



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
MESTRADO PROFISSIONAL EM REDE NACIONAL EM GESTÃO E REGULAÇÃO  
DE RECURSOS HÍDRICOS – PROFÁGUA

VALDEMIRO DA COSTA SILVA

**PARÂMETROS FÍSICOS DE RESERVATÓRIOS PARA ESTIMATIVA DE VOLUME  
SUBMERSO**

Recife  
2024

VALDEMIRO DA COSTA SILVA

**PARÂMETROS FÍSICOS DE RESERVATÓRIOS PARA ESTIMATIVA DE VOLUME  
SUBMERSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Gestão de Recursos Hídricos.

Área de concentração: Instrumentos da Política De Recursos Hídricos.

Orientador (a): Professor Doutor Alfredo Ribeiro Neto

Recife

2024

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

S586p Silva, Valdemiro da Costa  
Parâmetros físicos de reservatórios para estimativa de volume submerso / Valdemiro da Costa Silva, 2024.  
82 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.  
Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Recife, 2024.  
Inclui referências.

1. Gestão e regulação de recursos hídricos. 2. Geoprocessamento. 3. Recursos hídricos. 4. Relação cota-área-volume. I. Ribeiro Neto, Alfredo (Orientador). II. Título.

333.91 CDD (22. Ed.)

UFPE  
BCTG / 2024 - 121

VALDEMIRO DA COSTA SILVA

**PARÂMETROS FÍSICOS DE RESERVATÓRIOS PARA ESTIMATIVA DE VOLUME  
SUBMERSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão de Recursos Hídricos.

Área de concentração: Instrumentos da Política De Recursos Hídricos.

Aprovado em: 05 / 02 / 2024.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof/ Dr. Alfredo Ribeiro (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

CAMILO ALLYSON SIMOES  
DE FARIAS:03542044407

Digitally signed by CAMILO  
ALLYSON SIMOES DE  
FARIAS:03542044407  
Date: 2024.04.10 08:49:24 -03'00'

Prof. Dr. Camilo Allyson Simões de Farias (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG



Documento assinado digitalmente  
CRISTIANA COUTINHO DUARTE  
Data: 12/04/2024 11:10:46-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Cristiana Coutinho Duarte (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Dedico esse trabalho a todos os que contribuíram e acreditaram na minha pesquisa.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiro, agradeço a Deus, a Jesus e a João Evangelista por não me deixar sucumbir pelas tentações da vida humana, fazendo-me mediante esforço e perseverança iniciar pela terceira vez o curso de mestrado, porém desta última concluir o curso.

Aqui fica minha gratidão ao meu orientador Alfredo Ribeiro que com paciência e persistência me fez possibilitar um sonho antigo.

Aos professores Camilo Allyson e Cristiana Durte, por participarem da minha qualificação e fornecerem orientações preciosas para prosseguimento dos trabalhos.

A toda minha família, meu cunhado Hercílio Magalhães, minha irmã Vanice Magalhães e minha amiga Élcia Bandeira por sempre acreditarem no meu potencial.

A minha esposa por sempre me incentivar no crescimento profissional e intelectual.

Ao meu colega de trabalho da CPRM Thiago de Paula por valorizar este trabalho de mestrado e colocá-lo como de suma importância para o crescimento pessoal e profissional.

O treinamento de usuários consiste em parte do processo de educação, em base repetitiva, compreende ações e/ou estratégias para desenvolver determinadas habilidades ou habilidades específicas do usuário por desconhecer situações específicas de uso da biblioteca e seus recursos informacionais, que envolvem o conjunto de meios necessários para tal. (SANTIAGO, 2018, p. 21).

## RESUMO

No uso das imagens do modelo digital do terreno do sensor LIDAR para a geração das curvas cota-área-volume nos reservatórios, muitas vezes tem-se que as imagens foram elaboradas em períodos onde os reservatórios estavam parcialmente cheios. Com isso não se tem a curva cota-área-volume desde a profundidade zero de toda a bacia hidráulica, conseqüentemente o volume preciso do reservatório. A pesquisa em estudo procura identificar nos reservatórios uma relação entre as declividades na bacia hidráulica de cada reservatório com os coeficientes da geometria destes. Procurando identificar um padrão de correspondência. A partir dos dados da batimetria e dos modelos digitais do terreno, foram elaborados gráficos que relacionam profundidade em comparação ao volume das barragens. Com base nesses pontos plotados em gráfico foi gerado uma linha de tendência para cada reservatório. Procurou-se identificar um padrão de correlação entre os coeficientes da geometria dos açudes  $K$  e  $\alpha$ , com as declividades do mesmo, tendo como resultado inicial a não similitude linear. Porém, a partir de alguns testes contendo métricas dos erros dos volumes da CAV-MDT e volumes estimados foi identificado um teste com melhor desempenho em relação aos coeficientes  $\alpha$  e  $K$ . Portanto, para reservatórios meio cheio onde não existe informação dos parâmetros, utilizar os coeficientes médios de  $K$  e  $\alpha$  definidos por Molle (1994) será razoável e capaz de estimar não só a capacidade de armazenamento do reservatório meio cheio como também a sua curva cota-volume.

**Palavras-chave:** geoprocessamento; recursos hídricos; relação cota-área-volume.

## ABSTRACT

When using images from the digital terrain model from the LIDAR sensor to generate elevation-area-volume curves in reservoirs, it is often the case that the images were created in periods when the reservoirs were partially full. This means that we do not have the quota-area-volume curve from the zero depth of the entire hydraulic basin, consequently the precise volume of the reservoir. The research under study seeks to identify in reservoirs a relationship between the slopes in the hydraulic basin of each reservoir with the coefficients of their geometry. Looking to identify a matching pattern. Using bathymetry data and digital terrain models, graphs were created that relate depth in comparison to the volume of the dams. Based on these plotted points, a trend line was generated for each reservoir. An attempt was made to identify a correlation pattern between the coefficients of the geometry of the dams  $K$  and  $\alpha$ , with their slopes, with the initial result being non-linear similarity. However, from some tests containing CAV-MDT volume error metrics and estimated volumes, a test with better performance in relation to coefficients  $\alpha$  and  $K$  was identified. Therefore, for half-full reservoirs where there is no information on the parameters, use the Average coefficients of  $K$  and  $\alpha$  defined by Molle (1994) will be reasonable and capable of estimating not only the storage capacity of the half-full reservoir but also its quota-volume curve.

**Keywords:** geoprocessing; water resources; quota-area-volume ratio.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Site oficial do Pernambuco Tridimensional .....	21
Figura 2 - Zonas do relevo do PERH e os valores dos coeficientes $\alpha_1$ para os reservatórios selecionados com CAV atualizada.....	27
Figura 3 - Zonas do relevo do PERH e os valores dos coeficientes K1 para os reservatórios escolhidos com CAV atualizada.....	27
Figura 4 - Fluxograma das ações desenvolvidas na pesquisa.....	30
Figura 5 - Mapa da localização dos reservatórios em Pernambuco .....	31
Figura 6 - Mapa de Relevo de Pernambuco .....	32
Figura 7 - Mapa da precipitação média anual dos últimos 30 anos de Pernambuco (mm) .....	33
Figura 8 - Mapa da rede hidrográfica de Pernambuco .....	34
Figura 9 - Significado dos coeficientes K e $\alpha$ .....	37
Figura 10 - Mapa da declividade e declividade média da bacia hidráulica da barragem de Araripina no município de Araripina.....	41
Figura 11 - Gráfico da declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica da barragem Araripina..	42
Figura 12 - Identificação das cotas na barragem de Barrinha no município de Serrita-PE .....	45
Figura 13 - Gráfico da Profundidade versus volume da barragem de Barrinha no município de Serrita-PE .....	46
Figura 14 - Profundidade versus volume do reservatório de Abóboras no município de Parnamirim	48
Figura 15 - Profundidade x volume do reservatório Bom Sucesso no município de Ingazeira .....	49
Figura 16 - Gráfico Profundidade versus Volume da Barragem de Belo Jardim na cidade Belo Jardim .....	51
Figura 17 - Gráfico de dispersão e linha de tendência linear entre o coeficiente $\alpha$ e a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica .....	56
Figura 18 - Gráfico de dispersão e linha de tendência linear entre o coeficiente K e a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica .....	56
Figura 19 - Gráfico de dispersão e linha de tendência linear entre os coeficientes K e $\alpha$ com a declividade média da bacia hidráulica.....	58
Figura 20 - Gráfico de dispersão e linha de tendência linear entre o coeficiente K e a declividade média da bacia hidráulica.....	59
Figura 21 - Gráfico de dispersão e curva ajustada entre o coeficiente $\alpha$ e a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica .....	60
Figura 22 - Gráfico de dispersão e curva ajustada entre o coeficiente K e a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica .....	61
Figura 23 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da barragem Barrinha no município Cedro .....	66
Figura 24 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da barragem Cachoeirinha no município de Mirandiba .....	67
Figura 25 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da Barragem Monte Alegre no município de Floresta.....	68
Figura 26 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da barragem Muzumbú no município de Itambé.....	69
Figura 27 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da barragem Rancharia em Araripina .....	70
Figura 28 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da barragem Recreio em Lagoa Grande .....	71

Figura 29 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da barragem Umburanas no município de Custodia .....	72
Figura 30 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da barragem Zumbi no município de Camutanga .....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes $\alpha_1$ e $K_1$ da relação $V = f(A)$ em função do relevo .....	26
Tabela 2 - Fonte e ano da elaboração dos dados .....	35
Tabela 3 - Cálculo das cotas, volume estimado, volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório de Barrinha .....	46
Tabela 4 - Descrição dos campos da base de dados do projeto de pesquisa .....	47
Tabela 5 - Dados do reservatório de Abóboras no município de Parnamirim .....	47
Tabela 6 - Dados do reservatório de Bom Sucesso no município de Ingazeira .....	49
Tabela 7 - Dados do reservatório de Belo Jardim no município de Belo Jardim .....	50
Tabela 8 - Valores de $K$ e $\alpha$ nos 22 reservatórios parcialmente cheios .....	51
Tabela 9 - Base de dados com 53 reservatórios completamente vazios .....	52
Tabela 10 - Estatística dos parâmetros $\alpha$ e $K$ obtidos neste estudo e a média obtida em Molle .....	53
Tabela 11 - Relação entre os coeficientes $K$ e $\alpha$ com a declividade do eixo do rio na bacia hidráulica .....	54
Tabela 12 - Relação entre os coeficientes $K$ e $\alpha$ com a declividade média da bacia hidráulica .....	57
Tabela 13 - Valores de $\alpha$ e $K$ para os 4 testes com os volumes estimados para as profundidades do reservatório Abóboras e os valores das métricas 1 e 2 ....	62
Tabela 14 - Valores das métricas em percentual para cada teste e cada reservatório .....	62
Tabela 15 - Reservatórios parcialmente cheios, com coeficiente $K$ e $\alpha$ referente a parte não submersa .....	65
Tabela 16 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle, 1994), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Barrinha .....	65
Tabela 17 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Cachoeirinha .....	66
Tabela 18 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Monte Alegre ....	67
Tabela 19 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Muzumbú .....	68
Tabela 20 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Rancharia .....	69
Tabela 21 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Recreio .....	70

Tabela 22 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Umburanas .....	71
Tabela 23 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Zumbi.....	72
Tabela 24 - Valores dos coeficientes K e $\alpha$ depois da aplicação da metodologia da construção da CAV, em reservatórios parcialmente cheios .....	73
Tabela 25- Definição da CAV e do volume estimado para a capacidade máxima dos reservatórios parcialmente cheios, com os coeficientes K e $\alpha$ referente a parte submersa e não submersa .....	75
Tabela 26 - Análise da estatística descritiva dos valores de K e $\alpha$ , para os 8 reservatórios parcialmente cheios .....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADP	Acoustic Doppler Profiler
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ANA	Agencia Nacional de Água e Saneamento
ANA/CPRM-CN	Agencia Nacional de águas e Saneamento / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Curva de Nível
ANA/CPRM-MDT	Agencia Nacional de águas e Saneamento / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Modelo digital do terreno
APAC	Agencia Pernambucana de Águas e Clima
CAV	Curva cota-área-volume
CPRM	Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
DWG	Formato de extensão para Arquivo Vetorial
GeoTIFF	Formato de extensão de imagem
K	Coeficiente geométrico de abertura de reservatórios
LIDAR	Light Detection And Ranging
MDE	Modelo digital de elevação
MDS	Modelo digital de superfície
MDT	Modelo digital do terreno
NDWI	Índice de Água de Diferença Normalizada
NRMSE	Normalized root-mean-square-Error
NS	Nash-Sutcliffe
PE3D	Programa Pernambuco tridimensional
RASTER	Arquivo de Imagem
R <sup>2</sup>	Medida de Ajuste de um Modelo Estatístico Linear Generalizado
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SRH-PE	Secretaria de Recursos hídricos de Pernambuco
Vol.	Volume em Reservatórios
( $\alpha$ ) ALFA	Coeficiente geométrico de forma de reservatórios

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
2.1	RESERVATÓRIOS NO NORDESTE - A SUA CONSTRUÇÃO E FORMAS DE OBTENÇÃO DE DADOS ATÉ A ATUALIDADE .....	19
<b>2.1.1</b>	<b>Uso do sensoriamento remoto como alternativa na obtenção de dados nos reservatórios</b> .....	<b>20</b>
2.2	ESTIMATIVA DE VOLUME SUBMERSO EM RESERVATÓRIOS.....	25
2.3	EQUAÇÃO DE MOLLE PARA PEQUENOS AÇUDES.....	28
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>30</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E CLIMÁTICA DA ÁREA DE ESTUDO.....	30
3.2	DADOS UTILIZADOS.....	34
<b>3.2.1</b>	<b>PE3D</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Batimetria (ANA/CPRM-CN)</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2.3</b>	<b>MDT (ANA/CPRM-MDT)</b> .....	<b>36</b>
3.3	PARÂMETROS $\alpha$ e K.....	36
3.4	OBTENÇÃO DAS CURVAS PROFUNDIDADE EM RELAÇÃO AO VOLUME .	38
<b>3.4.1</b>	<b>Utilização das imagens do PE3D e da ANA/CPRM-MDT</b> .....	<b>38</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Utilização da topobatimetria da ANA/CPRM-CN</b> .....	<b>38</b>
3.5	UTILIZAÇÃO DO SOLVER PARA OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS K E ALFA .....	39
3.6	PROPOSIÇÃO PARA ESTIMAR ALFA E K APARTIR DAS DECLIVIDADES OBTIDAS COM MDT .....	39
<b>3.6.1</b>	<b>Declividade média da bacia hidráulica</b> .....	<b>40</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Declividade do eixo do rio na bacia hidráulica</b> .....	<b>41</b>
<b>3.6.3</b>	<b>Definição dos erros percentuais entre volumes da CAV-MDT e os volumes estimados</b> .....	<b>42</b>
3.7	METODOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO DA CAV NOS RESERVATÓRIOS PARCIALMENTE CHEIOS. ....	44
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>47</b>
4.2	APRESENTAÇÃO DE TRÊS CURVAS PROFUNDIDADE VERSUS VOLUME .....	47
<b>4.2.1</b>	<b>Obtida pelo PE3D</b> .....	<b>47</b>

<b>4.2.2</b>	<b>Obtida pela batimetria da ANA/CPRM-CN .....</b>	<b>48</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Obtida pelo MDT da ANA/CPRM-MDT.....</b>	<b>49</b>
4.3	ANÁLISE DOS VALORES OBTIDOS DOS PARÂMETROS ALFA E K .....	51
4.4	RELAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS COM AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS .....	53
<b>4.4.1</b>	<b>Análise em gráfico de dispersão com 100% da amostra .....</b>	<b>54</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Avaliação dos erros percentuais entre os volumes da CAV-MDT e os volumes estimados para cada reservatório .....</b>	<b>59</b>
4.5	ESTIMATIVA DA CAV PARA RESERVATÓRIOS PARCIALMENTE CHEIO. .	64
4.6	RESULTADOS OBTIDOS e DISCUSSÃO .....	73
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No ano de 2015 foi criado um pacto global e assinado durante a cúpula das Nações Unidas, pelos 193 países membros. Trata-se dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que fazem parte da chamada “Agenda 2030”. A agenda é composta por 17 objetivos ambiciosos e interconectados, desdobrados em 169 metas, com foco em superar os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no Brasil e no mundo, promovendo o crescimento sustentável global até 2030. A ODS-6 fala sobre a água potável e saneamento, que pretende garantir a disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos.

