

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

João Victor Souza Gabriel

**Comparação entre diferentes levantamentos batimétricos
e implicações na geração da curva CAV: Estudo de caso
no reservatório do Lobo, Itirapina - SP**

São Carlos

2020

João Victor Souza Gabriel

**Comparação entre diferentes levantamentos batimétricos
e implicações na geração da curva CAV: Estudo de caso
no reservatório do Lobo, Itirapina - SP**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Mauad

**São Carlos
2020**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

G118c Gabriel, João Victor Souza
 Comparação entre diferentes levantamentos
 batimétricos e implicações na geração da curva CAV:
 Estudo de caso no reservatório do Lobo, Itirapina - SP
 / João Victor Souza Gabriel; orientador Frederico Fábio
 Mauad; coorientador Rogério Andrade Flauzino. São
 Carlos, 2020.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2020.

1. reservatório. 2. assoreamento. 3. batimetria.
4. cota-área-volume. 5. comparação. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: João Victor Souza Gabriel

Título: "Comparação entre diferentes levantamentos batimétricos e implicações na geração da curva CAV: Estudo de caso no reservatório do Lobo, Itirapina - SP"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 27/11/2020,

com NOTA 9,0 (, m/18), pela Comissão Julgadora:

Prof. Associado Frederico Fabio Mauad - Orientador -
SHS/EESC/USP

Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior - SEL/EESC/USP

Mestre Talyson de Melo Bolleli - Doutorando/Eng. Ambiental -
EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

- Aos meus pais, Karina e Marcelo, que me apoiaram e me incentivaram a continuar estudando e à minha irmã, Débora, por sempre me dar um apoio moral;
- À todos os meus familiares que acreditaram em mim e torceram pelo meu sucesso, em especial às minhas avós Elza e Lúcia, e aos meus padrinhos, Andressa e Paulo Emílio;
- Ao meu orientador, Prof. Frederico Fábio Mauad, pela oportunidade de me aprofundar na área de aproveitamentos hidrelétricos e por todo o suporte durante a elaboração deste trabalho;
- Ao Prof. José Carlos pela preocupação com o aprendizado dos seus alunos, por todo o auxílio durante o estágio e as disciplinas de graduação, e por aceitar o convite de integrar à banca examinadora deste trabalho;
- Aos colegas: Carlos Martinez, por me guiar pelos primeiros passos desta pesquisa; Artur Matos, por me fornecer informações valiosas sobre as batimetrias realizadas no reservatório do Lobo; e Gabriel Pitta, por me auxiliar com a formatação do texto;
- À Mariana Barbosa, que me ofereceu ajuda durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho, tirando dúvidas, dando sugestões e me fornecendo informações importantes sobre o reservatório do Lobo;
- Aos meus colegas de turma que me ajudaram muito durante a graduação, especialmente ao Leonardo Fernandes e ao Adílson Koiti;
- Ao meu amigo Lucas Rocha Cupido, meu parceiro de apartamento, por toda a ajuda, pela companhia e pelos momentos memoráveis que vivemos ao longo da graduação.

*"Subverte a natureza mostrando sabedoria. Imponente, íntegro, certo de seu destino diante
do Grande Rio, transpondo-se para o mar"*

Ciro Julio Cellurale, *Versos desse Universo* (2017)

RESUMO

GABRIEL, J. V. S. Comparação entre diferentes levantamentos batimétricos e implicações na geração da curva CAV: Estudo de caso no reservatório do Lobo, Itirapina - SP. 2020. 74p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

A construção de uma barragem implica na formação de um reservatório e na alteração do regime de vazão do rio, o que acelera o processo de assoreamento. Esse fenômeno gradativamente diminui a capacidade de armazenamento do reservatório, o que, a longo prazo, pode inviabilizar o seu aproveitamento hidrelétrico. Com a finalidade de monitorar esse processo, devem ser realizadas batimetrias periódicas no local, que permitem que seja atualizada a curva cota-área-volume (CAV). Por conta da ausência de uma padronização de procedimentos, as comparações entre os dados das batimetrias feitas em períodos diferentes muitas vezes apresentam inconsistências e divergências. Por meio de um estudo de caso, este trabalho tem o objetivo de reunir informações a respeito de diferentes levantamentos batimétricos realizados no reservatório do Lobo, localizado no município de Itirapina – SP, e analisá-las a fim de discutir sobre quais seriam as causas das divergências constatadas nas curvas cota-área-volume. Foram comparadas quatro batimetrias: a primeira delas foi realizada em 2004, com seções transversais paralelas entre si e distanciadas de 300 metros, que resultou em um volume total calculado igual a $22,5 \times 10^6 m^3$; a segunda foi realizada em 2007, com seções transversais em zigue-zague e resultou no volume de $19,2 \times 10^6 m^3$; a terceira foi realizada em 2010, com seções transversais paralelas entre si e distanciadas de 10 metros, que resultou em um volume calculado de $24,3 \times 10^6 m^3$; e a última foi realizada em 2018, com seções transversais paralelas entre si e distanciadas de 100 metros, que resultou em um volume calculado de $23,8 \times 10^6 m^3$. A análise apontou as diferentes distâncias adotadas entre as seções transversais em cada batimetria como o principal fator que causou a divergência nos resultados. Além disso, foi possível constatar o impacto do uso de diferentes métodos de interpolação de dados na precisão dos resultados.

Palavras-chave: reservatório; assoreamento; batimetria; cota-área-volume; comparação.

ABSTRACT

GABRIEL, J. V. S. **Comparison between different bathymetric surveys and implications for the generation of the EAV curve: Case study at Lobo's reservoir, Itirapina - SP.** 2020. 74p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

The construction of a barrage implies in a reservoir formation and alteration of the river's flow pattern, also accelerates the silting process. This phenomenon gradually decreases the reservoir's storage capacity, and also in the long run, may prevent its hydroelectric use. In order to monitor this process, periodic bathymetry should be carried out on site, which allows the elevation-area-volume curve (EAV) to be updated. Due to the absence of a standardized procedure, comparisons between bathymetry data performed at different times often show inconsistencies and divergences. By means of case study, this paper aims to collect information about different bathymetric surveys carried out in the Lobo's reservoir, located in the municipality of Itirapina - SP, and to analyze them in order to discuss what would be the causes of divergences found in the elevation x area x volume curves. Four bathymetry were compared: the first one was carried out in 2004, with transects parallel to each other and spaced 300 meters, which resulted in a total calculated volume equal to $22.5 \times 10^6 m^3$; the second was carried out in 2007, with zigzag transects and resulted in a volume of $19.2 \times 10^6 m^3$; the third was carried out in 2010, with transects parallel to each other and spaced 10 meters, which resulted in a calculated volume of $24.3 \times 10^6 m^3$; and the last one was carried out in 2018, with transects parallel to each other and spaced 100 meters, which resulted in an estimated volume of $23.8 \times 10^6 m^3$. The analysis pointed out the different distances adopted between the transects in each bathymetry as the main factor that caused the divergence in the results. In addition, it was possible to verify the impact of using different methods of data interpolation on the accuracy of the results.

Keywords: reservoir; silting; bathymetry; elevation-area-volume; comparison.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Planejamento de seções de levantamento batimétrico. Fonte: Adaptado de (CARVALHO, 1994).	30
Figura 2 – Esquema de operação do sistema. Fonte: (BRUK, 1985).	32
Figura 3 – Unidade de Gerenciamento de recursos Hídricos do Estado de São Paulo nº 13 (UGRHI 13). Fonte: (SIGRH, 2020).	39
Figura 4 – Divisão das sub-bacias do Lobo. Fonte: (PEREIRA, 2013).	40
Figura 5 – O Reservatório do Lobo. Fonte: Google Earth.	41
Figura 6 – Vista aérea da barragem do reservatório do Lobo. Fonte: (CRHEA, 2020). .	41
Figura 7 – Carta batimétrica do Reservatório do Lobo. Fonte: (STRIXINO, 1973). .	42
Figura 8 – Placa de dados técnicos do gerador da CGH. Fonte: (PAULA, 2020). .	43
Figura 9 – Medição de profundidade pelo método acústico. Fonte: adaptado de (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2013).	46
Figura 10 – Ecobatímetro BATHY 500MF e transdutor P/N P01540. Fonte: (BARBOSA, 2019).	47
Figura 11 – Montagem para a realização do <i>bar-check</i> . Fonte: adaptado de (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2013).	47
Figura 12 – Batimetria do reservatório da Represa do Lobo realizada em 2004. Fonte: (ESTIGONI et al., 2009).	49
Figura 13 – Batimetria do reservatório da Represa do Lobo realizada em 2007. (Fonte: (ESTIGONI et al., 2009)).	50
Figura 14 – Contorno do reservatório. Fonte: (MATOS, 2012).	52
Figura 15 – Linhas de sondagem com distanciamento de 100 metros - pela tela do Hypack. Fonte: Adaptado de (BARBOSA, 2019).	54
Figura 16 – Localização dos pontos de verificação - tela do Hypack. Fonte: Adaptado de (BARBOSA, 2019).	55
Figura 17 – Resultado do uso das ferramentas <i>smooth</i> e <i>filter</i> . Fonte: (BARBOSA, 2019).	56
Figura 18 – MDEs gerados a partir das batimetrias de 2004 e 2007, respectivamente. Fonte: Adaptado de (ESTIGONI et al., 2009).	57
Figura 19 – Distanciamento entre as seções batimétricas. (A) 10 metros; (B) 100 metros; (C) 300 metros. Fonte: Adaptado de (MATOS, 2012).	58
Figura 20 – Faces dos triângulos gerados pelo método TIN tradicional. (A) 10 metros; (B) 100 metros; (C) 300 metros. (Fonte: Adaptado de (MATOS, 2012)).	59
Figura 21 – TIN resultante segundo o método tradicional. (A) 10 metros; (B) 100 metros; (C) 300 metros. Fonte: Adaptado de (MATOS, 2012).	59

Figura 22 – Faces dos triângulos gerados pelo TIN e resultantes do método IMP. (A) 10 metros; (B) 100 metros; (C) 300 metros. Fonte: Adaptado de (MATOS, 2012).	60
Figura 23 – TIN resultante segundo o método IMP. (A) 10 metros; (B) 100 metros; (C) 300 metros. Fonte: Adaptado de (MATOS, 2012).	60
Figura 24 – Comparação entre MDEs de 2004 e 2010. (A) MDE da batimetria de 2004; (B) MDE da batimetria de 2010 - adotando um distâncias de 300 metros entre as seções - gerado pelo método TIN tradicional; (C) MDE da batimetria de 2010 - adotando um distâncias de 300 metros entre as seções - gerado pelo método IMP. Fonte: Adaptado de (ESTIGONI et al., 2009) e de (MATOS, 2012).	61
Figura 25 – Coincidência das seções transversais de 2010 e de 2018. Fonte: (BAR- BOSA, 2019).	62
Figura 26 – Modelos TIN de 2010 e de 2018. Fonte: (BARBOSA, 2019).	63
Figura 27 – Comparação entre as superfícies TIN (esquerda) e raster (direita) da batimetria de 2018 em relação a de 2010. Fonte: (BARBOSA, 2019).	64
Figura 28 – Comparação entre as superfícies TIN (esquerda) e raster (direita) da batimetria de 2018 em relação a de 2010, após as correções. Fonte: (BARBOSA, 2019).	65
Figura 29 – Curvas Cota x Área das quatro batimetrias analisadas. Fonte: O autor.	66
Figura 30 – Curvas Cota x Volume das quatro batimetrias analisadas. Fonte: O autor.	66
Figura 31 – Comparação entre as curvas CAV de 2010 e de 2018 após os ajustes. Fonte: (BARBOSA, 2019)	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALESP	<i>Assembléia Legislativa do Estado de São Paulo</i>
ANA	<i>Agência Nacional das Águas</i>
ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
CAV	<i>Cota x Área x Volume</i>
CGH	<i>Central Geradora Hidrelétrica</i>
CRHEA	<i>Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais</i>
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DOP	<i>Dilution of precision</i>
EESC	<i>Escola de Engenharia de São Carlos</i>
GNSS	<i>Global Navigation System Satellite</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HRC	<i>High Resolution Camera</i>
IMP	<i>Inserção de Malha de Ponto</i>
MDE	<i>Modelo Digital de Elevação</i>
PCH	<i>Pequena Central Hidrelétrica</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SIG	<i>Sistema de Informação Geográfica</i>
SigRH	<i>Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
UGRHI	<i>Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos</i>
UHE	<i>Usina Hidrelétrica</i>
USP	<i>Universidade de São Paulo</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivo	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	Os impactos da construção de barragens	25
2.2	Assoreamento de reservatórios	26
2.3	Levantamentos batimétricos	28
2.4	Impacto do assoreamento de reservatórios na geração de energia	34
2.5	Panorama de PCHs e CGHs no Brasil	35
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	39
4	MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1	Materiais	45
4.2	Levantamentos batimétricos de 2004 e 2007	49
4.3	Levantamentos batimétricos de 2010	50
4.3.1	Coleta de dados	51
4.3.2	Processamento de dados	52
4.4	Levantamentos batimétricos de 2018	53
4.4.1	Coleta de dados	53
4.4.2	Processamento de dados	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1	Análise dos modelos digitais de elevação (MDEs)	57
5.2	Análise das curvas CAV e seus impactos no cálculo do volume total do reservatório	65
6	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

A humanidade tem construído barragens há milhares de anos a fim de criar reservas de água para que estas possam ser utilizadas em inúmeras aplicações fundamentais para o desenvolvimento de qualquer civilização, tais como: irrigação, navegação, abastecimento, saneamento, lazer, geração de energia elétrica, etc. Os reservatórios proporcionam um aumento da disponibilidade imediata de água para ser utilizada pela sociedade e a sua capacidade de armazenamento está diretamente ligada à topografia do lugar onde foi construído ([STERNBERG, 2006](#)).

A construção de uma barragem implica na formação de um reservatório que, por sua vez, promove drásticas mudanças econômicas e socioambientais na região ao seu redor. Destaca-se, por exemplo, a visível alteração geográfica causada pela inundação de áreas proporcionalmente gigantescas, acarretando um desequilíbrio ecológico que não pode ser ignorado.

Além disso, as barragens alteram drasticamente o regime de vazão do rio, interferindo em sua velocidade e, consequentemente, aumentando o acúmulo de sedimentos no leito, acelerando o processo de assoreamento. Esse fenômeno gradativamente diminui a capacidade de armazenamento do reservatório, além de ser responsável pelo surgimento de bancos de areia que podem atrapalhar o tráfego de embarcações ([LIMA et al., 2003](#)).

O assoreamento também pode causar grandes impactos econômicos, especialmente quando ocorre em reservatórios de usinas hidrelétricas, visto que a redução da capacidade de armazenamento pode inviabilizar o seu aproveitamento hidrelétrico, uma vez que a potência gerada por uma usina hidrelétrica depende da vazão, e esta é proporcional à área da seção transversal do rio. Além da alteração topográfica do fundo do reservatório, o acúmulo de sedimentos também pode obstruir a tomada d'água e danificar as pás da turbina ([CARVALHO et al., 2000](#)).

Considerando que a matriz elétrica brasileira é majoritariamente composta por hidroeletricidade, constata-se a importância de monitorar o processo de assoreamento dos reservatórios, uma vez que este dita qual será o tempo de vida útil de uma usina hidrelétrica, ou seja, além do prejuízo ambiental, esse processo também pode gerar um prejuízo econômico bastante significativo.

É possível quantificar o assoreamento em um reservatório dentro de um determinado período comparando dados coletados por levantamentos batimétricos. Ao confrontar os resultados de duas ou mais batimetrias, é possível constatar qual foi a redução do volume do reservatório causada pelo assoreamento ao longo desse período. Os estudos batimétricos consistem no levantamento da topografia do fundo do reservatório e geralmente são feitos

com o auxílio de um ecobatímetro, um equipamento que usa sinais acústicos para fornecer informações pontuais de profundidade, que são devidamente processadas e analisadas a fim de traçar o perfil topográfico do leito.

Apesar da existência de diversos estudos batimétricos, as concessionárias de energia elétrica do Estado de São Paulo não atribuem à essa questão a sua devida importância. Segundo Corrêa Filho *et al.* ([FILHO et al., 2005](#)), poucas medidas têm sido tomadas para monitorar a evolução do processo de assoreamento. Por consequência dessa negligência, as usinas hidrelétricas costumam adotar políticas de operação que partem de dados desatualizados, uma vez que, atualmente, o volume útil dos reservatórios não é mais o mesmo de quando as usinas foram projetadas ([ESTIGONI et al., 2009](#)).

Além da negligência, o monitoramento do assoreamento também enfrenta outros problemas, tal como a ausência de uma padronização de procedimentos e de calibração dos equipamentos de medição para realizar os levantamentos batimétricos. Por conta disso, as comparações entre os dados das batimetrias feitas em períodos diferentes muitas vezes apresentam inconsistências e divergências.

Tais inconsistências nos resultados são observadas, por exemplo, nas batimetrias realizadas no Reservatório do Lobo/Broa, área de estudo deste trabalho, localizado no município de Itirapina-SP. A represa abastece a Central Geradora Hidrelétrica do Lobo, fundada em 1936 e cuja potência instalada é de 1,59 MW ([ANEEL, 2017](#)). Este local foi escolhido devido à sua proximidade ao Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (CRHEA), que é vinculado à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), e devido à disponibilidade de dados confiáveis de batimetrias anteriores.

Há registros de batimetrias feitas no reservatório durante a década de 70, cuja metodologia não foi devidamente documentada, o que acabou restringindo a análise e a comparação com batimetrias mais recentes. Já no século XXI, houve levantamentos batimétricos nos anos de 2004 e 2007, que testaram novos métodos de posicionar as linhas topobatimétricas, mas não mostraram um resultado satisfatório, por apresentarem taxas de assoreamento altíssimas que, caso estivessem corretas, o aproveitamento hidrelétrico do reservatório já estaria comprometido. A fim de coletar dados mais confiáveis, houve mais duas outras campanhas, em 2010 e em 2018, que apresentaram resultados mais coerentes e documentação mais completa, pois registraram, em detalhes, a metodologia utilizada, bem como os parâmetros usados para configurar os equipamentos de medição ([STRIXINO, 1973](#)) ; ([ESTIGONI et al., 2009](#)); ([MATOS, 2012](#)); ([BARBOSA, 2019](#)).

Apesar dos avanços no estudo do assoreamento no reservatório do Lobo que foram observados ao longo das últimas décadas, a comparação entre levantamentos batimétricos ainda apresenta incertezas. Portanto, este trabalho se propõe a reunir informações sobre diversas batimetrias realizadas no local e fazer uma análise comparativa entre elas a fim de que sejam constatadas as origens dessas inconsistências e, assim, contribuir para os

estudos sobre o assoreamento do Reservatório do Lobo.

1.1 Objetivo

Este estudo tem o objetivo de reunir informações a respeito dos levantamentos batimétricos já realizados no reservatório do Lobo e analisá-las, tanto em relação às suas metodologias quanto ao resultado que apresentaram na forma de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) e de curvas cota x área x volume, a fim de que sejam discutidas as causas das divergências entre os resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Os impactos da construção de barragens

A humanidade tem construído barragens há mais de 4500 anos para inúmeras aplicações as quais foram evoluindo conforme a civilização humana foi se desenvolvendo. As represas que antes serviam apenas para armazenar água durante longos períodos do ano, hoje apresentam muitas outras finalidades, tais como navegação, irrigação, lazer e geração de energia elétrica. Entretanto, a construção de uma barragem implica em várias alterações no meio ambiente, algumas delas são facilmente visíveis, como a inundação de enormes áreas que dão origem aos reservatórios, mas existem também impactos que são menos perceptíveis e requerem um estudo mais aprofundado. Um dos grandes desafios da humanidade nas últimas décadas tem sido justamente minimizar esses efeitos negativos causados pela construção de barragens a fim de que a civilização possa se desenvolver de forma harmônica e sustentável ([STERNBERG, 2006](#)).

