, Gao et al. (2012) estimaram a área e o volume de Sobradinho e de outros 33 grandes reservatórios. Integrando altimetria de

radar e as imagens do MODIS, a área calculada (3.120 km<sup>2</sup>) para a elevação de 391,5 m foi 16,21% menor que a área CAV oficial (3.724 km<sup>2</sup>). Para a mesma elevação (391,5 m), usando imagens do Landsat-5 e Landsat-8 neste estudo, a área superficial foi subestimada em 3,6%.

Comparando os volumes estimados nas curvas das Figura 31a e Figura 31b para os dados na cota 391,5 m, os erros percentuais de volume foram 7,7% e 3,46%, usando as elevações ENSH e PTSH, respectivamente. Embora a diferença de desempenho seja pequena, os resultados promissores do ICESat-2 mostram a importância da precisão altimétrica para o estabelecimento das curvas CAV.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O monitoramento contínuo da morfologia dos reservatórios para o gerenciamento eficiente e eficaz da água é considerado essencial, ganhando relevância socioeconômica em cenários de escassez hídrica como o semiárido brasileiro. O método proposto foi aplicado inicialmente a um grande reservatório (Sobradinho), e seus resultados foram comparados com aqueles de um levantamento topobatimétrico convencional. Ao utilizar a altimetria LiDAR do ICESat-2, a existência de perfis ICESat-2 com níveis baixos em Poço da Cruz favoreceu uma melhor cobertura volumétrica, ao contrário dos resultados de Sobradinho.

O conhecimento das variações da superfície hídrica dos reservatórios foi etapa essencial na caracterização espaço-temporal dos lagos em estudo. A aplicação dos índices normalizados (NDWI e MNDWI) nas imagens estudadas permitiu avaliar com razoável precisão as áreas de superfície estimadas com NRMSE dentro de 7,8% das áreas de superfície das curvas CAV oficiais.

Algumas dificuldades foram encontradas na definição dos contornos hídricos quando duas imagens estavam espacialmente próximas, resultando no cruzamento de dois contornos consecutivos. Isso geralmente ocorreu devido aos desafios de interpretação das classes exatas das imagens (identificação de corpos d'água), cuja minimização foi possível mediante a aplicação de novas técnicas como a utilização das Bandas BQA para mitigar as interferências de nuvens, o recurso computacional em nuvem do GEE para o cálculo do NDWI e o processamento das imagens saídas do GEE até a vetorização dos contornos hídricos através do modelo desenvolvido no QGIS. Isso permitiu, por exemplo, realizar de forma célere e eficiente inúmeras tentativas para a definição de limiares do NDWI que melhor representassem a geometria do reservatório de Sobradinho.

Num cenário com escassez de dados altimétricos, a metodologia desenvolvida mostrou-se versátil por permitir o cálculo batimétrico a partir da combinação de imagens multitemporais de satélite com diferentes fontes de dados altimétricos. A incorporação neste estudo de um reservatório da proporção de Sobradinho requereu a inserção de elementos novos à metodologia, visando aprimorar a técnica aplicada. São exemplos: A divisão do reservatório de Sobradinho em trechos (LRS e ORS) e posteriormente integrá-los numa só batimetria, mesmo com imagens obtidas em períodos distintos; o uso de equações para reduzir o efeito da curvatura do lago no trecho ORS; e a otimização do processo de atribuição das elevações aos contornos hídricos visando maior precisão da relação E–A. Os objetivos propostos inicialmente foram alcançados satisfatoriamente, cabendo apenas observar as recomendações apresentadas adiante.

Outro aspecto exitoso da metodologia foi permitir que seja estimada não só a curva CAV, mas também a batimetria propriamente dita, cujo MDT é fundamental para modelagens mais complexas, em 2 e 3 dimensões, estudos de qualidade de água, zoneamento de parques aquícolas, alocação negociada de água, etc.

Adaptável aos dados altimétricos *in situ* e de satélite, o método se revelou uma alternativa econômica e viável face aos dados gratuitos existentes com potencial de gerar batimetria de alta resolução. Esta informação pode ser útil, por exemplo, no processo de validação do satélite SWOT, assumindo que este satélite será capaz de realizar uma estimativa semelhante.

Os resultados promissores desta pesquisa sugerem a replicação do método em reservatórios de dimensões e formas intermediárias aos aqui estudados. O método aqui apresentado possui limitações. A disponibilidade de imagens apropriadas que retrate a variação da superfície hídrica e detecção precisa do contorno são pré-requisitos. A presença de um perfil de terreno que coincida com o estágio mínimo do reservatório é o requisito mais importante. Recomenda-se para estudos futuros:

- O emprego de diferentes métodos e outros instrumentos de sensoriamento remoto para conhecimento da parte inferior da batimetria abaixo do nível mínimo utilizado no cálculo;
- A utilização de imagens de radar do satélite Sentinel-1 para reduzir os efeitos das nuvens na definição da superfície hídrica;
- A aplicação de outras metodologias para melhorar o desempenho na extração dos contornos hídricos;
- A utilização de outras fontes altimétricas com sensores do tipo LiDAR (tipo perfilamento a laser do PE3D) para transpor o nível de água das réguas em reservatórios com referencial vertical próprio para um referencial comum com as elevações obtidas pelo ICESat-2, permitindo uma avaliação dos dados sobre a superfície hídrica a partir de um referencial unificado. Com o uso do PE3D, por exemplo, seria possível validar os dados do ICESat-2 sobre a superfície hídrica do reservatório de Poço da Cruz;
- A combinação dos produtos ATL03 e ATL08 do ICESat-2 para melhorar o processo de aquisição de dados altimétricos e a precisão da elevação do terreno, permitindo a identificação das informações topográficas submarinas. Essas características melhorariam o processo de atribuição de elevação aos contornos hídricos, haja vista que o ATL03 é uma fonte de dados de fótons para todos os produtos ATLAS, e a distância entre os pulsos de laser é inferior à do ATL08;

- Avaliação do emprego da mediana, ao invés da média, para definição do valor do nível de água médio obtido pelas elevações medidas pelo ICESat-2, visando reduzir os efeitos das discrepâncias (outliers) causados por registros altimétricos insatisfatórios do satélite;
- A utilização de diferentes missões altimétricas para aprimorar a metodologia na obtenção de batimetrias 3D a partir da interação de altímetros distintos.