Nas regiões onde a disponibilidade hídrica é reduzida, as crises por incompatibilidade entre oferta e demanda de água são muito recorrentes. Este é o caso do nordeste brasileiro, com destaque para o semiárido, região na qual a variabilidade temporal dos baixos volumes precipitados associada às características geológicas dominantes, com predomínio de solos rasos no topo das rochas cristalinas, provocam uma reduzida transferência de água do rio para o solo adjacente, e vice-versa (Cirilo, 2008). A utilização de reservatórios tornou-se uma das principais soluções adotadas no Nordeste como alternativa ao armazenamento de água em épocas de estiagem (Fontes, 2015).

A importância de ter uma curva cota-área-volume precisa no processo de planejamento dos recursos hídricos vem das diversas demandas, dentre elas podemos citar:

- Na operação dos reservatórios para o abastecimento de água humano, irrigação, piscicultura, etc.
- Na simulação da evaporação da água a partir de cada espelho d’água em cada cota (profundidade).
- No dimensionamento de vertedouro.
- Na alocação negociada – A partir da simulação do reservatório seco, médio ou cheio, decidir antes no comitê de bacias hidrográficas como será a distribuição para os devidos usos.

A grande pergunta dessa dissertação é se existe uma relação física ou um padrão de correspondência espacial dos coeficientes “ $\alpha$ ” e “K”, que caracterizam a geometria dos reservatórios, em correspondência às características de relevo locais?

Segundo Moura (2021), o uso de produtos de sensoriamento remoto aplicado a reservatórios é uma metodologia que já vem sendo aplicada por diversos autores, com ótimos resultados. As aplicações são diversas como a avaliação da qualidade da água, monitoramento da eutrofização, estimativa da temperatura (Sobral et al., 2017), monitoramento de seca (Bacalhau et al., 2017), estimativa de volume máximo e monitoramento de volume (Abileah et al., 2011; Avisse et al., 2017; Baup et al., 2014).

No trabalho de Moura et al. (2021) procurou-se correlacionar os parâmetros geométricos  $\alpha_1$  e  $K_1$  da função volume versus área em cada reservatório, com as zonas de relevo ao qual os reservatórios estão inseridos.

Na pesquisa em curso, busca-se por meio de modelos digitais do terreno ou modelos digitais de elevação calcular a curva cota-área-volume de reservatórios e o respectivo volume do açude com maior nível de precisão possível. Muitas vezes tem-se que o MDT foi elaborado em períodos onde os reservatórios estavam parcialmente cheios. Com isso não se tem a curva cota-área-volume desde a profundidade zero de toda a bacia hidráulica, conseqüentemente o volume preciso do reservatório. A motivação da pesquisa em curso é identificar as relações físicas entre as características do reservatório em termos de coeficientes geométricos dentro do reservatório, e buscar correlacionar reservatórios parcialmente cheios e vazios.

A importância deste trabalho se reflete na realidade da escassez de água, onde o conhecimento preciso e atualizado sobre o armazenamento de água em reservatórios pode fornecer os dados e informações necessários para apoiar a gestão eficaz dos recursos.

Porém, a nova contribuição dada nesse estudo procura correlacionar parâmetros geométricos dos reservatórios  $\alpha$  e K da função volume versus profundidade, com aspectos novos, como a declividade da bacia hidráulica e a declividade do eixo do rio na bacia hidráulica de cada reservatório. O coeficiente K representa a abertura do açude e o coeficiente  $\alpha$  representa a forma mais ou menos curva das encostas do açude (Molle; Cadier, 1992).

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Busca-se com este estudo aplicar produtos de sensoriamento remoto na obtenção de curvas cota-área-volume em reservatórios com dados completos do relevo (totalmente vazio no momento do sobrevoo) e parcialmente preenchido com água.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Criar uma base de dados contendo 53 reservatórios em Pernambuco com a correspondência profundidade versus volume, ou seja, relação cota-área-volume atualizados.
- A pesquisa procura identificar uma relação física entre as características geomorfológicas dos reservatórios com relação aos coeficientes da geometria dos mesmos.
- Estimar o volume armazenado de um reservatório abaixo da linha d'água, para os casos onde o reservatório encontra-se parcialmente cheio, sem a necessidade de medição in loco (a partir da determinação da batimetria).

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta cessão abordará os conceitos básicos e bibliografias relacionadas a temática desta pesquisa. Inicialmente foi abordado os reservatórios do Nordeste, em seguida trabalhos com sensoriamento remoto, onde na obtenção de volume dos reservatórios utilizou-se o cálculo das áreas através do NDWI multiplicado pelas respectivas cotas, ou seja, para o cálculo da área, usa imagens de satélite. Em seguida, trabalhos utilizando imagens LIDAR (laser) dos MDTs das barragens para o cálculo do volume, passando pela estimativa do volume submerso em reservatórios.

### 2.1 RESERVATÓRIOS NO NORDESTE - A SUA CONSTRUÇÃO E FORMAS DE OBTENÇÃO DE DADOS ATÉ A ATUALIDADE

A construção de açudes no Nordeste do Brasil está ligada diretamente às características climáticas e geológicas da região, que levaram o poder público, a partir do fim do século XIX, a fomentar políticas para armazenar água, destaque para o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), que construiu a maioria dos açudes dos 9 estados do Nordeste e no norte de Minas Gerais (Collischonn; Clarke, 2016).

Em 1880, logo após a Grande Seca, o Imperador D. Pedro II nomeou uma comissão para recomendar uma solução para o problema das secas no Nordeste. As principais recomendações foram a construção de estradas para que a população pudesse atingir o litoral e a construção de barragens para suprimento de água e irrigação no polígono das secas cuja área é superior a 950.000 km<sup>2</sup>. Isso marcou o início do planejamento e projeto de grandes barragens no Brasil. A primeira dessas barragens foi Cedros, situada no Ceará e concluída em 1906.

A SUDENE, dirigida pelo economista Celso Furtado na década de 1960, implementou um plano de desenvolvimento regional embasado em estudos dos recursos naturais, envolvendo mapeamentos pedológicos, águas de superfície e subterrânea, climatologia, hidrologia, piscicultura, entre outras ciências que serviram de suporte para projetos de irrigação e construção de barragens (Mello, 2011).

Em suas pesquisas, Molle (1994) utilizava no cálculo do volume de reservatórios a equação de potência (Equação 1).

$$Vol = K * H^\alpha \tag{1}$$

**Onde:**  $K$  = coeficiente de abertura

$\alpha$  (alfa) = coeficiente de forma

$H$  = profundidade do açude

Calculavam-se os valores de  $k$  e  $\alpha$  através de equações que tinha como variáveis dois pares de coordenadas da área e profundidade, obtidos com levantamento topográfico.

A utilização de pequenos reservatórios está associada à necessidade de distribuição do estoque de água na bacia hidrográfica, uma vez que a disponibilização do recurso hídrico de forma espacializada auxilia no desenvolvimento socioeconômico nas comunidades difusas (Martins et al., 2007).

Os dados acerca da disponibilidade de água em reservatórios são calculados com curvas que relacionam o nível d'água, área de superfície e volume de armazenamento, também chamada de relação cota-área-volume, abreviado como "CAV" (Moura, 2021).

Atualizar as curvas cota-área-volume com levantamentos topográficos em campo não é uma tarefa fácil, pois envolve custos e mobilização de equipe especializada. O levantamento de campo consiste na realização de batimetria para levantar as profundidades em vários pontos da área inundada e levantamento por aerofotogrametria e topografia convencional da área acima do nível da água. Alguns reservatórios ainda possuem curvas da época do projeto do açude em que se utilizaram técnicas pouco precisas. Além disso, há o processo de assoreamento que contribui para a imprecisão das curvas (Collischonn; Clarke, 2016).

As regras operacionais dos reservatórios são baseadas nas curvas cota-área-volume que, por sua vez, nem sempre estão em escala adequada, uma vez que os reservatórios perdem volume continuamente devido ao processo de assoreamento.

No Brasil, onde praticamente todos os reservatórios formados por barragens têm menos de um século, tem-se feito políticas de operação utilizando-se o volume útil do projeto do reservatório.

### 2.1.1 Uso do sensoriamento remoto como alternativa na obtenção de dados nos reservatórios

Após o período emergencial devido às chuvas severas ocorridas nas bacias hidrográficas dos rios Una, Mundaú, Paraíba e Sirinhaém no estado de Pernambuco

entre 2010 e 2011, o Governo do Estado contratou o recobrimento aero-fotogramétrico e a cobertura a laser por meio da tecnologia LIDAR (Light Detection And Ranging). 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 (PE3D). Uma das aplicações foi 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 topo batimétrico, sem a necessidade de medição in loco (Cirilo et al., 2015).

A Figura 1 apresenta o site oficial do Pernambuco tridimensional, onde estão alocados os modelos digitais do terreno utilizados em alguns dos reservatórios da atual pesquisa.

Figura 1 - Site oficial do Pernambuco Tridimensional



Fonte: <http://www.pe3d.pe.gov.br/>

Os serviços contratados pelo Pernambuco Tridimensional incluem recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser em 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 cm e geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT), Modelos Digitais de Elevação (MDE) e imagens de Intensidade Hipsometria.

Avisse (2017), propõe uma nova abordagem usando imagens Landsat e modelos digitais de elevação para recuperar informações sobre variações de armazenamento em qualquer região inacessível. O método é aplicado para quantificar o armazenamento dos reservatórios na bacia de Yarmouk, no sul da Síria, onde o monitoramento terrestre é impedido pela guerra civil em curso.

A pesquisa de Avisse (2017) monitora o reservatório baseado exclusivamente em dados de sensoriamento remoto. O método é aplicado a pequenos reservatórios com capacidade a partir de 1 Hm<sup>3</sup> e superfícies a partir de 0,5 km<sup>2</sup>, na bacia do rio Yarmouk no sul da Síria. A metodologia aplicada em Avisse (2017), foi de usar bandas Landsat para melhorar a detecção de pixel de água, pois sob condições específicas o detector pode não reconhecer a diferença entre corpos de água e regiões de sombra, devido a sua similaridade estatística; explorar essas informações para corrigir estatisticamente os erros verticais do MDE e caracterizar a batimetria do reservatório, e usar a topografia atualizada para reconstruir partes ausentes das imagens Landsat por exemplo, pixel cobertos por nuvens ou não capturados pelo sensor Landsat (Avisse, 2017). A principal limitação da abordagem é a sua inaplicabilidade para reservatórios significativamente “cobertos” de água quando os satélites passaram sobre eles.

Para todos os reservatórios pequenos ou grandes “descobertos”, os usos de conjuntos de dados disponíveis em toda a superfície continental tornam esse método um complemento valioso para altimetria por satélite para aumentar o número de reservatórios observáveis em qualquer lugar o mundo.

Os dois recentes satélites Sentinel-2 também prometem um grande aprimoramento do método para estudos pós-2015, pois produzem imagens com resoluções espaciais e temporais mais finas do que Landsat (até 10m e 5 dias).

Segundo Oliveira (2018), o volume de um reservatório pode ser obtido por meio da integração da função que relaciona a área inundada com o nível d'água, conforme equação 2.

$$V(i) = \int_{h_0}^{h_i} A_i * dh \quad (2)$$

**Onde:**  $A_i$  = Área inundada em um dado nível  $h_i$

$V_i$  = volume armazenado pelo reservatório em um dado nível  $h_i$

e  $dh$  significa a variação da profundidade

A equação  $A = f(h)$  foi obtida por meio de uma equação de regressão, a partir de um conjunto de pares de dados de área inundada e nível d'água. O modelo mais adequado para representar essa relação é a equação potencial, conforme indicado na equação 3 (Molle; Cadier, 1992).

$$A = a * (H - H_0)^b \quad (3)$$

**Onde:** A = Área do espelho d'água

a = Constante

H = Nível d'água final

H<sub>0</sub> = Nível d'água inicial

b = Constante

O Índice Modificado de Diferença Normalizada da Água (MNDWI) proposto inicialmente por McFeeters (1996) e mais posteriormente adaptada por Xu (2006) possibilita a delimitação e extração precisa dos ambientes aquáticos e é calculado conforme equação 4.

$$MNDWI = \frac{verde - MIR}{verde + MIR} \quad (4)$$

**Onde:** MNDWI = Índice de diferença normalizado de água na versão modificada

Verde = Reflectância no verde

MIR = Infravermelho próximo

Segundo Oliveira (2018), foi concluído que não houve uma perda expressiva na capacidade de armazenamento do reservatório do Descoberto de 2002 a 2018, resultando em uma capacidade levemente superior aos 86 hm<sup>3</sup> atualmente adotados. Por fim, a estimativa da capacidade de armazenamento de reservatórios por meio de sensoriamento remoto pode ser vista como uma possibilidade promissora, em particular em regiões mais remotas, em que questões logísticas podem elevar consideravelmente os custos de levantamentos convencionais.