Em países localizados em regiões semiáridas, como a África do Sul e a Austrália, as barragens cumprem uma função vital de atender a demanda do abastecimento de água. Mas mesmo em países onde há abundância de recursos hídricos, como no Brasil e no Canadá, as barragens não são menos importantes, pois são fundamentais para atender a demanda energética por meio da hidroeletricidade. Além disso, os reservatórios criados pelas barragens podem promover um aumento no potencial de pesca, navegação, lazer e turismo na região ([PIMENTEL, 2004](#)).

Entretanto, a construção de barragens também causa impactos socioambientais negativos, como a inundação de grandes áreas que podem atingir regiões urbanizadas, produtivas e de significativa biodiversidade. Estima-se que entre 40 e 80 milhões de pessoas ao redor do mundo foram atingidas diretamente pela construção de barragens e tiveram que se deslocar da região onde moravam anteriormente, sendo que, grande parte delas, sequer foi reassentada e nem indenizada. O impacto social costuma ser proporcional à densidade demográfica da bacia. Por exemplo, a construção de uma barragem na bacia dos rios Tocantins e Amazonas, no Brasil, que tem uma densidade demográfica de cerca de 6 pessoas/km², causaria menor impacto social do que a construção de uma barragem na bacia do Ganges, na Índia, onde a densidade demográfica ultrapassa as 375 pessoas/km² ([WCD, 2000](#)).

Um caso emblemático de impacto sociocultural causado pela construção de uma barragem foi o da Represa de Assuã, no Egito. O lago artificial Nasser cobre o Vale do Nilo Superior, região conhecida, desde a antiguidade, como Núbia, onde se localizavam vários sítios arqueológicos e templos antigos. A fim de impedir que esse patrimônio histórico-

cultural fosse destruído, os governos do Egito e do Sudão, juntamente com a UNESCO iniciaram a Campanha Internacional para Salvar os Monumentos da Núbia, que consistia na escavação e no registro de centenas de locais; na recuperação de milhares de objetos e na realocação de vários templos, incluindo o gigantesco templo de Abu Simbel, que foi inteiramente desmontado e remontado próximo a margem do Lago Nasser. A campanha durou cerca de 20 anos (1960-1980) ([UNESCO, 2020](#)).

Outro problema causado pela construção da barragem de Assuã foi relacionado à saúde pública: o aumento de casos de esquistossomose na região, doença que chegou a atingir, na época, cerca de 70% da população local. Isso ocorreu por conta das mudanças ambientais causadas pela construção da barragem que acarretou um desequilíbrio no ecossistema, contribuindo para a proliferação de parasitas e transmissores de doenças como a malária e a própria esquistossomose, afetando a saúde das comunidades ribeirinhas ([ANDREAZZI, 1993](#)).

No Brasil, a organização não governamental conhecida como MAB - Movimento dos Atingidos por Barragens - surgiu na década de 1980 com o intuito de defender os interesses das populações atingidas pelo sistema de geração, distribuição e venda da energia elétrica. O movimento se propôs a lutar pelos direitos da população que foi direta ou indiretamente prejudicada, tanto pela construção quanto pelo rompimento de barragens, como nos famosos casos das barragens de Fundão, em Mariana-MG, e da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG, que causaram respectivamente 19 e 272 mortes, fora o prejuízo incalculável ao rio Doce e a todo o ecossistema da região ([MAB, 2020](#)).

Dos impactos ambientais causados pela construção de barragens, Pimentel ([PIMENTEL, 2004](#)) destaca a intrusão salina nos estuários, destruição de mangues, desaparecimento de diversas espécies de peixes, perdas de áreas alagadas nas foz dos rios, o impacto na flora causado pelo alagamento de florestas, diminuição da qualidade da água e a aceleração do processo de assoreamento do rio, fenômeno esse que é particularmente importante para este trabalho e será explicado com maior detalhamento a seguir.

2.2 Assoreamento de reservatórios

Carvalho ([CARVALHO, 2008](#)) define a sedimentologia como sendo a disciplina que estuda os sedimentos, que são por ela definidos como sendo partículas minerais ou orgânicas transportadas por um fluido de um ambiente a outro onde são depositadas. Entre as principais aplicações da sedimentologia, ou mais especificamente da hidrossedimentologia, destaca-se a avaliação do assoreamento de reservatórios formados pela construção de barragens.

Segundo Lima *et al.* ([LIMA et al., 2003](#)), a presença da barragem modifica o fluxo natural do rio e consequentemente o transporte de sedimentos, pois ela reduz a

velocidade da corrente e uma vez que isso ocorre, os sedimentos tendem a ser depositados no reservatório ao invés de escoar mais à jusante da barragem. Os sedimentos que ficam retidos se acumulam no leito, iniciando o processo de assoreamento ao qual, segundo Coiado (COIADO, 2001), todos os reservatórios estão fadados, independentemente de suas dimensões, características ou da finalidade para a qual foi construído.

Carvalho *et al.* (CARVALHO et al., 2000) destacam algumas das principais consequências do assoreamento em reservatório, tais como: a formação de bancos de areia que interferem nas rotas de navegação; a redução do volume do reservatório; obstrução de canais de irrigação; degradação do ecossistema aquático; perda de qualidade da água; entre outros.

Segundo Carvalho *et al.* (CARVALHO et al., 2000), os sedimentos depositados pela influência do reservatório não se distribuem uniformemente mesmo dentro do lago. Quando essa deposição acontece majoritariamente na montante, é chamado de depósito de remanso (*backwater deposit*), enquanto as deposições mais internas ao reservatório recebem o nome de delta, que geralmente são compostos por sedimentos grossos (MAHMOOD, 1987), ou recebem o nome de depósito de leito (*bottom-set deposit*), compostos por sedimentos mais finos. Há também o chamado depósito de margem (*overbank*), além do depósito de várzea ou de planície de inundação que é geralmente causado por enchentes.

Cada um desses tipos de depósito causa diferentes consequências para o reservatório. Enquanto os depósitos de remanso criam problemas de enchentes na montante, os depósitos no interior do lago, que condicionam a formação do delta, contribuem para a redução da capacidade de armazenamento do reservatório. Os depósitos de margem propiciam o crescimento de plantas aquáticas, as quais são removidas pela elevação do nível d'água e passarão a flutuar por ela, o que pode causar uma série de problemas, tais como a sua deposição no fundo do lago, contribuindo para o assoreamento, bem como interferências na operação quando os restos dessa vegetação alcançarem a tomada d'água. Os depósitos de leito, que cobrem o fundo do lago reduzem o seu volume morto, além de impactar na fauna e na flora do leito (CARVALHO et al., 2000).

Carvalho (CARVALHO, 1994) também destaca outros dois problemas: Eventualmente, os sedimentos irão alcançar a barragem, podendo passar pelo vertedouro ou por outros condutos, provocando abrasões nas tubulações, comportas e em outras estruturas. Além disso, uma vez que a barragem segura os sedimentos, impede também que os nutrientes contidos neles escoem para a jusante, o que prejudica a fauna e a flora de todo o canal a jusante, provocando modificações na formação do estuário ou do delta que leva ao mar.

Do ponto de vista sedimentológico, segundo Carvalho *et al.* (CARVALHO et al., 2000), o fim da vida útil de um reservatório se dá quando os depósitos passam a interferir na operação regular da usina e isso geralmente se torna crítico quando o sedimento alcança a soleira da tomada d'água.

A fim de estimar o tempo de vida útil de um reservatório, é de extrema importância que seja feita uma avaliação do assoreamento. Segundo um estudo apresentado pelo Banco Mundial ([MAHMOOD, 1987](#)), a vida útil média dos reservatórios espalhados pelo mundo que antes era de cerca de 100 anos, hoje decaiu para 22 anos devido a maior intensidade das ações antrópicas no meio ambiente. Com a finalidade de se realizar o cálculo preliminar do assoreamento, Carvalho *et al.* ([CARVALHO et al., 2000](#)) apresenta as seguintes expressões:

$$S = \frac{D_{st} \cdot E_r}{\gamma_{ap}} = \frac{365 \cdot Q_{st} \cdot E_r}{\gamma_{ap}} \quad (2.1)$$

$$T = \frac{V_{res}}{S} \quad (2.2)$$

Sendo:

S = volume de sedimento retido no reservatório (m^3/ano);

D_{st} = deflúvio sólido total médio anual afluente ao reservatório (t/ano);

E_r = eficiência de retenção do sedimento afluente ao reservatório (decimal);

γ_{ap} = peso específico aparente médio dos depósitos (t/m^3);

Q_{st} = descarga sólida total média afluente ao reservatório (t/dia);

T = tempo de assoreamento de um determinado volume (anos);

V_{res} = volume do reservatório, total ou volume morto (m^3).

Os sedimentos presentes no assoreamento de reservatórios são originados de processos erosivos, os quais Salomão ([SALOMÃO, 1991](#)) classifica como sendo de dois tipos: natural e antrópica, sendo, a segunda, fruto de intervenções humanas no meio ambiente, tais como o desmatamento, o mau uso da agropecuária, a mineração, a urbanização, entre outros.

Portanto, é necessário propor formas de minimizar esses impactos causados pela ação humana no meio ambiente. Guerra ([GUERRA, 1994](#)) destaca a importância das matas ciliares, que são responsáveis por proteger o solo das margens de rios e lagos contra processos erosivos. O autor propõe a manutenção das florestas por meio de medidas de proteção ambiental, bem como reflorestamento e o incentivo a uma agricultura orgânica, com adubação verde e sem uso de agrotóxicos, como as principais formas de preservar os rios e lagos do processo de assoreamento.

2.3 Levantamentos batimétricos

Conforme foi constatado anteriormente, todos os reservatórios sofrem com o processo de assoreamento. Por conta disso, é fundamental que haja um monitoramento do processo a

fim de evitar problemas de operação no aproveitamento do reservatório dentro do seu tempo de vida útil. O método mais eficaz em detectar as alterações causadas pelo assoreamento nos reservatórios ao longo do tempo é o levantamento batimétrico que efetua a medição de profundidade em diversos pontos do reservatório. Ao processar todas essas medições, traça-se o perfil do relevo do leito e este pode ser comparado com o perfil obtido de medições anteriores a fim de detectar as alterações causadas pela deposição de sedimentos ao longo de um determinado período ([CARVALHO et al., 2000](#)).

Carvalho et al. ([CARVALHO et al., 2000](#)) também enumeram, resumidamente, quais são os produtos que podem ser obtidos por meio da análise dos dados batimétricos, dentre eles, destaca-se:

- Determinação da capacidade atual de armazenamento do reservatório;
- Determinação da atual área do espelho d'água;
- Traçar as atuais curvas cota x área e cota x volume;
- Obtenção da atual geometria do leito do reservatório;
- Quantificação da camada de sedimentos que foi depositada ao longo de um período;
- Determinação da capacidade de retenção de sedimentos pelo reservatório;
- Determinar quais áreas do reservatório sofrem com um assoreamento mais intenso.

Com o intuito de atualizar os dados sobre a topografia dos reservatórios do país, entrou em vigor, em 2010, a Resolução Conjunta N° 003 ANEEL – ANA que prevê que os levantamentos batimétricos sejam realizados periodicamente com um intervalo máximo de 10 anos, sendo que, nos casos em que a ANA julgue necessário, esse intervalo pode ser menor do que o estipulado pela resolução ([ANA; ANEEL, 2010](#)).

O fator que determina a necessidade de realizar batimetrias mais ou menos frequentes é, principalmente, a sua capacidade total. Aqueles que demandam maior frequência são os reservatórios menores. Segundo *Carvalho et al.* ([CARVALHO et al., 2000](#)), em reservatórios com volume maior que $100 \times 10^6 \text{ m}^3$, deve-se realizar novas batimetrias a cada 10 anos, porém, nos que apresentam um volume entre $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ e $100 \times 10^6 \text{ m}^3$, esse número cai para 5 anos. Já em reservatórios ainda menores, cujo volume fica abaixo dos $10 \times 10^6 \text{ m}^3$, recomenda-se que ocorra a cada 2 anos.

A cada nova batimetria realizada, esta deve ser comparada com a anterior, a fim de que seja constatada a taxa de assoreamento por meio da diferença entre as duas. O maior desafio dessa análise se dá pela sensibilidade em relação a pequenos erros de medição que podem se propagar e refletir em grandes erros no cálculo do volume total do reservatório,

podendo indicar taxas de assoreamento exageradamente altas, baixas, ou, em alguns casos, até mesmo negativa, apontando, equivocadamente, que houve certo desassoreamento ([MORRIS; FAN, 1997](#)).

Uma das formas de se obter dados batimétricos é por meio do método de levantamento de contorno, que, por meio de fotografias aéreas, identifica alterações no contorno do reservatório. Apesar de se tratar de um método simples, direto e preciso, Eakin ([EAKIN, 1939](#)) ressalva que este só deve ser utilizado caso exista um mapa base com intervalo entre as curvas de nível inferior a 3 metros. Atualmente, costuma-se utilizar, para este método, imagens de satélites em alta definição, mapeamento topográfico por aerofotogrametria e técnicas de varredura a laser. Carvalho *et al.* ([CARVALHO et al., 2000](#)) destacam a eficiência desse método em reservatórios com altas taxas de variação de nível ao longo do ano.

Mas o método mais utilizado é o de levantamento de linhas topobatimétricas, que consiste na obtenção de seções transversais ou transectos do reservatório. Dentre as vantagens apresentadas por este método, destaca-se o relativo baixo custo de coleta, processamento e análise de dados. A figura 1 apresenta um esquema de planejamento das seções de um levantamento batimétrico, na qual os transectos são representados pelas linhas vermelhas ([CARVALHO, 1994](#)).

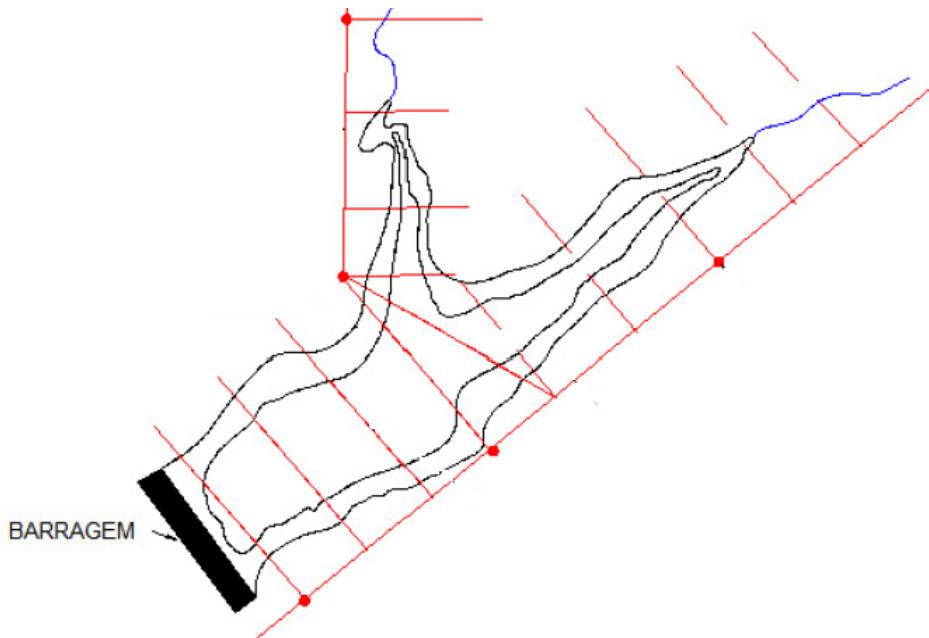


Figura 1 – Planejamento de seções de levantamento batimétrico. Fonte: Adaptado de ([CARVALHO, 1994](#)).

Eakin ([EAKIN, 1939](#)) descreve os procedimentos para a realização de batimetrias que eram adotados na década de 30, e Bruk ([BRUK, 1985](#)) observa que, até a década de 80, houve poucas mudanças relacionadas ao processo em si, porém, destaca-se a evolução dos

equipamentos utilizados. Os avanços tecnológicos impulsionaram uma modernização nos procedimentos para a realização da batimetria que, apesar de não alterarem o princípio desse método de medição, o tornaram muito mais rápido e preciso. O autor aponta o uso de equipamentos de "sonic sounding" que operavam nas frequências de 60 kHz e 120 kHz, que mais tarde, ainda evoluiria para o chamado "Subsurface Interface Radar", operando de 300 kHz a 1000 kHz, emitindo ondas eletromagnéticas, ao invés de ondas acústicas.

Bruck ([BRUK, 1985](#)) destaca os procedimentos básicos que eram adotados, na década de 80, para a realização do método de seções transversais:

- Obter mapas do reservatório em boa escala;
- Realizar um reconhecimento preliminar na área;
- Realizar o planejamento das seções a serem levantadas;
- Escolher os equipamentos apropriados, tais como barcos, meios de comunicação, etc.;
- Determinar o nível de redução do levantamento;
- Instalar réguas liminimétricas ao longo do reservatório para acompanhamento dos níveis;
- Instalar novos marcos de referência;
- Medir as profundidades e locação simultânea desses pontos;
- Interpretar os dados obtidos
- Preparar um relatório que contém mapas, desenhos e conclusões.

Levantamentos batimétricos que antes eram feitos apenas por meio de escalas graduadas, a partir da década de 90 são realizados com o auxílio de ecobatímetros os quais, segundo Santos *et al.* ([SANTOS et al., 2001](#)), utilizam sinais acústicos para medir a profundidade do reservatório estimando o tempo em que as ondas emitidas pelo aparelho levam para refletir no leito e retornarem. Normalmente, este equipamento é utilizado em reservatórios de até 100 metros de profundidade. É importante destacar que, a partir dessa década, começou-se a utilizar a tecnologia de GPS (Global Positioning System) nos levantamentos ([MORRIS; FAN, 1997](#)).

A figura 2 ilustra a dinâmica de entre a antena transmissora, presente na embarcação, e as estações remotas de resposta, localizadas em pontos fixos de coordenadas conhecidas, que sustentam o sistema de navegação via GPS.

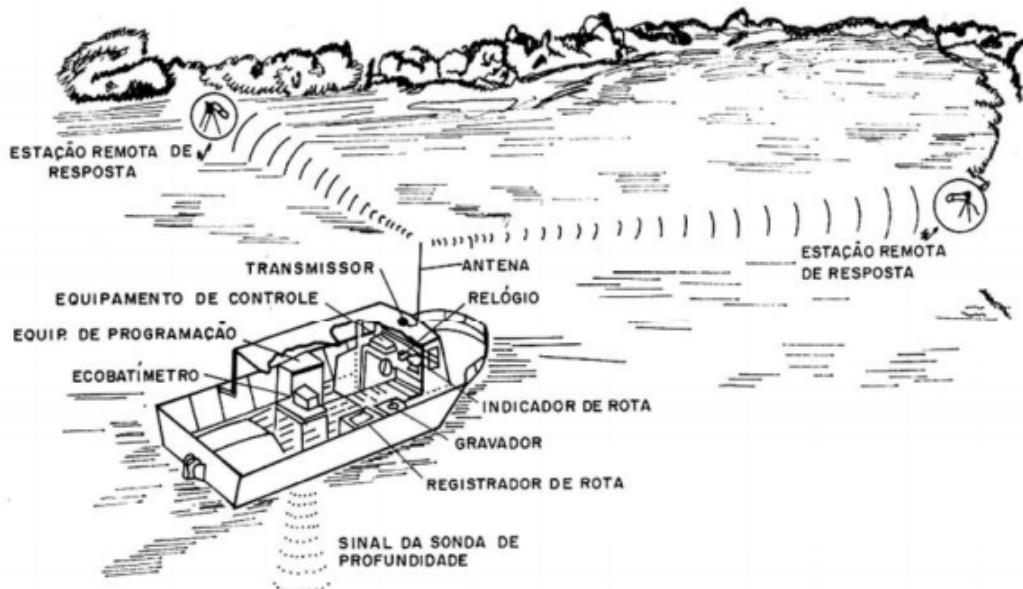


Figura 2 – Esquema de operação do sistema. Fonte: ([BRUK, 1985](#)).

