



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PEDRO VITTOR OLIVEIRA CAVALCANTE

**ANÁLISE DA GEOMETRIA DE PEQUENOS E MÉDIOS RESERVATÓRIOS COM
USO DO PE3D**

Recife

2020

PEDRO VITTOR OLIVEIRA CAVALCANTE

**ANÁLISE DA GEOMETRIA DE PEQUENOS E MÉDIOS RESERVATÓRIOS COM
USO DO PE3D**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para a obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia Civil

Área de concentração: Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.

Recife

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

C376a	<p>Cavalcante, Pedro Vittor Oliveira</p> <p>Análise da geometria de pequenos e médios reservatórios com uso do PE3D / Pedro Vittor Oliveira Cavalcante. - 2020.</p> <p>36 folhas, il., gráfs., tabs.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.</p> <p>TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2020.</p> <p>Inclui Referências.</p> <p>1. Engenharia civil. 2. Sensoriamento remoto. 3. Modelo Digital do Terreno. 4. Curvas cota-área-volume. I. Ribeiro Neto, Alfredo (Orientador). II. Título.</p> <p>624 CDD (22. ed.)</p>	<p>UFPE</p> <p>BCTG/2020-159</p>
-------	---	----------------------------------

PEDRO VITTOR OLIVEIRA CAVALCANTE

**ANÁLISE DA GEOMETRIA DE PEQUENOS E MEDIOS RESERVATÓRIOS COM
USO DO PE3D**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para a obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia Civil

Aprovada em: 21 / 05 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Examinadora Interna)

Universidade Federal de Pernambuco

Eng. Me. José Ráurium Bacalhau (Examinador Externo)

Agência Pernambucana de Águas e Clima

Dedico esse trabalho aos meus pais que sempre acreditaram e me apoiaram em todos os momentos dessa extensa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Arnaldo Cavalcante e Valéria Oliveira; e ao meu irmão, João Cavalcante, pelo amor, sacrifícios e ensinamentos e por me apoiarem em todas as minhas escolhas de vida.

À Wendy Alves, meu grande amor, por todos os ensinamentos e conselhos durante esses 3 anos juntos, por me apoiar incondicionalmente em todas as minhas loucuras e proporcionar inúmeros momentos de felicidade.

Ao meu orientador, professor Alfredo Ribeiro, por todos os ensinamentos desde a Pesquisa do PIBIC, juntamente com o professor Pedro Henrique, por toda a paciência e oportunidade para a realização deste trabalho de conclusão de curso.

A todos os meus amigos de vida, em especial Renato Lopes, Jonatas Pimentel e Matheus Lima, por me ajudarem me aconselhando, me dando suporte nos piores momentos e celebrando nos melhores.

Aos meus amigos de João Pessoa, Caio Hollanda e Rodrigo Farias, que chegaram há tão pouco tempo, mas mesmo assim já ocupam um lugar único ao meu lado.

Aos meus amigos da faculdade, André Felipe, Marllon Oliveira, Leandro Santiago, Dyego Farias, Katarina Lira e Helson Ribeiro, que aguentaram fortemente ao meu lado nessa árdua caminhada de formação em Engenharia Civil, sem vocês a UFPE não seria a mesma.

A grande família do DNOCS, nas pessoas de Marcos George, Marco Hachem, Dona Graça, Wellington Gualberto e tantos outros, que permitiram a minha primeira experiência profissional me acolhendo com tanto carinho.

Ao meu amigo Anátoli Pinho, por toda ajuda e força para realização e finalização do Trabalho de Conclusão de Curso.

Para o Engenheiro Civil e primo, Tiago Oliveira, que sempre me auxiliou com vários conselhos e explicações na área da engenharia.

Agradeço também à Agência Pernambucana de Águas e Clima e ao Projeto Pernambuco Tridimensional por disponibilizarem os dados que embasaram fortemente esse Trabalho de Conclusão de Curso.

A todos os meus familiares que me deram conselhos e auxílio nessa caminhada da vida.

E a todas as pessoas que passaram na minha vida e contribuíram para a minha formação acadêmica e para o ser humano que sou hoje em dia, muito obrigado.

Stay hungry. Stay foolish. Never let go of your appetite to go after new ideas, new experiences and new adventures (STEVE JOBS, 2005).

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação de produtos de sensoriamento remoto do tipo LiDAR cujas imagens são obtidas a partir do levantamento aéreo com câmeras digitais de alta resolução espacial e perfilamento de relevo a laser. Foram utilizadas as ortofotos e o Modelo Digital do Terreno (MDT) fornecido pelo Projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D) para processamento e obtenção das variáveis necessárias para elaboração das curvas cota-área-volume dos reservatórios selecionados. Também foram utilizados os dados de monitoramento fornecidos pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), os quais foram obtidos pelos métodos tradicionais de batimetria. Foram analisados 18 reservatórios os quais apresentaram uma diferença total no valor de -8,25% entre o valor encontrado com a análise do MDT e a ficha cadastral da APAC. Essa diferença indica a perda de volume pelo processo de assoreamento natural, contudo também aponta a um questionamento em relação à qualidade dos resultados obtidos *in loco* na época de construção dos reservatórios. Além disso, as funções $V=f(H)$ e $V=f(A)$ foram calculadas através dos MDT gerados a fim de estimar os volumes dos reservatórios fora do campo amostral estudado.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Modelo Digital do Terreno. Curvas cota-área-volume.

ABSTRACT

This work presents the application of LiDAR remote sensing products whose images are obtained from aerial surveying with digital cameras of high spatial resolution and laser profiling. The orthophotos and the Digital Terrain Model (DTM) provided by the Pernambuco Three-Dimensional Project (PE3D) were used to process and obtain the necessary variables for the elaboration of the water level-area-volume curves of the selected reservoirs. We also used the monitoring data provided by the Pernambuco Water and Climate Agency (APAC), which were obtained by traditional methods of bathymetry. Eighteen reservoirs were analyzed, they presented a total difference in the value of -8,25% between the value found in DTM analyses and registration from APAC. This difference indicates the loss of volume by natural silting process, however also points to a questioning regarding the result's quality from local measurement of construction data of these reservoirs. In addition, the functions $V=f(H)$ and $V=f(A)$ were calculated using DTM generate to estimate reservoirs volume outside the studied field.

Keywords: Laser profiling. Digital Terrain Model. Water level-area-volume curves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Correlação de geometria simples.	17
Figura 2 – Estrutura do açude cônico.	17
Figura 3 – Localização dos treze reservatórios do objeto de estudo.	19
Figura 4 – Exemplo do produto de mapeamento do PE3D: (a) Ortoimagem; (b) Modelo Digital do Terreno.	21
Figura 5 – Quadriculas do PE3D referente a barragem de Gurjão.	22
Figura 6 – Ortoimagem do reservatório de Gurjão praticamente seco.	22
Figura 7 – Identificação da barragem de Gurjão no MDT.	23
Figura 8 – Curvas de nível da barragem de Gurjão.	24
Figura 9 – Bacia hidráulica delimitada para o reservatório de Gurjão.	25
Figura 10 – Comparativo reservatório praticamente seco (a) e seco (b).	28
Figura 11 – Comparativo da relação profundidade x volume dos dados da Ficha da APAC e MDT para o reservatório de Juá.	29
Figura 12 – Relação profundidade x volume e curva ajustada para o reservatório de Juá.	30
Figura 13 – Relação Área x Volume e curva ajustada para o reservatório de Juá.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos reservatórios do objeto de estudo.	20
Tabela 2 – Características dos reservatórios da bacia hidrográfica do Pajeú.	20
Tabela 3 – Variação da Capacidade Máxima dos reservatórios.	27
Tabela 4 – Coeficientes da relação entre profundidade x volume dos reservatórios.	30
Tabela 5 – Comparativo da relação profundidade x volume com o estudo de Nascimento (2017).	31
Tabela 6 – Coeficientes da relação entre a área e volume dos reservatórios.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APAC	Agencia Pernambucana de Águas e Clima
CM	Capacidade Máxima
MDT	Modelo Digital do Terreno
PE3D	Projeto Pernambuco Tridimensional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	14
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	14
1.3	ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	ESCASSEZ DOS RECURSOS HÍDRICOS	16
2.2	GEOMETRIA DE PEQUENOS AÇUDES	16
2.3	MODELO DIGITAL DO TERRENO.....	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1	ÁREA DE ESTUDO	19
3.2	PROJETO PE3D.....	21
3.3	DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDRÁLICA	21
3.4	ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO	26
3.5	RELAÇÃO ÁREA X VOLUME	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1	CAPACIDADE MÁXIMA DOS RESERVATÓRIOS.....	27
4.2	RELAÇÃO PROFUNDIDADE X VOLUME	29
4.3	RELAÇÃO ÁREA X VOLUME	31
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	34
	REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

A região semiárida do Nordeste Brasileiro é caracterizada por uma reduzida disponibilidade hídrica superficial. Essa condição, segundo Cirilo (2008), pode ser explicada pela variabilidade temporal das chuvas e pelas características geológicas dominantes dessa região, onde predomina o solo raso no topo das rochas cristalinas e consequentemente as baixas trocas de água entre o rio e o solo adjacente. O resultado é a existência de uma densa rede de rios temporários.