Segundo Costa (2019) produtos de sensoriamento remoto podem ser usados para calcular a CAV e reduzir o custo de levantamentos topo batimétricos. Costa (2019) utilizou imagens do satélite Landsat para estimar a curva CAV do reservatório Poço da Cruz localizado no semiárido Pernambucano.

Segundo Costa (2019) o objetivo foi alcançado, ao mostrar que informações fornecidas por sensoriamento remoto podem ser um instrumento complementar para confecção e atualização das CAV's. Tanto os volumes quanto as séries altimétricas geradas apresentaram uma boa correlação com os dados coletados in situ. Quanto aos dados de nível da água in situ, apresentaram muitas falhas e, em determinados períodos, não havia informações para comparar com os dados dos radares altimétricos. Entretanto, é possível notar que o comportamento da variação dos níveis in situ e altimetria por radar apresentam o mesmo comportamento. Como muitos reservatórios ainda possuem falhas nas suas séries históricas de medição de nível, o dado altimétrico oriundo do satélite pode ajudar a recompor parte dessas séries.

Segundo Moura (2021), a estimativa das curvas CAV utilizando as imagens de satélite foi aplicada em três reservatórios com a topo batimetria atualizadas, todos localizados no semiárido do estado de Pernambuco.

A utilização da relação volume em função da área é uma função de grande importância, principalmente para reservatórios que não possuem monitoramento do nível da água ou os quais a série de dados apresenta uma quantidade de falhas que inviabiliza o cálculo do volume. Na pesquisa de Moura (2021), foi testado o potencial de uso de relações do tipo  $V = f(A)$ , a partir da equação 5.

$$Vol = K1 * H^{\alpha1} \quad (5)$$

**Onde:** K1 = Coeficiente de ajuste

$\alpha1$  = Coeficiente de ajuste

Vale resaltar que os coeficientes K1 e  $\alpha1$  se diferem dos coeficientes K e  $\alpha$  porque os primeiros se referem à correspondência do volume com a área. Já os coeficientes K e  $\alpha$  se referem à relação do volume com a profundidade.

Os coeficientes de ajuste são determinados em função das características geométricas das bacias hidráulicas dos reservatórios.

A classificação das imagens de satélite também é outra possibilidade. Nesse processo, os pixels das imagens são associados entre si com base nos seus valores digitais, formando um número finito de classes individuais que representam objetos do mundo real. Essa estratégia é, também, uma forma de calcular a área superficial de água dos reservatórios (Gao et al., 2012; Elmi, 2019).

## 2.2 ESTIMATIVA DE VOLUME SUBMERSO EM RESERVATÓRIOS

Nascimento (2017) apresenta técnicas utilizadas para a detecção de açudes e identificação de bacias hidráulicas a partir de ferramentas de sensoriamento remoto, bem como na determinação de curvas cota x área x volume, a partir de informações obtidas de modelos digitais do terreno, com base nos dados do projeto PE3D.

Foi aplicado como critério de comparação entre as fichas e os dados obtidos via MDT, a área formada pela bacia hidráulica dos reservatórios, sendo usada como referência de profundidade para as duas bases de dados diferentes.

Nascimento (2017) apresenta ainda a estimativa da curva cota x área x volume de reservatórios com trechos alagados. Foram obtidas as curvas Cota x Área x Volume através da equação 1 para três situações diferentes. A primeira utilizando as fichas técnicas com cota x volume disponibilizadas pela APAC para todas as cotas disponíveis. A segunda também utilizando as fichas, mas desprezando as primeiras cotas até 20% do volume total do reservatório. A terceira utilizando a CAV obtida através do MDT. Essa operação tem como objetivo gerar uma curva através da equação 1 que possa ser utilizada para cotas nas quais não foram obtidos os volumes e áreas, e que mesmo para barragens parcialmente cheias no momento de obtenção dos pontos LIDAR, tenha-se uma curva Cota x Área x Volume confiável. Cada barragem terá um  $k$  e um  $\alpha$  próprio que descreve uma curva diferente, bem como cada uma das 3 situações descrita acima também terá um  $k$  e um  $\alpha$  distinto.

Os volumes encontrados através da função proposta por Molle (1994) apresentaram bons resultados e grande semelhança entre os volumes fornecidos pelas Fichas Técnicas ( $V_{Ficha}$ ) e MDT ( $V_{MDT}$ ) (Nascimento, 2017).

Outro critério utilizado para medir a acurácia da determinação das curvas Cota x Área x Volume obtidas através da função  $V=K \times H^\alpha$  é a comparação entre as constantes  $K$  e  $\alpha$  encontradas, utilizando os dados das fichas técnicas (Ficha (100%) e Ficha (80%)) e obtidas via MDT.

As conclusões de Nascimento (2017) foram que a utilização da tecnologia LIDAR de alta resolução para a detecção de pequenos reservatórios em uma pequena bacia hidrográfica no Nordeste Brasileiro foi eficiente. A acurácia para a detecção de reservatórios com bacia hidráulica menor que 1 há (hectare) foi bem superior aos métodos aplicados utilizando imagens de satélite com baixa resolução espacial.

Os resultados obtidos pelo método usado podem ser considerados como referência para a validação de outros métodos utilizando sensores laser com menor precisão (Nascimento, 2017).

Segundo Nascimento (2017), nas suas conclusões a equação 1 proposta por Molle (1994) para pequenos açudes, pode ser utilizada para relacionar o volume e a profundidade também de açudes grandes, com erro inferior a 1%. Tais dados são calculados com curvas que relacionam o nível d'água com a área superficial e o volume de armazenamento.

Segundo Moura (2021), o valor de área permite obter o volume armazenado nos reservatórios a partir das relações  $V=f(A)$ . Essas relações também podem ser avaliadas utilizando os dados de reservatório com as CAV's atualizadas para obtenção de coeficientes de ajuste para ser possível calcular o volume dos reservatórios a partir de dados das áreas superficiais de reservatório que não tem essa correspondência atualizada.

Segundo Moura (2021), o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco também apresenta uma relação volume em função da área superficial, onde esses coeficientes são indicados por regiões em função do tipo de relevo do estado, indicados na Tabela 1. A classificação conforme o tipo de relevo foi realizado no âmbito do Plano Integrado de Recursos Hídricos do Nordeste (PLIRINE), em que a região Nordeste foi dividida em zonas de relevo, denominadas R1 a R7, variando de suave a forte. Para o território de Pernambuco, há ocorrência de três classes (R2, R4, R5).

Tabela 1 - Coeficientes  $\alpha_1$  e K1 da relação  $V = f(A)$  em função do relevo

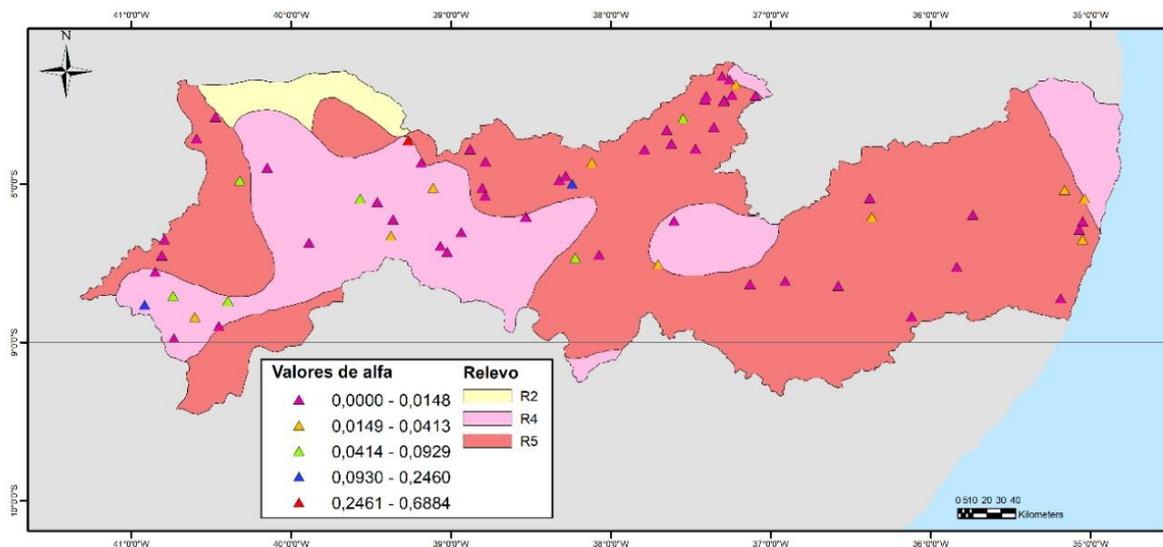
Relevo	$\alpha_1$	K1
R2	15,28	1,207
R4	21,87	1,066
R5	23,10	1,113

Fonte: modificado de PERH (1998).

Segundo Moura (2021), a distribuição espacial dos coeficientes não apresentou a classificação segundo o relevo, o que provavelmente indica que os parâmetros apresentados no PERH utilizaram outras unidades para o dado de volume e área. Visto que a ordem de grandeza dos valores apresentados está diferente dos valores encontrados, Rodrigues e Liebe (2013) aplicaram essa relação em 42 reservatórios do Brasil e 61 reservatórios de Gana e encontraram valores na mesma ordem de grandezas para esses coeficientes. A Figura 2 e a Figura 3 apresentam os valores

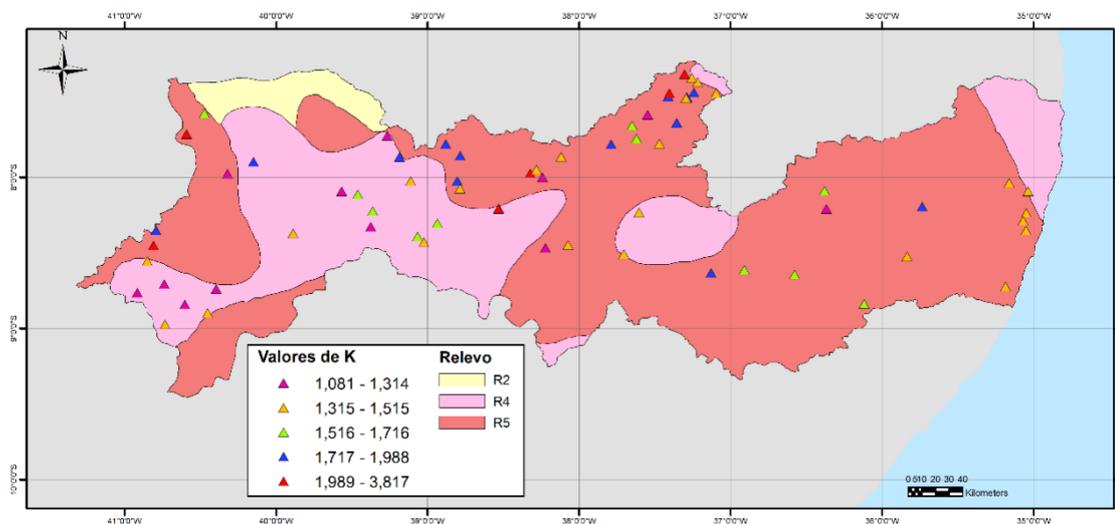
dos coeficientes distribuídos no território Pernambucano e as zonas de relevo indicadas no PERH (Moura, 2021).

Figura 2 - Zonas do relevo do PERH e os valores dos coeficientes  $\alpha 1$  para os reservatórios selecionados com CAV atualizada



Fonte: modificado de PERH (1998) e de Moura (2021).

Figura 3 - Zonas do relevo do PERH e os valores dos coeficientes K1 para os reservatórios escolhidos com CAV atualizada



Fonte: modificado de PERH (1998) e de Moura (2021).

Segundo Moura (2021) os valores dos coeficientes obtidos, a partir das curvas atualizadas, não apresentaram um padrão de comportamento quando relacionados ao relevo do território pernambucano como estabelecido no PERH.

No entanto, outras formas de classificação dos parâmetros podem ser testadas para identificação de quais características geométricas influenciam os valores de  $\alpha$  e  $K$  das relações  $V=f(A)$ . Dessa forma, na intenção de encontrar um padrão de distribuição espacial, variáveis como área superficial dos reservatórios, capacidades máximas, declividade do terreno, declividade longitudinal e bacias hidrográficas onde se localizam, entre outros, sendo essa uma potencialidade para realização de trabalhos futuros (MOURA, 2021).

### 2.3 EQUAÇÃO DE MOLLE PARA PEQUENOS AÇUDES

Segundo Molle (1994) a geometria de uma pequena represa no nordeste do Brasil apresenta grande variabilidade. A caracterização de geometrias específicas de reservatórios usando dois coeficientes geométricos simples pode resolver muitos problemas relacionados a reservatórios. O mais importante deles é a determinação do volume armazenado, devendo ser explorados os diversos métodos possíveis para esse fim, cada um com uma margem de erro. O estudo de uma amostra de 420 pequenas represas permitiu estabelecer várias correlações estatísticas entre os principais parâmetros físicos e geométricos. Apresenta-se, em particular, uma correlação entre a superfície e o volume do açude, visando-se estimar os volumes estocados a partir de fotos aéreas.

Molle (1994) propôs uma metodologia simplificada permitindo avaliar os coeficientes geométricos  $\alpha$ ,  $K$  e o volume do açude com precisão aceitável, descrita a seguir.

A proposta foi determinar uma reta de regressão no mínimo passando por dois pares  $(H, S)$ . Por isso, pode-se imaginar restringir o levantamento topográfico do açude ao levantamento de dois espelhos d'água distintos, os quais poderão ser o espelho d'água atual  $S_a$  (no dia do levantamento) e o espelho d'água máxima  $S_x$  (correspondente a cota de sangria). Estas superfícies correspondem à profundidade  $H_a$  (profundidade no dia do levantamento) e  $H_x$  (profundidade na cota de sangria). Em resumo, trata-se de determinar dois pares  $(H_a, S_a)$ ;  $(H_x, S_x)$  com as seguintes restrições:  $H_x - H_a > 1$  metro e  $H_a > H_x/3$ .