Pode-se classificar os ecobatímetros em duas categorias: os monofeixe e os multi-feixe. O primeiro emite um feixe único e, consequentemente retorna apenas um valor de profundidade para cada intervalo de tempo correspondente. Já o multifeixe, por retornar vários valores de profundidade, torna-se uma opção que apresenta um resultado mais detalhado e, apesar do seu custo elevado, pode ser a melhor opção em casos de reservatórios cuja profundidade média ultrapassa os 10 metros. Em reservatórios mais rasos, a área abrangida pelos feixes torna-se demasiadamente pequena, a ponto de apresentar resultados muito semelhantes aos do monofeixe ([FERRARI, 2006](#)).

Para que sejam realizados os levantamentos batimétricos pelo método das linhas topobatimétricas, é preciso efetuar um planejamento de quantos e quais serão os pontos onde serão realizadas as medições. Na década de 30, Eakin ([EAKIN, 1939](#)) descreveu alguns procedimentos a serem considerados no planejamento das seções batimétricas. De lá pra cá, pouca coisa mudou. O autor destaca a importância do corpo principal do reservatório, bem como os seus braços, serem divididos em seções transversais paralelas entre si, tolerando convergências de até 10 graus e não recomendando que esse valor ultrapasse 30 graus. Em caso de curvas onde não seja possível a manutenção das seções paralelas, deve-se iniciar uma nova série de seções, a fim de que sejam respeitadas essas condições.

Segundo Morris e Fan ([MORRIS; FAN, 1997](#)), é possível calcular o número mínimo necessário de seções topobatimétricas a serem medidas para que haja uma precisão adequada, por meio da seguinte equação:

$$N_{st} = 2.942 \cdot A^{0.3652} \quad (2.3)$$

Onde:

- N_{st} : Número de seções topobatimétricas
- A: Área do reservatório

Em 2013, a Agência Nacional de Águas (ANA) apresentou uma fórmula para definir as linhas equidistantes de sondagem para o corpo do reservatório em batimetrias que se utiliza de ecobatímetros monofeixe ([ANA, 2013](#)). Para tributários, estreitamentos e canais, orienta-se que se utilize metade dessa equidistância do corpo principal. A fórmula pode ser aplicada tanto a Usinas Hidrelétricas (UHEs) quanto a Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e para cada um dos casos aplica-se cada uma das seguintes variações da fórmula:

Para UHE:

$$E_{st} = \frac{0,35A^{0,35}}{D} \quad (2.4)$$

Para PCH:

$$E_{st} = \frac{0,1A^{0,25}}{D} \quad (2.5)$$

Onde:

- E_{st} : equidistância entre as seções, em quilômetros;
- A: área do reservatório em seu nível máximo, em hectares
- D: extensão do corpo principal, em quilômetros

A partir dos dados coletados pela batimetria, forma-se o Modelo Digital de Elevação (MDE), que representa a geometria do leito do reservatório, quanto a seus vales e elevações do terreno. Quanto mais precisos forem os dados batimétricos, mais fiel será a representação do MDE. Estigoni *et al.* ([ESTIGONI; MATOS; MAUAD, 2014](#)) citam a distância entre as seções transversais e o método de interpolação de dados como sendo os pontos aos quais deve-se dar uma atenção especial para que se evite erros que interfiram no cálculo do volume do reservatório.

A fim de se construir a MDE, adota-se o modelo *Triangulated Irregular Network* (TIN), que pode ser obtido utilizando um método tradicional, ou utilizando o método de Inserção de Malha de Pontos (IMP). O modelo TIN tradicional é o mais utilizado modelo de interpolação e consiste na formação de triângulos com todos os pontos amostrados a fim de que sejam geradas curvas de nível. Esse processo pode ser realizado com a ajuda do software ArcGIS, que utiliza o método de triangulação Delaunay para a construção

do modelo TIN ([FERRARI, 2006](#)). Entretanto, Matos ([MATOS, 2012](#)) conclui que o método IMP apresenta um resultado mais preciso quanto à representação das bordas do reservatório, especialmente quando há um maior espaçamento entre as seções.

2.4 Impacto do assoreamento de reservatórios na geração de energia

Uma vez que a comparação entre levantamentos batimétricos pode quantificar a redução do volume de um reservatório em certo período, é possível, por meio de simulações, descobrir o quanto essa diminuição do volume impactou na geração de energia hidrelétrica. Um grande exemplo é o caso da Usina da Brecha - MG, cujo reservatório tinha uma capacidade de cerca de 2.000.000 m³ no ano de 1958 e em 1992 essa capacidade tinha sido reduzida para cerca de 1.200.000 m³, o que representou uma perda de 40% em seu volume total ao longo desses 34 anos. Estima-se que, por conta disso, a usina deixou de gerar 9.000.000 kWh/ano gerando um prejuízo de cerca de 500 mil dólares ([PAIVA, 1993](#)).

Já no reservatório da Usina de Taquaraçu, também em Minas Gerais, foi constatada uma perda de 70% em sua capacidade, desde 1935, ano de construção da usina, em que o volume total era de cerca de 2.200.000 m³, até o ano de 1992, em que foi constatado um volume de apenas 700.000 m³. Por conta dessa redução, a usina, que antes era capaz de gerar 20.000.000 kWh/ano passou a gerar apenas 12.000.000 kWh/ano após 57 anos, o que representa uma queda de 40%. Só no ano de 1992, estima-se que o prejuízo foi na ordem de 500 mil dólares. Além disso, a Companhia Siderurgia Belgo-Mineira teve que comprar energia para suprir a sua demanda, gastando cerca de 1,5 milhões de dólares ([PAIVA, 1993](#)).

Além do prejuízo causado pela redução do volume do reservatório, há casos em que o assoreamento inviabiliza o funcionamento da usina, forçando a sua paralização até que seja feita uma dragagem no local. Foi o que aconteceu na UHE Funil - BA durante o período entre janeiro de 1992 e março de 1993, causando um prejuízo total de cerca de US\$ 1.420.000,00, que representava a soma do dinheiro que a usina deixou de ganhar enquanto esteve paralisada (cerca de US\$ 1.200.000,00) com o custo da dragagem (cerca de US\$ 220.000,00) ([ALMEIDA; CARVALHO, 1993](#)).

Outro exemplo de batimetria que constatou o impacto do assoreamento na geração de energia elétrica de uma UHE foi o caso da realizada em 2008 no reservatório da Usina Hidrelétrica de Três Irmãos - SP. Neste caso, o autor comparou batimetrias realizadas nos anos de 1975 e 2008 e constatou que durante o período, houve uma redução de 14,3% no volume total do reservatório. A partir desses dados, foi estimado o estado deste no ano de 1993, quando a usina começou a entrar em operação. Por meio de simulações, foi possível constatar qual teria sido a potência total fornecida pela usina no período entre 1993 e 2008 caso não houvesse ocorrido assoreamento nenhum e comparar com o valor de potência total fornecida pela usina, no mesmo período, considerando o assoreamento

apontado pela batimetria. As simulações apontaram que, desconsiderando o assoreamento, a usina forneceria um total de 53.013 MW, mas acabou fornecendo apenas 52.912 MW, 101 MW a menos, o que representa uma perda de 72.420 MWh durante esse período de quinze anos, o que equivale a uma perda de 377 MWh/mês, podendo gerar até R\$ 56.550,00 de prejuízos mensais ([MIRANDA, 2011](#)).

Esse estudo no reservatório da UHE Três Irmãos também apontou que todas as reduções energéticas constatadas ocorriam entre os meses de maio e novembro - época de estiagem na região. Com isso, foi possível concluir que os efeitos do assoreamento na geração de energia elétrica são atenuados durante os períodos de chuva e agravados durante os períodos de estiagem ([MIRANDA, 2011](#)).

2.5 Panorama de PCHs e CGHs no Brasil

Dentro do cenário atual de crescimento no investimento em fontes de energia renováveis no Brasil, a hidroeletricidade cumpre um papel fundamental. As Usinas Hidrelétricas de grande porte (UHE), que têm potência instalada de mais de 50 MW são a principal fonte de geração desse tipo de energia do país, especialmente devido à presença de grandes reservatórios que garantem que a usina opere por algum tempo mesmo durante períodos de estiagem.

Durante os períodos de chuva, é fundamental que os reservatórios das UHE armazenem o maior volume possível de água para que, durante a estiagem, possam atender à demanda energética do país. É justamente nesse período de chuvas que entram em ação as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs) que oferecem auxílio às usinas de grande porte a fim de que elas, enquanto operam a fio d'água, possam armazenar o maior volume de água possível. Graças a essa dinâmica, as UHEs conseguem lidar melhor com os períodos de estiagem, podendo operar em sua capacidade máxima por bastante tempo, enquanto as PCHs e CGHs têm a sua geração de energia bem mais prejudicada nessa época do ano. A complementação entre esses tipos de hidrelétricas, maiores e menores, é extremamente importante para que se mantenha a geração contínua de energia elétrica no país, juntamente com as termelétricas, mas com a vantagem de não emitir gases poluentes. Além disso, as PCHs e CGHs têm a função de complementar as cargas ofertadas a regiões rurais e pequenos centros urbanos ([ABRAPCH, 2014](#)).

Atualmente, a ANEEL considera como PCHs as usinas hidrelétricas que possuem entre 5 e 50 MW de potência instalada e cujo reservatório tenha uma área de, no máximo, 13 km². Já as CGHs são ainda menores, apresentando potência instalada de até 5 MW, apesar de não haver especificações da ANEEL quanto ao tamanho do reservatório ([ABRAPCH, 2020](#)).

Além da potência instalada, existem outras características que diferenciam as PCHs das CGHs, como, por exemplo, o seu processo de licenciamento. Para licenciar uma PCH é necessário que seja realizado um estudo de inventário, cuja função é analisar o potencial hidrelétrico do rio e avaliar a viabilidade de sua implementação. Nesse caso, cabe à ANEEL aprovar o projeto com base nos estudos realizados. Esse processo costuma levar, em média, cinco anos ([ABRAPCH, 2014](#)).

Já no caso das CGHs, o processo de licenciamento é muito mais simples, pois dispensa a obrigatoriedade dos estudos de inventário e não depende da aprovação da ANEEL, deve-se apenas ser comunicado aos órgãos reguladores e fiscalizadores a intenção de implantação desses empreendimentos. O processo de licenciamento das CGHs costuma durar apenas dois anos e meio, que corresponde à metade do tempo que leva para licenciar uma PCH ([ABRAPCH, 2014](#)).

Essa agilidade no tempo de implementação tanto das PCHs quanto das CGHs faz com que, muitas vezes, esses empreendimentos sejam mais viáveis economicamente do que as UHEs, especialmente por conta da dificuldade de se obter o licenciamento ambiental para projetos hidrelétricos de grande porte. Mas, ainda assim, as UHEs continuam sendo prioridade para a oferta de energia elétrica para o país, apesar do crescimento percentual da participação de outras fontes de energia renovável na matriz brasileira. As construções de PCHs e CGHs, por estes se tratarem de empreendimentos de pequeno porte, acabam sendo muito mais baratas do que a construção de uma UHE. Além disso, com as PCHs e CGHs é possível alcançar altas margens operacionais com um baixo custo geração/manutenção ([ABRAPCH, 2014](#)).

Outro fator que faz com que essas pequenas centrais se tornem mais atrativas é o fato de causarem menores impactos ambientais, pois suas barragens alagam áreas bem menores do que as das UHEs, o que ajuda a preservar tanto a fauna da região quanto as suas matas ciliares, tão fundamentais para a proteção do solo contra a erosão ([ABRAPCH, 2014](#)).

Enquanto as UHEs são implementadas em rios de grande porte, as PCHs e CGHs podem ser construídas em rios menores, o que ajuda a descentralizar a geração de energia elétrica do país, bem como garantir que seja explorado o potencial hidrelétrico de regiões nas quais não seria viável implementar uma UHE. A energia gerada de forma distribuída por essas pequenas centrais é utilizada de forma efetiva para reduzir as faturas de energia elétrica dos consumidores da região, e a água represada por suas barragens pode ser utilizada também para irrigação, lazer, abastecimento e piscicultura ([ABRAPCH, 2014](#)).

No ano de 1997, foi extinto o monopólio do Estado no setor elétrico e isso fez com que centenas de empresas começassem a explorar o potencial das PCHs no país. Desde então, mais de R\$ 1 bilhão foi investido, pelo setor privado, na elaboração de cerca de

mil projetos de PCHs, que hoje resultam em mais de 9000 MW em empreendimentos protocolados pela ANEEL, sendo que cerca de 7000 MW ainda estão em processo de análise feita pelo órgão regulador ([ABRAPCH, 2020](#)).

Atualmente, as PCHs são responsáveis por cerca de 3,5% de toda a capacidade de geração elétrica instalada do sistema interligado nacional. Esse tipo de empreendimento está presente, especialmente, na região geoeconômica do Centro-Sul. Em 2016, ocorreu o primeiro leilão de energia elétrica que permitiu a participação de CGHs, colocando-as oficialmente dentro do mercado regulado. Atualmente, o Brasil possui mais de 732 unidades de CGHs em operação, que correspondem a 808.665,67 kW de potência instalada, e esses números tendem a crescer cada vez mais nos próximos anos ([ABRAPCH, 2020](#)).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Reservatório do Lobo está localizado entre os municípios de Itirapina - SP e Brotas - SP, que fazem parte da área da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo 13 (UGRHI 13), que contém as bacias dos rios Tietê e Jacaré - Guaçu. Segundo o site da SigRH ([SIGRH, 2020](#)), a UGRHI 13 possui uma área de drenagem de 11.779 km²; comporta uma população de 1.462.855 habitantes espalhada por 34 municípios; e possui 1.106 km² de vegetação natural remanescente que ocupa 9% de sua área total. A figura 3 apresenta o mapa da região correspondente a UGRHI 13.



Figura 3 – Unidade de Gerenciamento de recursos Hídricos do Estado de São Paulo nº 13 (UGRHI 13). Fonte: ([SIGRH, 2020](#)).

A bacia hidrográfica do reservatório do Lobo possui uma área de 227,7 km² e uma densidade de drenagem igual a 0,75 km/km². Suas altitudes variam de 680 m a 940 m e a sua região apresenta uma precipitação média de 1300 mm/ano ([MATSUMURA-](#)

TUNDISI, 1995). A figura 4 apresenta as sub-bacias localizadas nos arredores do reservatório enumeradas de 1 a 6, sendo:

- 1 - sub-bacia do rio Itaqueri;
- 2 - sub-bacia do córrego Geraldo;
- 3 e 4 - sub-bacia de córregos menores;
- 5 - sub-bacia do ribeirão do Lobo;
- 6 - sub-bacia do córrego das Perdizes.

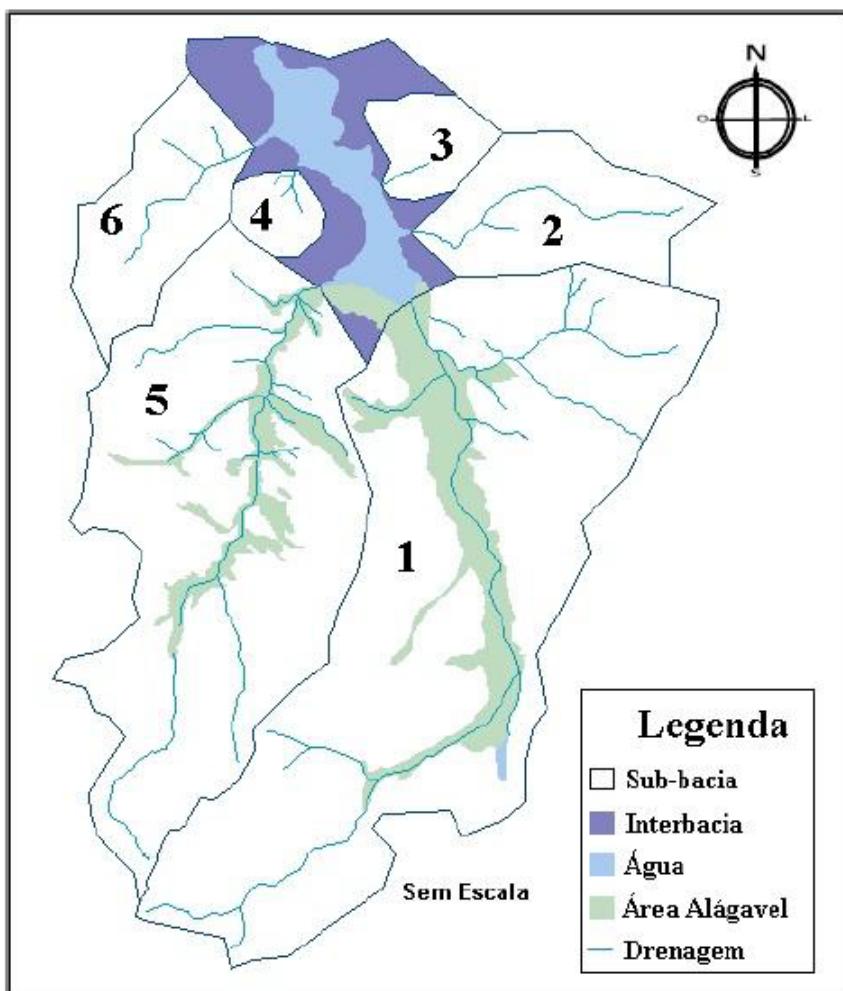


Figura 4 – Divisão das sub-bacias do Lobo. Fonte: (PEREIRA, 2013).

A represa, cuja vista aérea é apresentada na figura 5, está inserida na ÁREA de Proteção Ambiental do perímetro do município de Corumbataí, estabelecida pelo Decreto Estadual N° 20.960, de 8 de junho de 1983, onde é caracterizada como "zona de vida silvestre"(ALESP, 1983).



Figura 5 – O Reservatório do Lobo. Fonte: Google Earth.

Com uma barragem de 15 metros de altura representada pela figura 6, o reservatório tem 6,2 km de comprimento, 5,8 m de profundidade média, sendo a máxima de 14 m, ocupando uma área total de 5,6 km² cujo perímetro é de 18,6 km e cujo volume ultrapassa os $24,3 \times 10^6$ m³ ([ESTIGONI; MATOS; MAUAD, 2014](#)).



Figura 6 – Vista aérea da barragem do reservatório do Lobo. Fonte: ([CRHEA, 2020](#)).

Na época em que ainda não eram utilizados os modelos digitais de elevação (MDE) para caracterizar o relevo do leito do reservatório do Lobo, usava-se como referência a chamada carta batimétrica, que representava as diferentes profundidades da represa por meio de curvas de nível. Strixino ([STRIXINO, 1973](#)) apresenta uma dessas cartas que expressa apenas 5 níveis de profundidade (2, 4, 6, 8 e 10 metros) conforme a figura 7.