Nesse contexto, o atendimento das demandas de água para diversos usos torna-se uma questão de grande complexidade que envolve aspectos sociais e econômicos, logo propor soluções baseadas na gestão adequada dos recursos e no fortalecimento da infraestrutura hídrica se torna essencial. De acordo com Santos et al. (2009), uma alternativa de caráter estrutural que é muito utilizada a fim de mitigar os impactos da variabilidade hidrológica nessa região é a construção de reservatórios para regularização da vazão, que armazenam volumes no período de chuvas para garantir o suprimento nos períodos de estiagem.

Segundo Nascimento e Ribeiro (2017), para que se tenha o valor mais preciso possível a respeito dos volumes armazenados nos reservatórios é necessário obter a relação entre nível de água, área da superfície inundada e volume armazenado (curvas cota-área-volume) atualizados. O volume armazenado em diferentes níveis define a capacidade de regularização do reservatório, enquanto que a área de superfície está relacionada diretamente à perda de água por evaporação. Ambas são variáveis importantes para o dimensionamento e operação dos reservatórios, oferecendo suporte à tomada de decisão, principalmente, em situações de crise por escassez de água.

Entretanto, são poucos os reservatórios para regularização do semiárido que têm uma sistemática contínua de estimativa da batimetria. Na maior parte dos casos, o que se dispõe são as curvas cota-área-volume estimadas à época do projeto do açude, muitas delas das décadas de 1950-1970, levantando dúvidas sobre a consistência dessas informações (COLLISSCHONN e CLARKE, 2016). O nível de precisão para obtenção das curvas originais sugere consideráveis incertezas devido ao uso de tecnologias ultrapassadas e à falta de informação, levando-se em consideração a data de execução dos projetos. Além disso, o processo de assoreamento natural pelo qual ocorre o transporte de certa quantidade de matéria sólida ao longo do rio faz com que essa se deposite no fundo do reservatório, diminuindo, com o decorrer do tempo, sua capacidade de armazenamento.

De acordo com Cirilo et al. (2015), após o período emergencial devido as chuvas severas ocorridas nas bacias hidrográficas dos rios Una, Mundaú, Paraíba e Sirinhaém no

Estado de Pernambuco entre 2010 e 2011, o governo contratou o recobrimento aerofotométrico e a cobertura a laser por meio da tecnologia LiDAR. Nesse primeiro momento, buscou-se mapear as calhas e leitos de inundação dos rios e municípios afetados. A partir desse mapeamento, surgiu a ideia de estendê-lo para todo o território do estado originando o Projeto Pernambuco Tridimensional.

A estimativa das curvas cota-área-volume por meio de sensoriamento remoto pode ser uma fonte alternativa, rápida e de menor custo de informação (ABILEAH, VIGNUDELLI; SCOZZARI, 2011) e já vem sendo empregada com resultados satisfatórios para a região semiárida do Nordeste (TOLEDO et al., 2014; NASCIMENTO E RIBEIRO, 2017) e em outros reservatórios no mundo (ZHANG, 2017; AVISSE et al., 2017), estimando variáveis hidrológicas importantes.

Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo avaliar alternativas para atualização de curvas cota-área-volume de reservatórios através do uso de produtos de sensoriamento remoto de acesso gratuito de modo a permitir a redução dos custos com levantamento topobatimétrico. Foram avaliados 18 reservatórios localizados no semiárido do Estado de Pernambuco, construídos na segunda metade do século XX, e monitorados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

A demanda por novos projetos na área da Engenharia de Recursos Hídricos está mais recorrente e busca satisfazer diversos objetivos. Ademais, atualmente há um notável crescimento no que diz respeito à preocupação com o meio ambiente, principalmente em relação a um dos bens mais preciosos e finito, que é o caso da água.

Desse modo, devido a essa preocupação e ao fato do Brasil, principalmente o Nordeste, enfrentar uma baixa disponibilidade hídrica dada a irregularidade das chuvas e aos baixos índices pluviométricos, é de fundamental importância o correto mapeamento dos recursos hídricos disponíveis (com a devida atualização das curvas cota-área-volume) para um melhor e efetivo gerenciamento, visto que as fichas dos reservatórios podem se encontrar defasadas.

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar alternativas para a atualização das curvas cota-área-volume através do uso de sensoriamento remoto a fim de reduzir os custos e facilitar o levantamento topobatimétrico, sem a necessidade de medição *in loco*.

Como objetivos específicos, pode-se listar:

- a) Elaborar procedimento para obtenção das curvas cota-área-volume com uso do PE3D;
- b) Estabelecer uma relação entre área e volume para estimativa do volume de outros reservatórios a partir da superfície da lâmina de água;
- c) Definir reservatórios com características semelhantes para aplicação da relação área-volume.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

O presente Trabalho de Conclusão de Curso é apresentado em cinco capítulos, conforme explicado abaixo:

No capítulo primeiro, que se finda nesse tópico, apresenta uma introdução sobre o assunto propriamente dito, a justificativa e a motivação que foram tomadas como base para realização desta monografia e seus respectivos objetivos.

No capítulo segundo, serão apresentadas as conceituações referentes a recursos hídricos e sua importância para o planeta, a geometria de açudes e o georreferenciamento.

No capítulo terceiro, apresentará a explicação da metodologia aplicada para obtenção dos resultados.

No capítulo quarto, serão apresentados e discutidos os resultados referentes a essa monografia.

No capítulo quinto, serão feitas as considerações finais pertinentes ao trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referido capítulo irá apresentar a sequência lógica dos conceitos que levaram a realização dessa monografia.

2.1 ESCASSEZ DOS RECURSOS HÍDRICOS

Segundo Souza (2009), cada vez mais está existindo um aumento da escassez de água devido a duas vertentes, a primeira relacionada ao aumento populacional e consequentemente intensificação de atividades que demandam uma quantidade elevada de água pelos setores industriais e agrícolas. E a segunda vertente é a degradação das fontes de água potável.

O Brasil, por se tratar de um país continental em que cada região apresenta situações bastante distintas em questão climática, de forma mais evidenciada pela seca nordestina, o geoprocessamento se torna um dos melhores meios para realizar o levantamento dos corpos hídricos para o melhor aproveitamento da região (CAMARA, DAVIS e MONTEIRO, 2004).

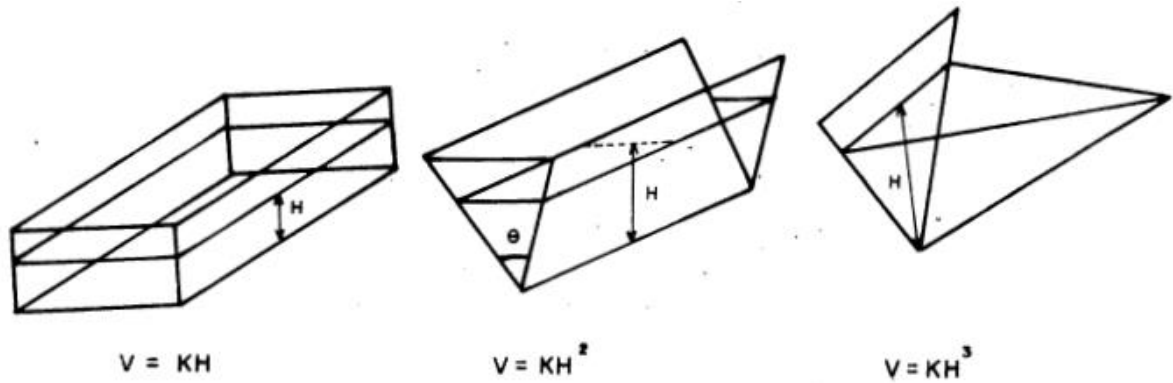
Além disso, a aquisição de dados referentes a cada açude in loco constitui uma solução de alto custo e muito trabalhosa por se tratar de um espaço com vários açudes e reservatórios de pequeno porte, constituindo-se numa tarefa árdua e inviável (SANTOS et al, 2009).

A gestão eficiente da água disponível e do planejamento para cada um dos reservatórios só é possível com dados consistentes e informações precisas, o que nos deixa uma lacuna enorme (LIEBE et al, 2005), visto que a maioria dos reservatórios possuem informações iniciais datadas da época de construção e não antes atualizadas.