Segundo Mole (1994), passando apenas pelos dois pontos, tem-se as equações 6 e 7.

$$\alpha = 1 + \log\left(\frac{Sx}{Sa}\right) / \log\left(\frac{Hx}{Ha}\right) \quad (6)$$

**Onde:**  $\alpha$  = Coeficiente de forma

$Sx$  = Espelho de água máxima do reservatório

$Sa$  = Espelho de água atual no dia do levantamento

$Hx$  = Profundidade na cota de sangria

$Ha$  = Profundidade do reservatório no dia do levantamento

$$K = Sx / (\alpha \cdot Hx^{(\alpha-1)}) \quad (7)$$

**Onde:**  $K$  = Coeficiente de abertura

$Sx$  = Espelho de água máxima do reservatório

$\alpha$  = Coeficiente de forma

$Hx$  = Profundidade na cota de sangria

A partir dos valores calculados desses dois coeficientes, é possível estimar o volume do reservatório para uma dada profundidade, através da equação 1.

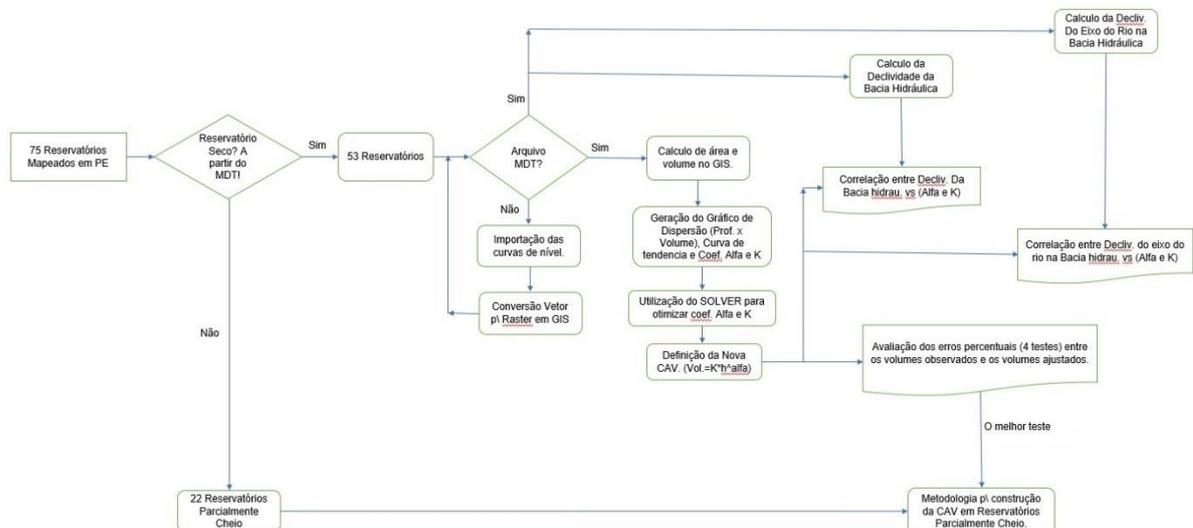
Molle (1994) cita que algumas conclusões merecem destaque:

- A geometria dos reservatórios pode ser descrita com excelente precisão, mediante apenas dois parâmetros característicos  $\alpha$  e  $K$ .
- A precisão sobre o volume máximo, obtida a partir de um levantamento topográfico completo e regressão ponderada é digna de destaque, chegando-se a um intervalo de confiança de 2,5%, o que comprova a grande adequação das funções potência.
- Para uma amostragem de 420 pequenos açudes, calculou-se que o volume médio disponível no açude, depois de 7 meses de estação seca, corresponde a 27% do volume máximo.
- Um levantamento parcial limitado a dois espelhos d'água permite avaliar o par ( $\alpha$ ;  $K$ ) e o volume máximo com um intervalo de confiança de 17%.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho inicia-se com a caracterização da área de estudo e com a informação dos dados utilizados na pesquisa. Em seguida faz-se a definição dos parâmetros geométricos  $\alpha$  e  $K$  a partir da teoria de Molle (Molle; Cadier, 1992). Posteriormente a obtenção das curvas cota-área-volume dos reservatórios selecionados a partir das imagens raster (MDT) oriundos do programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) e da ANA/CPRM-MDT, e da batimetria vinda do convênio ANA/CPRM-CN, estimando assim os coeficientes  $K$  e  $\alpha$  de cada barragem. Logo depois propôs-se formas de estimar os parâmetros geométricos  $\alpha$  e  $K$  de cada barragem a partir de algumas características físicas dos reservatórios, seja a declividade da bacia hidráulica ou a declividade longitudinal do eixo do rio na bacia hidráulica. E por fim uma metodologia para a construção da CAV em reservatórios parcialmente cheios. A metodologia deste trabalho será demonstrada na Figura 4, como o fluxo das ações desenvolvidas.

Figura 4 - Fluxograma das ações desenvolvidas na pesquisa



Fonte: Autor

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E CLIMÁTICA DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é o estado de Pernambuco, que está localizado no centro-leste da região Nordeste e tem como limites os estados da Paraíba (N), do Ceará (NO), de Alagoas (SE), da Bahia (S) e do Piauí (O), além de ser banhado pelo oceano

Atlântico Leste. Ocupa uma área de 98.149,119 km<sup>2</sup>. O estado de Pernambuco possui 185 municípios.

Segundo o IBGE (2017), o estado de Pernambuco está dividido em 19 microrregiões como mostra a Figura 5, onde também estão localizados os 53 reservatórios em estudo nesta pesquisa.

Figura 5 - Mapa da localização dos reservatórios em Pernambuco

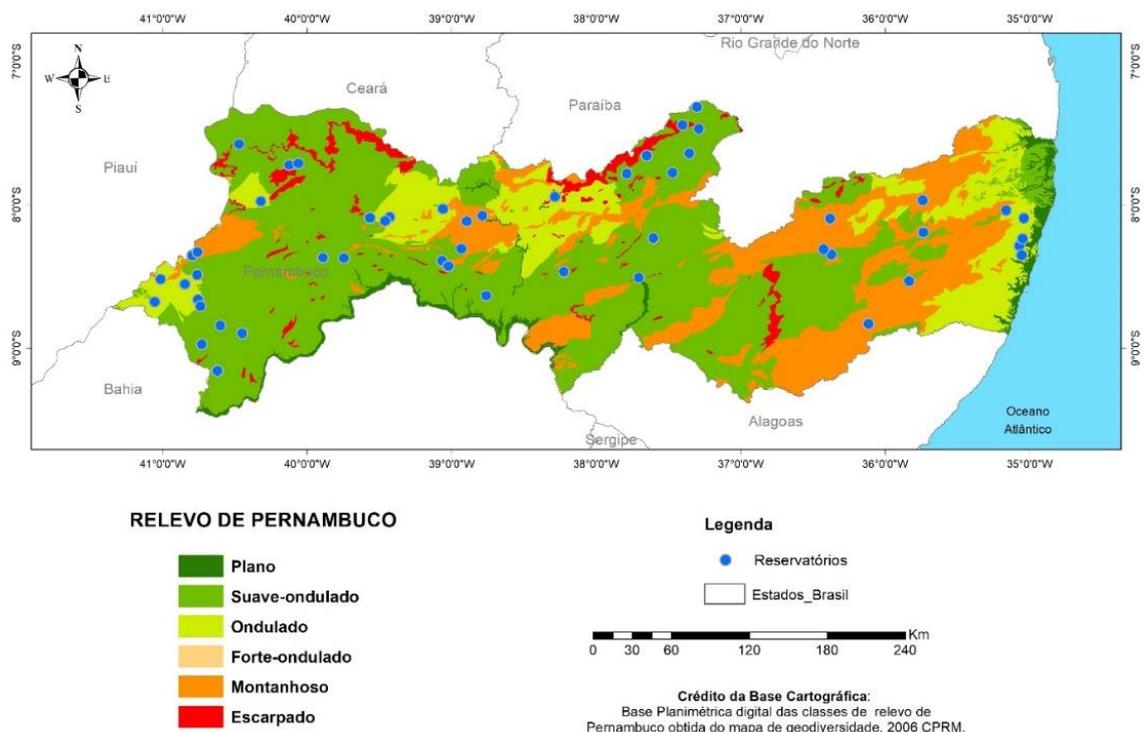


Fonte: O autor (2024).

O território Pernambucano possui os três principais tipos de relevo da formação geomorfológica brasileira: planície, planalto e depressão. Assim, o relevo estadual Pernambucano pode ser classificado em: planície litorânea (litoral), planalto (zona da mata e agreste Pernambucano) e depressão (sertão Pernambucano). A Figura 6 mostra as classes de relevo associada as feições geomorfológicas. A classe de relevo plana se refere a geomorfologia de recife, ilhas oceânicas, cordões litorâneos, dunas, brejos, planícies e terraços fluviais. A classe de relevo suave-ondulado se refere a geomorfologia de tabuleiros, chapadas e superfícies aplainadas. A classe de relevo ondulado se refere a geomorfologia de colinas e morros baixos. A classe de relevo forte-ondulado se refere a geomorfologia de depósitos de piemont. A classe de relevo montanhoso se refere a geomorfologia de morros e montanhas. A classe de relevo

escarpado se refere a geomorfologia de inselberg, escarpas, degraus e serras. Como o mapa de relevo da figura 6 foi concebido pela CPRM na escala de 1:1.000.000 e os modelos digitais do terreno das barragens foram concebidos na escala de 1:5.000, tornar-se impreciso caracterizar o tipo de relevo de cada barragem, como também associar a declividade de cada barragem a partir da declividade do relevo, pois o nível de detalhe do mapa de relevo da CPRM é muito pequeno, havendo a necessidade da elaboração de um mapa de relevo numa escala de mais detalhe.

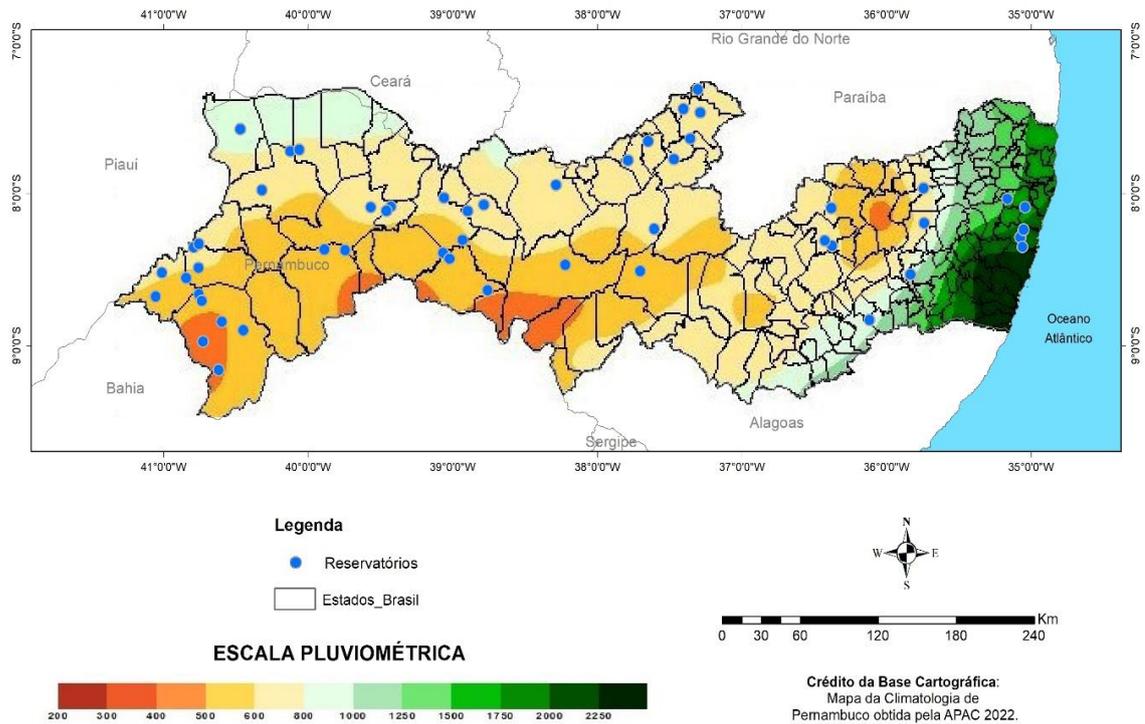
Figura 6 - Mapa de Relevo de Pernambuco



Fonte: O autor (2024).

Os índices pluviométricos do estado apresentam grande diferenciação entre a porção semiárida, a qual não dispõe de um regime regular de precipitações com valores entre 360 mm e 960 mm de chuva. Já a porção do litoral apresenta valores de precipitação maiores que 1250 mm, mostrando que não existe uma uniformidade da distribuição espacial da água sobre o território (Moura, 2021). A Figura 7 apresenta o comportamento da precipitação média anual no estado de Pernambuco.