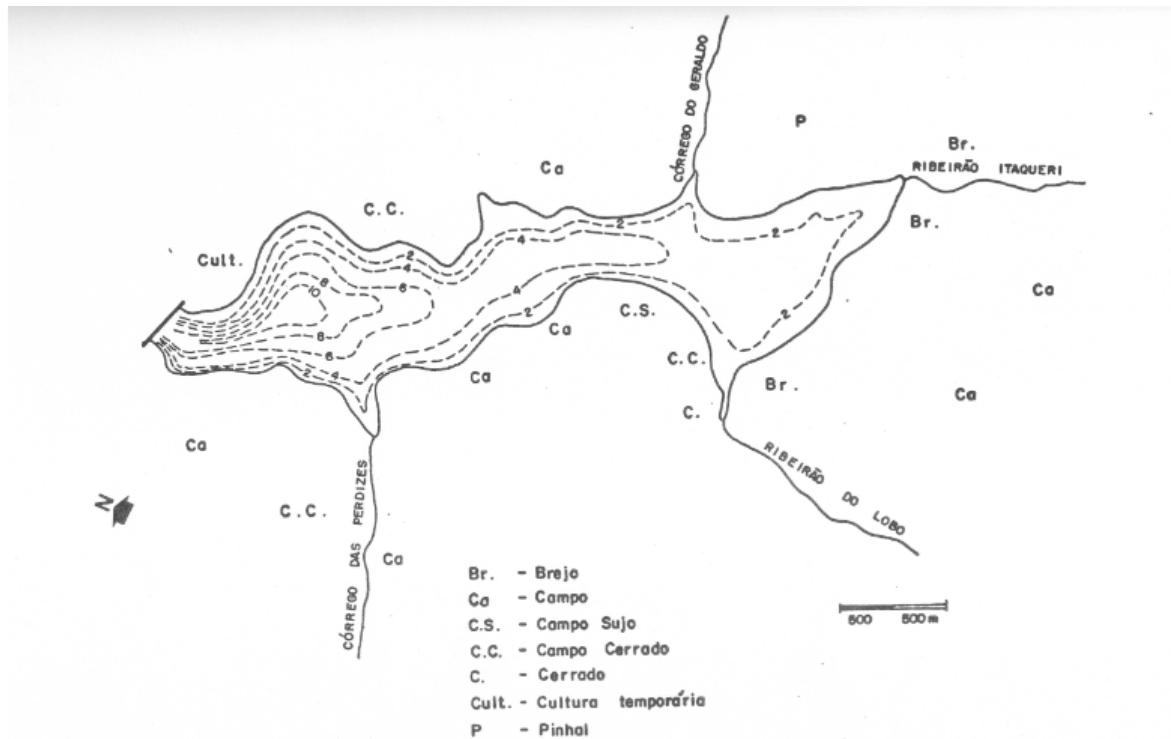


Figura 7 – Carta batimétrica do Reservatório do Lobo. Fonte: ([STRIXINO, 1973](#)).

Segundo Estigoni *et al.* (ESTIGONI; MATOS; MAUAD, 2014), a Central Gerdoura Hidrelétrica do Lobo, também conhecida como Carlos Botelho, está localizada nas coordenadas 22°15'S e 47°40'W, foi inaugurada em 1936 e possui uma potência instalada de aproximadamente 1,59 MW. A fim de atender a demanda da região, a CGH deve operar com níveis de montante que variam entre as cotas 703,0 e 703,3 m. A potência nominal do seu gerador principal é de 2000 kVA, este fornece energia elétrica a 2,4 kV, que após passar por um transformador de 2500 kVA, chega ao sistema de distribuição com uma tensão de 34,5 kV. Os dados técnicos do gerador estão presentes na figura 8. Em junho de 2018, a Aratu Geração S.A solicitou o cancelamento do registro da CGH do Lobo na ANEEL a fim de que a produção de energia pudesse se enquadrar oficialmente na modalidade de minigeração distribuída (ANEEL, 2018).



Figura 8 – Placa de dados técnicos do gerador da CGH. Fonte: ([PAULA, 2020](#)).

Este foi escolhido como o local deste estudo devido à sua proximidade ao Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (CRHEA), que é vinculado à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Além disso, há a disponibilidade de dados confiáveis de batimetrias anteriores, o que viabiliza a comparação entre elas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentados os materiais e métodos utilizados em quatro levantamentos batimétricos diferentes realizados no Reservatório do Lobo nos anos de 2004, 2007, 2010 e 2018, com foco em apresentar as semelhanças e as diferenças entre eles. Essa análise metodológica é fundamental para que se compreenda tanto as concordâncias quanto as discordâncias apresentadas nos resultados dessas batimetrias, uma vez que algumas diferenças no método de coleta e de processamento de dados podem resultar em inconsistências nas relações cota x área x volume e, consequentemente, podem tornar menos precisos os cálculos de assoreamento.

4.1 Materiais

A seguir, serão apresentados os materiais utilizados nos levantamentos batimétricos estudados, os quais abrangem tanto os equipamentos aplicados em campo, quanto os softwares que auxiliaram na coleta e no processamento dos dados.

As quatro batimetrias estudadas utilizaram praticamente os mesmos equipamentos em suas campanhas, todos eles pertencentes ao Núcleo de Hidrometria do CHREA-EESC/USP. Apesar de utilizarem os mesmos equipamentos, não há registros de que foram adotadas as mesmas configurações em seus parâmetros de calibração. Apesar disso, o fato de que todos os dados foram obtidos por meio dos mesmos equipamentos facilita a comparação entre eles e descarta a possibilidade de que certas divergências de resultados sejam atribuídas ao uso de equipamentos diferentes, embora ainda seja importante considerar que em cada ocasião há a possibilidade de terem sido utilizadas configurações diferentes na calibração ([ESTIGONI et al., 2009](#)); ([MATOS, 2012](#)); ([BARBOSA, 2019](#)).

Os dados de profundidade foram obtidos por meio de um ecobatímetro, cujo princípio de funcionamento consiste na emissão de ondas ultrassonoras, que atingem o leito do reservatório e refletem para o receptor, conforme a figura 9. O tempo de trajetória da onda é cronometrado e, a partir dele, calcula-se a distância entre o equipamento e a superfície, multiplicando esse tempo por 0,5 e pela velocidade de propagação do som, um parâmetro ajustável que pode ser configurada no equipamento.

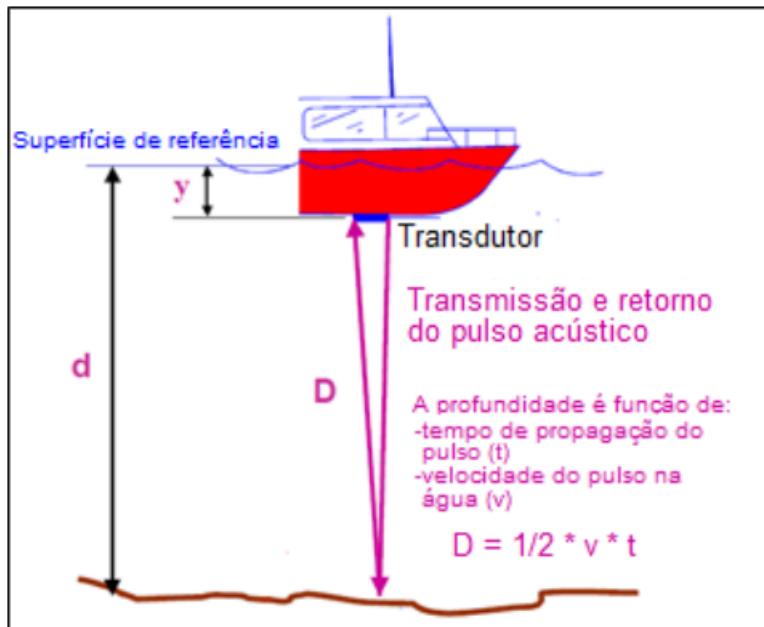


Figura 9 – Medição de profundidade pelo método acústico. Fonte: adaptado de ([US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2013](#)).

O mesmo ecobatímetro foi utilizado em todas as batimetrias estudadas, o BATHY-500 MF *Survey Echo Sounder*, da SyQwest, monofeixe, que pode trabalhar com:

- Quatro frequências diferentes: 33, 40, 50 e 200 kHz;
- Sete intervalos de profundidades, sendo 640 metros o limite;
- Velocidade do som ajustável que varia de 1393 a 1590 m/s.

Já o transdutor associado ao ecobatímetro, cuja função é converter energia elétrica em ondas ultrassonoras e vice-versa, foi o de modelo P/N P01540, que apresenta as seguintes características:

- Frequência de ressonância é de 208 kHz;
- Impedância nominal de 50 ohms
- Abertura do feixe no ponto de 3db de 8 graus.

Ambos os equipamentos são ilustrados pela figura 10 que, indica também o eixo y do transdutor que deve ser posicionado de forma vertical durante as medições.



Figura 10 – Ecobatímetro BATHY 500MF e transdutor P/N P01540. Fonte: ([BARBOSA, 2019](#)).

Foi utilizada a técnica *bar-check* para calibrar a velocidade do som como parâmetro do ecobatímetro. Técnica essa que utiliza de uma placa suspensa a uma profundidade conhecida a fim de se testar o valor medido pelo ecobatímetro, comparando-o com o valor real anteriormente definido. A figura 11 ilustra essa técnica.

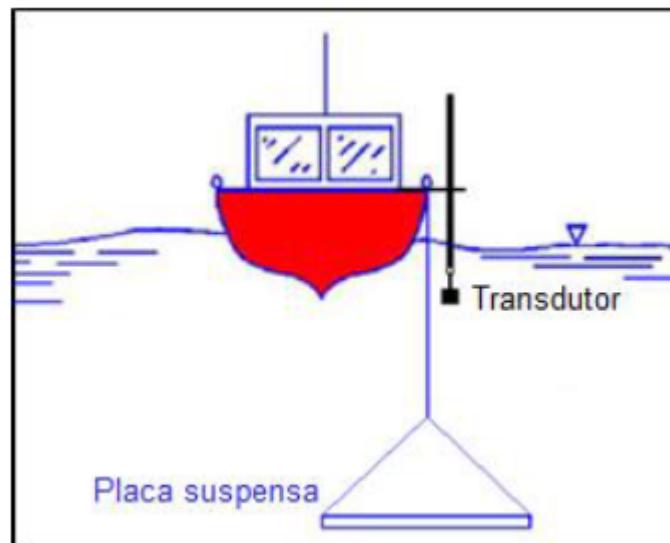


Figura 11 – Montagem para a realização do *bar-check*. Fonte: adaptado de ([US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2013](#)).

Barbosa ([BARBOSA, 2019](#)), registrou que na batimetria de 2018, após o *bar-check*, configurou-se a velocidade do som para 1505 m/s. Além disso, outros parâmetros foram configurados da seguinte maneira:

- Frequência da saída acústica: 200 kHz;

- Profundidade de imersão do transdutor: 30 cm;
- Ganho: 42;
- Fase: de 0-40 m;
- Alcance de 5, 10 ou 20 m, dependendo da região do reservatório.

Em 2004, 2007 e 2010, foi utilizado o receptor GPS de modelo GS20 PDM (*Professional Data Maper*), da Leica Geosystems, como *Global Navigation System Satellite* (GNSS), junto com a antena externa modelo AT 51, da RACAL Landstar. Enquanto em 2018, conforme as orientações da ANA ([ANA, 2013](#)), foi adotado o *Differential Global Positioning System* (DGPS) com desempenho *Real Time Kinematic* (RTK), da empresa Leica. Esse sistema é composto por uma controladora, modelo CS10, além de duas antenas receptoras de modelo GS15 ([ESTIGONI et al., 2009](#)); ([MATOS, 2012](#)); ([BARBOSA, 2019](#)).

O posicionamento diferencial RTK apresenta a vantagem de realizar medidas em tempo real com alta precisão. O uso de duas ou mais antenas GPS permite que haja um receptor de base que fica posicionado em um ponto fixo enquanto um receptor remoto fica livre para se mover e calcular as coordenadas da posição em que se encontra, utilizando a posição da base como referência ([INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION, 2011](#)).

Nas batimetrias de 2004 e de 2007, o levantamento dos dados foi feito com o auxílio do software River Surveyor, da Sontek. Já em 2010 e em 2018, foi adotado o software *Hypack Hydrographic Survey* para o planejamento das seções batimétricas, definindo suas posições relativas em relação às margens, bem como o espaçamento entre elas, além de sincronizar o ecobatímetro e o GPS durante o trabalho de coleta de dados em campo ([ESTIGONI et al., 2009](#)); ([MATOS, 2012](#)); ([BARBOSA, 2019](#)).

Nas batimetrias de 2004 e 2007, para que fosse obtido o MDE do leito do reservatório, utilizou-se a modelagem TIN com o método de triangulação Delaunay. A modelagem em 3D foi realizada com o auxílio do Idrisi 32, um software de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Já em 2010, o SIG ficou por conta do pacote de softwares da Esri (Environmental Systems Research Institute), o ArcGIS 9.3, cujas extensões mais utilizadas foram o *3D Analyst tools*, o *Spacial Analyst tools*, e o *Data Management tools*. O ArcGIS 9.3 oferece a opção de geração de *scripts* por meio de linguagens de programação de alto nível, por conta disso, utilizou-se a linguagem Python para o processamento do cálculo da tabela CAV, implementando a ferramenta CAV-NH e fazendo uso das bibliotecas do ArcGIS 9.3. Em 2018, também foi utilizado o ArcGIS, porém em uma versão mais recente, o ArcGIS v10.3.1. ([ESTIGONI et al., 2009](#)); ([MATOS, 2012](#)); ([BARBOSA, 2019](#)).

4.2 Levantamentos batimétricos de 2004 e 2007

Em 2004 e em 2007, a equipe do Núcleo de Hidrometria do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) realizou batimetrias no reservatório do Lobo com o intuito de atualizar os dados batimétricos adotando novos equipamentos e novos métodos de planejamento das seções batimétricas, além de novas formas de processamento de dados, visando reduzir o tempo e o custo do procedimento.

Os planejamentos das seções batimétricas realizadas em 2004 e em 2007 seguiram modelos muito diferentes um do outro. Na primeira, optou-se por um método mais consolidado de seções transversais paralelas entre si, guiadas por uma seção central que acompanha o corpo do reservatório e que cruza todas as outras seções, conforme mostrado na figura 12.

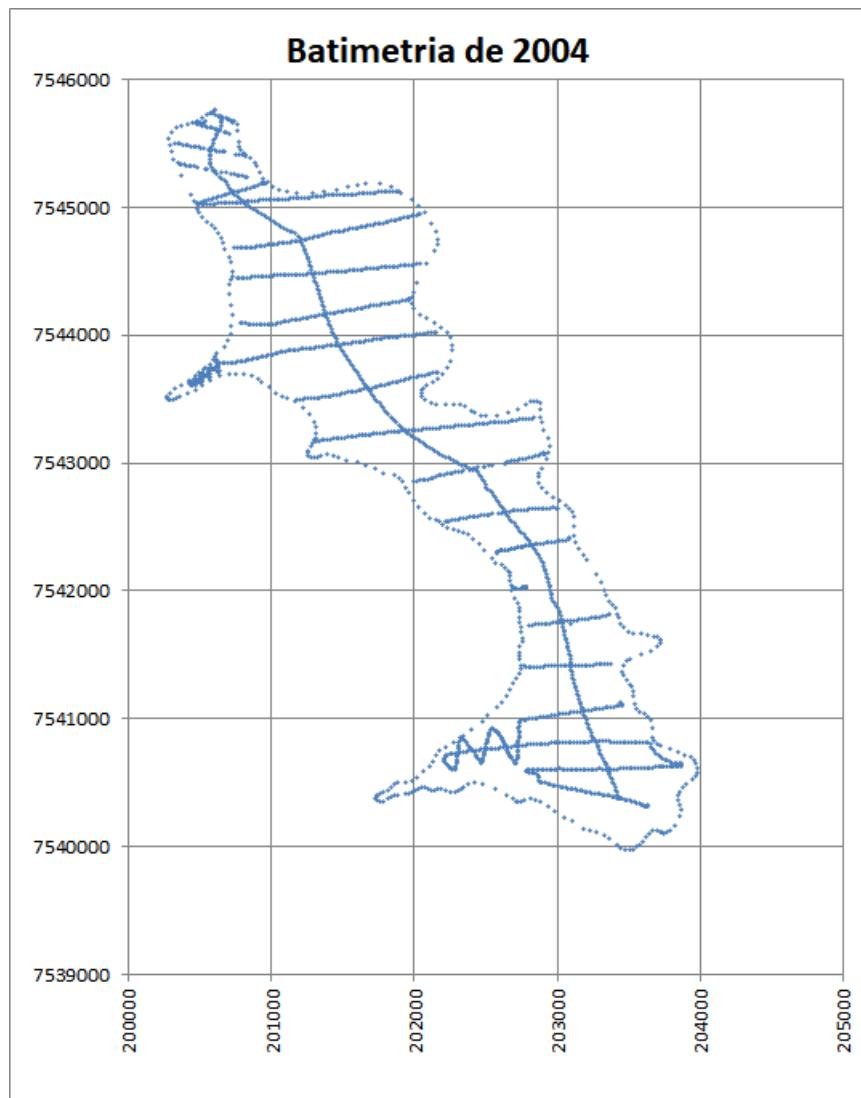


Figura 12 – Batimetria do reservatório da Represa do Lobo realizada em 2004. Fonte: (ESTIGONI et al., 2009).

Já na segunda batimetria, houve a tentativa de planejar as seções batimétricas em zigue-zague a fim de agilizar e baratear o processo. Observa-se, na figura 13, que, devido a esse formato, houve uma redução no número de seções analisadas.

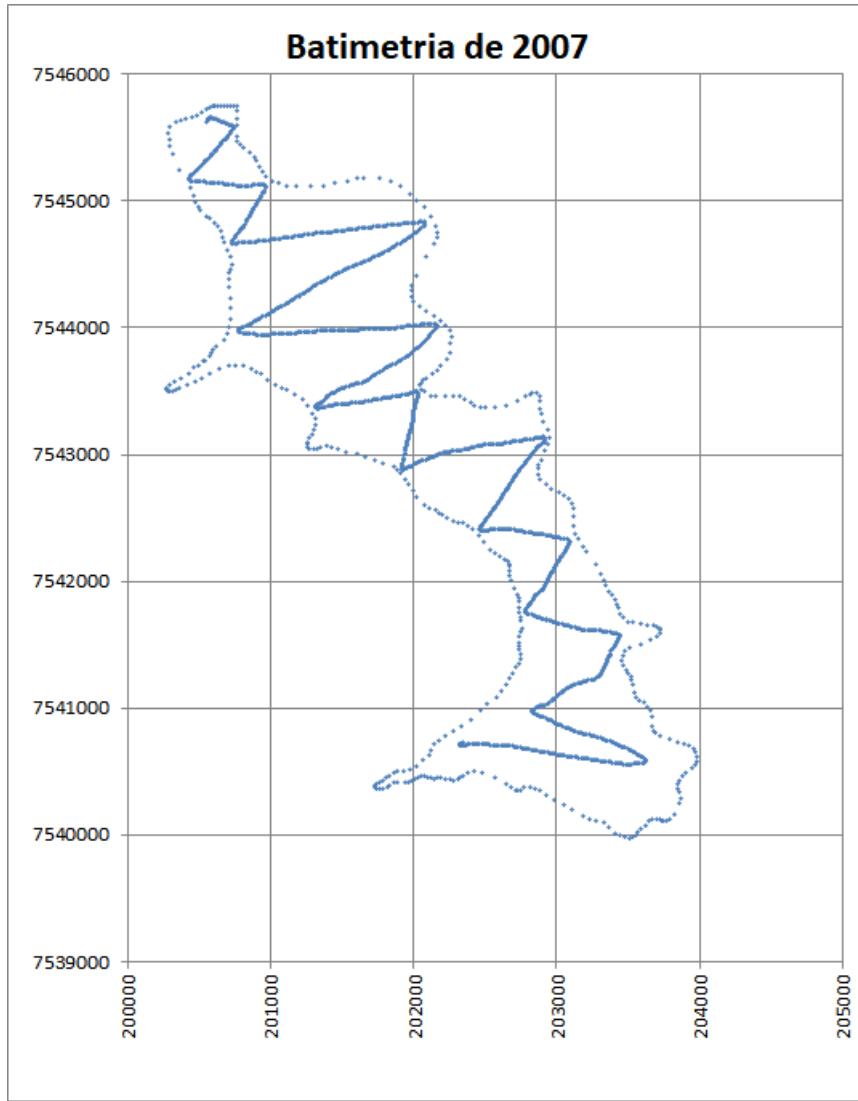


Figura 13 – Batimetria do reservatório da Represa do Lobo realizada em 2007. (Fonte: ([ESTIGONI et al., 2009](#)).)