2.2 GEOMETRIA DE PEQUENOS AÇUDES

Segundo o estudo de Molle (1994), que envolveu 420 reservatórios de pequeno porte, com volume de até 100.000 m³, estabeleceu diversas correlações a fim de obter o volume estimado do reservatório a partir da sua profundidade. Primeiramente, valeu-se da relação entre a profundidade (H) e a geometria mais simples de volume (Figura 1).

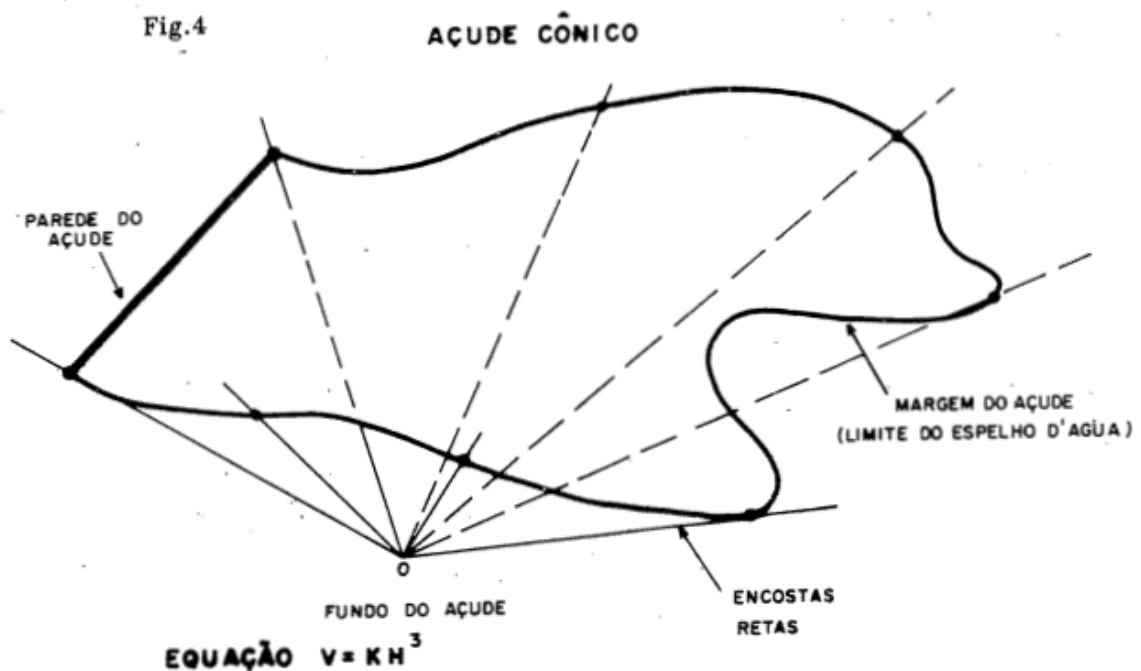
Figura 1 – Correlação de geometria simples



Fonte: Molle (1994).

A partir disso, Molle (1994) estendeu essa correlação para o açude cônico utilizando dois parâmetros “K” e “ α ”. A constante “K” relaciona-se com a abertura do cone, quanto mais aberto e menos inclinado o vale barrado pelo açude, maior será esse coeficiente (Figura 2). Já para o parâmetro “ α ”, que é o expoente da profundidade, seria a concavidade das encostas denominado coeficiente de forma.

Figura 2 – Estrutura do açude cônico



Fonte: Molle (1994).

Dessa forma, foi possível, por meio de trigonometria, adotar uma função potencial que relaciona a profundidade e o volume.

2.3 MODELO DIGITAL DO TERRENO

O Modelo Digital do Terreno (MDT) foi definido por Liporaci et al. (2003) como sendo a representação matemática da realidade geográfica em questão, a qual provém da interpolação de um conjunto finito de pontos de coordenadas em 3 dimensões. Por meio desta, é possível obter informações relacionadas ao volume e à área de uma superfície específica a partir da variação altimétrica do terreno.

O MDT possui várias aplicabilidades em diversas áreas de estudo. Primeiramente, o MDT era realizado a partir de equipamentos clássicos de topografia, ocasionando um alto custo e uma tarefa árdua e lenta. Com o passar do tempo e com os avanços tecnológicos, o MDT se desenvolveu da utilização dos sistemas aerotransportados LiDAR, com boa precisão, rapidez e eficiência para grandes áreas. (POLAT; UYSAL, 2015)

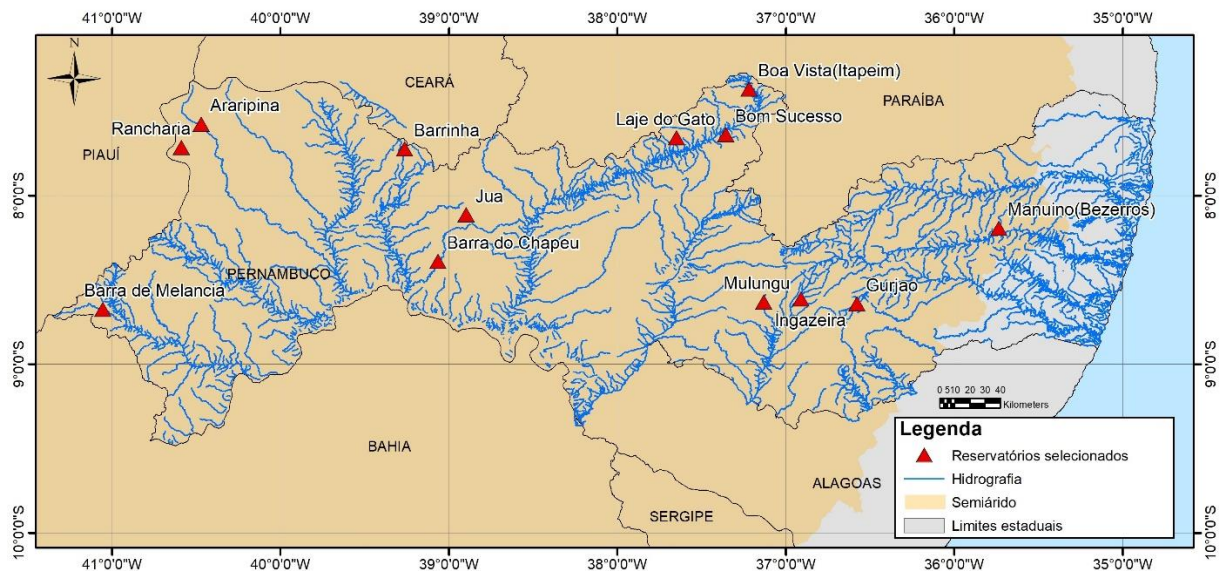
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo se destina a apresentação da área de estudo, uma breve explicação sobre o Projeto PE3D e a metodologia aplicada para obtenção dos valores para área e volume a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT) e dos softwares do ArcGIS e do Excel.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A metodologia foi aplicada a treze reservatórios localizados no Estado de Pernambuco (Figura 3) nos quais a grande maioria é utilizada para abastecimento. Os critérios utilizados para a escolha foram a capacidade máxima de armazenamento não ultrapassando de $5 \times 10^6 \text{ m}^3$, e que no período do perfilamento a laser, a área do reservatório deveria estar completamente seca ou com um volume desprezível, praticamente seca. A Tabela 1 apresenta as informações coletadas da ficha técnica fornecida pela APAC.

Figura 3 - Localização dos treze reservatórios do objeto de estudo



Fonte: O Autor (2020).

Tabela 1 - Características dos reservatórios do objeto de estudo

Reservatório	Capacidade máxima (m³)	Riacho	Bacia Hidrográfica	Tipo de Uso
Araripina	3.702.230	Sohen	Brígida	Abastecimento
B. de Melancia	1.374.000	C. do Roberto	Pontal	Abastecimento
B. do Chapéu	1.600.000	Ouricuri	Terra Nova	Outro Uso
Barrinha	1.959.976	Barrinha	Brígida	Abastecimento
Boa Vista	1.632.187	Belém	Pajeú	Outro Uso
Bom Sucesso	1.743.680	Paus Brancos	Pajeú	Abastecimento
Gurjão	3.847.000	Rio Uma	Una	Outro Uso
Ingazeira	4.800.000	Rio Ipanema	Ipanema	Outro Uso
Jua	3.500.000	Dos Picos	Terra Nova	Irrigação
Laje do Gato	1.102.940	Manicoba	Pajeú	Abastecimento
Manuíno	2.021.000	-	Ipojuca	Abastecimento
Mulungu	1.280.953	Mulungu	Ipanema	Abastecimento
Rancharia	1.042.810	Bom Jardim	Brígida	Abastecimento

Fonte: APAC (2015).