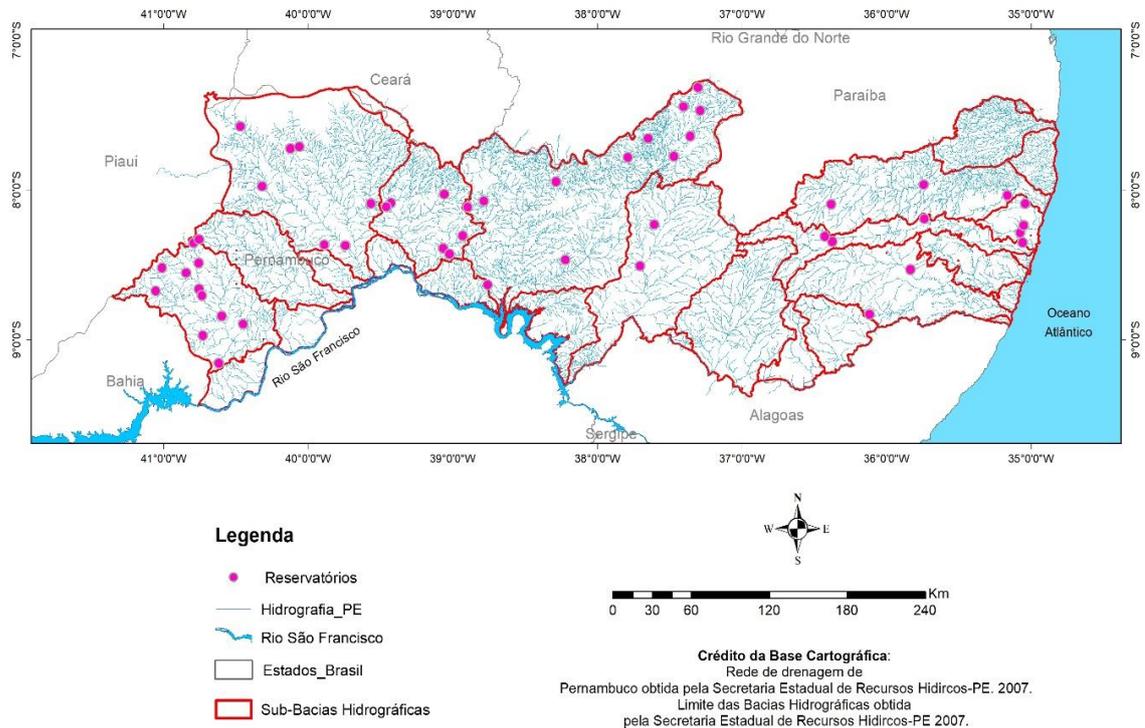
Figura 7 - Mapa da precipitação média anual dos últimos 30 anos de Pernambuco (mm)



Fonte: O autor (2024).

A hidrografia Pernambucana é formada por vários rios, mas, sem dúvida, o principal é o São Francisco, uma vez que o mesmo é fundamental para a irrigação e demais atividades do sertanejo nordestino. Identifica-se a rede hidrográfica de Pernambuco na Figura 8, mostrando também que os limites das bacias hidrográficas litorâneas deságuam no oceano atlântico e as bacias interioranas no rio São Francisco.

Figura 8 - Mapa da rede hidrográfica de Pernambuco



Fonte: O autor (2024).

### 3.2 DADOS UTILIZADOS

Antes de citar informações com relação a origem dos dados utilizados na pesquisa, descreve-se um pouco sobre a diferença entre MDT, MDS e MDE.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é a forma mais utilizada para representar uma superfície de maneira digital com base em um conjunto de pontos com coordenadas tridimensionais. Assim, um MDE consiste em uma representação discreta de uma superfície topográfica, na qual as elevações do terreno podem ser representadas computacionalmente por um conjunto de pontos regularmente distribuídos (Wolf; Dewwitt, 2000).

Um MDE pode se subdividir em Modelo Digital do Terreno (MDT) ou Modelo Digital de Superfície (MDS). O MDT consiste em um MDE no qual as informações de pontos de elevação se restringem a superfície topográfica, compreendendo apenas o terreno e corpos d'água. O MDS refere-se a um MDE que apresenta informações de elevação de pontos na superfície terrestre e de objetos que estão sobre ela, tais como árvores, edificações, etc. (El-Sheimy et al., 2005).

As imagens raster utilizadas nesta pesquisa correspondem ao Modelo digital do terreno, ou seja, compreendendo o terreno e corpos d'água.

Foram analisados inicialmente 75 reservatórios, porém 22 reservatórios estavam parcialmente cheios. Com isso a análise da geometria dos reservatórios em relação às características do relevo se refere a 53 barragens.

Os dados utilizados nesta pesquisa foram:

- A batimetria fornecida pela ANA/CPRM-CN (em que CN se refere a curvas de nível), para atualizar as curvas de nível de alguns reservatórios de Pernambuco.
- O MDT fornecido pelo programa PE3D.
- O MDT fornecido pela ANA/CPRM-MDT, para atualização das CAVs de algumas barragens do Nordeste.

Os anos de elaboração e as fontes dos dados utilizados nesta pesquisa estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Fonte e ano da elaboração dos dados

<b>Método (Empresa)</b>	<b>Ano</b>	<b>Quantidade de açudes</b>
Batimetria (ANA/CPRM-CN)	2011/2012	24
MDT (PE3D)	2013	24
MDT (ANA/CPRM-MDT)	2017/2018	5

Fonte: Autor

### 3.2.1 PE3D

O programa Pernambuco tridimensional (PE3D) consiste no levantamento a laser do relevo e imagens de alta resolução com qualidade equivalente à escala 1:5.000 para todo o estado de Pernambuco. Tendo como início das atividades o ano de 2013 e um custo de R\$ 21,5 milhões. Foi financiado pelo banco mundial no programa de sustentabilidade hídrica (PSHPE).

Os serviços contratados pelo Pernambuco Tridimensional e utilizados nessa pesquisa incluem o perfilamento a Laser e geração do Modelo Digital do Terreno com erro máximo altimétrico melhor que 25 cm.

As imagens foram levantadas no ano de 2013, mediante varredura aérea em cinco blocos. Foi utilizada a tecnologia LIDAR que significa detecção de luz e alcance,

para o levantamento do relevo. A resolução espacial do MDT no Pernambuco Tridimensional na escala de 1:5000 é de 1 metro, enquanto que a resolução para a escala de 1:1000 é de 50 centímetros. O dado usado do PE3D nesta pesquisa foi o MDT, apresentado em formato GeoTIFF e arquivo auxiliar TFW, na escala de 1/5.000 e com resolução espacial de 1m.

### 3.2.2 Batimetria (ANA/CPRM-CN)

Nesta pesquisa, utilizou-se complementarmente dados oriundos da topobatimetria porque alguns reservatórios estavam parcialmente cheios na ocasião do levantamento a laser do relevo ocorrido em 2013.

As equipes de engenheiros e técnicos do Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM, em parceria com empresas contratadas, executaram levantamento topo batimétrico de alguns dos reservatórios, utilizando-se de equipamentos como estação total e ADCP.

Os dados do levantamento topobatimétrico ANA/CPRM-CN utilizados nessa pesquisa foram as curvas de nível de cada reservatório levantado. As curvas de nível foram manuseadas no formato dwg e depois convertida em shapefile em software GIS.

### 3.2.3 MDT (ANA/CPRM-MDT)

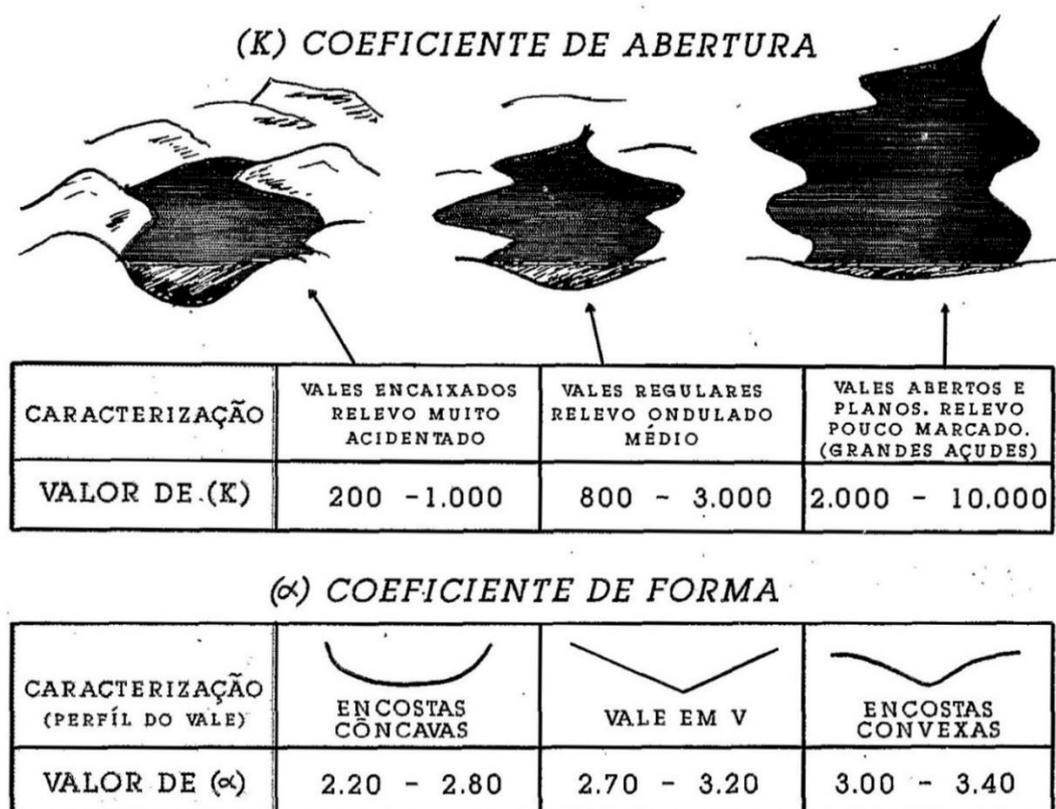
Nesta pesquisa, utilizaram-se também os MDT's obtidos no convênio ANA/CPRM na escala de 1:5.000, para a realização da atualização das CAV's de 30 barragens presentes na região Nordeste do Brasil e norte do Estado de Minas Gerais, por meio de levantamentos aerofotogramétricos da porção terrestre e levantamentos batimétricos da porção aquática. Em Pernambuco, cinco reservatórios foram levantados.

## 3.3 PARÂMETROS $\alpha$ E K

A forma muito variável dos pequenos açudes e, conseqüentemente, da capacidade de armazenamento, torna necessário métodos de avaliação dos volumes estocados (Molle; Cadier, 1992). Para uma determinada profundidade, o volume armazenado varia muito segundo o açude. Para ilustrar a variabilidade das situações

encontradas na prática, vale lembrar que, em um estudo que foi realizado sobre uma amostragem de 420 açudes, o volume desses reservatórios, para uma mesma profundidade de 4 metros, variava numa faixa de menos de 25.000 m<sup>3</sup> a mais de 500.000 m<sup>3</sup>, ou seja, numa razão de 1 a 20. Isto se deve ao fato que alguns açudes são encaixados (e represam menos água), geralmente situados em zonas de relevo ondulado ou acidentado, enquanto outros são "abertos" e encontrados de preferência em áreas de relevo plano e suave. Esses dois coeficientes geométricos variam bastante, como é mostrado na figura 9. O coeficiente K é chamado coeficiente de abertura e representa o caráter mais ou menos "aberto" do vale barrado pelo açude e o coeficiente  $\alpha$  é chamado coeficiente de forma e depende da forma mais ou menos curva das encostas do açude (Molle; Cadier, 1992).

Figura 9 - Significado dos coeficientes K e  $\alpha$



Fonte: modificado de Molle; Cadier (1992).

O valor de K para pequenos e médios açudes, varia comumente entre 200 e 8.000 (em 90% dos casos), mas pode alcançar, em particular para grandes represas, valores extremos de várias dezenas de milhares. O valor de  $\alpha$  tem média regional de 2,70 e somente em 20% dos casos foge da faixa de 2,20 a 3,20, podendo atingir

valores baixos e inferiores a 2,00 e valores altos da ordem de 3,60, somente em casos excepcionais (Molle; Cadier, 1992).

Será adotado nesta pesquisa a relação entre a profundidade (H) e o volume (V) do açude do tipo  $V=K.H^\alpha$ , definida anteriormente como equação 1.

### 3.4 OBTENÇÃO DAS CURVAS PROFUNDIDADE EM RELAÇÃO AO VOLUME

#### 3.4.1 Utilização das imagens do PE3D e da ANA/CPRM-MDT

O PE3D disponibiliza um arquivo shapefile nativo do ArcGIS, com a articulação do estado de Pernambuco das quadrículas referente às ortofotos e ao MDT, para facilitar a identificação da quadrícula em que o reservatório se encontra.

A partir dos softwares ArcGIS 10.8.1 e Planilha eletrônica, foram efetuadas as análises e processamento a fim de obtenção das curvas cota-área-volume.

Inicialmente utilizou-se do software ArcMap para manuseio, análise e processamento das imagens raster, obtidas do PE3D e da ANA/CPRM-MDT. Em alguns casos, para a composição das imagens de cada reservatório fez-se necessário a criação de um mosaico de imagens. Na composição desses mosaicos é importante que as cenas possuam uma área em comum (interseção). Já para as imagens da ANA/CPRM-MDT não foi necessário esse mosaico, pois a imagem raster já veio completa.

Na caixa de ferramentas do GIS “3D analyst” foram calculados a área e volume para uma superfície abaixo de um plano de referência, representando a profundidade “h” da barragem especificada.

A partir desses pontos de profundidade em relação ao volume, plotados em gráfico, foi gerada uma curva de tendência inicial para cada reservatório. Essa curva de tendência é do tipo potência, dada pela equação (1) igual à descrita em Molle (1994).

#### 3.4.2 Utilização da topobatimetria da ANA/CPRM-CN

Nesse contexto, o formato do arquivo a ser transformado em raster foram os arquivos vetoriais dos reservatórios. A partir do software ArcGIS importa-se as curvas de nível e converte os arquivos do formato dwg em shapefile, identificando o limite da bacia hidráulica da barragem como polígono. A partir das curvas de nível da bacia

hidráulica cria-se uma imagem raster, e calcula-se a área e volume das superfícies rasters da mesma forma do item anterior, além das curvas de tendência para cada reservatório.

De posse do gráfico profundidade x volume, em uma planilha eletrônica obtém-se uma linha de tendência tipo potência, dada pela equação 1, identificando os valores dos coeficientes  $K$  e  $\alpha$  e o valor do  $R^2$ , em que  $R^2$  é o coeficiente de determinação e serve para medir o nível de correlação entre a variável ou as variáveis e sua função ajustada. A variável nessa pesquisa é a profundidade do reservatório e a função ajustada é o volume do reservatório.

### 3.5 UTILIZAÇÃO DO SOLVER PARA OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS K E ALFA

O Solver é uma função que permite resolver problemas de otimização e encontrar valores ideais para determinadas variáveis, sujeitas a um conjunto de restrições. Ele é útil quando você precisa maximizar ou minimizar uma função objetivo, levando em consideração limitações ou restrições específicas. Para a função objetivo, utilizou-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe. O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) é calculado conforme mostrado na equação 8.

$$NSE = 1 - [\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2 / \sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{mean})^2] \quad (8)$$

Onde  $Y_i^{obs}$  é a  $i$ -ésima observação para o elemento que está sendo avaliado,  $Y_i^{sim}$  é o  $i$ -ésimo valor simulado para o elemento que está sendo avaliado,  $Y^{mean}$  é a média dos dados observados para o elemento que está sendo avaliado e  $n$  é o número total de observações (Nash; Sutcliffe, 1970). O coeficiente de Nash-Sutcliffe será abreviado pelo símbolo NS.