4.3 Levantamentos batimétricos de 2010

Em 2010 realizou-se novos levantamentos batimétricos no reservatório do Lobo. Matos ([MATOS, 2012](#)) documenta detalhadamente a metodologia utilizada para a coleta e o processamento de dados, apresentando inovações quanto a forma de obter-se as curvas CAV por meio de uma ferramenta computacional chamada CAV-NH e também quanto a formas de minimizar os erros de bordas na modelagem do reservatório por meio do método de Inserção de Malhas de Pontos (IMP). Devido à minúcia na documentação, na coleta e no processamento dos dados, além da adoção de uma equidistância de apenas 10 metros

entre as seções batimétricas, esta é considerada a batimetria que apresentou os resultados mais precisos e confiáveis que podem ser encontrados sobre o reservatório do Lobo.

4.3.1 Coleta de dados

A batimetria no Reservatório do Lobo realizada em 2010 teve suas seções batimétricas planejadas com o auxílio do contorno do reservatório que tinha sido estabelecido pela batimetria de 2004, adotando um espaçamento de apenas 10 metros.

Os levantamentos foram efetuados em duas campanhas, a primeira em maio e a segunda em junho de 2010, ao longo de dezesseis dias de trabalho de campo. Ao final, foram coletadas 726 seções transversais que totalizaram 514.735 metros.

O software Hypack, presente em um computador de bordo, promoveu a sincronização dos dados e a comunicação entre os equipamentos. Os dados foram exportados em forma de texto, no qual cada linha apresentava informações como:

- o nome do transecto;
- o número de gravação;
- data e hora;
- latitude e longitude em UTM;
- o número de satélites;
- o *Dilution of precision* (DOP);
- a profundidade medida pelo ecobatímetro.

O levantamento de contorno do reservatório foi realizado por meio da interpretação de imagens de satélite da câmera Pancromática HRC (*High Resolution Camera*) do Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS2-B). Houve o georreferenciamento da imagem seguido de um delineamento manual da borda do reservatório, com a finalidade de corrigir alguns erros de sombreamento na imagem original. O resultado final é apresentado na figura 14.

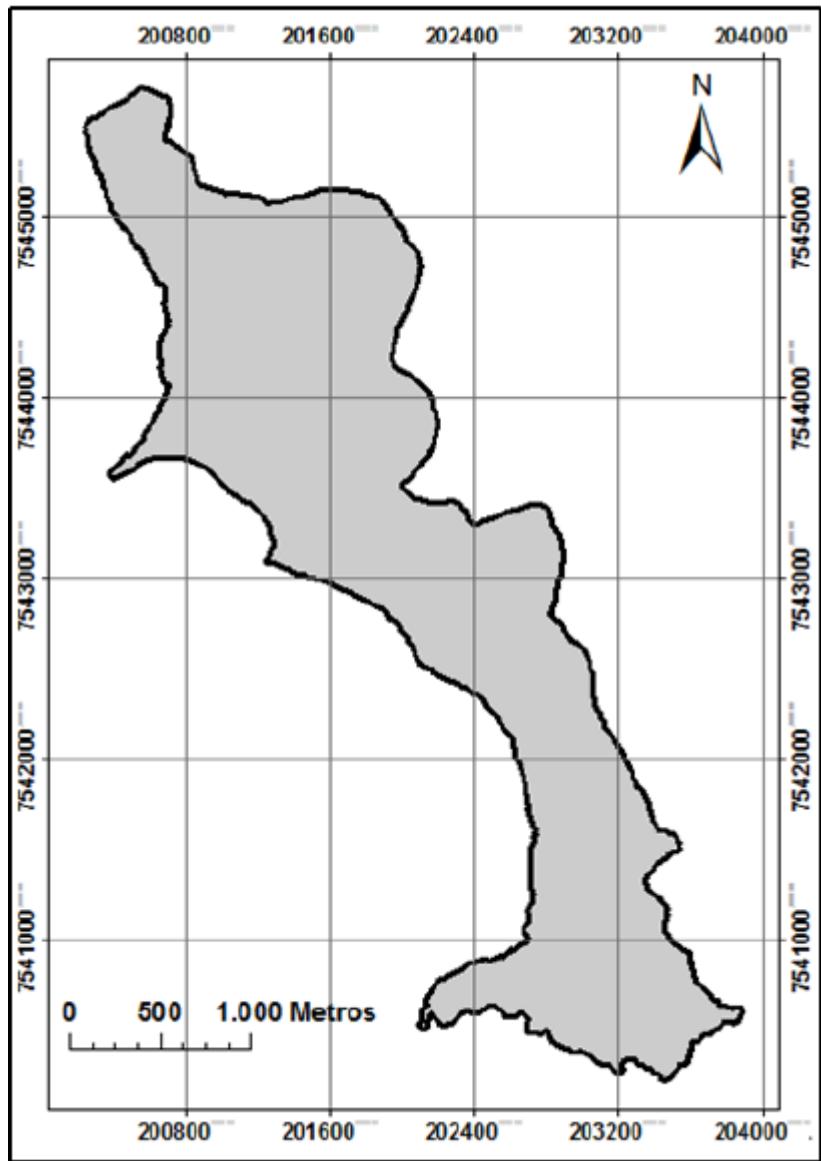


Figura 14 – Contorno do reservatório. Fonte: ([MATOS, 2012](#)).

4.3.2 Processamento de dados

Os dados pré-processados foram organizados por meio de três rotinas computacionais. Conforme passam pela primeira rotina, os dados são carregados em formato de texto, e em seguida, acontece a correção da profundidade medida pelo ecobatímetro e a sua conversão em cota. Após a separação de cada transecto em um novo arquivo de texto, a segunda rotina se encarrega de organizar esses dados de forma que cada transecto sempre inicie da margem esquerda e termine na direita. Por fim, a terceira rotina gera arquivos de texto com diferentes distanciamentos, gravando as bordas do reservatório separadamente. Uma vez que os dados passam por essas rotinas, estão prontos para as etapas seguintes da análise.

Com a finalidade de melhorar o processamento de dados e promover um cálculo mais preciso da curva CAV utilizou-se o método de Inserção de Malha de Pontos (IMP)

para realizar a zinterpolação dos dados. A partir da extração do contorno do reservatório e do TIN gerado pelos dados da batimetria, gera-se uma imagem raster, a partir da qual é extraída uma máscara cujos pixels serão convertidos em pontos associados a valores de cota e de coordenadas. Por fim, a partir dos pontos obtidos, dos transectos da batimetria e da borda original do reservatório gera-se o MDE final.

Com a finalidade de otimizar o processo de geração do MDE por meio do método IMP, utilizou-se a ferramenta computacional CAV-NH, que foi desenvolvida com o auxílio das bibliotecas do ArcGIS 9.3 e das funcionalidades da linguagem de programação Python. Essa ferramenta é dividida em quatro módulos, sendo que os dois primeiros têm a finalidade de gerar o MDE pelo método TIN tradicional, enquanto os dois últimos adotam o método IMP. Por fim, foi obtida a relação CAV e o volume do reservatório foi calculado com o auxílio da ferramenta *Surface Volume (3D Analyst)* do ArcGIS 9.3.

4.4 Levantamentos batimétricos de 2018

Oito anos depois da batimetria de 2010, que apresentou resultados de alta precisão e confiabilidade, foi realizado um novo levantamento batimétrico a fim de avaliar o assoreamento no reservatório durante esse período. Segundo as novas orientações da ANA ([ANA, 2013](#)), a batimetria contou com o uso do posicionamento diferencial RKT e atualizou tanto o MDE quanto a curva CAV do reservatório do Lobo.

4.4.1 Coleta de dados

Na época em que foram planejadas as seções batimétricas desta batimetria, a atual CGH do Lobo ainda era classificada pela ANEEL como sendo UHE. O cancelamento do seu registro junto a Agência Nacional de Energia Elétrica só aconteceu oficialmente em agosto de 2018 ([ANEEL, 2018](#)).

Como já apresentado anteriormente, a ([ANA, 2013](#)) apresentou uma fórmula para definir a distância entre as linhas de sondagem em batimetrias realizadas em UHE e que utilizam ecobatímetro de monofeixe. Aplicou-se essa fórmula para o Reservatório do Lobo e o resultado foi o seguinte:

$$E_{st} = \frac{0,35A^{0,35}}{D} = \frac{0,35 \cdot (560ha)^{0,35}}{6,2km} = 517m \quad (4.1)$$

Avaliou-se que 517 metros seria uma distância grande demais para que houvesse uma precisão satisfatória nas medições, então o cálculo foi refeito, desta vez considerando a fórmula destinada às PCHs.

$$E_{st} = \frac{0,1A^{0,25}}{D} = \frac{0,1 \cdot (560ha)^{0,25}}{6,2km} = 78m \quad (4.2)$$

Após constatar-se que 78 metros seria um valor adequado para que a batimetria apresentasse um nível de detalhamento satisfatório, esse valor foi arredondado, por questões práticas, para 100 metros. Considerando que em 2010 adotou-se uma equidistância de 10 metros, esse arredondamento permitiu que houvesse uma coincidência entre as seções batimétricas de 2018 em relação às de 2010. Ao final do planejamento, foram obtidas as 72 seções do reservatório conforme a figura 15([BARBOSA, 2019](#)).

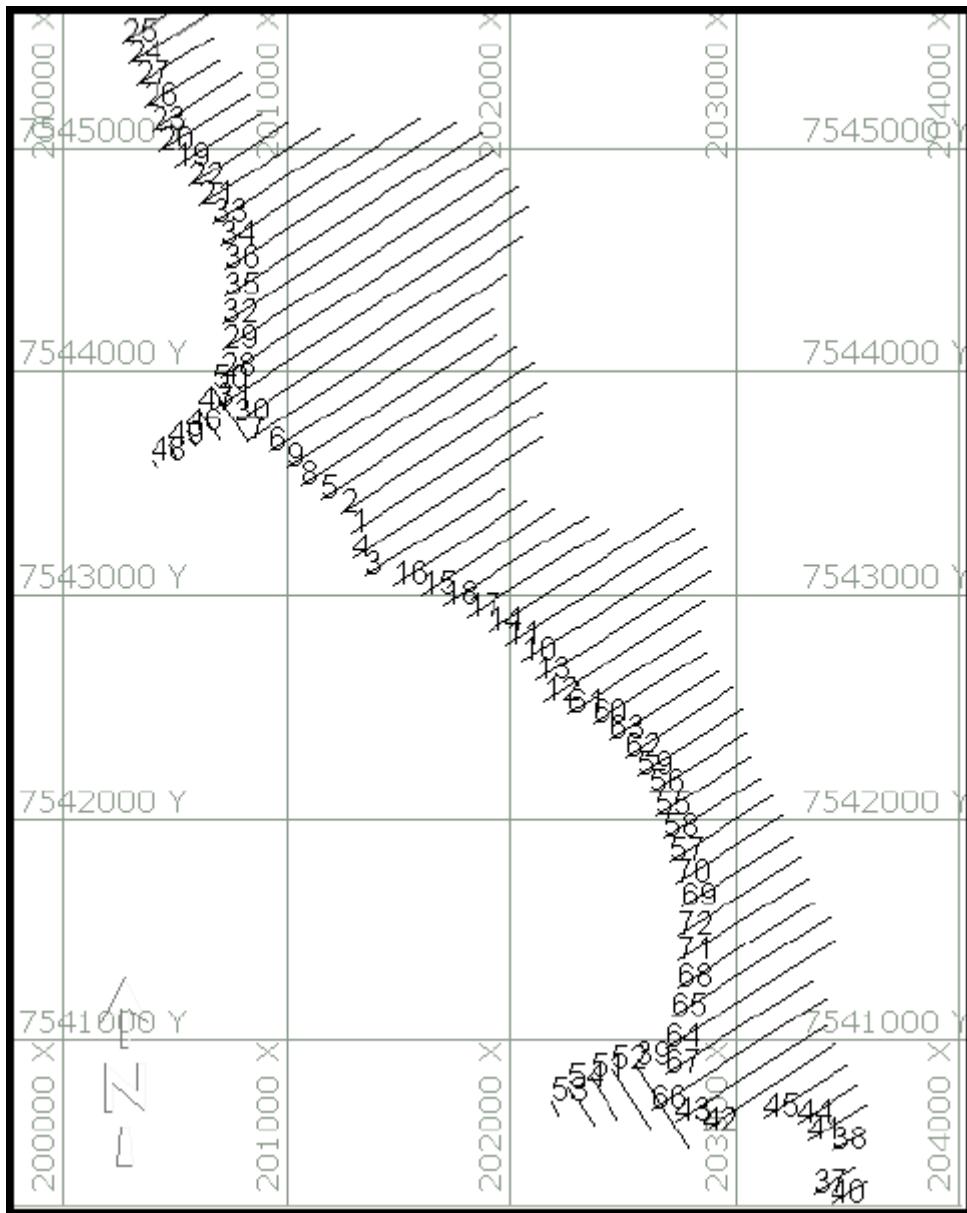


Figura 15 – Linhas de sondagem com distanciamento de 100 metros - pela tela do Hypack.
Fonte: Adaptado de ([BARBOSA, 2019](#)).

Além da medição indireta realizada pelo ecobatímetro, optou-se também por realizar algumas medições diretas em pontos específicos do reservatório, a fim de verificar a verossimilhança dos dados coletados. Para isso, foram determinados 25 pontos no interior do reservatório (conforme mostra a figura 16), que foram escolhidos de acordo com

dados brutos apresentados pelo Hypack e que estavam localizados pontos com diferentes profundidades.

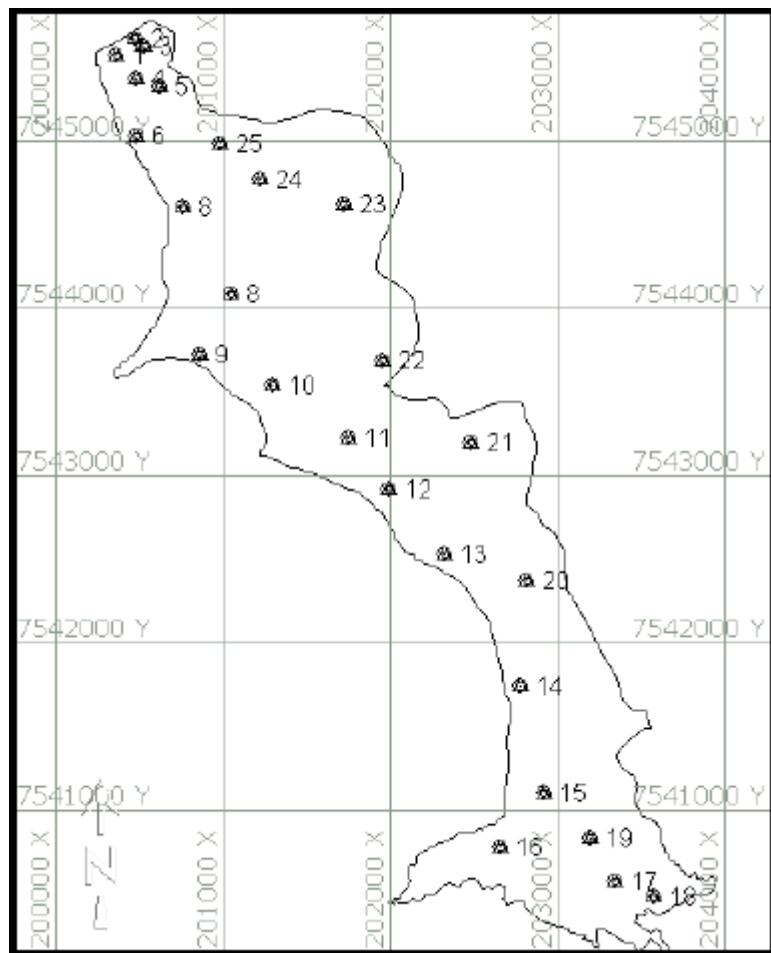


Figura 16 – Localização dos pontos de verificação - tela do Hypack. Fonte: Adaptado de ([BARBOSA, 2019](#)).

As medições diretas foram realizadas por meio de uma corda graduada e com o auxílio de uma antena receptora GPS conectada um *Toughbook*. Os valores medidos foram registrados manualmente e associados às coordenadas indicadas pelo sistema GNSS. Após todo o processamento de dados (que será descrito a seguir) os valores medidos nos 25 pontos de coleta foram comparados com seus correspondentes apresentados no modelo TIN.

4.4.2 Processamento de dados

A partir dos dados coletados, o Hypack realiza um pré-processamento no qual já é possível visualizar as seções e corrigir os erros mais grosseiros. Foi utilizada a planilha de dados, um recurso que apresenta os dados brutos que foram coletados além dos dados de profundidade já corrigidos por meio da diferença entre o nível real e um nível de referência

(neste caso, foi adotado 703,06 m). A princípio, os erros são corrigidos por meio de uma avaliação visual na qual o programa auxilia sugerindo pontos a serem eliminados.

Apesar da eliminação automática de erros não ser muito recomendada, nos casos em que houve oscilações mais proeminentes, essa medida foi adotada com o uso das ferramentas *smooth* e *filter*, as quais promoveram uma suavização da superfície, conforme mostra a figura 17.

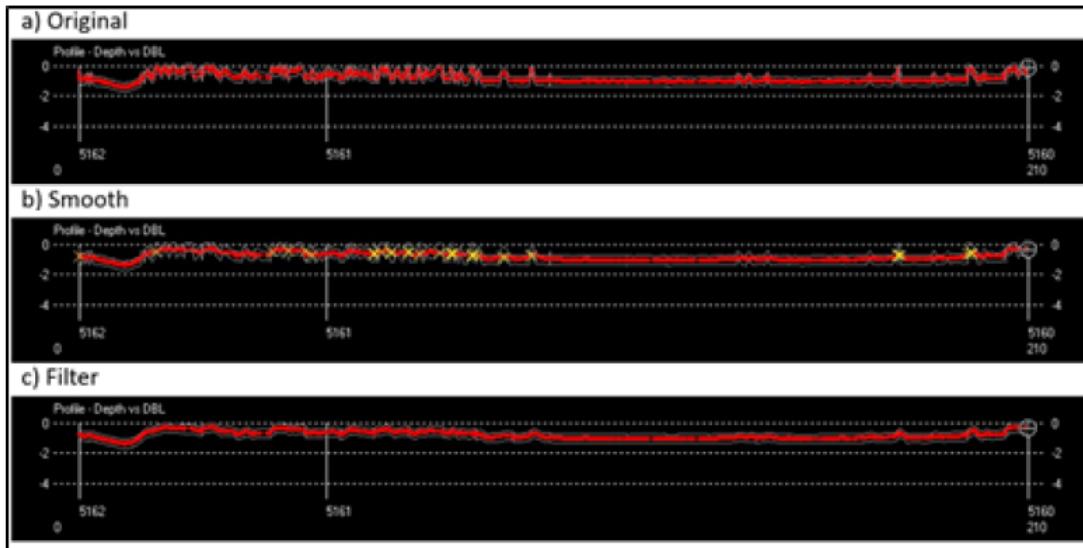


Figura 17 – Resultado do uso das ferramentas *smooth* e *filter*. Fonte: ([BARBOSA, 2019](#)).

O pré-processamento resulta em arquivos .txt os quais, em seguida, são inseridos no ArcGIS v10.3.1. para que seja feito o processamento de fato. Passaram por esse processo tanto os dados coletados em 2018 quanto os de 2010, que tinham sido disponibilizados, a fim de que pudesse ser feita a comparação entre eles.