## REFERÊNCIAS

ABREU, L. G. Á. de C.; MAILLARD, P. A model based on satellite altimetry and imagery to evaluate water volume changes in a reservoir in Brazil, 2014. V. 9239, p. 92391B. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.2067270>>.

AGOSTINHO, A. A.; GOMES, L. C.; PELICICE, F. M. Os Reservatórios Brasileiros Capítulo. *In*: EDUEM (Org.). **Ecologia e manejo de recursos pesqueiros em reservatórios do Brasil**. Maringá-PR: 2007, p. 42–67.

AGOSTINHO, A. A.; PELICICE, F. M.; GOMES, L. C. Dams and the fish fauna of the Neotropical region: Impacts and management related to diversity and fisheries. **Brazilian Journal of Biology**, 2008. v. 68, n. 4 SUPPL., p. 1119–1132.

ALBRIGHT, A.; GLENNIE, C. Nearshore Bathymetry from Fusion of Sentinel-2 and ICESat-2 Observations. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, 2021. v. 18, n. 5, p. 900–904.

ALCÂNTARA, E.; NOVO, E.; STECH, J.; ASSIREU, A.; NASCIMENTO, R.; LORENZZETTI, J.; SOUZA, A. Integrating historical topographic maps and SRTM data to derive the bathymetry of a tropical reservoir. **Journal of Hydrology**, 2010. v. 389, n. 3–4, p. 311–316.

ALSDORF, D. E.; RODRÍGUEZ, E.; LETTENMAIER, D. P. Measuring surface water from space. **Reviews of Geophysics**, 2007. v. 45, n. 2, p. 1–24.

ANA/ANEEL. Resolução Conjunta Nº 3 de 10 de agosto de 2010. 2010. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/monitoramento-hidrologico/resolucao-conjunta>>. Acesso em: 17 dez. 2021.

ANA. Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do Rio São Francisco, 2009. v. 4, p. 1–15.

\_\_\_\_\_. **Relatório de Elaboração da CAV - ANA-CAV Açude Poço da Cruz**, 2017.

\_\_\_\_\_. Reservatórios do Semiárido Brasileiro: hidrologia, balanço hídrico e operação, 2020.

ANDERSEN, H. E.; REUTEBUCH, S.E. MCGAUGHEY, R. J. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 2006. v. 32, n. 5, p. 355–366.

ANDRADE, A. C. F.; PASSAIA, O. A.; MARTINS, V. S.; PAIVA, R. C. D.. Estimativa da batimetria do reservatório de sobradinho por imagens orbitais. **anais do xix simpósio brasileiro de sensoriamento remoto**, Santos, Brasil, 2019. v. 19, p. 1480–1483. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/estimativa-da-batimetria-do-reservatorio->

de-sobradinho-por-imagens-orbitais>.

ANDRADE, E. M. de; ARAÚJO, L. de F. P.; ROSA, M. de F.; DISNEY, W.; ALVES, A. B. Seleção dos indicadores da qualidade das águas superficiais pelo emprego da análise multivariada. **Engenharia Agrícola**, 2007. v. 27, n. 3, p. 683–690.

ANEEL. Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA. 2021.

ARAÚJO, J. C. de; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, 2006. v. 51, n. 1, p. 157–170.

ARMON, M.; DENTE, E.; SHMILOVITZ, Y.; MUSHKIN, A.; COHEN, T. J.; MORIN, E.; ENZEL, Y. Determining Bathymetry of Shallow and Ephemeral Desert Lakes Using Satellite Imagery and Altimetry. **Geophysical Research Letters**, 2020. v. 47, n. 7, p. 1–9.

ARSEN, A.; CRÉTAUX, J.; BERGE-NGUYEN, M.; DEL RIO, R. A. Remote sensing-derived bathymetry of Lake Poopó. **Remote Sensing**, 2014. v. 6, n. 1, p. 407–420.

ASADZADEH JARIHANI, A.; CALLOW, J. N.; JOHANSEN, K.; GOUWELLEEUW, B. Evaluation of multiple satellite altimetry data for studying inland water bodies and river floods. **Journal of Hydrology**, 2013. v. 505, p. 78–90. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.010>>.

AVISO. SATELLITE ALTIMETRY DATA. **Os produtos altímetro foram produzidos e distribuídos por Aviso +**, 2021. Disponível em: <<https://www.aviso.altimetry.fr/>>. Acesso em: 22 nov. 2021.

AXELSSON, P. Processing of laser scanner data—algorithms and applications. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 1999. v. 54, n. 2, p. 138–147. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271699000088>>.

BABEL, B. J.; PARRISH, C. E.; MAGRUDER, L. A. ICESat-2 Elevation Retrievals in Support of Satellite-Derived Bathymetry for Global Science Applications. **Geophysical Research Letters**, 2021. v. 48, n. 5, p. 1–9.

BAGHDADI, N.; LEMARQUAND, N.; ABDALLAH, H.; BAILLY, J. S.. The relevance of GLAS/ICESat elevation data for the monitoring of river networks. **Remote Sensing**, 2011. v. 3, n. 4, p. 708–720.

BALTSAVIAS, E. P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 1999. v. 54, n. 2–3, p. 83–94.

BAYISSA, Y.; TADESSE, T.; DEMISSE, G.; SHIFERAW, A. Evaluation of satellite-based rainfall estimates and application to monitor meteorological drought for the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Remote Sensing**, 2017. v. 9, n. 7, p. 1–17.

BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B. da; BEZERRA, B. G. Avaliação dos efeitos atmosféricos no albedo e NDVI obtidos com imagens de satélite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2011. v. 15, p. 709–717.

BOBACH, T.; FARIN, G.; HANSFORD, D.; UMLAUF, G. Natural neighbor extrapolation using ghost points. **CAD Computer Aided Design**, 2009. v. 41, n. 5, p. 350–365. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2008.08.007>>.

BRANDO, V. E.; ANSTEE, J. M.; WETTLE, M.; DEKKER, A. G.; PHINN, S. R.; ROELFSEMA, C. A physics based retrieval and quality assessment of bathymetry from suboptimal hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, 2009. v. 113, n. 4, p. 755–770. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2008.12.003>>.

BRISCO, B.; SCHMITT, A.; MURNAGHAN, K.; KAYA, S.; ROTH, A. Sar polarimetric change detection for flooded vegetation. **International journal of digital earth**, 2013. v. Vol.6(2), p. 103–114.

BRUNT, K. M.; NEUMANN, T. A.; SMITH, B. E. Assessment of ICESat-2 Ice Sheet Surface Heights, Based on Comparisons Over the Interior of the Antarctic Ice Sheet. **Geophysical Research Letters**, 2019. v. 46, n. 22, p. 13072–13078.

BUSKER, T. DE ROO, A.; GELATI, E.; SCHWATKE, C.; ADAMOVIC, M.; BISSELINK, B.; PEKEL, J.-F.; COTTAM, A. A global lake and reservoir volume analysis using a surface water dataset and satellite altimetry. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, 2019. p. 1–32.

CARVALHO, L. D. S. M. **Altimetria por satélite na determinação do nível de reservatórios hídricos**. [S.l.]: Universidade Estadual Paulista, 2020.

CARVALHO, M. S. B. de S.; MARTINS, E. S. P. R.; SOARES, A. M. L.; CHAVES, L. C. G.; OLIVEIRA, F. de A. J. De; PERINI, D. S.; MENESCAL, R. de A.; SCHERER-WARREN, M. **Levantamento dos espelhos d'água acima de 20ha em todo o território brasileiro através de sensoriamento remoto Margareth**. Natal: 2009.

CASTLE, S.; THOMAS, B.; J., REAGER.; M., RODELL.; S., SWENSON.; S., FAMIGLIETTI. J. Groundwater depletion during drought threatens future water security of the Colorado River Basin. **Geophysical Research Letters**, 2014. v. 41, p. 5904–5911.

CASTRO, F. C. E; CENTENO, T. M. Segmentação de imagens geradas por perfilamento a laser para a delimitação de árvores individuais em uma área de reflorestamento de eucaliptos. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2005. p. 737–744.

CENTENO, J. A. S.; MITISHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento**

**Remoto**, 2007. v. 1, p. 3645–3652.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; BARSÍ, J. A. Revised Landsat-5 thematic mapper radiometric calibration. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, 2007. v. 4, p. 490–494.

CHAVEZ, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, 1988. v. 24, n. 3, p. 459–479.

CHESF. Descrição do Aproveitamento de Sobradinho. 2020.

CHIPMAN, J. W.; LILLESAND, T. M. Satellite-based assessment of the dynamics of new lakes in southern Egypt. **International Journal of Remote Sensing**, 2007. v. 28, n. 19, p. 4365–4379.

CHU, Y.; LI, J.; JIANG, W.; ZOU, X.; FAN, C.; XU, X.; DADZIE, I. Monitoring level fluctuations of the lakes in the Yangtze River basin from radar altimetry. **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences**, 2008. v. 19, n. 1–2, p. 63–70.

CIRILO, J. A. **Simulação Hidrodinâmica bidimensional do lago de Sobradinho**. Fortaleza: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 1994.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, B. de M.; CAMPOS, P. H. de A. L. Pernambuco Tridimensional: Base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. **Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa**, 2015. p. 1–10.

COELHO, C.; HEIM, B.; FOERSTER, S.; BROSINSKY, A.; DE ARAÚJO, J. C. In situ and satellite observation of CDOM and chlorophyll-a dynamics in small water surface reservoirs in the Brazilian semiarid region. **Water (Switzerland)**, 2017. v. 9, n. 12.

COLLISCHONN, B.; CLARKE, R. T. Estimativa e incerteza de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2016. v. 21, n. 4, p. 719–727.

COLTIN, B.; MCMICHAEL, S.; SMITH, T.; FONG, T. Automatic boosted flood mapping from satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, 2016. v. 37, n. 5, p. 993–1015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2016.1145366>>.

COOLEY, S. W.; RYAN, J. C.; SMITH, L. C. Human alteration of global surface water storage variability. **Nature**, 2021. v. 591, n. 7848, p. 78–81. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41586-021-03262-3>>.

CORREIA, M. F.; SILVA DIAS, M. A. F. da; SILVA ARAGÃO, M. R. da. Soil occupation and atmospheric variations over Sobradinho Lake area. Part one: An observational

analysis. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 2006. v. 94, n. 1–4, p. 103–113.

CPRM. Investigação da Dinâmica Fluvial em Grandes Bacias Hidrográficas com Uso de Técnicas de Sensoriamento Remoto. 2007. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Pesquisa-e-Inovacao/Saiba-Mais---Investigacao-da-Dinamica-Fluvial-em-Grandes-Bacias-Hidrograficas-com-Uso-de-Tecnicas-de-Sensoriamento-Remoto-6598.html>>. Acesso em: 30 abr. 2022.

CRÉTAUX, J. F.; JELINSKI, W.; CALMANT, S.; KOURAEV, A.; VUGLINSKI, V.; BERGÉ-NGUYEN, M.; GENNERO, M. C.; NINO, F.; ABARCA DEL RIO, R.; CAZENAVE, A.; MAISONGRANDE, P. SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data. **Advances in Space Research**, 2011. v. 47, n. 9, p. 1497–1507.