### 3.6 PROPOSIÇÃO PARA ESTIMAR ALFA E K APARTIR DAS DECLIVIDADES OBTIDAS COM MDT

A partir da identificação nos reservatórios de um padrão de correlação espacial (características de semelhança) em conexão aos coeficientes da geometria desses reservatórios, pode-se definir relações entre coeficientes que caracterizam a geometria dos reservatórios e características físicas dos mesmos.

Com o uso de ferramentas de geoprocessamento é possível fazer análises e gerar características da morfologia de cada reservatório. Dentre as características físicas obtidas no MDT que são utilizados nesse estudo, estão a declividade média da bacia hidráulica e a declividade longitudinal média do rio na bacia hidráulica.

### 3.6.1 Declividade média da bacia hidráulica

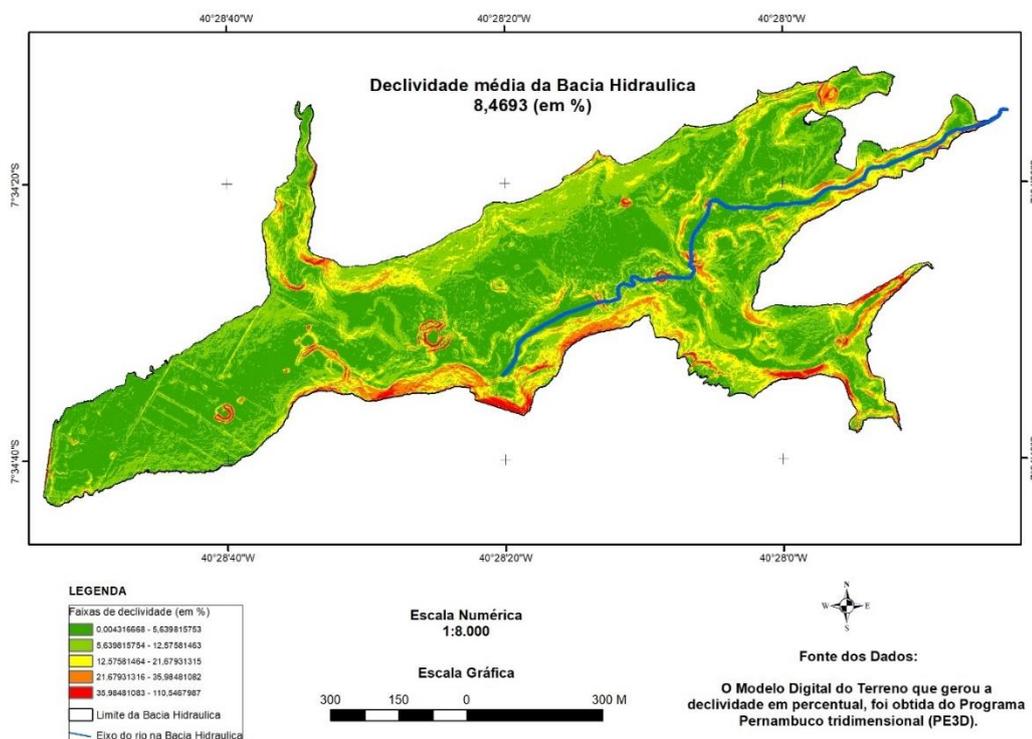
A declividade média da bacia hidráulica foi obtida a partir do MDT. A partir da definição do limite da bacia hidráulica, através das curvas de nível, foi feito um recorte dessa imagem. Através do comando “slope”, foi gerado uma imagem raster da declividade da bacia hidráulica de cada reservatório.

Faz-se então a análise da relação entre a declividade média da bacia hidráulica de cada reservatório com os coeficientes  $K$  e  $\alpha$  das respectivas barragens.

Caso haja uma correspondência entre a declividade média da bacia hidráulica com os coeficientes  $K$  e  $\alpha$ , poderemos estimar  $K$  e  $\alpha$  a partir dos valores da declividade média da bacia hidráulica.

Na Figura 10, tem-se um mapa da declividade média da bacia hidráulica da barragem de Araripina elaborada a partir do MDT do PE3D.

Figura 10 - Mapa da declividade e declividade média da bacia hidráulica da barragem de Araripina no município de Araripina



Fonte: Autor

### 3.6.2 Declividade do eixo do rio na bacia hidráulica

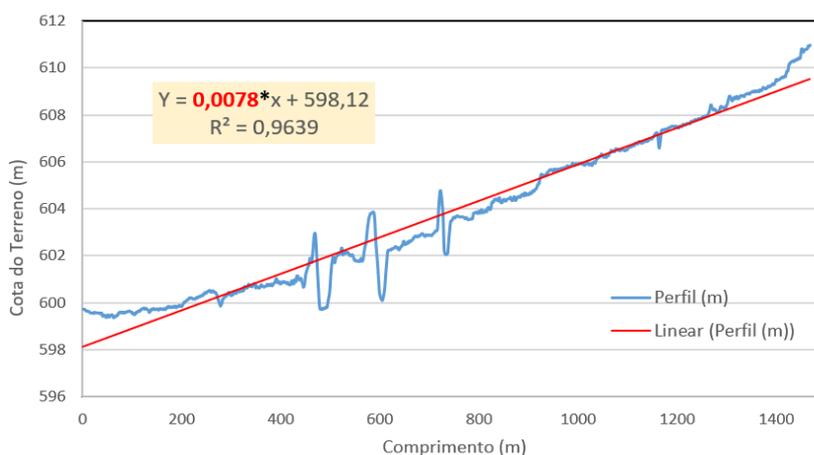
A declividade do rio na bacia hidráulica será obtida a partir do MDT, onde através do comando “Interpolar linha”, inicia-se a digitalização de uma linha sobre o MDT desde a cota mais baixa próximo ao barramento do açude até a cota mais alta no sentido da montante do barramento. Com essa linha definida e selecionada utiliza-se o comando “perfil de gráfico”, onde é gerado um gráfico do perfil do rio na bacia hidráulica do açude. Em seguida, exporta-se esse gráfico para uma Planilha eletrônica onde se adiciona uma linha de tendência linear e a equação do gráfico, obtendo-se a declividade média do rio para cada barragem.

Faz-se então a análise da relação entre a declividade média do rio na bacia hidráulica de cada reservatório com os coeficientes  $K$  e  $\alpha$  das respectivas barragens, utilizando uma planilha eletrônica. Caso haja uma correspondência entre a declividade do rio na bacia hidráulica com os coeficientes  $K$  e  $\alpha$ , pode-se estimar  $K$  e  $\alpha$  a partir dos valores da declividade do rio.

Na Figura 10, tem-se uma linha azul, que representa o eixo do rio na bacia hidráulica. A partir da relação profundidade versus comprimento do eixo do rio,

elabora-se o gráfico cota do terreno versus comprimento. Com isso, adiciona-se uma linha de tendência gerando assim uma equação linear, onde o coeficiente angular da reta representa a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica, como visto na Figura 11, em que a declividade média do eixo do rio é de 0,0078.

Figura 11 - Gráfico da declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica da barragem Araripina



Fonte: Autor

### 3.6.3 Definição dos erros percentuais entre volumes da CAV-MDT e os volumes estimados

Para se ter um melhor entendimento a respeito das nomenclaturas dos diversos volumes utilizados nesta pesquisa, definiu-se que:

- Volume da CAV-MDT – é o volume dado pela CAV que foi estimado pelo MDT;
- Volume calculado – é o volume da CAV-MDT cujos parâmetros “K” e “ $\alpha$ ” foram otimizados pelo solver;
- Volume estimado – São os volumes dos 4 testes, com os quatro pares de coeficientes (K e  $\alpha$ ) diferentes.

A partir do cálculo da CAV e do volume pelo MDT, foram otimizados os valores de  $\alpha$  e K pelo Solver e foi calculada uma nova CAV para cada reservatório. Foi definido quatro testes com diferentes valores dos coeficientes de K e  $\alpha$ :

- Teste 1 - Estimativa de  $\alpha$  e K por meio de uma interpolação linear, utilizando a declividade média do rio na bacia hidráulica calculada pelo MDT. A partir dos valores de  $\alpha$  e K estimados, foram calculados os volumes estimados para as diversas profundidades do reservatório. Com isso foram calculados os erros percentuais entre os volumes da CAV-MDT e os volumes estimados, gerando assim as métricas 1 e 2.

A métrica 1 significa o erro percentual para a capacidade máxima do reservatório e a métrica 2 significa a média dos erros de cada profundidade do reservatório. As métricas são calculadas conforme as equações 9 e 10.

- A equação da métrica 1 é:

$$M1 = \frac{(V_{máx}^{CAV-MDT} - V_{máx}^{estim.})}{V_{máx}^{CAV-MDT}} \quad (9)$$

Onde  $V_{máx}^{CAV-MDT} \rightarrow$  é o volume máximo da CAV-MDT;

$V_{máx}^{estim.} \rightarrow$  é o volume máximo estimado pela equação 1 com os coeficientes K e  $\alpha$  obtidos para cada teste.

- A equação da métrica 2 é:

$$M2 = [\sum_{i=1}^n (V_i^{CAV-MDT} - V_i^{estim.}) / V_i^{CAV-MDT}] / n \quad (10)$$

Onde  $V_i^{CAV-MDT} \rightarrow$  É o volume da CAV-MDT para cada metro de profundidade;

$V_i^{estim.} \rightarrow$  É o volume estimado pela equação 1 para cada metro de profundidade, utilizando os coeficientes K e  $\alpha$  obtidos para cada teste;

n é o número total de profundidades que foram avaliadas com intervalo de 1 metro;

i é o número da profundidade.

- Teste 2 - usar os valores das medias de K e  $\alpha$ , definidas pelo pesquisador Molle (1994), que são  $\alpha=2,7$  e  $K=1.500$ . A partir dos valores de  $\alpha$  e K foram calculados os volumes estimados para as diversas profundidades do reservatório. Com isso, foram calculados os erros percentuais entre os volumes da CAV-MDT e os volumes estimados, gerando assim as métricas 1 e 2, como visto nas equações 9 e 10.

- Teste 3 - usar as médias obtidas pelos valores calculados de  $\alpha$  e K da pesquisa em curso. A partir dos valores de  $\alpha$  e K foram calculados os volumes estimados para as diversas profundidades do reservatório. Com isso foram calculados os erros percentuais entre os volumes da CAV-MDT e os volumes estimados, gerando assim as métricas 1 e 2, como visto nas equações 9 e 10.
- Teste 4 – usar os valores obtidos de  $\alpha$  e K no teste 1, porém quando o valor de K supera a 20.000, utiliza-se o valor de  $K=20.000$ . A partir dos valores de  $\alpha$  e K estimados, foram calculados os volumes para as diversas profundidades do reservatório. Com isso, foram calculados os erros percentuais entre os volumes da CAV-MDT e os volumes estimados, gerando assim as métricas 1 e 2, como visto nas equações 9 e 10.

Por meio das métricas define-se qual o teste teve melhor desempenho, e conseqüentemente os valores de  $\alpha$  e K a serem utilizados.

### 3.7 METODOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO DA CAV NOS RESERVATÓRIOS PARCIALMENTE CHEIOS.

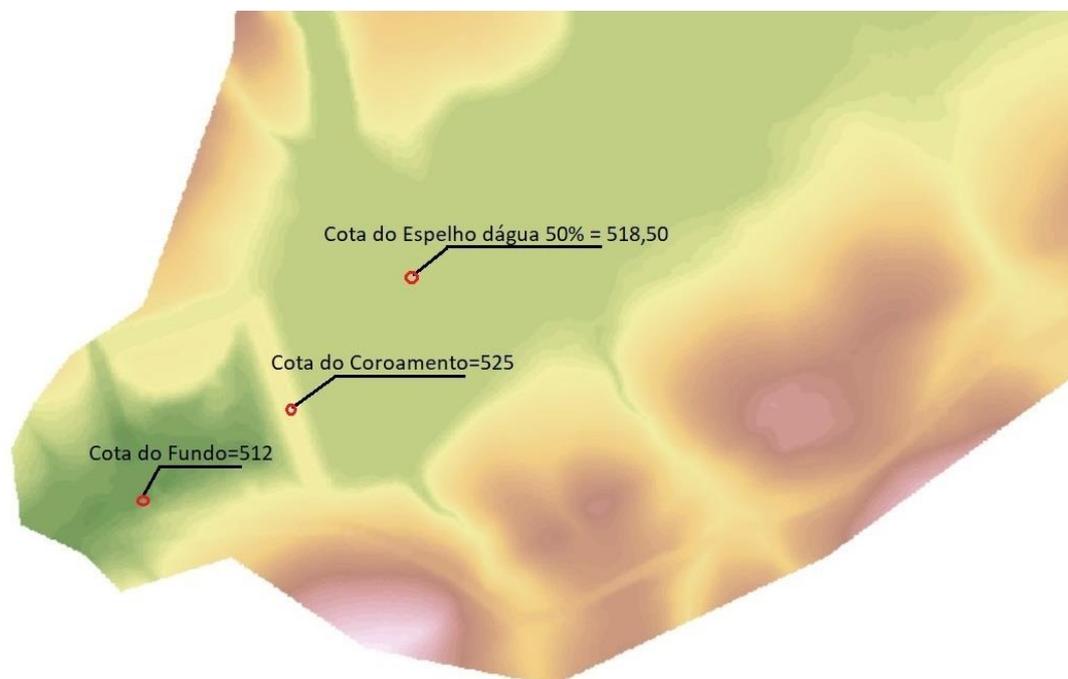
Um dos objetivos específicos deste trabalho é estimar o volume armazenado abaixo da linha d'água, ou seja, quando o reservatório esteja parcialmente cheio. O reservatório parcialmente cheio é aquele que no momento da passagem do sobrevoo não estava completamente seco e por isso não é possível ter a CAV completa do reservatório.

Para estimativa do volume submerso, foram utilizados os coeficientes K e  $\alpha$  referente ao melhor teste visto no item 3.6.3, calculando o volume estimado a partir da equação 1 para esses coeficientes que tiveram melhor desempenho.

Um exemplo da metodologia aplicada para reservatórios parcialmente cheios, será mostrado a seguir no reservatório de Barrinha no município de Serrita-PE, onde o mesmo se encontrava parcialmente cheio no período de aquisição da imagem no PE3D.