Além dos treze reservatórios citados acima, também foram analisados outros cinco (Tabela 2) a fim de aumentar o espaço amostral e realizar o estudo para os açudes pertencentes à maior bacia hidrográfica do estado de Pernambuco com área de 16.685,63 km² e extensão de aproximadamente 353 km. Eles foram escolhidos a partir do estudo de Nascimento (2017), que analisou de forma abrangente os reservatórios para a bacia do Pajeú e que no período de perfilamento os açudes estivessem secos ou com volume desprezível.

Tabela 2 – Características dos reservatórios da bacia hidrográfica do Pajeú

Reservatório	Capacidade Máxima (m³)	Riacho	Bacia Hidrográfica	Tipo de Uso
Barra do Juá	71.474.000	Do Navio	Pajeú	Outro Uso
Brejinho	282.840	Brejinho	Pajeú	Abastecimento
Chinelo	3.453.800	Da Chinela	Pajeú	Abastecimento
Rosário	34.990.000	Do Cedro	Pajeú	Outro Uso
São José II	7.152.875	Barro Branco	Pajeú	Abastecimento

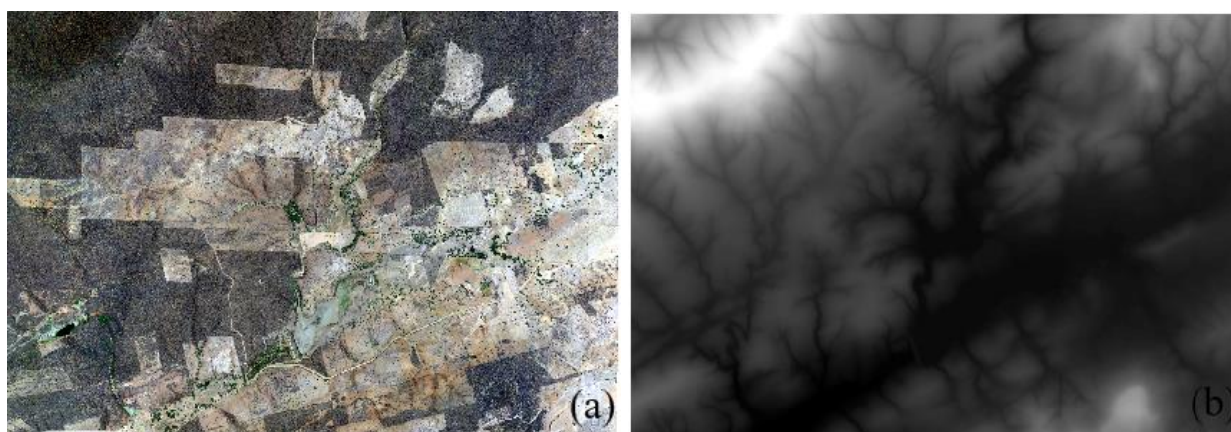
Fonte: APAC (2015).

3.2 PROJETO PE3D

O Pernambuco Tridimensional (PE3D) é um projeto do Governo do Estado de Pernambuco que inclui o recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser. A técnica LiDAR mede o tempo de viagem da energia de um pulso de laser entre um avião, a superfície e de volta ao avião. Quando o pulso atinge a superfície, obstáculos como vegetação, água e construções refletem os feixes e um sensor no avião os captura. Para cada feixe de luz emitido, o tempo de viagem e o ângulo do espelho de varredura correspondente ao momento da emissão do pulso são registrados. A associação desses dados com a altitude e a posição relativa do avião permite determinar as coordenadas tridimensionais dos alvos da superfície (BLAIR; RABINE; HOFTON, 1999).

O banco de dados do PE3D apresenta informações com dois níveis de precisão. O primeiro abrange todo o território de Pernambuco com um recobrimento aerofotogramétrico e geração de ortofotos na escala 1:5.000, perfilamento a laser com precisão altimétrica melhor que 25 centímetros e com a geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT), Modelos Digitais de Elevação (MDE) (Figura 4) e imagens de intensidade hipsométrica. Já para o segundo nível de precisão, abrange apenas uma pequena área de 870 km², distribuídos em 26 municípios com recobrimento fotogramétrico na escala 1:1000, perfilamento a laser com precisão altimétrica melhor que 10cm e geração de MDT, MDE e as imagens hipsométricas.

Figura 4 – Exemplo do produto de mapeamento do PE3D



Fonte: O Autor (2020).

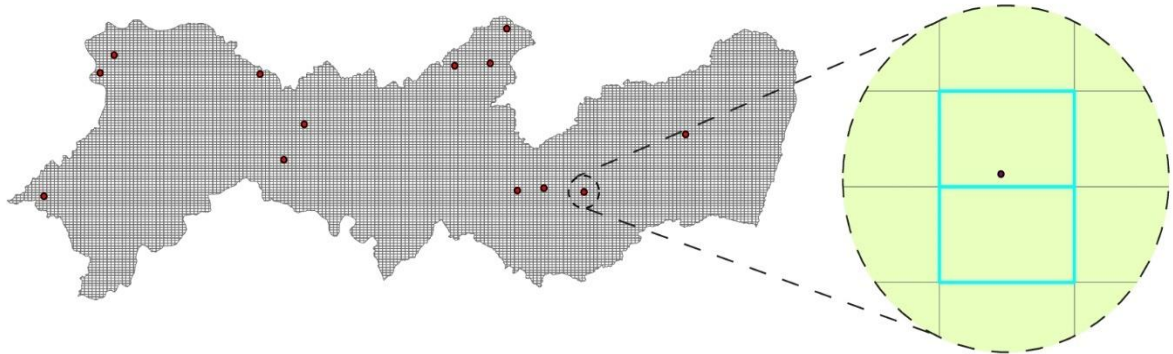
(a) Ortoimagem; (b) Modelo Digital do Terreno.

3.3 DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDRÁLICA

Primeiramente, para a delimitação da bacia hidráulica foi georreferenciado, a partir das coordenadas disponíveis pela APAC, o posicionamento de cada um dos reservatórios na quadrícula do PE3D (Figura 5). Com isso, para cada açude foi obtido o(s) quadrante(s) tanto

da ortoimagem como do Modelo Digital do Terreno.

Figura 5 – Quadriculas do PE3D referente a barragem de Gurjão.



Fonte: O Autor (2020).

A partir do conhecimento da posição da barragem, foram utilizadas duas análises combinadas. A primeira, por meio das ortoimagens, com a análise do contorno da área inundada e da vegetal existente em seu entorno foi delimitada a sua área e observou-se através de um diagnóstico visual se o açude estava seco ou praticamente seco (Figura 6).

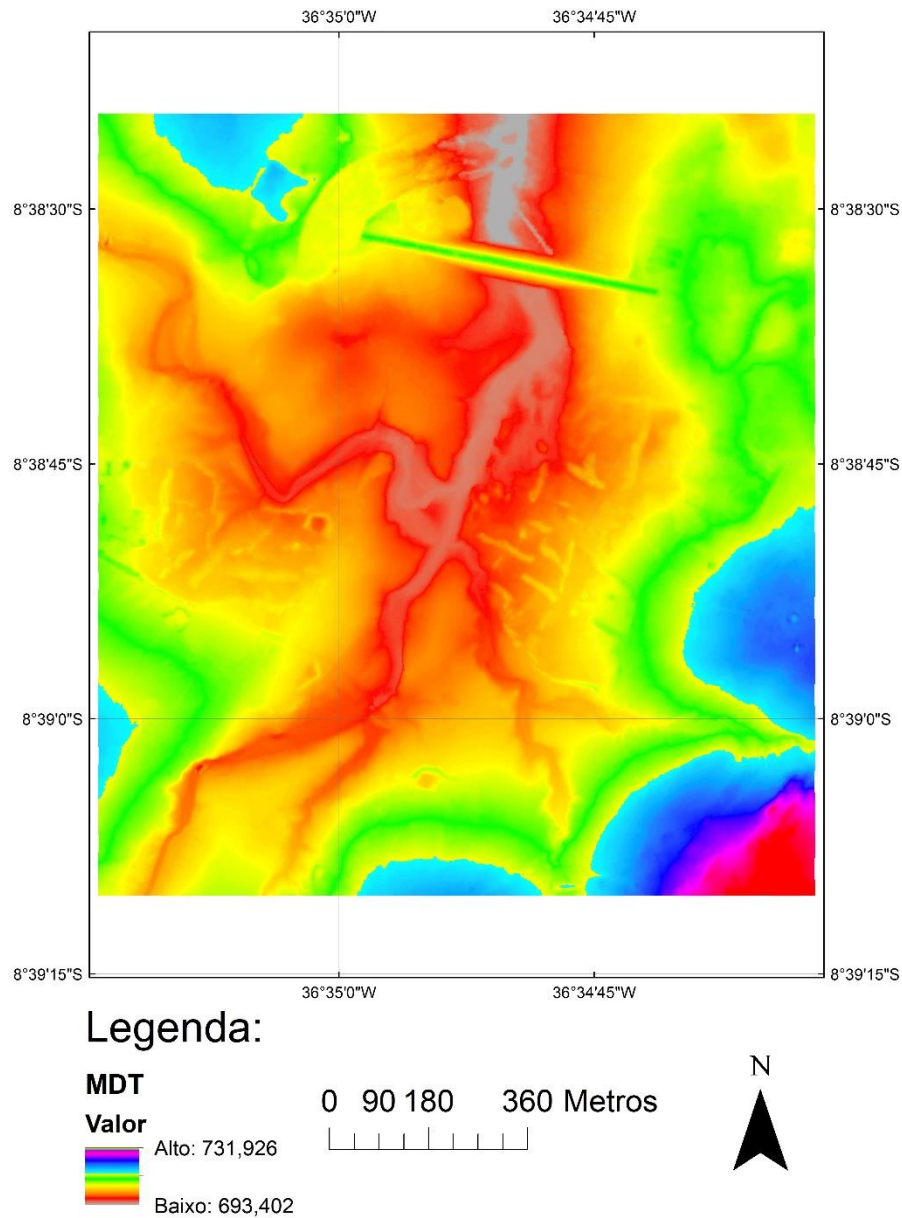
Figura 6 – Ortoimagem do reservatório de Gurjão praticamente seco.