\_\_\_\_\_. Lake Volume Monitoring from Space. **Surveys in Geophysics**, 2016. v. 37, n. 2, p. 269–305.

CRÉTAUX, J. F.; BIRKETT, C. Lake studies from satellite radar altimetry. **Comptes Rendus - Geoscience**, 2006. v. 338, n. 14–15, p. 1098–1112.

DANDABATHULA, G.; VERMA, M.; SATYANARAYANA, P.; SRINIVASA RAO, S. Evaluation of ICESat-2 ATL08 Data Product: Performance Assessment in Inland Water. **European Journal of Environment and Earth Sciences**, 2020. v. 1, n. 3, p. 1–7.

DEMIR, B.; BOVOLO, F.; BRUZZONE, L. Updating land-cover maps by classification of image time series: A novel change-detection-driven transfer learning approach. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 2013. v. 51, n. 1, p. 300–312.

DNOCS. Perímetro Irrigado do Moxotó. 2020. Disponível em: <[https://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros\\_irrigados/pe/moxoto.htm](https://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/pe/moxoto.htm)>. Acesso em: 25 out. 2020.

DONG, J.; XIAO, X.; MENARGUEZ, M.A.; ZHANG, G.; QIN, Y.; THAU, D.; BIRADAR, C.; MOORE, B. Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine. **Remote Sensing of Environment**, 2016. v. 185, p. 142–154. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.016>>.

DU, Z.; LINGHU, B.; LING, F.; LI, W.; TIAN, W.; WANG, H.; GUI, Y.; SUN, B.; ZHANG, X. Estimating surface water area changes using time-series Landsat data in the Qingjiang River Basin, China. **Journal of Applied Remote Sensing**, 2012. v. 6, n. 1, p. 063609.

DUAN, Z.; BASTIAANSEN, W. G. M. Estimating water volume variations in lakes

and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. **Remote Sensing of Environment**, 2013. v. 134, p. 403–416. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.010>>.

ESTIGONI, M. V. **Influência da quantidade e disposição de dados na modelação de terrenos aplicada a batimetria de reservatórios. Estudos de caso: UHE Três Irmãos – SP e UHE Chavantes – SP.** (Dissertação) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). Guia Técnico do Sentinel-2 MSI. **EUROPEAN SPACE AGENCY**, 2020. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi>>. Acesso em: 18 fev. 2020.

FORFINSKI-SARKOZI, N. A.; PARRISH, C. E. Analysis of MABEL bathymetry in Keweenaw Bay and implications for ICESat-2 ATLAS. **Remote Sensing**, 2016. v. 8, n. 9.

FRANCO, D. P. **Momentos de Coragem (Pelo Espírito Joanna de Ângelis)**. 8. ed. Salvador: LEAL, 2014.

FREITAS, S. R. C.; BLITZKOW, D. Altitudes e geopotencial. **IGeS Bulletin – Special Issue for South America**, 1999. n. 9, p. 47–62.

GAO, H. Satellite remote sensing of large lakes and reservoirs: from elevation and area to storage. **WIREs Water**, 2015. v. 2, n. 2, p. 147–157.

GAO, H.; BIRKETT, C.; LETTENMAIER, D. P. Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. **Water Resources Research**, 2012. v. 48, n. 9, p. 1–12.

GARAMBOIS, P.; CALMANT, S.; ROUX, H.; PARIS, A.; MONNIER, J.; FINAUD-GUYOT, P.; SAMINE MONTAZEM, A.; SANTOS DA SILVA, J. Hydraulic visibility: Using satellite altimetry to parameterize a hydraulic model of an ungauged reach of a braided river. Chichester, UK: **Hydrological processes**, 2017. v. 31, n. 4, p. 756–767.

GELLA, G. W. Statistical evaluation of High Resolution satellite precipitation products in arid and semi-arid parts of Ethiopia: a note for hydro-meteorological applications. **Water and Environment Journal**, 2019. v. 33, n. 1, p. 86–97.

GETIRANA, A.; JUNG, H. C.; TSENG, K. H. Deriving three dimensional reservoir bathymetry from multi-satellite datasets. **Remote Sensing of Environment**, 2018. v. 217, n. May, p. 366–374. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.030>>.

GIONGO, M.; KOEHLER, H.S.; MACHADO, S. DO A.; KIRCHNER, F.F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 2010. v. 30, n. 63, p. 231–244.

GLEICK, P. H. Global Freshwater Resources: Soft-Path Solutions for the 21st Century.

**Science**, 2003. v. 302, n. 5650, p. 1524–1528.

GLENN, J.; TONINA, D.; MOREHEAD, M.D.; FIEDLER, F.; BENJANKAR, R. Effect of transect location, transect spacing and interpolation methods on river bathymetry accuracy. **Earth surface processes and landforms**, 2016. v. 41, n. 9, p. 1185–1198.

GOES FILHO, A. Gestão de reservatórios com sistema de apoio à decisão espacial: o caso do açude Castanhão. 2012.

HABETS, F.; MOLÉNAT, J.; CARLUER, N.; DOUEZ, O.; LEENHARDT, D. The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: A review. **Science of the Total Environment**, 2018. v. 643, p. 850–867.

HALL, A.C.; SCHUMANN, G.J.P.; BAMBER, J.L.; BATES, P.D.; TRIGG, M.A. Geodetic corrections to Amazon River water level gauges using ICESat altimetry. **Water Resources Research**, 2012. v. 48, n. 6, p. 1–6.

HANSEN, M.C.; POTAPOV, P. V.; MOORE, R.; HANCHER, M.; TURUBANOVA, S.A.; TYUKAVINA, A.; THAU, D.; STEHMAN, S. V.; GOETZ, S.J.; LOVELAND, T.R.; KOMMAREDDY, A.; EGOROV, A.; CHINI, L.; JUSTICE, C.O.; TOWNSHEND, J.R.G. High-Resolution Global Maps of. 2013. v. 850, n. November, p. 850–854.