Os dados relativos ao contorno do reservatório utilizados em 2010 também foram a base para a geração do modelo TIN de 2018, a fim de que as áreas do reservatório sejam coincidentes. Por meio da ferramenta *Surface Difference* do *3D Analyst*, gerou-se um mapa que compara as superfícies constatadas em 2018 com a de 2010.

A partir da obtenção do TIN, gerou-se um modelo raster, o qual foi analisado com o auxílio da ferramenta *Map Algebra* do *Spacial Analyst*, que gerou um mapa resultante, no qual foi possível constatar em quais pontos do leito reservatório houve elevações e afundamentos. Por fim, o volume do reservatório foi calculado com o auxílio do *3D Analyst*, mais especificamente por meio da ferramenta *Surface Volume* o qual, ao final do processo, gera um arquivo .txt que contém uma tabela com todas as informações de cota, área e volume ([BARBOSA, 2019](#)).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, os resultados das batimetrias realizadas no Reservatório do Lobo serão expostos na forma de MDEs e de curvas CAV. Será realizada uma comparação entre os resultados e será feita uma análise a fim de que sejam identificadas as causas de eventuais inconsistências entre eles. Por fim, serão apresentados e analisados os valores de volume total calculados em cada uma das batimetrias.

5.1 Análise dos modelos digitais de elevação (MDEs)

Todas as batimetrias analisadas neste trabalho, que já datam do século XXI, apresentam como resultados os seus próprios MDEs, que demonstram um enorme avanço em relação às cartas batimétricas representadas por curvas de nível, por não mais expressarem a profundidade por meio de valores discretos, e sim apresentarem gradientes de cor que tornam mais precisas tanto a análise visual quanto os cálculos de volume.

No caso das batimetrias de 2004 e de 2007, os MDEs foram gerados pelo software Idrisi. A figura 18 coloca lado a lado esses dois modelos digitais.

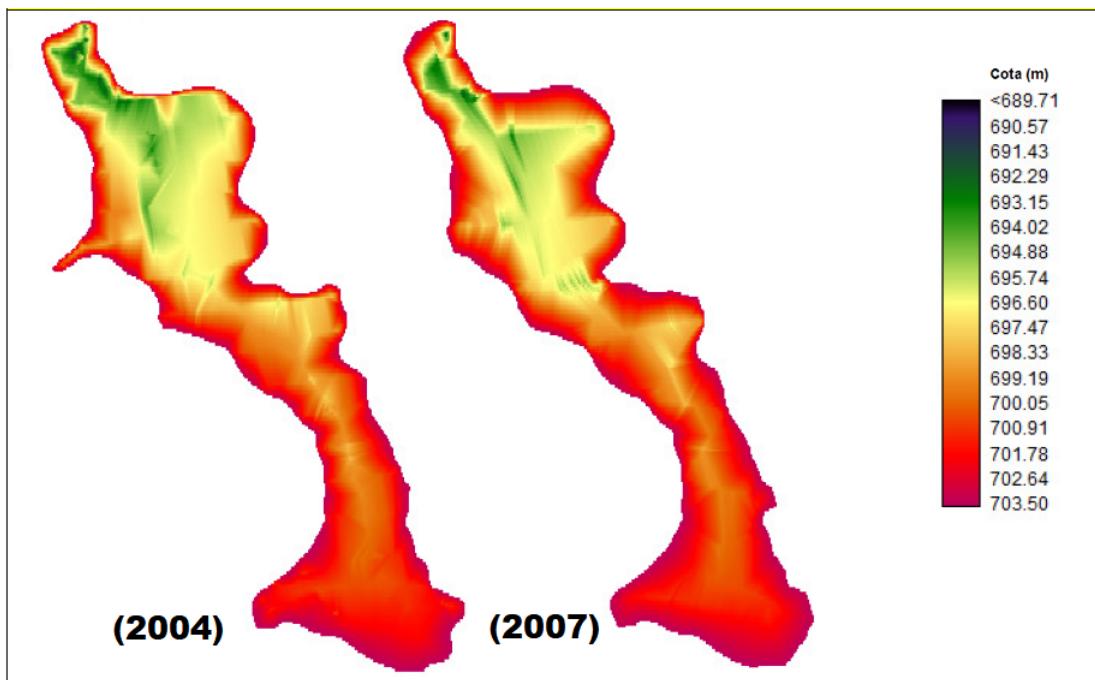


Figura 18 – MDEs gerados a partir das batimetrias de 2004 e 2007, respectivamente. Fonte: Adaptado de ([ESTIGONI et al., 2009](#)).

Ao comparar os dois modelos, encontram-se diferenças expressivas. A começar pelo contorno do reservatório que, em 2007, devido ao método de planejamento das seções batimétricas, resultou em uma demasiada simplificação que supriu alguns pontos

relevantes da margem. O braço do reservatório que provém do córrego das Perdizes foi o ponto do contorno do reservatório que sofreu a maior distorção. Visualmente já é possível notar, no MDE de 2007 em relação ao de 2004, um aumento das zonas em vermelho e laranja o que já é um indicativo que a segunda batimetria resultou em um volume calculado menor do que o da primeira.

Em 2010, Matos ([MATOS, 2012](#)) realizou uma batimetria cujas seções batimétricas eram espaçadas por apenas 10 metros. A fim de demonstrar o impacto da variação do tamanho dos espaçamentos na geração da MDE, utilizou-se os dados dessa batimetria para gerar modelos digitais diferentes para um número distinto de seções consideradas.

Para o primeiro modelo, utilizou-se todas as 726 seções coletadas com o espaçamento de 10 metros. Para um segundo modelo, ele considerou apenas uma a cada dez seções, de forma que o espaçamento das seções consideradas foi igual a 100 metros. De forma análoga, ele considerou espaçamentos de 200, 300, 400, 500 e 600 metros.

Para este trabalho, é pertinente analisar três casos: o com espaçamento de 10 metros, por ser o mais detalhado; o com o espaçamento de 100 metros, pois esse foi o distanciamento adotado na batimetria de 2018; e o com o espaçamento de 300 metros por se assemelhar com as distâncias adotadas em 2004. A figura 19 coloca lado a lado os três casos. Neste momento, não foi possível comparar diretamente com a batimetria de 2007, na qual as seções não eram paralelas como nas demais.

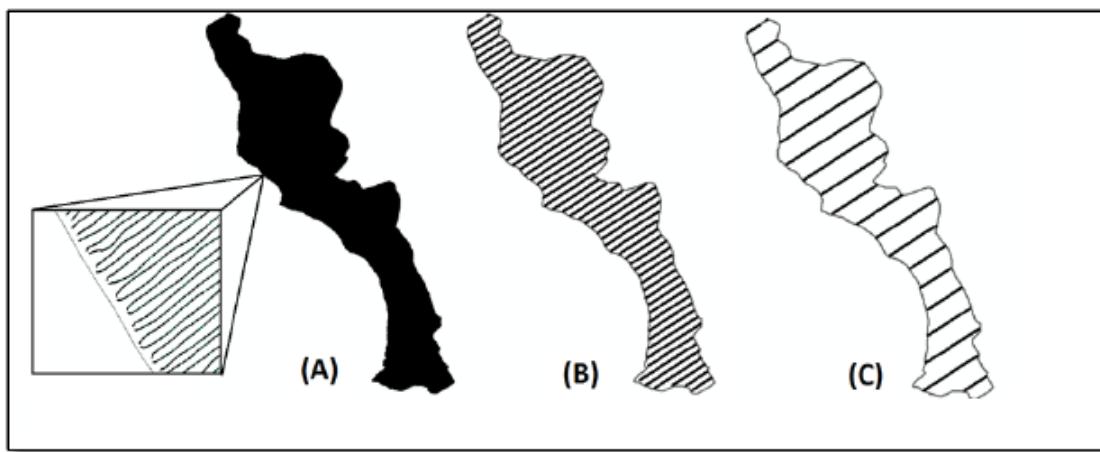


Figura 19 – Distanciamento entre as seções batimétricas. (A) 10 metros; (B) 100 metros; (C) 300 metros. Fonte: Adaptado de ([MATOS, 2012](#)).

Foi gerado um TIN para cada um dos casos. As faces dos triângulos gerados pela interpolação evidenciam que quanto maiores as equidistâncias, menor é a área coberta, sobretudo em regiões próximas à borda, conforme mostra a figura 20.

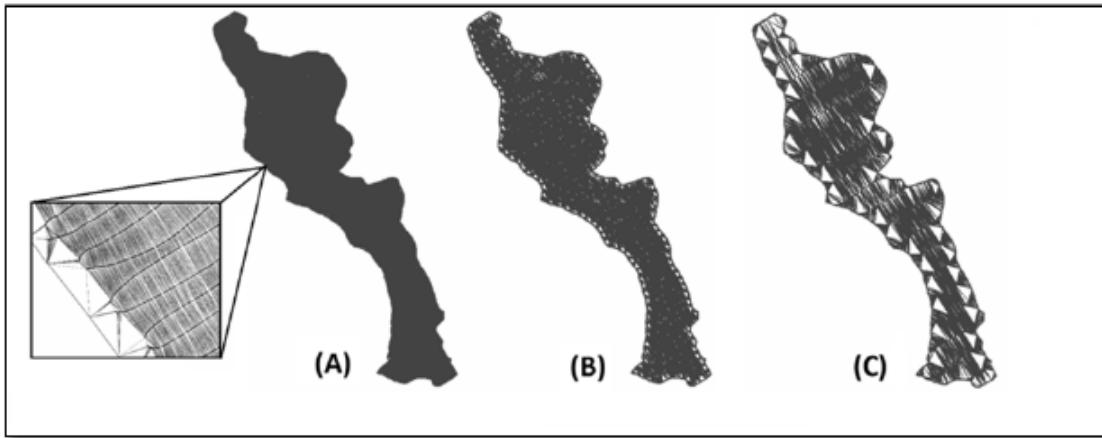


Figura 20 – Faces dos triângulos gerados pelo método TIN tradicional. (A) 10 metros; (B) 100 metros; (C) 300 metros. (Fonte: Adaptado de ([MATOS, 2012](#))).

As MDEs geradas a partir do método tradicional não eliminam os efeitos de borda o que resultou em distorções no relevo, conforme mostra a figura 21.

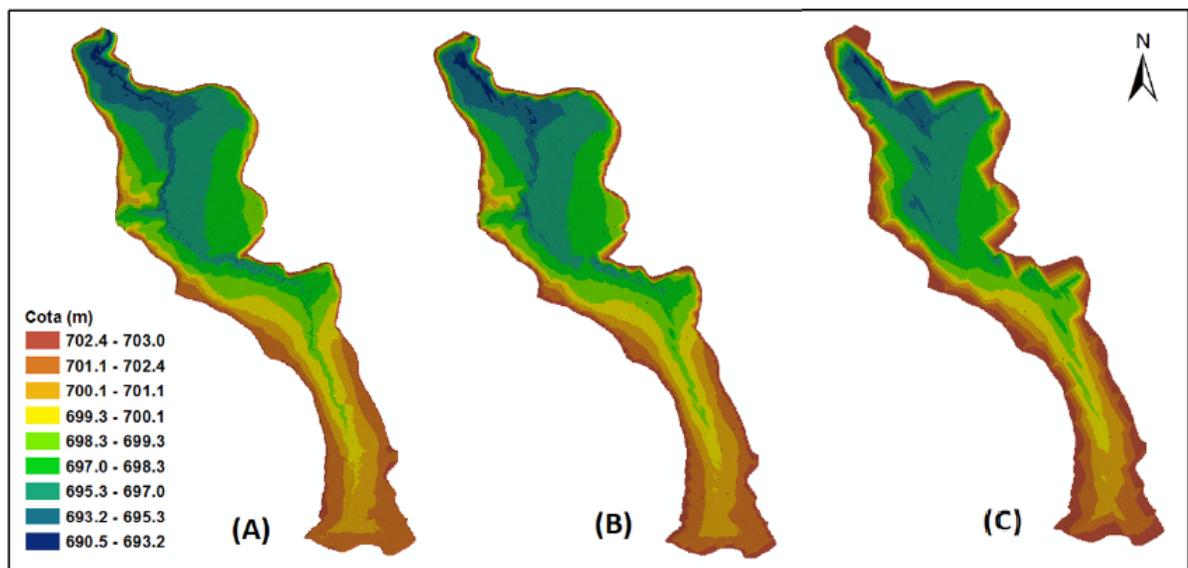


Figura 21 – TIN resultante segundo o método tradicional. (A) 10 metros; (B) 100 metros; (C) 300 metros. Fonte: Adaptado de ([MATOS, 2012](#)).

Após a implementação do método IMP, constatou-se uma redução significativa nos erros em regiões próximas à borda, o que implicou em no aumento da área coberta pelos triângulos, conforme mostra a figura 22.

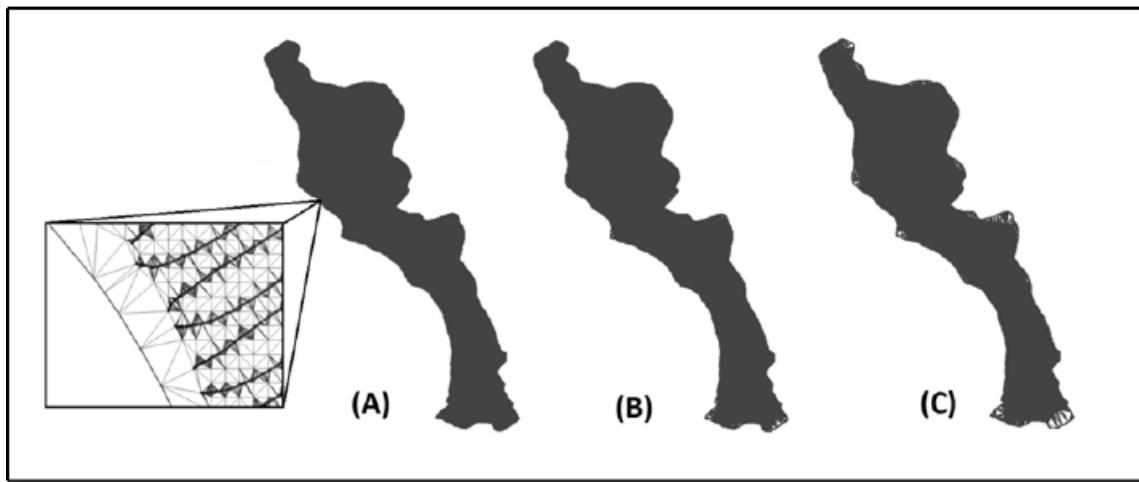


Figura 22 – Faces dos triângulos gerados pelo TIN e resultantes do método IMP. (A) 10 metros; (B) 100 metros; (C) 300 metros. Fonte: Adaptado de ([MATOS, 2012](#)).

Essa correção dos erros resultou em uma diminuição do efeito de borda, atenuando as diferenças entre as MDEs dos três casos, conforme mostra a figura 23.

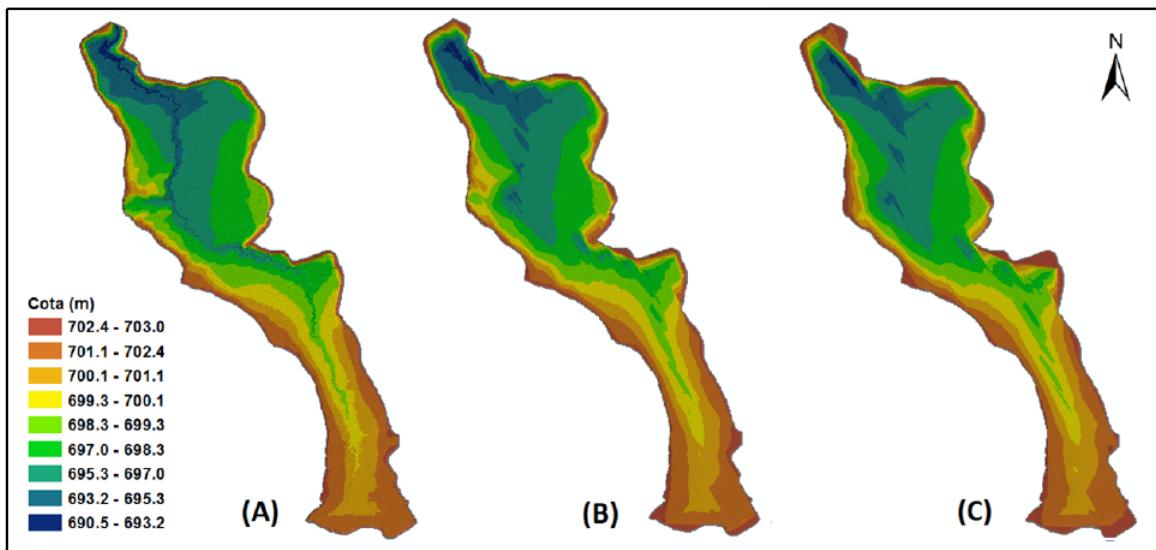


Figura 23 – TIN resultante segundo o método IMP. (A) 10 metros; (B) 100 metros; (C) 300 metros. Fonte: Adaptado de ([MATOS, 2012](#)).

Voltando ao MDE da batimetria de 2004, é possível observar que também houve erros causados pelo efeito de borda. Colocando-o lado a lado, na figura 24, com os resultados obtidos em 2010, considerando um espaçamento de 300 metros entre as seções, é possível observar algumas semelhanças.

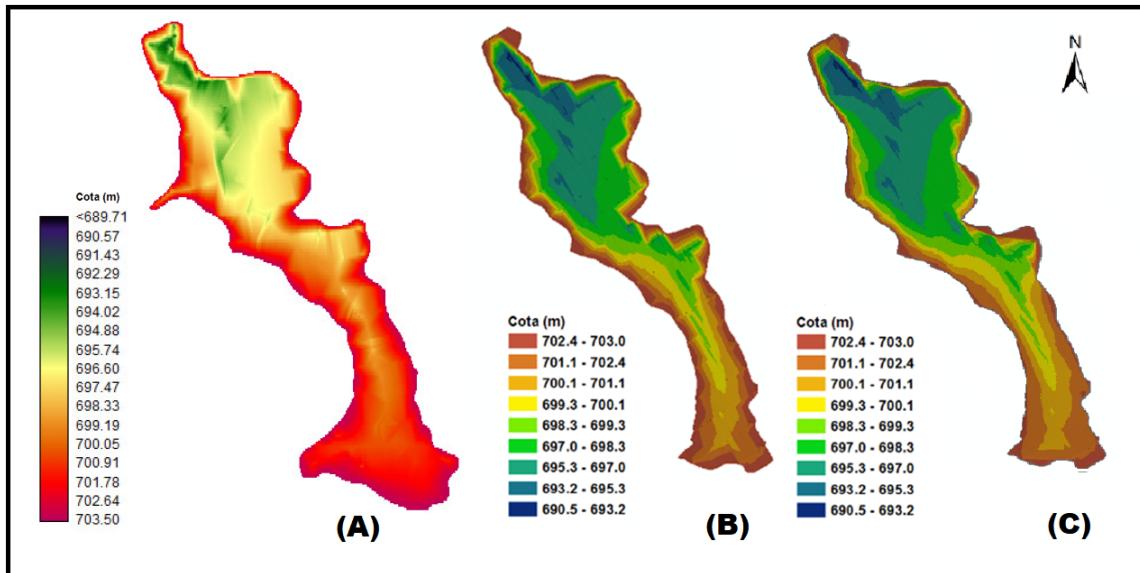


Figura 24 – Comparação entre MDEs de 2004 e 2010. (A) MDE da batimetria de 2004; (B) MDE da batimetria de 2010 - adotando um distâncias de 300 metros entre as seções - gerado pelo método TIN tradicional; (C) MDE da batimetria de 2010 - adotando um distâncias de 300 metros entre as seções - gerado pelo método IMP. Fonte: Adaptado de (ESTIGONI et al., 2009) e de (MATOS, 2012).