Fonte: O Autor (2020).

Já a segunda, a partir das imagens MDT, onde os pontos na tonalidade vermelha apresentam as cotas de menor valor e os pontos na tonalidade verde a de maior valor, como demonstrado na legenda da imagem. Foi demarcado o ponto da crista da barragem a partir do ponto mais alto, correspondente ao filete verde e do posicionamento da coordenada do reservatório por meio dos dados disponibilizados pela APAC (Figura 7).

Figura 7 – Identificação da barragem de Gurjão no MDT.

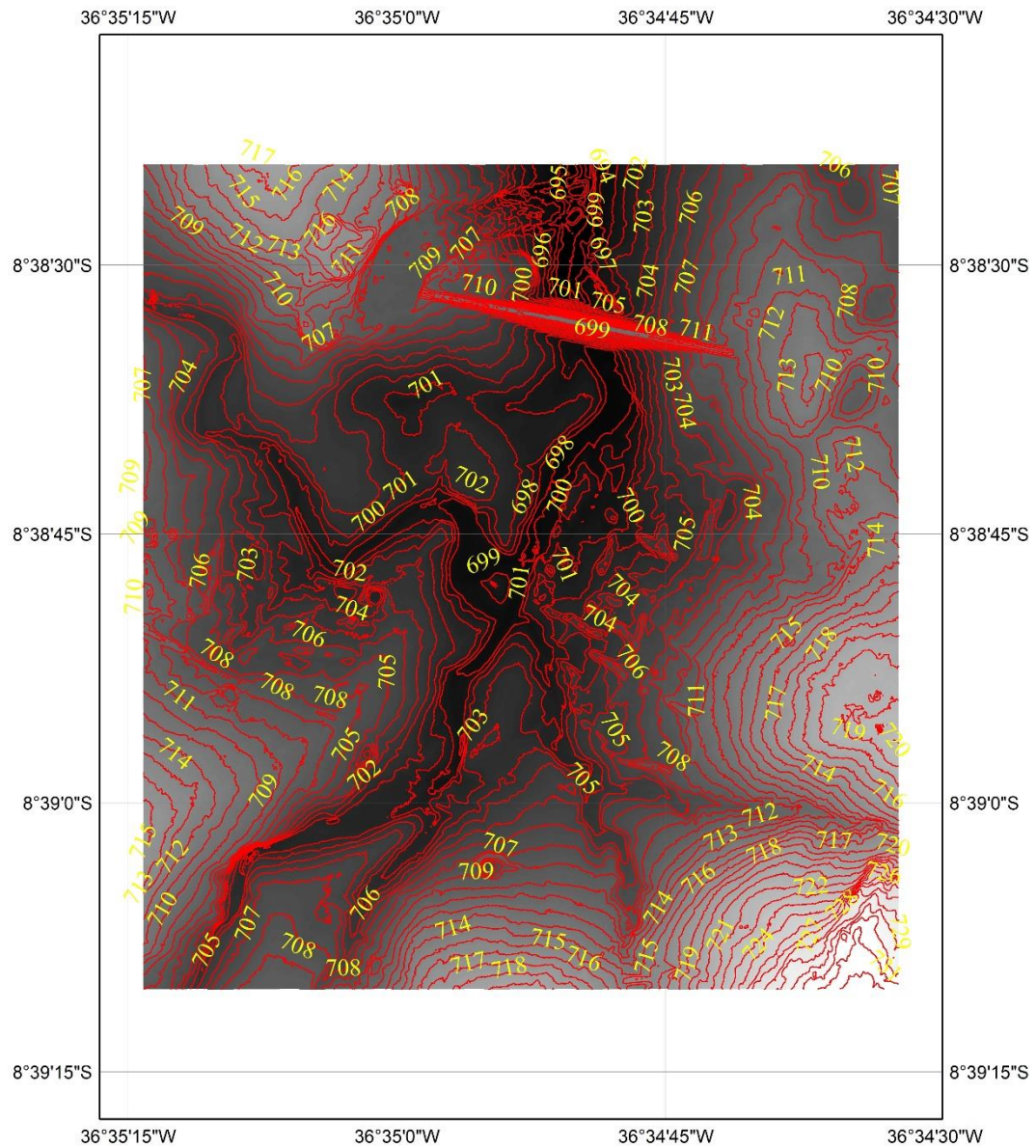


Fonte: O Autor (2020).

Após a demarcação da posição, foi definido o respectivo contorno da bacia a partir da cota máxima da barragem de acordo com as curvas de nível adotando um espaçamento de

1,0m entre elas. É possível observar que na área da barragem há o aumento da declividade de forma acentuada, curvas de nível com distâncias pequenas entre elas (Figura 8), o que corrobora na posição da barragem.

Figura 8 – Curvas de nível da barragem de Gurjão.



Legenda:

— Curvas de Nível

MDT

Valor



Alto: 731,926

Baixo: 693,402

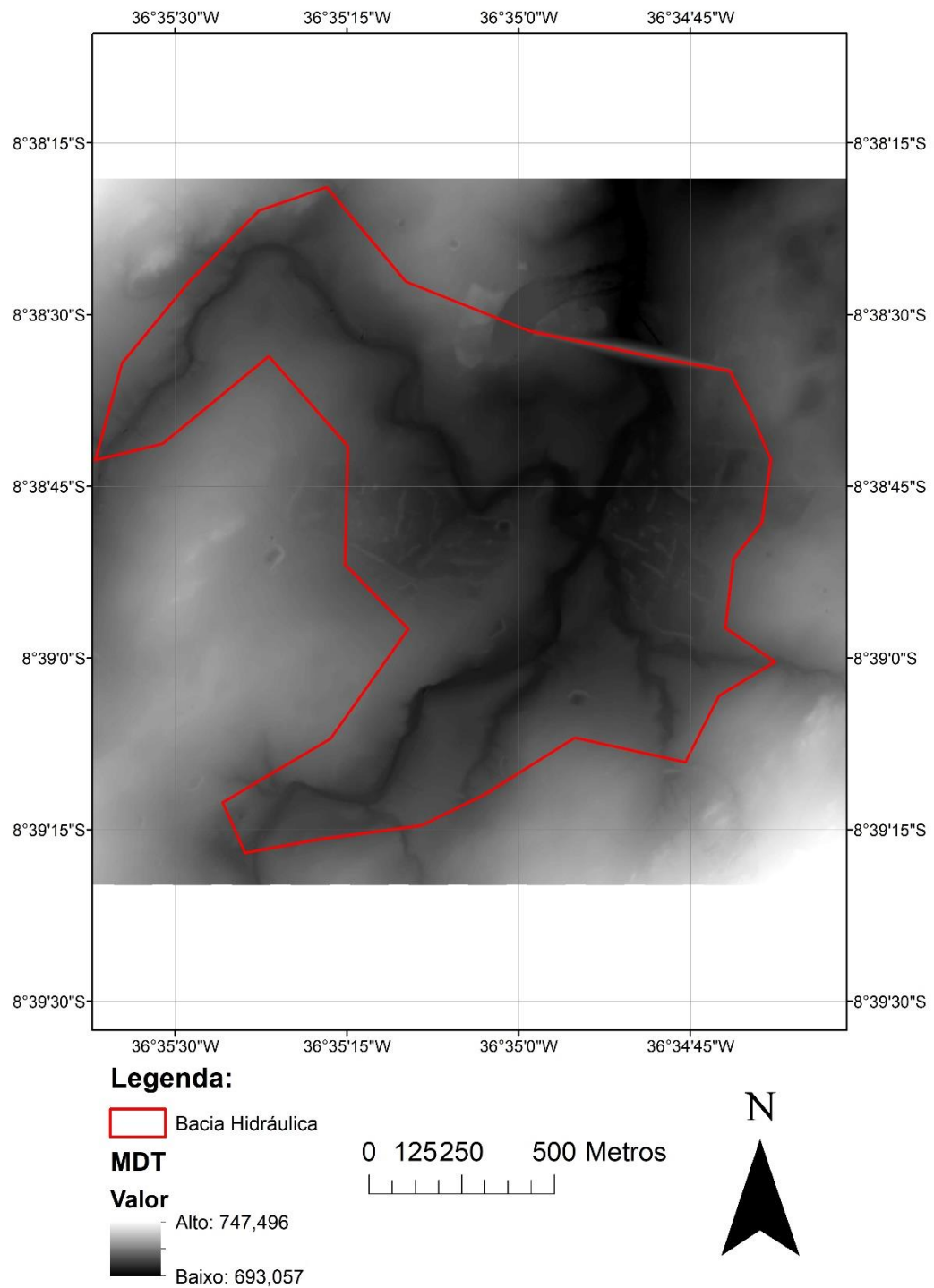
0 100 200 400 Metros



Fonte: O Autor (2020).

Por fim, foi possível estabelecer a vetorização da bacia hidráulica a partir do MDT gerado (Figura 9).

Figura 9 – Bacia hidráulica delimitada para o reservatório de Gurjão.



Fonte: O Autor (2020).

3.4 ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO

Por meio da vetorização da bacia hidráulica, foi possível calcular a área e o volume para o respectivo valor da profundidade de cada um dos reservatórios. Essa profundidade variou do ponto de menor cota para o de maior cota, identificado pela crista da barragem, caracterizando a capacidade máxima do reservatório.

A área foi definida pela superfície do plano e o volume como a área compreendida entre esse mesmo plano e o ponto mais baixo da imagem gerada do MDT para a respectiva profundidade.

Com os dados da capacidade máxima dos reservatórios, foi realizado um comparativo entre a ficha da APAC e do MDT, estabelecendo a respectiva variação (Equação 1).

$$Variação = \frac{CM_{(MDT)} - CM_{(Ficha)}}{CM_{(Ficha)}} \quad (1)$$

Com o cálculo da área e do volume para cada uma das profundidades, foi possível estabelecer relação análoga a de Molle (1994). Por meio do excel, realizou o ajustamento da curva de função $V=f(H)$ com os parâmetros “K” e “α” (Equação 2). Além disso, também foi calculado seu coeficiente de correlação “R²”.

$$V = K.H^{\alpha} \quad (2)$$

3.5 RELAÇÃO ÁREA X VOLUME

De modo análogo ao item 3.6, foi realizado um ajustamento da curva para uma função $V=f(A)$ com a utilização de outros parâmetros “K’” e “β”, para um melhor ajuste da função, foi aplicado o logaritmo na variável “A” (Equação 3). Para esses casos, também foi calculado o seu coeficiente de correlação (R²).

$$V = K'.(\log A)^{\beta} \quad (3)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo busca apresentar os resultados encontrados com o desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso, bem como, discutir sobre os mesmos.

4.1 CAPACIDADE MÁXIMA DOS RESERVATÓRIOS

Com o cálculo do volume indicado no item 3.4 e com a utilização da equação 1 foi possível estabelecer um comparativo entre os dados da Ficha da APAC e do MDT gerado para cada um dos reservatórios (Tabela 3).

Tabela 3 – Variação da Capacidade Máxima dos reservatórios

Reservatório	CM Ficha (m³)*	CM MDT (m³)	Variação (%)
Araripina	3.702.230,00	4.046.413,08	9,30
B. de Melancia	1.572.511,00	1.553.583,84	- 1,20
B. do Chapéu	1.600.000,00	1.608.702,16	0,54
Barrinha	1.959.976,00	2.021.322,02	3,13
Boa Vista	1.632.188,00	1.683.257,05	3,13
Bom Sucesso	1.855.000,00	1.680.859,50	-9,39
Gurjão	3.847.000,00	4.181.046,72	8,68
Ingazeira	4.599.750,00	4.445.840,26	-3,35
Juá	3.676.447,00	4.268.863,99	16,11
Laje dos Gatos	1.102.940,00	1.033.077,29	-6,33
Manuíno	2.218.180,00	2.462.747,42	11,03
Mulungu	1.280.953,00	1.219.622,77	-4,79
Rancharia	1.042.810,00	942.460,60	-9,62
Barra do Juá	71.474.000,00	59.518.314,37	-16,73
Brejinho	282.840,00	287.833,69	1,77
Chinelo	3.453.700,00	2.933.648,14	-15,06
Rosário	36.532.000,00	36.451.142,77	-0,22
São José II	11.041.000,00	9.924.972,49	-10,11
Total	152.873.525,00	140.263.708,16	-8,25

Fonte: Adaptado pelo o Autor (2020).

*Dados extraídos de APAC (2015).

Os resultados variaram entre -16,73% e 16,11% e com valores bastante próximos de zero, como é o caso dos reservatórios Barra de Melancia (-1,20%), Barra do Chapéu (0,54%),

Rosário (0,22%) e Brejinho (1,77%). Devido à medição dos reservatórios *in loco* ser datada da época de construção entre as décadas de 50 e 70 e com a tendência natural de assoreamento dos leitos devido à sedimentação, esperava-se que os resultados da variação fossem negativos.

Cabe também destacar que existe certas discrepâncias pelo fato do reservatório estar ou não praticamente seco no momento em que houve a captação da imagem de satélite. Dessa forma, existe o caso de Bom Sucesso (-9,39%) que não estava totalmente seco, mesmo apresentando apenas uma parcela de volume preenchido, diferente do reservatório Barra de Melancia (-1,20%) que se encontrava totalmente seco (Figura 10).

Figura 10 – Comparativo reservatório praticamente seco (a) e seco (b).



Fonte: PE3D (2015).

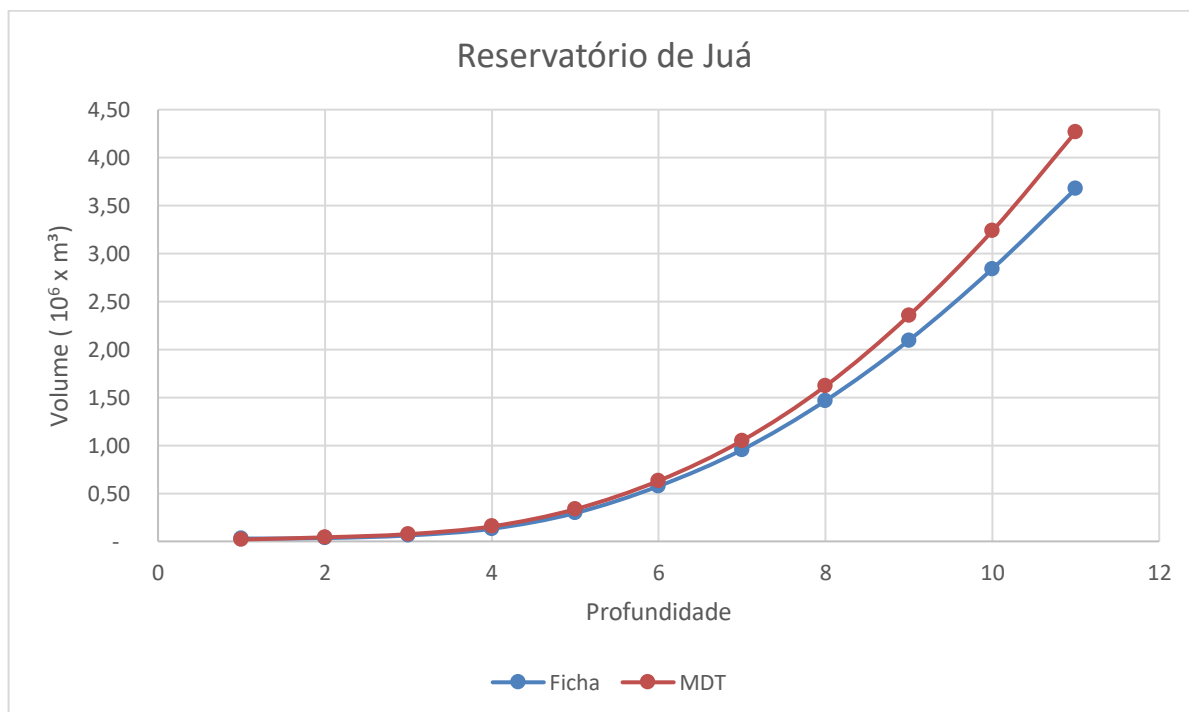
Além disso, em relação a alguns dos reservatórios estudados por Nascimento (2017), como é o caso de Barra do Juá (-16,73%), Chinelo (-15,06%) e São José II (-10,11%), permitem alguns levantamentos: a dificuldade em delimitar as suas bacias hidráulicas e o maior assoreamento dos seus leitos, devido a sua grande extensão, como também o questionamento em relação a qualidade dos dados obtidos da época de construção das barragens.