HENRY, R. **Ecologia de reservatórios: estrutura, função e aspectos sociais**. Botucatu:FAPESP: 1999.

HUNTINGTON, J.; HEGEWISCH, K.; DAUDERT, B.; MORTON, C.; ABATZOGLOU, J.; MCEVOY, D. T. E. Climate Engine: Cloud Computing of Climate and Remote Sensing Data for Advanced Natural Resource Monitoring and Process Understanding. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 2017. Disponível em: <<http://climateengine.org>>.

JASINSKI, M.F.; STOLL, J.D.; COOK, W.B.; ONDRUSEK, M.; STENGEL, E.; BRUNT, K. Inland and near-shore water profiles derived from the high-altitude multiple altimeter beam experimental lidar (MABEL). **Journal of Coastal Research**, 2016. v. 76, n. sp1, p. 44–55.

JENSEN, J. **Remote Sensing of the Environment: an Earth Resources Perspective**. New Jersey: Pearson Prentice Hall., 2009.

JI, L.; ZHANG, L.; WYLIE, B. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 2009. v. 75, n. 11, p. 1307–1317. Disponível em: <<https://www.ingentaconnect.com/content/asprs/pers/2009/00000075/00000011/art00004?crawler=true&mimetype=application/pdf>>.

KALIRAJ, S.; MUTHU MEENAKSHI, S.; MALAR, V. K. Application of remote sensing in detection of forest cover changes using geo-statistical change detection matrices—A case study of devanampatti reserve forest. **Nat. Environ.**, 2012. p. 261–269.

KOURAEV, A. V.; ZAKHAROVA, E.A.; SAMAIN, O.; MOGNARD, N.M.; CAZENAVE, A. Ob' river discharge from TOPEX/Poseidon satellite altimetry (1992-2002). **Remote Sensing of Environment**, 2004. v. 93, n. 1–2, p. 238–245.

KROL, M.S.; DE VRIES, M.J.; VAN OEL, P.R.; DE ARAÚJO, J.C. Sustainability of Small Reservoirs and Large Scale Water Availability Under Current Conditions and Climate Change. **Water Resources Management**, 2011. v. 25, n. 12, p. 3017–3026.

KROPACEK, J.; BRAUN, A.; KANG, S.; FENG, C.; YE, Q.; HOCHSCHILD, V. Analysis of lake level changes in Nam Co in central Tibet utilizing synergistic satellite altimetry and optical imagery: Retrieval of Key Eco-hydrological Parameters for Cold and Arid Regions. Kidlington: **International journal of applied earth observation and geoinformation**, 2012. v. 17, p. 3–11.

LABORATORY, J. P. Jason-CS (Sentinel-6). **California Institute of Technology**, 2021. Disponível em: <<https://sealevel.jpl.nasa.gov/missions/jason-cs-sentinel-6/summary/>>. Acesso em: 6 dez. 2021.

LEE, H.; SHUM, C.K.; YI, Y.; IBARAKI, M.; KIM, J.-W.; BRAUN, A.; KUO, C.-Y.; LU, Z. Louisiana Wetland Water Level Monitoring Using Retracked TOPEX/POSEIDON Altimetry. **Marine geodesy**, 2009. v. 32, n. 2, p. 284–302.

LEHNER, B.; DÖLL, P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. **Journal of Hydrology**, 2004. v. 296, n. 1–4, p. 1–22.

LEON, J.G.; CALMANT, S.; SEYLER, F.; BONNET, M.P.; CAUHOPÉ, M.; FRAPPART, F.; FILIZOLA, N.; FRAIZY, P. Rating curves and estimation of average water depth at the upper Negro River based on satellite altimeter data and modeled discharges. **Journal of Hydrology**, 2006. v. 328, n. 3–4, p. 481–496.

LI, W.; QIN, Y.; SUN, Y.; HUANG, H.; LING, F.; TIAN, L.; DING, Y. Estimating the relationship between dam water level and surface water area for the Danjiangkou Reservoir using Landsat remote sensing images. **Remote Sensing Letters**, 2016. v. 7, n. 2, p. 121–130.

LI, Y.; GAO, H.; JASINSKI, M.F.; ZHANG, S.; STOLL, J.D. Deriving high-resolution reservoir bathymetry from ICESat-2 prototype photon-counting lidar and landsat imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 2019. v. 57, n. 10, p. 7883–7893.

LI, Y.; GAO, H.; ZHAO, G.; TSENG, K.H. A high-resolution bathymetry dataset for global reservoirs using multi-source satellite imagery and altimetry. **Remote Sensing of**

**Environment**, 2020. v. 244, n. May, p. 111831. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111831>>.

LI, Y.; GAO, H.; ALLEN, G.H.; ZHANG, Z. Constructing reservoir area-volume-elevation curve from TanDEM-X DEM data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, 2021. v. 14, p. 2249–2257.

LIEBE, J.R.; VAN DE GIESEN, N.; ANDREINI, M.; WALTER, M.T.; STEENHUIS, T.S. Determining watershed response in data poor environments with remotely sensed small reservoirs as runoff gauges. **Water Resources Research**, 2009. v. 45, n. 7, p. 1–12.

LIU, K.; SONG, C.; WANG, J.; KE, L.; ZHU, Y.; ZHU, J.; MA, R.; LUO, Z. Remote Sensing-Based Modeling of the Bathymetry and Water Storage for Channel-Type Reservoirs Worldwide. **Water Resources Research**, 2020. v. 56, n. 11, p. 1–19.

LOBELL, D.B.; THAU, D.; SEIFERT, C.; ENGLE, E.; LITTLE, B. A scalable satellite-based crop yield mapper. **Remote Sensing of Environment**, 2015. v. 164, p. 324–333. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.021>>.

LOPES, H.L.; RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J.A. MODELAGEM BATIMÉTRICA NO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO : I – GERAÇÃO E AVALIAÇÃO DE SUPERFÍCIES BATIMÉTRICAS UTILIZANDO INTERPOLADORES ESPACIAIS. **Revista Brasileira de Cartografia**, 2013. n. 65/5, p. 907–922.