Constatou-se grande influência do efeito de borda em (A) e (B). Ambos os MDEs foram gerados a partir do uso do método TIN tradicional, enquanto em (C) fez-se uso do método IMP e apresentou menos falhas ao representar as regiões próximas à borda. Pode-se concluir que, caso a batimetria de 2004 tivesse utilizado o método IMP, o MDE gerado apresentaria uma atenuação dos erros próximos à borda.

Por outro lado, observa-se que (A) representou as regiões mais profundas do reservatório, localizadas na região central da represa, com melhor detalhamento, em relação a (B) e (C). Esse resultado se deve à presença, na batimetria de 2004, de uma seção central, que cortou de cima a baixo todo o corpo do reservatório, perpendicular as demais seções, conforme observado anteriormente na figura 10.

A batimetria de 2018 teve um cuidado especial em criar condições para uma melhor comparação com os levantamentos de 2010. Para isso, adotou-se um espaçamento de 100 metros entre as seções, posicionando-as de forma com que coincidissem com as seções de 100 metros de espaçamento consideradas na batimetria de 2010, conforme a figura 25.

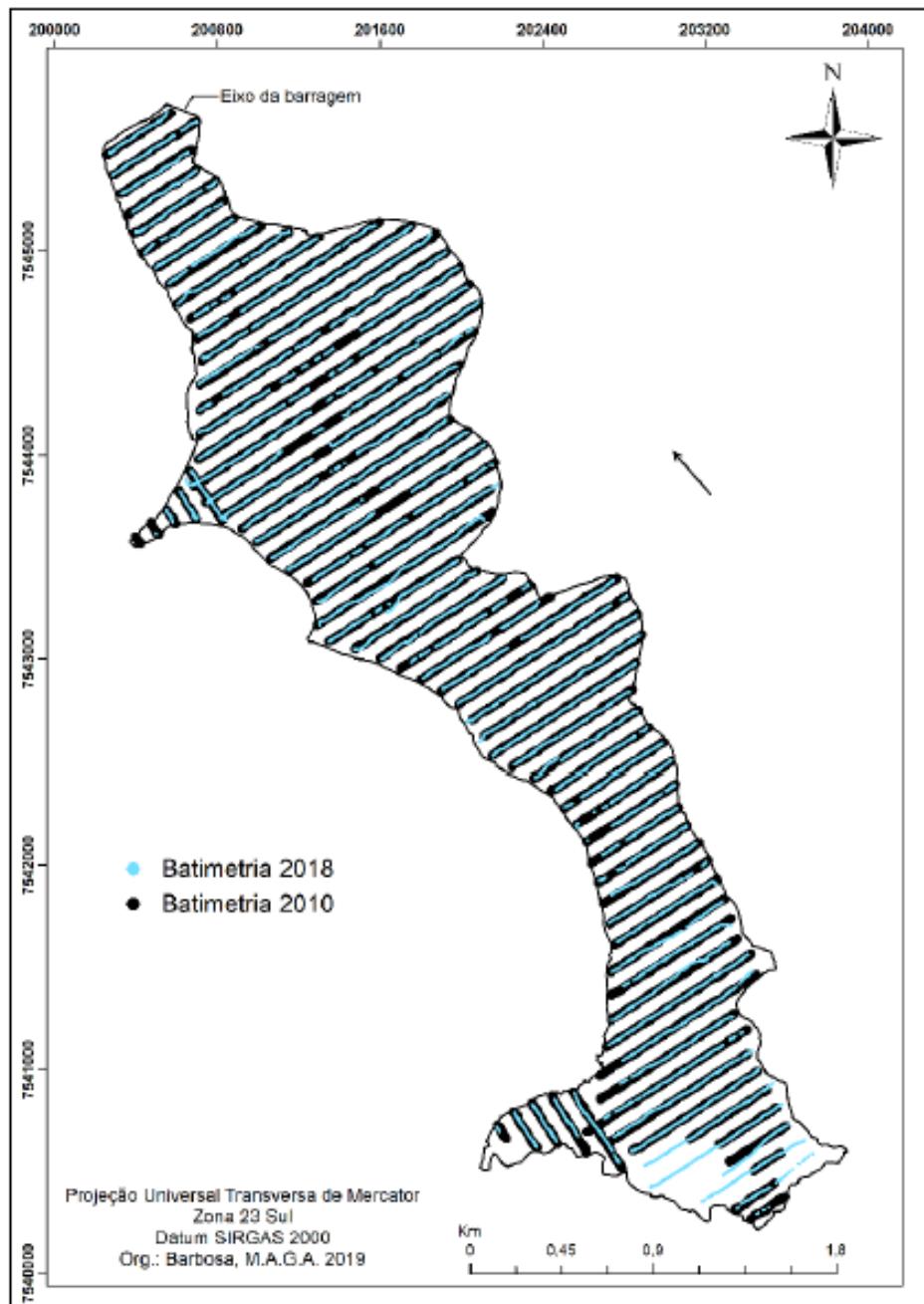


Figura 25 – Coincidência das seções transversais de 2010 e de 2018. Fonte: ([BARBOSA, 2019](#)).

A partir dos dados coletados, gerou-se um modelo TIN atualizado. Além disso, com base nos dados fornecidos de 2010, gerou-se novamente um modelo correspondente daquela batimetria. Ambos foram colocados lado a lado para comparação na figura 26.

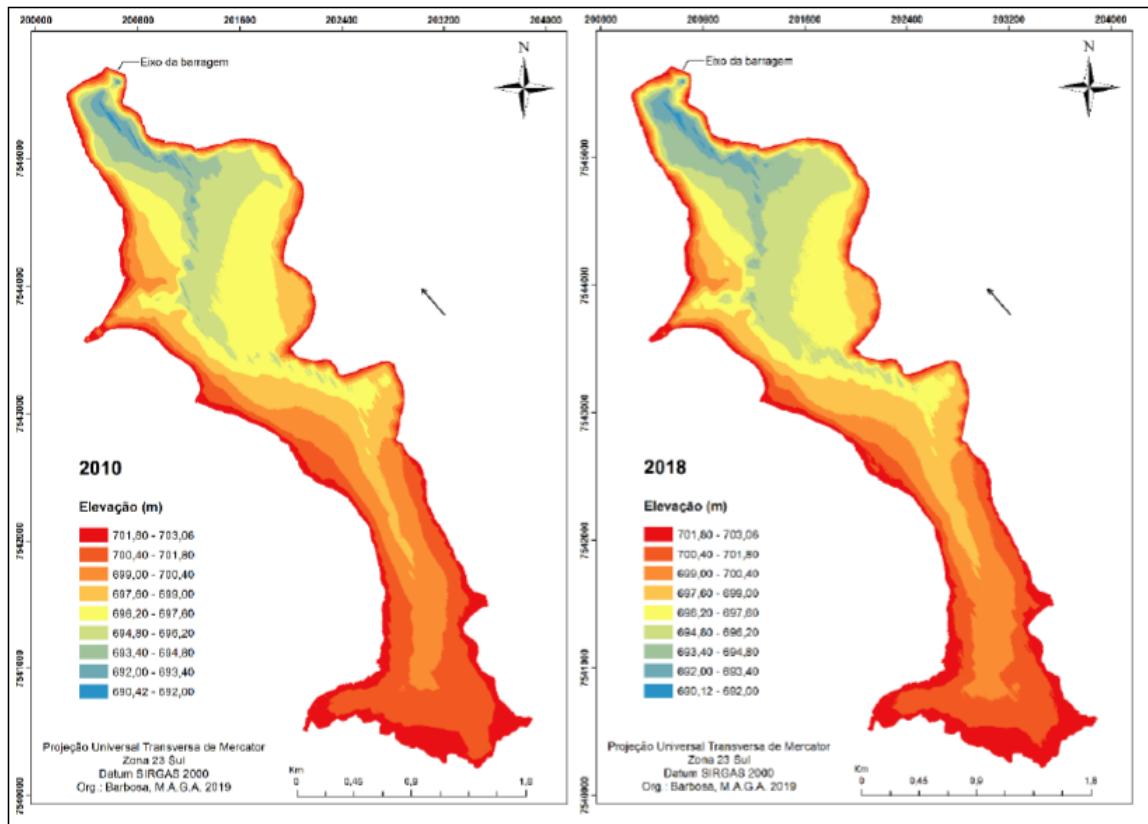


Figura 26 – Modelos TIN de 2010 e de 2018. Fonte: ([BARBOSA, 2019](#)).

Além da superfície TIN, foi gerada também uma superfície raster. A fim de realizar uma análise do assoreamento ocorrido nesse período de oito anos, as superfícies dos modelos de 2010 e 2018 foram subtraídas uma da outra a fim de que se fosse possível visualizar as diferenças entre elas. Na figura 27, o azul representa regiões do reservatório cuja cota atualizada estava abaixo da anterior e o vermelho representa regiões cuja cota atualizada estava acima.

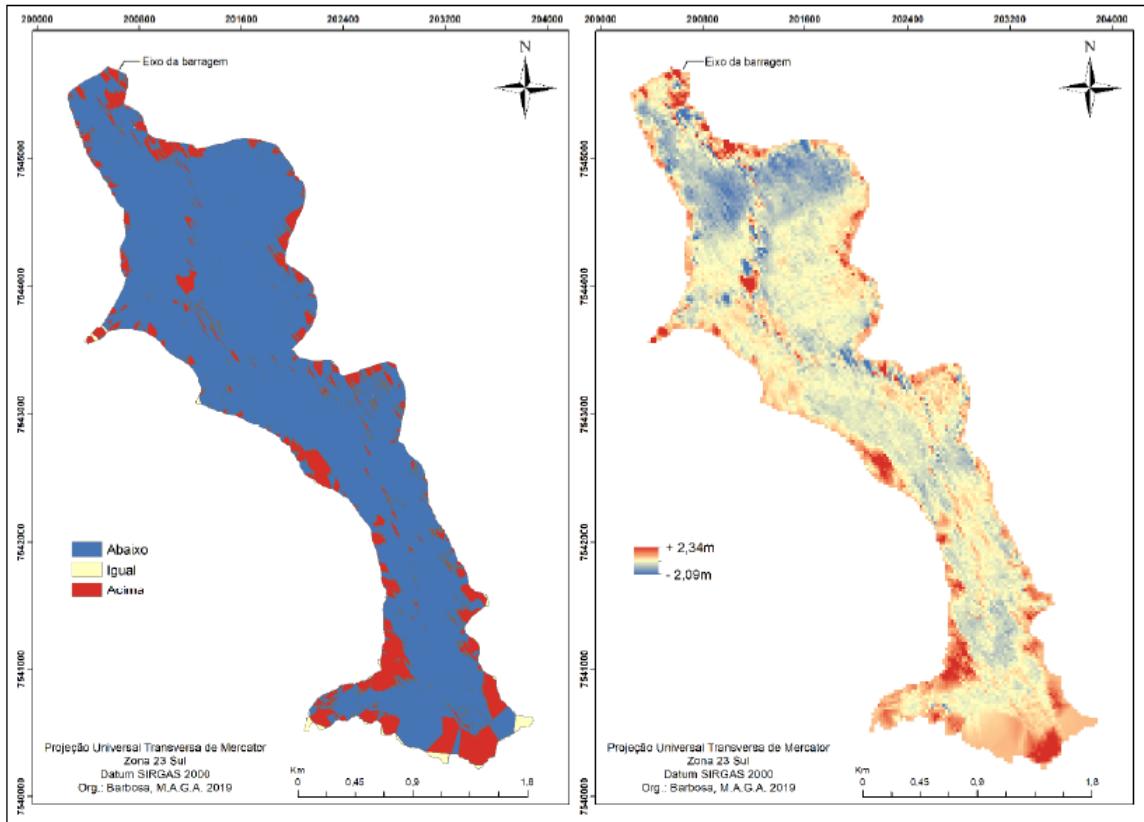


Figura 27 – Comparação entre as superfícies TIN (esquerda) e raster (direita) da batimetria de 2018 em relação a de 2010. Fonte: ([BARBOSA, 2019](#)).

Nessa primeira análise, observa-se que a maior parte da superfície do leito do reservatório apresenta uma cota correspondente abaixo em relação aos dados de 2010, o que seria um indicativo de que o volume do reservatório aumentou ao invés de diminuir. Ao se deparar com um resultado bem diferente do esperado, ([BARBOSA, 2019](#)) promove alguns ajustes a fim de que corrigir os possíveis erros na comparação das duas batimetrias. Foram realizados ajustes na velocidade do som considerada pelo ecobatímetro para efetuar as medições de profundidade. Após serem testadas várias novas velocidades, chegou-se ao valor de 1484 m/s como sendo o mais adequado. Além disso, houve também um ajuste manual de profundidades que considerou a diferença média entre os dados das duas batimetrias. Após esse processo, a comparação entre as superfícies TIN e raster foi registrada na figura 28.

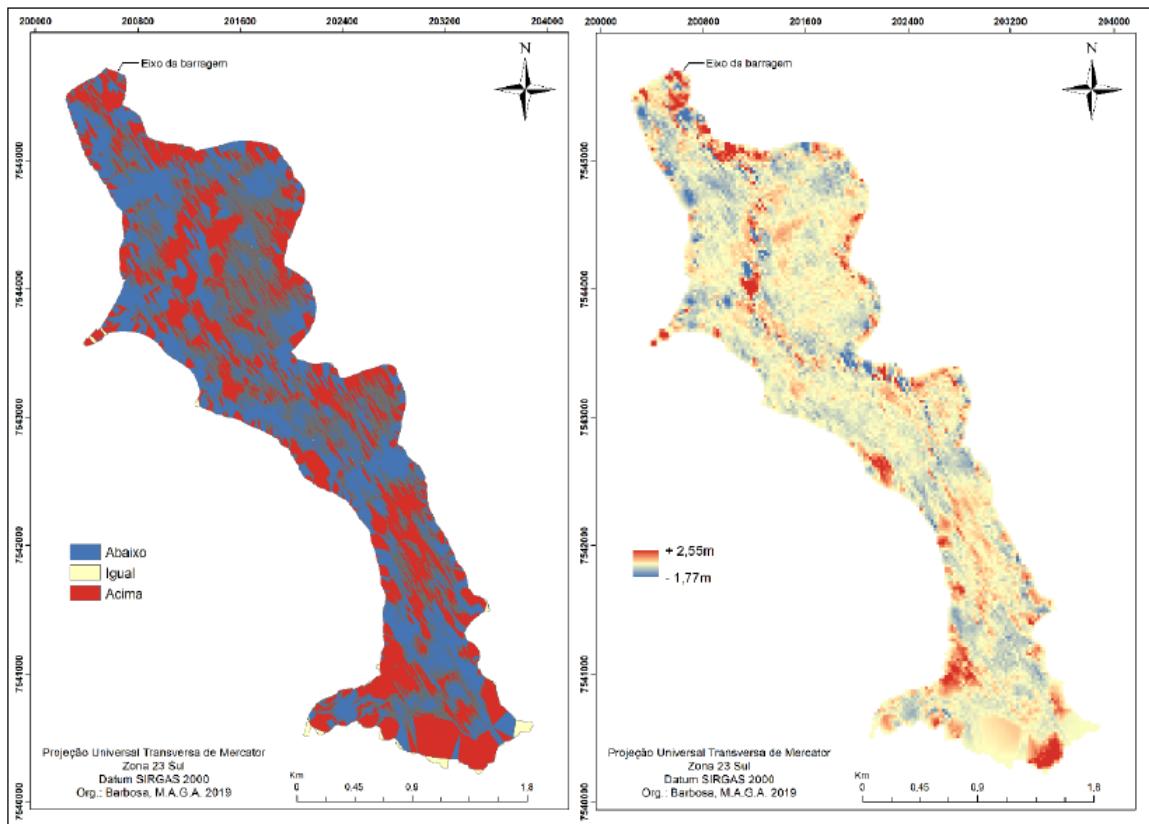


Figura 28 – Comparação entre as superfícies TIN (esquerda) e raster (direita) da batimetria de 2018 em relação a de 2010, após as correções. Fonte: ([BARBOSA, 2019](#)).

A comparação do TIN apresenta uma coloração discreta, que pode passar a impressão de que houve muitas alterações no leito do reservatório, pois praticamente toda a superfície atualizada foi representada como estando acima ou abaixo em relação à batimetria anterior. Porém, a comparação do raster, que é expressa por meio de gradientes de cor, indica que as alterações no leito do reservatório foram bem sutis, sendo acentuadas apenas em alguns pontos específicos. Esse indicativo aponta que ambas as batimetrias apresentaram um nível de precisão semelhante que valida a comparação entre elas, além de sinalizar que a taxa de assoreamento no reservatório, ao longo desses oito anos, foi baixa.

5.2 Análise das curvas CAV e seus impactos no cálculo do volume total do reservatório

Após a geração dos MDEs, foi possível obter a relação cota x área x volume para cada uma das quatro batimetrias. A partir dos valores presentes nessa relação, foram traçadas as curvas cota x área e cota x volume, presentes nas figuras 29 e 30, respectivamente. A fim de padronizar a análise, estabeleceu-se uma cota máxima de 703,06 metros, pois esse é o valor correspondente ao nível d'água no dia em que foram feitas as imagens de satélite que serviram de base para o levantamento de contorno do reservatório ([MATOS, 2012](#)).

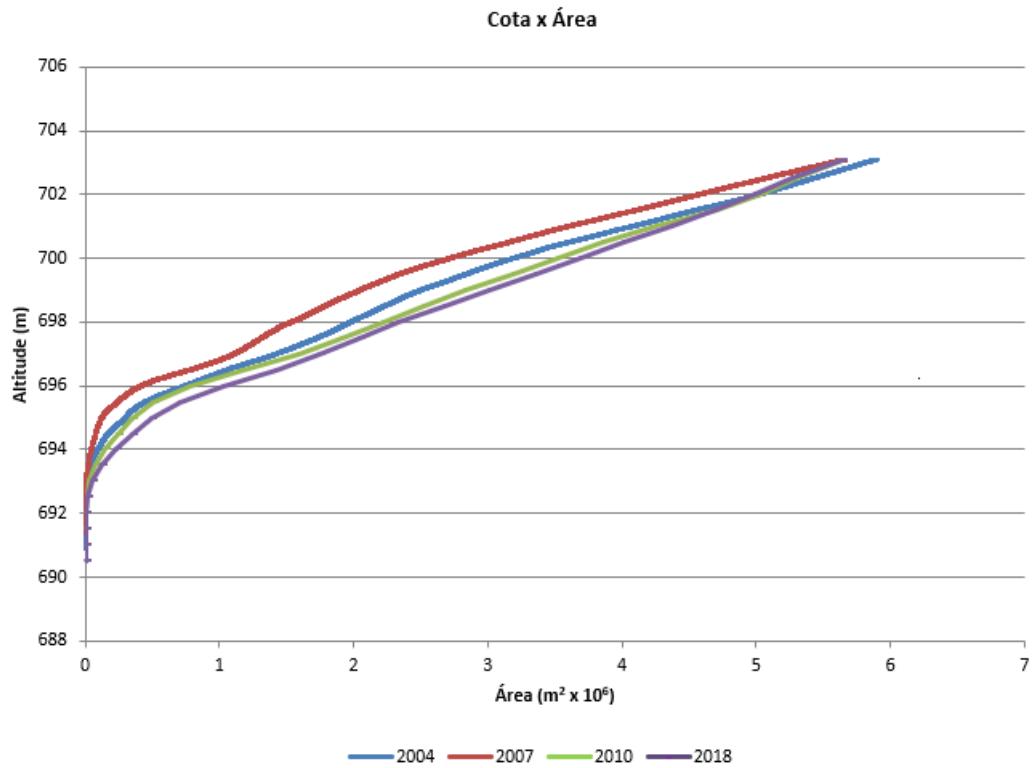


Figura 29 – Curvas Cota x Área das quatro batimetrias analisadas. Fonte: O autor.