Por fim, realizando um comparativo com os resultados de Nascimento (2017) que foi uma variação de -12,41% na totalidade dos reservatórios da bacia do Pajeú, enquanto que o do presente estudo apresentou uma variação de -8,25%. Isso evidencia que os reservatórios, com o passar do tempo, têm a diminuição dos seus volumes por conta do assoreamento.

4.2 RELAÇÃO PROFUNDIDADE X VOLUME

Com os resultados obtidos do volume para suas respectivas profundidades de cada um dos reservatórios, pôde-se estabelecer um comparativo entre os dados da ficha da APAC e do MDT que foi exemplificado utilizando o reservatório de Juá (Figura 11).

Figura 11 – Comparativo da relação profundidade x volume dos dados da Ficha da APAC e MDT para o reservatório de Juá

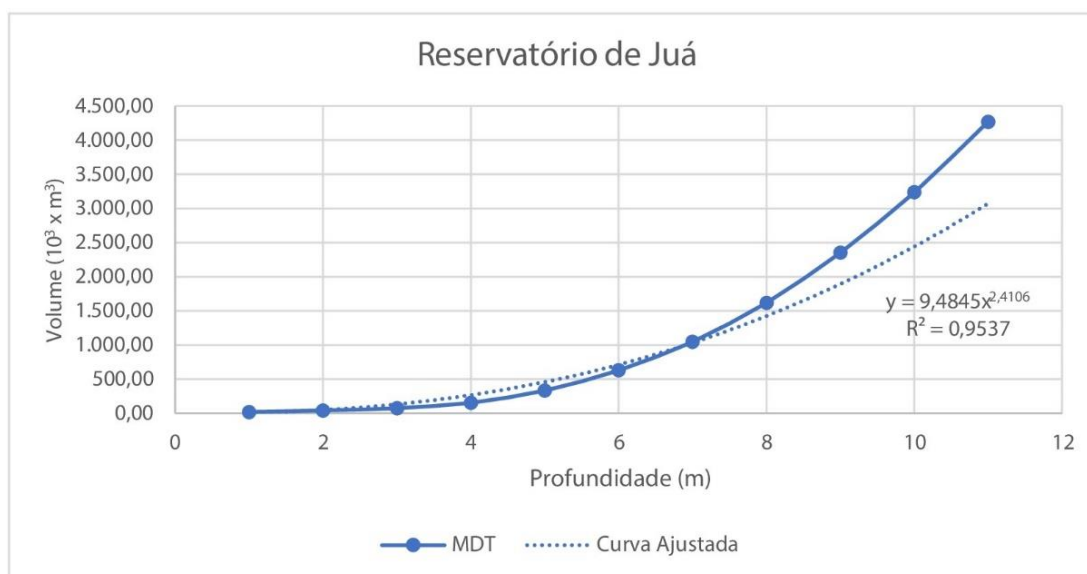


Fonte: O Autor (2020).

Desse modo, percebe-se que mesmo para o reservatório de Juá, que apresentou uma variação discrepante de 16,11%, existe uma tendência semelhante entre curva da ficha da APAC e do MDT. Cabe destacar que essa semelhança foi encontrada nos gráficos dos outros reservatórios, com pequenas variações.

Após essa comparação inicial, foi obtida a curva ajustada em potência em função $V=f(H)$ evidenciada pela equação 2. Tal fato remete ao estudo realizado por Molle (1994). Dessa forma, foi exemplificado também por meio do reservatório de Juá (Figura 12). Logo, foram obtidos os parâmetros “K” e “ α ” que correspondem a abertura do cone e o coeficiente de forma, definido por Molle (1994), respectivamente, além do coeficiente de correlação R^2 (Tabela 4).

Figura 12 – Relação profundidade x volume e curva ajustada para o reservatório de Juá.



Fonte: O Autor (2020).

Tabela 4 - Coeficientes da relação entre profundidade x volume dos reservatórios.

Reservatório	K	α	R ²	CM MDT (m ³)
Araripina	0,0027	2,8499	0,9927	4.046.413,08
B. de Melancia	0,0011	3,6938	0,994	1.553.583,84
B. do Chapéu	0,0052	2,9815	0,9993	1.608.702,16
Barrinha	0,0026	2,9407	0,9077	2.021.322,02
Boa Vista	0,00005	4,2112	0,9296	1.683.257,05
Bom Sucesso	0,0001	4,9021	0,8573	1.680.859,50
Gurjão	0,0025	3,1589	0,9935	4.181.046,72
Ingazeira	0,0578	2,6845	0,9987	4.445.840,26
Juá	0,0095	2,4106	0,9537	4.268.863,99
Laje dos Gatos	0,0002	3,9396	0,9413	1.033.077,29
Manuíno	0,0032	2,6381	0,9923	2.462.747,42
Mulungu	0,008	1,8694	0,9956	1.219.622,77
Rancharia	0,0067	2,8284	0,9476	942.460,60
Barra do Juá	11,033	3,2345	0,9999	59.518.314,37
Brejinho	0,0007	5,2037	0,9627	287.833,69
Chinelo	12,6110	2,6657	0,996	2.933.648,14
Rosário	3,1179	4,5234	0,8205	36.451.142,77
São José II	0,6017	4,4726	0,8633	9.924.972,49

Fonte: O Autor (2020).

Por meio da Tabela 4, observa-se que, para grande parte dos reservatórios, quanto maior foi o valor encontrado para o parâmetro “ α ”, menor foi o “K”, consequentemente, o reservatório seria mais fechado e com maior declividade.

Para observar a variação desses dois parâmetros, foi realizada a comparação do presente trabalho com o estudo de Nascimento (2017) (Tabela 5).

Tabela 5 – Comparativo da relação profundidade x volume com o estudo de Nascimento (2017)

Reservatório	Presente Estudo		Nascimento (2017)	
	α	K	α	K
Barra do Juá	3,2345	11,033	2,76	5,7354
Brejinho	5,2037	0,0007	3,08	0,0862
Chinelo	2,6657	12,6111	2,85	4,0444
Rosário	4,5234	3,1179	3,60	2,0853
São José II	4,4726	0,6017	3,11	1,8089

Fonte: Nascimento (2017) adaptado pelo o Autor.

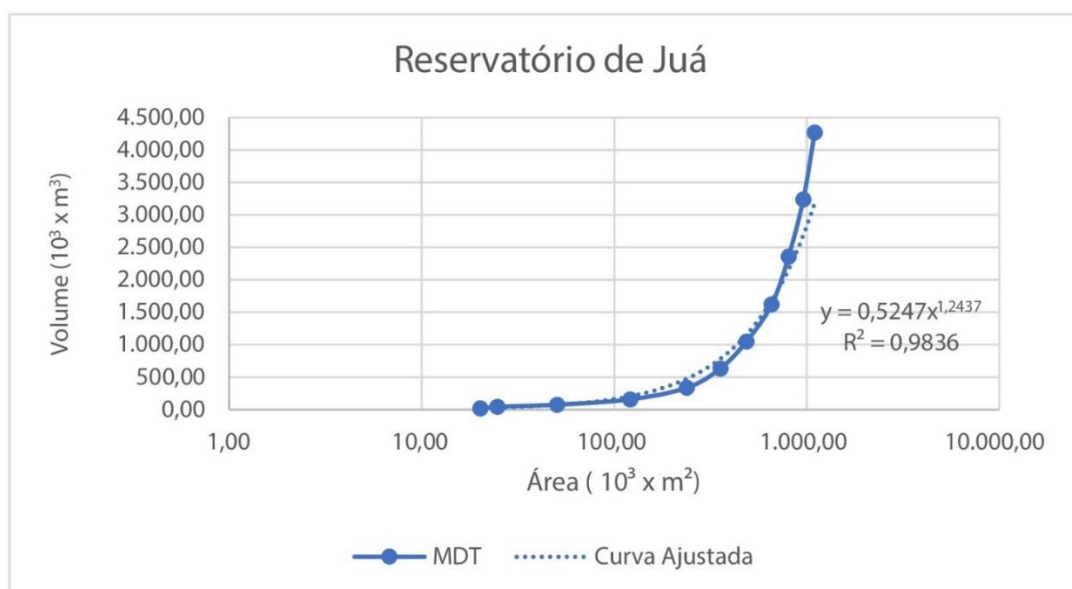
Com isso, percebe-se a diferença entre os valores encontrados em cada um dos estudos, devido à diferença utilizada na metodologia para a definição da bacia hidráulica e pelo fato, já evidenciado por Molle (1994), de que a relação entre os parâmetros “ α ” e “K” é bastante sensível.