\_\_\_\_\_. Modelagem batimétrica no reservatório de Sobradinho: II- Avaliação do volume atual e da taxa de sedimentação no espaço de tempo entre 1978 e 2009. **Revista Brasileira de Cartografia**, 2015. v. 67, n. 6, p. 1265–1277. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44641>>.

LOPES, J. W. B.; ARAÚJO, J. C. DE. Simplified method for the assessment of siltation in semiarid reservoirs using satellite imagery. **Water (Switzerland)**, 2019. v. 11, n. 5, p. 1–18.

LU, S.; OUYANG, N.; WU, B.; WEI, Y.; TESEMMA, Z. Water body mapping method with HJ-1A/B satellite imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 2011. v. 13, n. 3, p. 428–434.

LU, S.; WU, B.; YAN, N.; WANG, H. Lake water volume calculation with time series remote-sensing images. **International Journal of Remote Sensing**, 2013. v. 34, n. 22, p. 7962–7973. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.827814>>.

LV, J.; PENG, J.; ZHANG, D.; ZHAO, H.; LI, B. Application of Robust Estimation Method in Study of Relationship Between Lake's Water Area and Water Level. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, 2018. v. 46, n. 10, p. 1595–1603. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12524-018-0812-0>>.

MA, Y.; XU, N.; LIU, Z.; YANG, B.; YANG, F.; WANG, X.H.; LI, S. Satellite-derived bathymetry using the ICESat-2 lidar and Sentinel-2 imagery datasets. **Remote Sensing of Environment**, 2020. v. 250, n. July, p. 112047. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112047>>.

MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. Thematic Mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, 1 mar. 1987. v. 8, n. 3, p. 517–523. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01431168708948658>>.

MARKOGIANNI, V. DIMITRIOU, E.; KALIVAS, D. P. Land-use and vegetation change detection in Plastira artificial lake catchment (Greece) by using remote-sensing and GIS techniques. **International Journal of Remote Sensing**, 2013. p. 1265–1281.

MARTINS, D. DE M.F.; CHAGAS, R.M.; MELO NETO, J. DE O.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Impactos da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões no Baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2011. v. 15, n. 10, p. 1054–1061.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, 1 maio. 1996. v. 17, n. 7, p. 1425–1432. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01431169608948714>>.

MERWADE, V. M.; MAIDMENT, D. R.; GOFF, J. A. Anisotropic considerations while interpolating river channel bathymetry. **Journal of Hydrology**, 2006. v. 331, n. 3–4, p. 731–741.

MOLLE, F.; CADIER, E. **Manual do Pequeno Açude**. Recife: 1992.

MOREIRA, D. M. **Rede de referência altimétrica para avaliação da altimetria por satélites e estudos hidrológicos na região amazônica**. 2010.

\_\_\_\_\_. **Geodésia Aplicada Ao Monitoramento Hidrológico Da Bacia Amazônica**. 2016. ISBN 9788578110796.

MOURA, R. S. T. de; SANTOS, R. V. dos; HENRY-SILVA, G. G. Parâmetros Morfométricos dos Reservatórios Santa Cruz E Umari , Semiárido do Rio Grande do Norte , Brasil Rodrigo.2015. v. 41, n. 2, p. 355–363.

NASA. ICESat: GLAS Instrument. 2020. Introduction to ICESat-2. NASA. National Snow and Ice Data Center, 2022. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kanl64Yx5VI>>.

NASCIMENTO DO VASCO, A.; NETTO, A. de O.A.; PRUSKI, F.F.. Impactos das barragens na disponibilidade hídrica do Nordeste do Brasil. **Revista Recursos Hídricos**, 2017. v. 38, n. 2, p. 39–49.

NASCIMENTO, V. F.; RIBEIRO NETO, A. Characterization of reservoirs for water supply in Northeast Brazil using high resolution remote sensing. **Rbrh**, 2017. v. 22, n. 0.

NEUENSCHWANDER, A.; GUENTHER, E.; WHITE, J.C.; DUNCANSON, L.; MONTESANO, P. Validation of ICESat-2 terrain and canopy heights in boreal forests. **Remote Sensing of Environment**, 2020. v. 251, n. September, p. 112110. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112110>>.

NEUMANN, T.; BRENNER, A.C.; HANCOCK, D.W.; ROBBINS, J.; SABA, J.; HARBECK, K.; GIBBONS, A. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Global Geolocated Photons. 2020. v. 1, n. 3, p. 184.

OWEN, S.J. **An implementation of natural neighbor interpolation in three dimensions**. [S.l.]: Brigham Young University, 1992.

OWEN, S. J.; SAIGAL, S. Surface mesh sizing control. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2000. v. 47, n. 1–3, p. 497–511.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C. Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the Amazon: AMAZON LARGE-SCALE HYDRODYNAMIC MODELLING. **Hydrological processes**, 2013. v. 27, n. 3, p. 333–346.

PAPA, F.; BALA, S.K.; PANDEY, R.K.; DURAND, F.; GOPALAKRISHNA, V. V.; RAHMAN, A.; ROSSOW, W.B. Ganga-Brahmaputra river discharge from Jason-2 radar altimetry: An update to the long-term satellite-derived estimates of continental freshwater forcing flux into the Bay of Bengal. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, 2012. v. 117, n. 11, p. 1–13.

PARIS, A.; DIAS DE PAIVA, R.; SANTOS DA SILVA, J.; MEDEIROS MOREIRA, D.; CALMANT, S.; GARAMBOIS, P.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.; SEYLER, F. Stage-discharge rating curves based on satellite altimetry and modeled discharge in the Amazon basin. **Water resources research**, 2016. v. 52, n. 5, p. 3787–3814.

PARRISH, C.E.; MAGRUDER, L.A.; NEUENSCHWANDER, A.L.; FORFINSKI-SARKOZI, N.; ALONZO, M.; JASINSKI, M. Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry and analysis of ATLAS's bathymetric mapping performance. **Remote Sensing**, 2019. v. 11, n. 14.