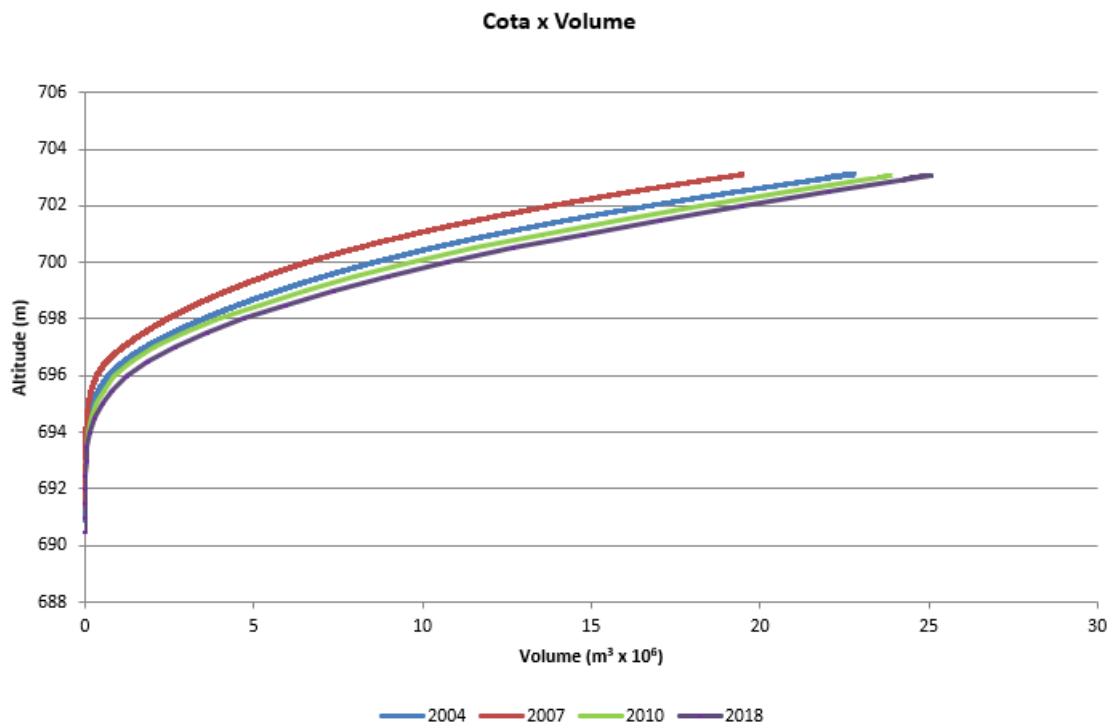


Figura 30 – Curvas Cota x Volume das quatro batimetrias analisadas. Fonte: O autor.

Ao analisar a curva cota x área das quatro batimetrias, observa-se que a área total (para a cota máxima de 703,06) de 2010 e de 2018 coincidem no valor de 5,63 km². Isso

acontece pois ambas as batimetrias utilizaram o mesmo contorno para o reservatório, obtido por meio de imagens de satélite. A curva que representa a batimetria de 2007, por mais que destoe das demais em diversas cotas, atinge o valor de $5,61 \text{ km}^2$ na cota máxima, um valor muito próximo do que foi constatado nas duas batimetrias mais recentes. Já a batimetria de 2004 apresenta uma área total maior, de $5,85 \text{ km}^2$.

Sobre as curvas cota x volume, a discrepância dos dados de 2007 em relação aos outros anos fica ainda mais evidente ao apresentar um volume anormalmente baixo. As demais curvas são bem semelhantes entre si, porém a de 2004 apresenta um volume um pouco menor do que as outras, por conta, principalmente do efeito de borda observado durante a interpolação dos dados, causado pela adoção de um espaçamento longo entre as seções batimétricas.

Em uma primeira análise, a curva cota x volume de 2018 ficou ligeiramente abaixo da de 2010, apresentando, assim, um volume maior do que o calculado na batimetria anterior. Entretanto, conforme já explicado, os dados de 2018 passaram por alguns ajustes que resultaram na geração de uma nova curva cota x área x volume que, desta vez, manteve-se mais fiel à curva de 2010, conforme mostra a figura 31.

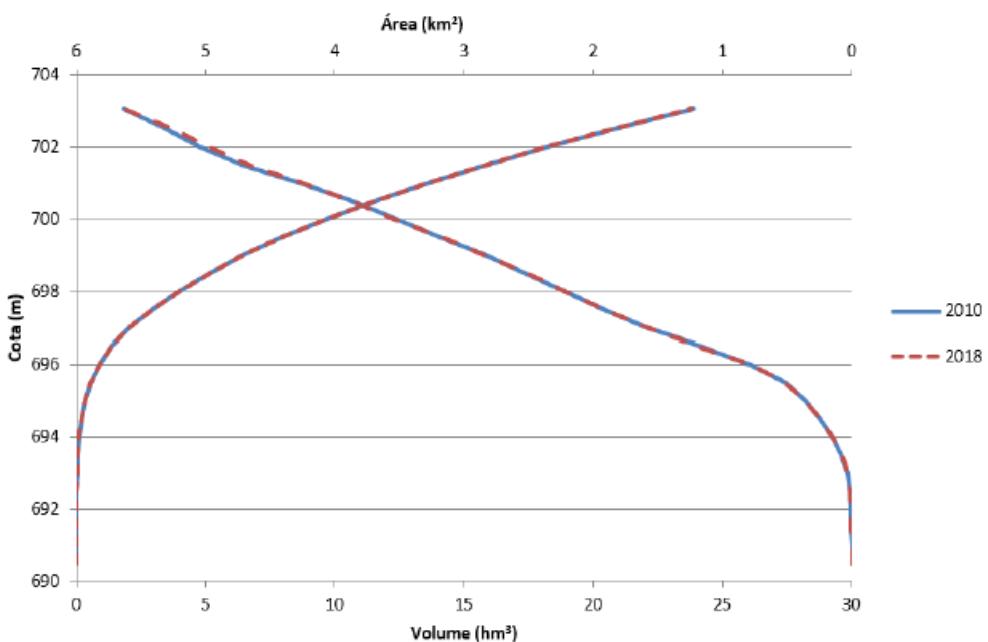


Figura 31 – Comparação entre as curvas CAV de 2010 e de 2018 após os ajustes. Fonte: ([BARBOSA, 2019](#))

Considerando a cota máxima como sendo de 703,06, a batimetria de 2004 resultou em um volume total do reservatório de aproximadamente $22,5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Já em 2007, o volume encontrado foi de apenas $19,2 \times 10^6 \text{ m}^3$, o que indicaria um assoreamento de 15% do volume total em apenas 3 anos. Caso essa taxa fosse mesmo real, o reservatório do Lobo, que foi construído em 1936, já teria sido completamente assoreado.

Pode-se, portanto, considerar que, de todas as quatro batimetrias analisadas, a de 2007 foi a que pior representou a topologia real do leito do reservatório do Lobo. Tanto o MDE quanto a curva CAV apresentaram erros grosseiros e isso se deve, principalmente, a adoção de um método de obtenção de linhas topobatimétricas em zigue-zague, contrariando as recomendações de Eakin ([EAKIN, 1939](#)) e de Carvalho *et al.* ([CARVALHO et al., 2000](#)), que argumentam que as seções transversais devem ser paralelas entre si.

A batimetria de 2010 chegou a um volume total igual a $24,3 \times 10^6 m^3$, que é considerado o valor mais próximo do real, uma vez que a batimetria foi realizada com um espaçamento de apenas 10 metros entre as seções.

Além disso, Matos ([MATOS, 2012](#)) fez uma análise do quanto a alteração no espaçamento entre as seções impacta no volume total calculado. No caso da cota 703, foi observada uma variação de 14,62% entre o volume calculado a partir do espaçamento de 300 metros (o mesmo utilizado em 2004), utilizando o método TIN tradicional, em relação ao volume calculado a partir do espaçamento de 10 metros. Ao fazer a mesma análise, mas desta vez utilizando o método IMP, essa diferença cai para 6,75%.

Considerando essas taxas de variação, pode-se estimar que a batimetria de 2010 encontrou o valor de $20,74 \times 10^6 m^3$, adotando um espaçamento de 300 metros e utilizando o método TIN tradicional. Considerando o método IMP, o valor encontrado seria aproximadamente de $22,65 \times 10^6 m^3$.

A batimetria de 2004, que apresentou um valor de $22,5 \times 10^6 m^3$, chegou a um valor bem próximo ao estimado em 2010 para um espaçamento semelhante (300 metros) e considerando o método IMP, mesmo sem ter utilizado esse método. Apesar de ter adotado o método TIN tradicional, essa batimetria teve o mérito de retratar de forma mais detalhada as regiões mais profundas do reservatório, por conta da presença de uma seção central, perpendicular às outras, que cruzou todo o corpo reservatório.

Por último, a batimetria de 2018 aponta, inicialmente, um volume total calculado de $25,1 \times 10^6 m^3$. Após os ajustes citados anteriormente, chegou-se ao valor final de $23,8 \times 10^6 m^3$. Esse número foi comparado com o volume total obtido em 2010, considerando um espaçamento de 100 metros entre as seções, a fim de que a comparação fosse mais precisa, e chegou-se à conclusão de que houve, no reservatório do Lobo durante esse período de oito anos, um assoreamento de apenas 0,4%, que é considerada uma taxa pouco significativa.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho se propôs a reunir informações a respeito dos levantamentos batimétricos realizados no Reservatório do Lobo e analisá-las, a fim de que fossem discutidas as causas de algumas inconsistências apresentadas nos resultados. Foram estudadas as batimetrias realizadas nos anos de 2004, 2007, 2010 e 2018. Para cada um dos casos, foram expostas as suas respectivas metodologias, abrangendo os equipamentos utilizados, a forma com que o posicionamento das linhas topobatimétricas foi planejado, bem como a coleta e o processamento dos dados, que resultaram na geração de modelos digitais de elevação (MDEs) e também de curvas cota x área x volume, a partir das quais foi possível calcular o volume total do reservatório.

Constatou-se que, com o passar dos anos, todas as etapas desse processo sofreram alterações graças à introdução do uso de novas tecnologias. Quanto aos equipamentos, apesar de todas as batimetrias terem utilizado o mesmo ecobatímetro, houve um avanço quanto ao Sistema de Navegação Global por Satélite, pois em 2018 foi utilizado um DGPS com desempenho RTK. Outro avanço observado foi a tendência de realizar batimetrias com um espaçamento menor entre as seções. Além disso, o processamento de dados por meio de softwares, também avançou bastante, especialmente quanto aos métodos de interpolação de dados.

A batimetria de 2004 adotou seções transversais paralelas com um espaçamento de cerca de 300 metros e também contou com a presença de uma seção central, que cruzava por todas as demais e contribuiu para que as regiões mais profundas do reservatório pudessem ser retratadas com um maior detalhamento. Com os dados dessa batimetria, gerou-se um MDE que sofreu bastante com o efeito de borda, devido ao longo espaçamento entre as seções. O volume total calculado foi de $22,5 \times 10^6 m^3$, resultado que foi considerado relativamente satisfatório, considerando um espaçamento de 300 metros entre as seções.

A batimetria de 2007 foi a que apresentou os erros mais grosseiros, tanto no MDE, quanto na relação CAV. Por conta da adoção de um método de posicionamento das linhas topobatimétricas em zigue-zague, o que contraria as recomendações da literatura especializada, essa batimetria apresentou os resultados que pior representaram a topografia real do leito do Reservatório do Lobo, indicando um volume total calculado de apenas $19,2 \times 10^6 m^3$.

A batimetria de 2010 foi a que apresentou resultados mais precisos devido à adoção de um espaçamento de apenas 10 metros entre as seções, que resultou em um volume total de $24,3 \times 10^6 m^3$. Além disso, aplicou-se o método de interpolação IMP, que reduziu significativamente o efeito de borda nos modelos digitais de elevação. Esse levantamento

batimétrico também se propôs a mostrar o impacto que a alteração no espaçamento entre as seções tem no cálculo do volume total do reservatório.

Por fim, a batimetria de 2018 teve um cuidado especial de promover as melhores condições para que seus resultados pudessem ser comparados com os de 2010. Foi adotado um espaçamento de 100 metros entre as seções, e ao comparar com a batimetria anterior, considerou-se o mesmo espaçamento, de forma que quase todas as seções das duas campanhas fossem coincidentes uma com a outra. Após alguns ajustes, essa batimetria apresentou um volume total de $23,8 \times 10^6 m^3$, o que indicou que houve um assoreamento de apenas 0,4% ao longo de um período de oito anos.

Como foi constatada, no reservatório do Lobo, uma taxa de assoreamento muito baixa, é necessário que, para as próximas batimetrias, seja adotada uma metodologia que preze pelo detalhamento da representação da topografia do leito, pois a margem de erro gerada por uma batimetria pouco detalhada pode ser maior do que a própria taxa de assoreamento. Como foi exposto neste trabalho, o detalhamento na representação depende, principalmente, da adoção de um curto espaçamento entre as seções, além de ser necessário promover uma padronização de métodos, que crie as melhores condições para a comparação coerente entre duas batimetrias.

REFERÊNCIAS

- ABRAPCH. Associação Brasileira de PCHs e CGHs, **O que são PCHs e CGHs**. 2014. Acesso em 13 out 2020. Disponível em: <<https://abrapch.org.br/2014/03/17/o-que-sao-pchs-e-cghs/>>.
- _____. Associação Brasileira de PCHs e CGHs, **O que são PCHs e CGHs**. 2020. Acesso em 13 out 2020. Disponível em: <<https://abrapch.org.br/o-setor/o-que-sao-pchs-e-cghs/>>.
- ALESP. **Decreto N. 20.960**. São Paulo: Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, 1983. Declara área de proteção ambiental regiões situadas em diversos municípios, dentre os quais Corumbataí, Botucatu e Tejupá.
- ALMEIDA, S. B.; CARVALHO, N. O. **Efeitos do assoreamento de reservatório na geração de energia elétrica: Análise da UHE Mascarenhas**. Gramado, RS: X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos., 1993.
- ANA. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica, **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume**. Brasília: Agência Nacional das Águas, 2013.
- ANA; ANEEL. **Resolução Conjunta Nº 03**. Brasília: Agência Nacional das Águas; Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010.
- ANDREAZZI, M. A. R. **Impactos de Hidrelétricas para a Saúde na Amazônia**. Rio de Janeiro: Ed. Universidade de Estado do Rio de Janeiro - Instituto de Medicina Social (Série Estudos em Saúde Coletiva, 78, 1993.
- ANEEL. **Resolução autorizativa Nº 6.742**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017.
- _____. **Despacho de Mero Expediente nº 50/2018-SCG/ANEEL**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2018.
- BARBOSA, M. A. G. A. **Avaliação do assoreamento do reservatório do Lobo - Itirapina-SP: Comparação entre os levantamentos batimétricos de 2010 e 2018**. 2019. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.
- BRUK, S. **Methods of computing sedimentation in lakes and reservoir**. Paris: UNESCO, 1985. IHP - II Project A.2.6.1.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: CPRM, Eletrobrás, 1994.
- _____. **Hidrossedimentologia Prática, 2ª edição**. Rio de Janeiro: Editora Interciênciac, 2008.
- CARVALHO, N. O.; JUNIOR, N. P. F.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: CPRM, Eletrobrás, 2000.

COIADO, E. M. Assoreamento de reservatórios. In: _____. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

CRHEA. Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais, **Vista aérea do reservatório do Lobo**. 2020. Acesso em 06 out 2020. Disponível em: <<http://nh.eesc.usp.br/>>.

EAKIN, H. M. **Silting of Reservoirs**. Washington, D.C.: Technical Bulletin Nº 524. United States Departament of Agriculture. Revised by Brown, C. B. Washington, D.C. U. S. Government Printing Office, 1939.

ESTIGONI, M. V.; MATOS, A. J. S.; MAUAD, F. F. **Assessment of the accuracy of different standart methods for determining reservoir capacity and sedimentation**. São Carlos: Journal of Soils and Sediments, 2014.

ESTIGONI, M. V.; MATOS, A. J. S.; PIOLTINE, V.; ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F. **Comparação de Diferentes Batimetrias do Reservatório da Usina Hidroelétrica do Lobo**. Campo Grande: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos., 2009.

FERRARI, R. L. **Reconnaissance Techniques for Reservoir Surveyes**. Denver, Colorado, USA: U. S. Departament of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, 2006.

FILHO, C. R. R. C.; ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F.; SIMIONATO, J. L. A.; MANGILE, F. **Levantamento Batimétrico de um Grande Reservatório formado por barragem utilizando a sonda Acoustic Doppler Profiler - ADP**. João Pessoa: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos., 2005.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: _____. **Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos**. Rio de Janeiro: Ed. Afiliada, 1994.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. **Manual on hydrography**. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 2011.

LIMA, J. E. F. W.; SANTOS, P. M. C.; CARVALHO, N. O.; SILVA, E. M. **Fluxo De Sedimentos Em Suspensão Na Bacia Araguaia-Tocantins**. Curitiba: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos., 2003.

MAB. Movimento dos atingidos por barragens, **Quem somos**. 2020. Acesso em 22 out 2020. Disponível em: <<https://mab.org.br/quem-somos/>>.

MAHMOOD, K. **Reservoir sedimentation – impact, extent and mitigation**. Washington, D.C: World Bank Tech. Paper No. 71, 1987.

MATOS, A. J. S. **Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional "CAV-NH"**. 2012. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MATSUMURA-TUNDISI, J. G. T. C. E. M. B. T. **Limnology in Brazil**. Rio de Janeiro: ABC/SBL, 1995.

- MIRANDA, R. B. **A influência do assoreamento na geração de energia hidrelétrica: Estudo de caso na Usina Hidrelétrica de Três Irmãos - SP.** 2011. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use.** New York: McGraw-Hill, 1997.
- PAIVA, J. M. O. **Sedimentação de reservatórios de barragens.** 1993. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- PAULA, G. P. D. **Proposta de melhoria do esquema de proteção de um sistema elétrico de potência: estudo de caso da PCH Usina Lobo.** 2020 — escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.
- PEREIRA, J. P. F. A. **Caracterização morfométrica da bacia do reservatório do Lobo (Broa) Itirapina/Brotas - SP e análise temporal dos usos da terra em sua área.** 2013 — Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- PIMENTEL, V. C. R. **Alternativas de solução para os impactos físicos de barragens.** 2004. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- SALOMÃO, F. X. T. Erosão e a ocupação rural e urbana. In: _____. **Curso de Geologia Aplicada a Problemas Ambientais.** São Paulo: AGAMA-DIGEM, 1991.
- SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. C. **Hidrometria Aplicada.** Curitiba: LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001.
- SIGRH. Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo, **Comitê da Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré - Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo nº 13.** 2020. Acesso em 01 fev 2020. Disponível em: <[<http://www.sigrh.sp.gov.br/cbhtj/apresentacao>](http://www.sigrh.sp.gov.br/cbhtj/apresentacao)>.>
- STERNBERG, R. **Damming the River: a changing perspective on altering nature.** New Jersey: Journal of Renewable and Sustainable Energy Review, 2006.
- STRIXINO, G. B. M. A. **Sobre a Ecologia dos Macroinvertebrados do fundo, na Represa do Lobo.** 1973. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1973.
- UNESCO. Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura, **Monuments of Nubia-International Campaign to Save the Monuments of Nubia.** 2020. Acesso em 22 out 2020. Disponível em: <<https://whc.unesco.org/en/activities/172/>>.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Hydrographic Surveying.** Washington, D.C: Engineer Manual 1110-2-100, 2013.

**WCD. Dams and Development - A New Framework for Decision-Making -
The Report of the Commission on Dams.** USA: Thematic Reviews II. Dams and
Global Change, Parts II and III, 2000.