Por último, apenas analisando os valores dos coeficientes “K” e “ α ”, devido a sua grande sensibilidade e pela quantidade do espaço amostral estudado, não foi possível agrupar os reservatórios e obter uma função $V=f(H)$ que os satisfizesse.

4.3 RELAÇÃO ÁREA X VOLUME

Por último, foi realizada a definição da função $V=f(A)$, evidenciada pela equação 3, utilizando a curva de tendência potencial exemplificada pelo reservatório de Juá (Figura 13). Dessa forma, obteve-se os coeficientes “K” e “ β ” e o valor do coeficiente de correlação (Tabela 6).

Figura 13 - Relação Área x Volume e curva ajustada para o reservatório de Juá.



Fonte: O Autor (2020).

Tabela 6 - Coeficientes da relação entre a área e volume dos reservatórios

Reservatório	K'	β	R ²	CM MDT (m ³)
Araripina	0,0609	1,6929	0,9918	4.046.413,08
B. de Melancia	0,2681	1,2769	0,991	1.553.583,84
B. do Chapéu	0,0592	1,583	0,9923	1.608.702,16
Barrinha	3×10^{-7}	3,6088	0,9741	2.021.322,02
Boa Vista	0,1984	1,4991	0,9834	1.683.257,05
Bom Sucesso	0,002	2,2898	0,9971	1.680.859,50
Gurjão	0,0366	1,6862	0,9954	4.181.046,72
Ingazeira	0,0683	1,6776	0,9515	4.445.840,26
Juá	0,5247	1,2437	0,9836	4.268.863,99
Laje dos Gatos	0,0354	1,8653	0,9994	1.033.077,29
Manuíno	0,0309	1,8624	0,9985	2.462.747,42
Mulungu	0,0787	1,8491	0,9911	1.219.622,77
Rancharia	0,0001	2,7435	0,9421	942.460,60
Barra do Juá	0,054	1,4613	0,9989	59.518.314,37
Brejinho	0,0848	2,0183	0,9757	287.833,69
Chinelo	0,0188	1,7576	0,9989	2.933.648,14
Rosário	0,0026	1,8168	0,9852	36.451.142,77
São José II	0,0004	2,2495	0,934	9.924.972,49

Fonte: O Autor (2020).

Diferentemente do que ocorreu com a relação entre a profundidade e o volume, os valores dos coeficientes “K” e “ β ” das novas variáveis estudadas, não obtiveram grandes variações como ocorreu com “K” e “ α ”. Isso evidencia a diminuição entre a sensibilidade dos novos parâmetros na relação entre a área e o volume.

Além disso, obteve-se um número maior de reservatórios com o R^2 próximos a 1,0, o que indica uma maior correlação entre a área e o volume.

Por fim, cabe destacar que, do mesmo modo ocorrido no tópico 4.2, não foi possível agrupar os reservatórios e definir uma função $V=f(A)$ que o satisfizesse devido à pequena quantidade do espaço amostral.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a realização desse trabalho de conclusão de curso, ficou ainda mais evidente a importância atrelada aos avanços tecnológicos e à aplicabilidade de sensoriamento remoto para gerenciamento dos recursos hídricos ao redor do planeta.

Diversas formas foram estudadas para obtenção da bacia hidráulica de cada um dos reservatórios, contudo, o método apresentado constituiu a forma mais coerente com a constituição de curvas de nível que toma como base a crista da barragem e espaçamento de 1,0m podendo ser utilizado em novos estudos na área.

Em relação aos resultados obtidos, pode-se perceber a diferença encontrada nos valores da Capacidade Máxima da ficha com o MDT gerado a partir do projeto PE3D. Mesmo que exista essa diferença, tornar-se imprescindível um maior estudo sobre os reservatórios buscando conciliar os dados cadastrais da APAC com o PE3D, que é uma ferramenta importante para o desenvolvimento e gerenciamento de recursos hídricos na região.

Com o aumento dos reservatórios estudados, visto que um espaço amostral de 18 reservatórios é bastante inferior ao estudado por Molle (1994), poderá constituir um avanço no estudo dos parâmetros “K” e “ α ” podendo atribuir equações para que o volume e a capacidade máxima do reservatório sejam estimados.

Contudo, ainda é uma área que deve ser explorada ao longo dos anos, com mais estudos e otimizações dos softwares e das próprias imagens de satélite. Além disso, é fundamental tais avanços e novas pesquisas com incentivos na sua temática, dada sua importância, para que seja possível estabelecer o volume e a capacidade máxima dos reservatórios mesmo que eles não estejam secos ou praticamente secos no momento do perfilamento.

REFERÊNCIAS

- ABILEAH, R.; VIGNUDELLI, S.; SCOZZARI, A. A completely remote sensing approach to monitoring reservoirs water volume”. **International Water Technology Journal**, v. I, n. 1, p. 59-72, 2011.
- AVISSE, N.; TILMANT, A.; MULLER, M. F.; ZHANG, H. Monitoring small reservoirs’ storage with satellite remote sensing in inaccessible areas. **Hydrology and Earth System Sciences**, p. 6445 - 6459, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-21-6445-2017>. Acesso em: 21. Dez. 2019.
- BLAIR, J. B.; RABINE, D. L.; HOFTON, M. A. The Laser Vegetation Imaging Sensor: a medium- altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 115-122, 1999.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2004.
- COLLISCHONN, B.; CLARKE, R. T. Estimativa e incerteza de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 21, n. 4, p. 719-727, 2016.
- CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, São Paulo, p. 61–82, 2008.
- CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, B. M.; CAMPOS, P. H. A. L. Pernambuco Tridimensional: Base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. In: PORTUGUESE-SPEAKING COUNTRIES SYMPOSIUM OF HYDRAULICS AND WATER RESOURCES, 12., 2015, Brasília, DF. **Anais [...]**. Porto Alegre: ABRH, 2015.
- GAO, H.; BIRKETT, C.; LETTENMAIER, D. P. Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. **Water Resources Research**, v. 48, n. W09504, 2012.
- LIEBE, J.; VAN DE GIESEN, N.; ANDREINI, M. Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment - A case study in the Upper East Region of Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 30, n. 6-7, 2005. 7p.
- LIPORACI, S. R.; RÖHM, S. A.; PEDRO, F. G.; CEREDA JUNIOR, A. Comparação entre diferentes técnicas digitais para elaboração do modelo digital do terreno e da carta de declividades, com aplicação em mapeamento geológico-geotécnico e análise ambiental. **Revista Holos Environment**, v. 3, n. 2, p. 85–102, 2003.
- MOLLE, F. **Manual do pequeno açude**. Recife: SUDENE, 1992. 525 p. Anexos. (DPG-PRN, DPP-WR (1994)).
- NASCIMENTO, V. F. **Produtos de sensoriamento remoto de alta resolução aplicados à caracterização volumétrica de reservatórios de água**. 2017. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

NASCIMENTO, V.; RIBEIRO NETO, A. Characterization of reservoirs for water supply in Northeast Brazil using high resolution remote sensing. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 22, n. 50, 2017. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0217170060>. Acesso em: 15. Fev. 2020.

POLAT, N.; UYSAL, M. Investigating performance of Airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation. *Measurement*: **Journal of the International Measurement Confederation**, v. 63, p. 61–68, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.12.017>. Acesso em: 10. Jan. 2020

SANTOS, F. A.; SILANS, A. M. B. P.; PORTO, R. Q.; ALMEIDA, C. N. Estimativa e análise do volume dos pequenos açudes através de imagens de satélite e levantamento de campo na Bacia Hidrográfica do açude Sumé. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande: ABRH, 2009. 14p

SOUZA, S. H. B. **Avaliação da eficácia de barreiras sanitárias em sistemas para aproveitamento de águas de chuva no semi-árido pernambucano**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009. 179 p.

TOLEDO, C. E.; ARAÚJO, J. C.; ALMEIDA, C. L. The use of remote-sensing techniques to monitor dense reservoir networks in the Brazilian semiarid region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 10, p. 3683-3699, 2014. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1080/01431161.2014.915593>. Acesso em: 15. Fev. 2020