PASSAIA, O.A.; PAIVA, R.C.D. de. **Processamento de dados do ICESat para aplicações hidrológicas**. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. São Paulo: 2017.

PATELA, N.N.; ANGIULI, E.; GAMBA, P.; GAUGHAN, A.; LISINI, G.; STEVENS, F.R.; TATEM, A.J.; TRIANNI, G. Multitemporal settlement and population mapping from

landsat using google earth engine. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 2015. v. 35, n. PB, p. 199–208.

PAVLIS, N.K.; HOLMES, S.A.; KENYON, S.C.; FACTOR, J.K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2012. v. 117, n. 4, p. 1–38.

PEKEL, J.-F.; COTTAM, A.; GORELICK, N.; BELWARD, A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**, 2016. v. 540, n. 7633, p. 418–422.

PEREIRA, B.; MEDEIROS, P.; FRANCKE, T.; RAMALHO, G.; FOERSTER, S.; DE ARAÚJO, J.C. Assessment of the geometry and volumes of small surface water reservoirs by remote sensing in a semi-arid region with high reservoir density. **Hydrological Sciences Journal**, 2 jan. 2019. v. 64, n. 1, p. 66–79. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1566727>>.

PEREIRA, E. O. Altimetria por satélite radar na medição do nível d'água de rios de pequeno e médio porte: um estudo de caso no Rio São Francisco. 2018.

PEREIRA, S.B.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. DA, RAMOS, M.M. Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2009. v. 13, n. 3, p. 346–352.

REIS, L.G. DE M.; SOUZA, W. DE O.; RIBEIRO NETO, A.; FRAGOSO, C.R.; RUIZ-ARMENTEROS, A.M.; CABRAL, J.J. DA S.P.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Uncertainties involved in the use of thresholds for the detection of water bodies in multitemporal analysis from landsat-8 and sentinel-2 images. **Sensors**, 2021. v. 21, n. 22, p. 7494.

RIBEIRO NETO, A.; BEHNIA, S.; TOURIAN, M.J.; COSTA, F.A. DA, SNEEUW, N. Satellite altimetry over small reservoirs in the brazilian semiarid region. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2021. v. 26, p. 1–11.

RIO, C. M. M. G. Modelagem da Circulação de um Reservatório Tropical Polimítico Cristina. 2003.

RODRIGUES, L.N.; SANO, E.E.; STEENHUIS, T.S.; PASSO, D.P. Estimation of small reservoir storage capacities with remote sensing in the Brazilian Savannah region. **Water Resources Management**, 2012. v. 26, n. 4, p. 873–882.

ROKNI, K.; AHMAD, A.; SELAMAT, A.; HAZINI, S. Water feature extraction and change detection using multitemporal landsat imagery. **Remote Sensing**, 2014. v. 6, n. 5, p. 4173–4189.

ROSMORDUC, V. BENVENISTE, J.; LAURET, O.; MAHEU, C.; MILAGRO, M.;

PICOT, N. Radar Altimetry Tutorial. **J. Benveniste and N. Picot Ed.**, 2009. Disponível em: <[www.altimetry.info](http://www.altimetry.info)>. Acesso em: 30 maio 2022.

RUBIRA, F. G.; MELO, G. D. V. De; FONSECA, G. A importância dos sistemas geodésicos de referência no cadastramento rural. **Geografia Ensino & Pesquisa**, 2016. v. 20, n. 2, p. 147.

SALMON, B.P.; KLEYNHANS, W.; VAN DEN BERGH, F.; OLIVIER, J.C.; GROBLER, T.L.; WESSELS, K.J. Land cover change detection using the internal covariance matrix of the extended kalman filter over multiple spectral bands. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, 2013. v. 6, n. 3, p. 1079–1085.

SAMUELSSON, P.; KOURZENEVA, E.; MIRONOV, D. The impact of lakes on the European climate as simulated by a regional climate model. **Boreal Environment Research**, 2010. v. 15, n. 2, p. 113–129.

SANTOS, C.; LORITE, I.J.; TASUMI, M.; ALLEN, R.G.; FERERES, E. Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level. **Irrigation Science**, 2008. v. 26, n. 3, p. 277–288.

SIBSON, R. A Brief Description of Natural Neighbour Interpolation. **Interpolating Multivariate Data**, 1981, p. 21–36

SILVA, B. B. da; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens LANDSAT 5 - TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2005. v. 20, p. 243–252.

SILVA, J. S.; SILVA, R. M. Da; SILVA, A. M. Revista Brasileira de Geografia Física. **Revista Brasileira de Geografia**, 2016. v. 9, n. 1, p. 265–279.

SONG, C.; WOODCOCK, C.E.; SETO, K.C.; LENNEY, M.P.; MACOMBER, S.A. Classification and Change Detection Using Landsat TM Data. **Remote Sensing of Environment**, 2001. v. 75, n. 2, p. 230–244.

SONG, J.X.; XU, Z.X.; LIU, C.M.; LI, H.E. Ecological and environmental instream flow requirements for the Wei River—the largest tributary of the Yellow River. **Hydrol. Process.**, 2007. v. 21, n. January 2007, p. 1066–1073. Disponível em: <<http://jamsb.austms.org.au/courses/CSC2408/semester3/resources/ldp/abs-guide.pdf>>.

SOULARD, C.E.; ALBANO, C.M.; VILLARREAL, M.L.; WALKER, J.J. Continuous 1985-2012 Landsat monitoring to assess fire effects on meadows in Yosemite National Park, California. **Remote Sensing**, 2016. v. 8, n. 5, p. 1–16.

STEVAUX, J. C.; MARTINS, D. P.; MEURER, M. Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil. **Geomorphology**,

2009. v. 113, n. 3–4, p. 230–238. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.015>>.