A partir da identificação da cota mais baixa a jusante do barramento estima-se a cota do fundo do reservatório. Foi identificada a cota do espelho d'água e a cota de coroamento da barragem, como mostra a figura 12 referente a barragem de Barrinha.

Figura 12 - Identificação das cotas na barragem de Barrinha no município de Serrita-PE



Fonte: O autor

A partir das cotas definidas no MDT calcula-se com a equação 1 o volume estimado com os coeficientes  $K$  e  $\alpha$  que obteve melhor resultado no item anterior (item 3.6.3.) para toda a parte submersa.

Calcula-se então, no software ArcGIS os volumes da CAV-MDT para as profundidades não submersa com o MDT.

Serão calculados os volumes finais da CAV, como mostra a Tabela 3, considerando os volumes da CAV-MDT elaborados no ArcGIS, somados aos volumes da parte submersa.

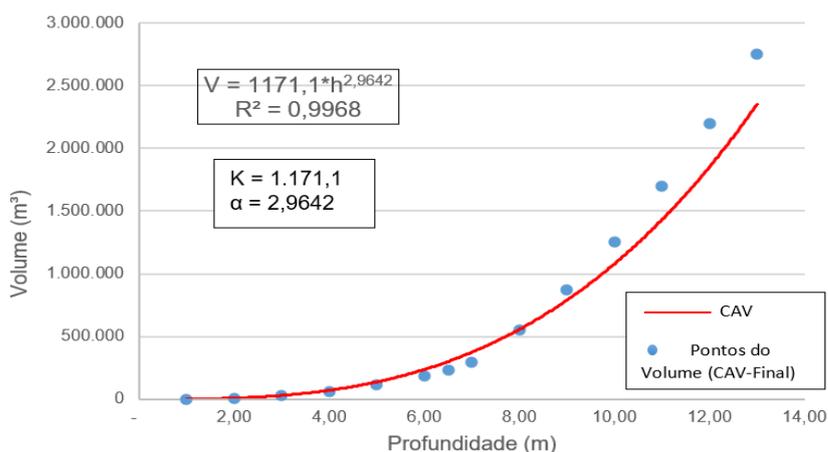
Tabela 3 - Cálculo das cotas, volume estimado, volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório de Barrinha no município de Serrita-PE

Descrição dos pontos	Cota (m)	Profundidade (m)	Volume estimado (Molle)	Volume (CAV-MDT)	Volume (CAV-Final)
Fundo a Jusante	512,00	-			
	513,00	1,00	1.500,00		1.500,00
	514,00	2,00	9.747,03		9.747,03
	515,00	3,00	29.128,54		29.128,54
	516,00	4,00	63.336,38		63.336,38
	517,00	5,00	115.693,85		115.693,85
	518,00	6,00	189.277,78		189.277,78
Espelho d'água a 50%	518,50	6,50	234.940,19		234.940,19
	519,00	7,00	286.982,87	57.934,54	292.874,73
	520,00	8,00	411.561,01	315.222,33	550.162,52
	521,00	9,00	565.647,71	638.586,72	873.526,91
	522,00	10,00	751.780,85	1.022.306,06	1.257.246,25
	523,00	11,00	972.414,69	1.465.618,08	1.700.558,27
	524,00	12,00	1.229.930,65	1.962.183,25	2.197.123,44
Cota Coroamento	525,00	13,00	1.526.645,88	2.512.963,68	2.747.903,87

Fonte: autor

Em seguida, constrói-se o gráfico da curva cota-área-volume entre o volume e a profundidade, como descrito na Figura 13, onde serão definidos os valores de K e  $\alpha$  a partir da equação 1.

Figura 13 - Gráfico da Profundidade versus volume da barragem de Barrinha no município de Serrita-PE



Fonte: autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo, foram apresentados os campos gerados da base de dados das barragens. Em seguida gráficos do volume versus profundidade dos reservatórios Abóboras e Bom Sucesso, além da análise dos valores obtidos dos parâmetros K e  $\alpha$  otimizados. Finaliza com a relação dos parâmetros geométricos com as características físicas e a discussão dos resultados obtidos.

A base de dados dos coeficientes calculados dos reservatórios foi organizada em uma planilha eletrônica com 7 campos, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Descrição dos campos da base de dados do projeto de pesquisa

Item	Descrição
Campo 1	Um número de ordem de cada reservatório
Campo 2	Nome do reservatório
Campo 3	Valor do coeficiente $\alpha$
Campo 4	Valor do coeficiente K
Campo 5	Origem da CAV, se MDT (PE3D ou ANA/CPRM-MDT) ou Batimetria
Campo 6	Declividade média do reservatório
Campo 7	Declividade do rio na bacia hidráulica do reservatório

Fonte: O autor (2024).

### 4.2 APRESENTAÇÃO DE TRÊS CURVAS PROFUNDIDADE VERSUS VOLUME

#### 4.2.1 Obtida pelo PE3D

A título de exemplo, são apresentados na Tabela 5 os dados que relacionam a profundidade do reservatório com os volumes da CAV-MDT e os volumes calculados (parâmetros “K” e “ $\alpha$ ” otimizados pelo solver) na bacia hidráulica da barragem de Abóboras.

Tabela 5 - Dados do reservatório de Abóboras no município de Parnamirim  
continua

Profundidade (m)	Volume CAV-MDT (m <sup>3</sup> )	Volume Calculado (m <sup>3</sup> )
-	-	-
1,00	4,41	1.196,45
2,00	53,92	15.000,99
3,00	3.093,93	65.847,54

Fonte: O Autor (2024)

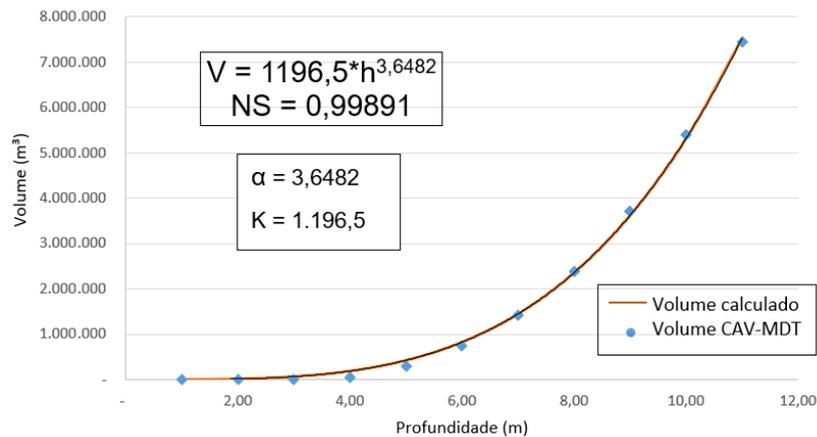
Tabela 5 - Dados do reservatório de Abóboras no município de Parnamirim conclusão

Profundidade (m)	Volume CAV-MDT (m³)	Volume Calculado (m³)
4,00	51.390,64	188.080,44
5,00	287.585,35	424.514,71
6,00	747.758,86	825.588,04
7,00	1.426.325,09	1.448.772,01
8,00	2.390.928,41	2.358.128,47
9,00	3.713.755,54	3.623.957,92
10,00	5.401.490,81	5.322.510,95
11,00	7.450.991,62	7.535.745,26

Fonte: O autor (2024).

Na Figura 14 é mostrado a partir dos dados na Tabela 5 o gráfico do volume versus profundidade e a equação da curva cota-volume do reservatório Abóboras.

Figura 14 - Profundidade versus volume do reservatório de Abóboras no município de Parnamirim



Fonte: O autor

#### 4.2.2 Obtida pela batimetria da ANA/CPRM-CN

A título de exemplo, é apresentado na Tabela os dados que relacionam a profundidade do reservatório com os volumes da CAV-MDT e o volume calculado (parâmetros “K” e “α” otimizados pelo solver) na bacia hidráulica da barragem de Bom Sucesso.

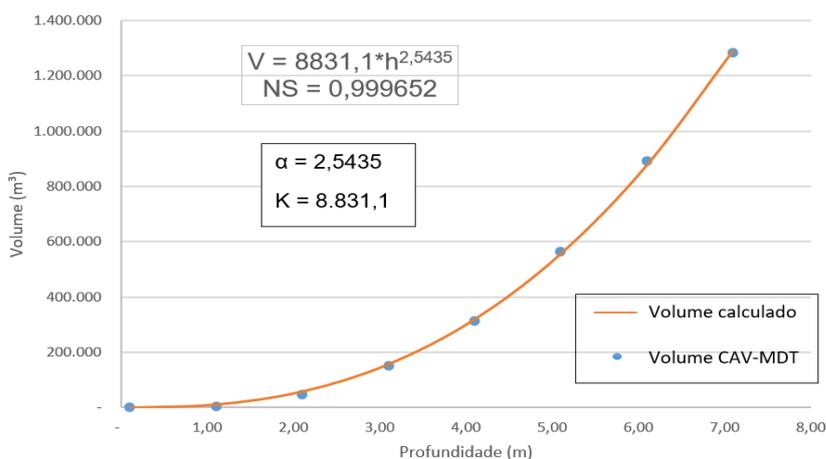
Tabela 6 - Dados do reservatório de Bom Sucesso no município de Ingazeira

Profundidade	Volume CAV-MDT	Volume Calculado
-	-	-
0,10	7,10	25,27
1,10	4.647,88	11.253,74
2,10	47.513,74	58.286,79
3,10	149.191,97	156.956,12
4,10	313.343,51	319.603,50
5,10	564.068,12	556.797,66
6,10	890.464,01	877.963,63
7,10	1.283.158,16	1.291.705,54

Fonte: O autor (2024).

Na Figura 15 é mostrado a partir dos dados na Tabela 6 o gráfico do volume versus profundidade e a equação da curva profundidade-volume do reservatório Bom Sucesso.

Figura 15 - Profundidade x volume do reservatório Bom Sucesso no município de Ingazeira



Fonte: O autor (2024).

#### 4.2.3 Obtida pelo MDT da ANA/CPRM-MDT

São apresentados na Tabela os dados que relacionam a profundidade do reservatório com os volumes da CAV-MDT proveniente da ANA/CPRM-MDT e o volume calculado (parâmetros “K” e “α” otimizados pelo solver) na bacia hidráulica da barragem de Belo Jardim.

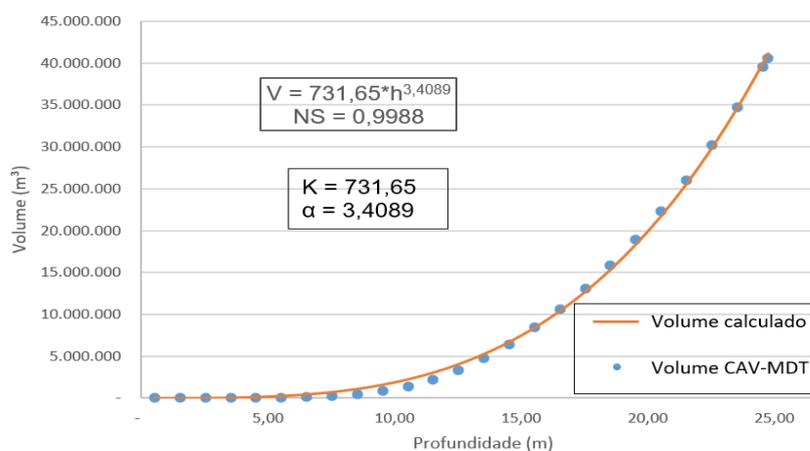
Tabela 7 - Dados do reservatório de Belo Jardim no município de Belo Jardim

Profundidade (m)	Volume CAV-MDT (m³)	Volume Calculado (m³)
-	-	-
0,53	65,19	84,02
1,53	674,06	3.118,20
2,53	2.147,93	17.318,66
3,53	4.676,12	53.905,19
4,53	10.653,82	126.153,15
5,53	31.629,73	249.002,38
6,53	97.750,42	438.821,30
7,53	228.233,71	713.244,75
8,53	462.704,18	1.091.053,69
9,53	813.424,91	1.592.081,66
10,53	1.343.628,49	2.237.139,41
11,53	2.166.765,59	3.047.952,49
12,53	3.283.208,74	4.047.108,61
13,53	4.712.374,47	5.258.012,42
14,53	6.444.573,28	6.704.846,17
15,53	8.415.511,85	8.412.535,12
16,53	10.617.624,41	10.406.716,78
17,53	13.076.928,65	12.713.713,38
18,53	15.829.919,02	15.360.507,00
19,53	18.899.726,45	18.374.717,06
20,53	22.299.586,32	21.784.579,68
21,53	26.057.528,84	25.618.928,81
22,53	30.191.532,98	29.907.178,83
23,53	34.688.408,77	34.679.308,41
24,53	39.533.846,73	39.965.845,58
24,74	40.591.013,42	41.144.271,47

Fonte: Autor

A Figura 16 representa graficamente a profundidade versus volume do reservatório Belo Jardim para os volumes da CAV-MDT e o volume calculado com a ferramenta solver. Com isso, tem-se também a equação da curva profundidade-volume do reservatório de Belo Jardim e seus coeficientes  $K$  e  $\alpha$ .

Figura 16 - Gráfico Profundidade versus Volume da Barragem de Belo Jardim na cidade Belo Jardim



Fonte: O autor (2024).

#### 4.3 ANÁLISE DOS VALORES OBTIDOS DOS PARÂMETROS ALFA E K

Como citado na metodologia foram analisadas 75 barragens, porém foram identificados 22 reservatórios que estavam parcialmente cheios, quando da realização do levantamento pelo sensor LIDAR nos anos de 2013 e 2014, como mostra a Tabela 8. Com isso, identificou-se que o valor calculado do coeficiente K, que representa o coeficiente de abertura do reservatório, resultou em sua maioria em valores elevados. Dessa forma, retiraram-se esses 22 reservatórios da pesquisa. Parte desses reservatórios foram utilizados para testar a forma de cálculo do volume submerso.