SYVITSKI, J.P.M.; VOROSMARTY, C.J.; KETTNER, A.J.; GREEN, P. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. **Science**, 7 fev. 2005. v. 308, p. 376+. Disponível em: <<https://link.gale.com/apps/doc/A132052951/AONE?u=capex&sid=bookmark-AONE&xid=9f66472b>>.

TANG, Q.; PETERSON, S.; CUENCA, R.H.; HAGIMOTO, Y.; LETTENMAIER, D.P. Satellite-based near-real-time estimation of irrigated crop water consumption. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, 2009. v. 114, n. 5, p. 1–14.

TAPLEY, B.D.; BETTADPUR, S.; RIES, J.C.; THOMPSON, P.F.; WATKINS, M.M. **GRACE measurements of mass variability in the Earth system**. 2004.

TOLEDO, C. E. de; ARAÚJO, J. C. de; ALMEIDA, C. L. de. The use of remote-sensing techniques to monitor dense reservoir networks in the Brazilian semiarid region. **International Journal of Remote Sensing**, 2014. v. 35, n. 10, p. 3683–3699. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2014.915593>>.

UNITED NATIONS FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. COLLECT EARTH. 2016. Disponível em: <<http://www.openforis.org/tools/collectearth.html>>.

USGS. USGS Global Visualization Viewer. 2019. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 2 fev. 2019.

\_\_\_\_\_. Landsat Collection 1 Level-1 Quality Assessment Band. 2022. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-1-level-1-quality-assessment-band>>. Acesso em: 15 maio 2022.

VOLPI, M.; PETROPOULOS, G. P.; KANEVSKI, M. Flooding extent cartography with Landsat TM imagery and regularized kernel Fisher’s discriminant analysis. **Computers and Geosciences**, 2013. v. 57, p. 24–31.

VOROSMARTY, C. J.; SAHAGIAN, D. Anthropogenic disturbance of the terrestrial water cycle. **BioScience**, 2000. v. 50, n. 9, p. 753–765.

WAGNER, W.; ULLRICH, A.; MELZER, T.; BRIESE, C.; KRAUS, K.; SENSING, R. From Single-Pulse To Full-Waveform Airborne Laser Scanners : Potential and Practical Challenges. **Scanning**, 1999. p. 0–5.

WANG, X.; GONG, P.; ZHAO, Y.; XU, Y.; CHENG, X.; NIU, Z.; LUO, Z.; HUANG, H.; SUN, F.; LI, X. Water-level changes in China’s large lakes determined from ICESat/GLAS data. **Remote Sensing of Environment**, 2013. v. 132, p. 131–144. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.005>>.

WATSON, D. F. **ngridr: an implementation of natural neighbor interpolation**. [S.l.]: University of Western Australia, 1994.

WORLD BANK. Population total. <https://data.worldbank.org/>, 2022. Disponível em: <[https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?end=2021&name\\_desc=false&start=1960&view=chart](https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?end=2021&name_desc=false&start=1960&view=chart)>. Acesso em: 2 set. 2022.

XAVIER, G. de O.; OLIVEIRA, T. de, MOREIRA, C.M.; OLIVEIRA, P.D.S. de, COSTA, V.H.B.; GRANADO, L.M.A. Estimate and evaluation of reservoir metrics in Serra da Mesa dam (GO) using the Google Earth Engine platform. **Revista Ambiente e Agua**, 2020. v. 9, n. 3, p. 445–458.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. College of Environment and Resources, Fuzhou University, China's Ministry of Education, Fuzhou, Fujian 350002, China: **International Journal of Remote Sensing**, 2006. v. 27, n. 14, p. 3025–3033. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33747136902&doi=10.1080%2F01431160600589179&partnerID=40&md5=72c9192a4775b1ce554b589e87d09f72>>.

XU, N.; MA, Y.; ZHOU, H.; ZHANG, W.; ZHANG, Z.; WANG, X.H. A Method to Derive Bathymetry for Dynamic Water Bodies Using ICESat-2 and GSWD Data Sets. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, 2020. p. 1–5.

YE, Z.; LIU, H.; CHEN, Y.; SHU, S.; WU, Q.; WANG, S. Analysis of water level variation of lakes and reservoirs in Xinjiang, China using ICESat laser altimetry data (2003–2009). **PLoS ONE Journal**, 2017. v. 12, n. 9, p. 1–21.

ZAHAR, Y.; GHORBEL, A.; ALBERGEL, J. Impacts of large dams on downstream flow conditions of rivers: Aggradation and reduction of the Medjerda channel capacity downstream of the Sidi Salem dam (Tunisia). **Journal of Hydrology**, 2008. v. 351, n. 3–4, p. 318–330.

ZHANG, G.; XIE, H.; KANG, S.; YI, D.; ACKLEY, S.F. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003-2009). **Remote Sensing of Environment**, 2011. v. 115, n. 7, p. 1733–1742. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.005>>.

ZHANG, Q.; LI, B.; THAU, D.; MOORE, R. Building a better Urban picture: Combining day and night remote sensing imagery. **Remote Sensing**, 2015. v. 7, n. 9, p. 11887–11913.

ZHANG, S.; FOERSTER, S.; MEDEIROS, P.; DE ARAÚJO, J.C.; MOTAGH, M.; WASKE, B. Bathymetric survey of water reservoirs in north-eastern Brazil based on TanDEM-

X satellite data. **Science of the Total Environment**, 2016. v. 571, p. 575–593.

ZHANG, S.; FOERSTER, S.; MEDEIROS, P.; DE ARAÚJO, J.C.; WASKE, B. Effective water surface mapping in macrophyte-covered reservoirs in NE Brazil based on TerraSAR-X time series. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 2018. v. 69, p. 41–55.

ZHU, X. .; CAO, J. .; DAI, Y. A. Decision Tree Model For Meteorological Disasters Grade Evaluation of Flood. (I. of E. and E. E. N. Y. N. USA, Org.). Yunnan. China.: 2011. p. 916–919.