Tabela 8 - Valores de K e  $\alpha$  nos 22 reservatórios parcialmente cheios  
continua

Reservatório	$\alpha$	K
Arrodeio	3,6961	21.950,00
Barrinha	1,474	161.745,00
Brotas	2,3489	333.964,00
Cabidela	1,1383	44.999,00
Cachoeira II	4,3692	17.581,00
Cachoeirinha	1,8053	17.486,00
Chapéu	3,6004	7.586,60
Engenheiro Camacho (Tamboril II)	2,3027	109.385,00
Juá II	1,802	141.565,00
Monte Alegre	2,45	12.234,00
Mourão	1,3905	73.327,00
Muzumbú	1,5418	127.186,00
Nilo Coelho	2,6612	78.515,00
Rancharia	1,6779	69.384,00

Fonte: O Autor (2024)

Tabela 8 - Valores de K e  $\alpha$  nos 22 reservatórios parcialmente cheios conclusão

<b>Reservatório</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>K</b>
Recreio	2,6585	20.681,00
Saco I	2,5908	58.965,00
São José I - Baixio Grande	2,5708	5.549,00
São José II	3,18	10.467,00
Serrote	1,9693	58.260,00
Umburanas	1,8677	19.740,00
Vira Beijú	2,1456	51.714,00
Zumbi	1,4242	78.677,00

Fonte: O Autor (2024)

Devido a essa situação, a base de dados para a análise estatística dos parâmetros  $\alpha$  e K, e a análise da correlação espacial desses elementos geométricos com características dos reservatórios foi reduzida para 53 barragens, listados na Tabela 9 com os seus respectivos parâmetros  $\alpha$  e K.

Tabela 9 - Base de dados com 53 reservatórios completamente vazios continua

<b>Reservatório</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>K</b>
Abóboras	3,6482	1.196,45
Araripina	2,5237	6.711,34
Barra de Melancia	4,6666	32,89
Barra do Chapéu	3,7514	898,38
Barra do Juá	2,9683	23.562,17
Barragem Lagoa das Pedras	3,3205	1.921,55
Belo Jardim	3,4089	731,65
Bitury	2,9068	3.500,22
Bom Sucesso	2,5435	8.831,12
Bom Viver	3,3159	852,77
Cacimba Velha	2,7612	7.992,86
Caiçara	2,9722	12.316,18
Câmara	2,5335	11.523,29
Chinelo	2,6887	6.023,31
Cocos	2,5456	5.957,83
Conceição	2,2560	9.069,79
Conceição Criolas	2,5150	14.101,29
Cruz Salina	3,1797	6.159,05
Duas Unas	2,6196	15.281,07
Eixo da Serra	3,1898	1.520,20
Extrema	2,8460	8.976,66
Gurjau	2,6469	6.023,56
José Antônio	2,8613	950,69
Juá	3,2018	834,40
Jucazinho	3,0490	1.039,88
Jureminha	1,9082	46.278,79

Fonte: O Autor (2024)

Tabela 9 - Base de dados com 53 reservatórios completamente vazios  
conclusão

<b>Reservatório</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>K</b>
Lagoa da Pedra	3,0626	2.354,34
Laje do Gato	2,3756	5.804,91
Livino	2,2355	22.755,53
Manuíno	2,2096	9.492,20
Monte Orebe	2,3292	7.986,53
Morros	3,3266	333,79
Oitis	2,4296	2.834,82
Parnamirim	2,2998	36.782,13
Pau Branco	3,0754	714,57
Pau Ferro (Petrolina)	2,4675	15.710,73
Pau Ferro (Quipapá)	2,1262	9.319,60
Pirapama	2,9574	5.033,02
Plinio Amorim	2,8826	12.115,92
Poço da Areia	2,9965	1.454,74
Poço da Cruz	3,7763	917,19
Poço da Onça	3,3993	1.684,13
Prata	2,6280	12.342,75
Quebra Unha	2,6391	7.810,45
Riacho Pequeno	3,2379	1.568,40
Rosário	3,1103	5.994,75
Salgueiro	2,1782	36.828,45
São Bento	3,0310	1.977,32
Serrinha	2,3733	8.746,32
Soledade	3,2012	1.661,55
Tapacurá	3,1317	2.432,00
Terra Nova	2,7401	5.099,00
Utinga	3,4839	424,40

Fonte: O autor (2024).

A análise estatística básica dos parâmetros geométricos  $\alpha$  e K dos reservatórios é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Estatística dos parâmetros  $\alpha$  e K obtidos neste estudo e a média obtida em Molle (1994)

<b>Descrição</b>	<b>Valores de <math>\alpha</math></b>	<b>Valores de K</b>
Mínimo (neste estudo)	1,9082	32,89
Máximo (neste estudo)	4,6666	46.278,79
Media (neste estudo)	2,8780	7.971,07
Media de Molle (1994)	2,7000	1.500,00
Desvio Padrão (neste estudo)	0,5066	9.681,34

Fonte: O autor (2024).

#### 4.4 RELAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS COM AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Como foi citado anteriormente, as características físicas são a declividade da bacia hidráulica e a declividade do rio na bacia hidráulica. Os parâmetros da variável

dependente e da variável explanatória devem ser campos numéricos contendo um intervalo de valores.

#### 4.4.1 Análise em gráfico de dispersão com 100% da amostra

Foram espacializados os reservatórios dentro do estado de Pernambuco. Nesse contexto foram analisados 53 reservatórios.

Fez-se inicialmente a análise da relação entre a variável exploratória declividade do eixo do rio na bacia hidráulica versus os coeficientes K e  $\alpha$  de cada barragem a partir dos dados na Tabela 11. A metodologia de cálculo da declividade do eixo do rio na bacia hidráulica da barragem foi exposta no item 3.6.2.

Tabela 11 - Relação entre os coeficientes K e  $\alpha$  com a declividade do eixo do rio na bacia hidráulica  
continua

<b>Reservatório</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>K</b>	<b>Declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica</b>
Abóboras	3,6482	1.196,45	0,0011
Araripina	2,5237	6.711,34	0,0078
Barra de Melancia	4,6666	32,89	0,0015
Barra do Chapéu	3,7514	898,38	0,0015
Barra do Júa	2,9683	23.562,17	0,0012
Barragem Lagoa das Pedras	3,3205	1.921,55	0,0015
Belo Jardim	3,4089	731,65	0,0012
Bitury	2,9068	3.500,22	0,0049
Bom Sucesso	2,5435	8.831,12	0,0028
Bom Viver	3,3159	852,77	0,005
Cacimba Velha	2,7612	7.992,86	0,0021
Caiçara	2,9722	12.316,18	0,0014
Camara	2,5335	11.523,29	0,0023
Chinelo	2,6887	6.023,31	0,0032
Cocos	2,5456	5.957,83	0,0031
Conceição	2,2560	9.069,79	0,0042
Conceição Criolas	2,5150	14.101,29	0,003
Cruz Salina	3,1797	6.159,05	0,0007
Duas Unas	2,6196	15.281,07	0,0019
Eixo da Serra	3,1898	1.520,20	0,0038
Extrema	2,8460	8.976,66	0,0018
Gurjau	2,6469	6.023,56	0,0009

Fonte: O Autor (2024)

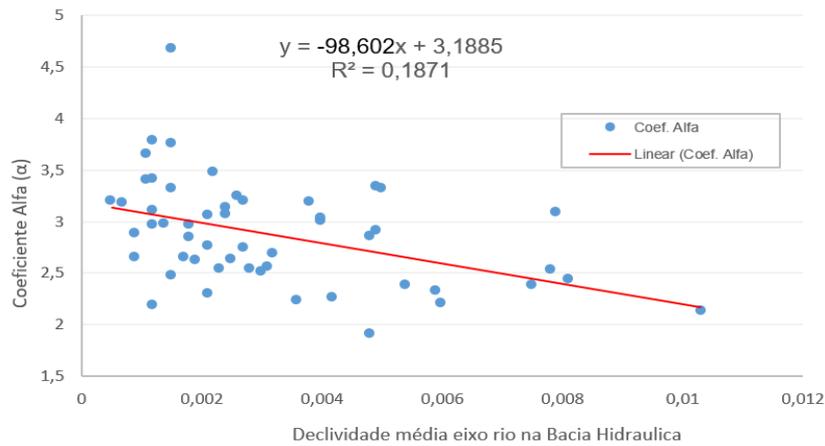
Tabela 11 - Relação entre os coeficientes K e  $\alpha$  com a declividade do eixo do rio na bacia hidráulica conclusão

Reservatório	$\alpha$	K	Declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica
José Antônio	2,8613	950,69	0,0048
Juá	3,2018	834,40	0,0027
Jucazinho	3,0490	1.039,88	0,0021
Jureminha	1,9082	46.278,79	0,0048
Lagoa da Pedra	3,0626	2.354,34	0,0024
Laje do Gato	2,3756	5.804,91	0,0075
Livino	2,2355	22.755,53	0,0036
Manuíno	2,2096	9.492,20	0,006
Monte Orebe	2,3292	7.986,53	0,0059
Morros	3,3266	333,79	0,0049
Oitis	2,4296	2.834,82	0,0081
Parnamirim	2,2998	36.782,13	0,0021
Pau Branco	3,0754	714,57	0,0079
Pau Ferro (Petrolina)	2,4675	15.710,73	0,0015
Pau Ferro (Quipapa)	2,1262	9.319,60	0,0103
Pirapama	2,9574	5.033,02	0,0018
Plinio Amorim	2,8826	12.115,92	0,0009
Poço da Areia	2,9965	1.454,74	0,004
Poço da Cruz	3,7763	917,19	0,0012
Poço da Onça	3,3993	1.684,13	0,0011
Prata	2,6280	12.342,75	0,0025
Quebra Unha	2,6391	7.810,45	0,0017
Riacho Pequeno	3,2379	1.568,40	0,0026
Rosário	3,1103	5.994,75	0,0012
Salgueiro	2,1782	36.828,45	0,0012
São Bento	3,0310	1.977,32	0,004
Serrinha	2,3733	8.746,32	0,0054
Soledade	3,2012	1.661,55	0,0005
Tapacura	3,1317	2.432,00	0,0024
Terra Nova	2,7401	5.099,00	0,0027
Utinga	3,4839	424,40	0,0022

Fonte: O autor (2024)

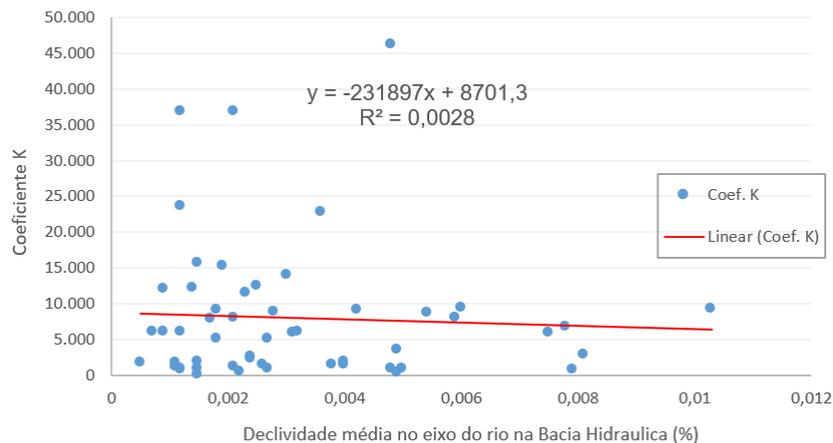
Em seguida, foram elaborados dois gráficos de dispersão através de uma planilha eletrônica procurando identificar um padrão de correlação (características de semelhança) entre os coeficientes K e  $\alpha$  com a declividade média do eixo no rio da bacia hidráulica, como mostra as Figuras 17 e 18.

Figura 17 - Gráfico de dispersão e linha de tendência linear entre o coeficiente  $\alpha$  e a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica



Fonte: Autor

Figura 18 - Gráfico de dispersão e linha de tendência linear entre o coeficiente K e a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica



Fonte: Autor

Foi observado na Figura 17 o valor de  $R^2 = 0,1871$ , que denota que apenas 18,71% da variação do coeficiente  $\alpha$  é explicado pela variação da declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica. Na Figura 18 o valor de  $R^2 = 0,0028$  denota que apenas 0,28% da variação do coeficiente K é explicado pela variação da declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica, ou seja, com os dados utilizados, não se identificou correlação entre os coeficientes K e  $\alpha$  com a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica.

Em seguida, fez-se a análise da relação entre a variável exploratória declividade média da bacia hidráulica versus os coeficientes K e  $\alpha$  de cada barragem a partir dos dados na Tabela 12.

Tabela 12 - Relação entre os coeficientes K e  $\alpha$  com a declividade média da bacia hidráulica  
continua

<b>Reservatório</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>K</b>	<b>Declividade média da Bacia Hidráulica (%)</b>
Abóboras	3,6482	1.196,45	10,4516
Araripina	2,5237	6.711,34	8,4693
Barra de Melancia	4,6666	32,89	7,3820
Barra do Chapéu	3,7514	898,38	6,7355
Barra do Juá	2,9683	23.562,17	5,8898
Barragem Lagoa das Pedras	3,3205	1.921,55	6,2875
Belo Jardim	3,4089	731,65	11,2913
Bitury	2,9068	3.500,22	6,7429
Bom Sucesso	2,5435	8.831,12	4,6193
Bom Viver	3,3159	852,77	7,0125
Cacimba Velha	2,7612	7.992,86	3,1599
Caiçara	2,9722	12.316,18	3,0363
Camará	2,5335	11.523,29	7,3419
Chinelo	2,6887	6.023,31	5,3754
Cocos	2,5456	5.957,83	9,1224
Conceição	2,2560	9.069,79	8,9783
Conceição Criolas	2,5150	14.101,29	3,2317
Cruz Salina	3,1797	6.159,05	6,1496
Duas Unas	2,6196	15.281,07	5,5018
Eixo da Serra	3,1898	1.520,20	4,4962
Extrema	2,8460	8.976,66	3,6280
Gurjaú	2,6469	6.023,56	12,9601
José Antônio	2,8613	950,69	11,9338
Juá	3,2018	834,40	8,7801
Jucazinho	3,0490	1.039,88	17,0088
Jureminha	1,9082	46.278,79	4,0607
Lagoa da Pedra	3,0626	2.354,34	7,2606
Laje do Gato	2,3756	5.804,91	9,5282
Livino	2,2355	22.755,53	5,2866
Manuíno	2,2096	9.492,20	11,6643
Monte Orebe	2,3292	7.986,53	6,4135
Morros	3,3266	333,79	8,5640
Oitis	2,4296	2.834,82	15,0960
Parnamirim	2,2998	36.782,13	3,5493
Pau Branco	3,0754	714,57	7,8159
Pau Ferro (Petrolina)	2,4675	15.710,73	4,1586
Pau Ferro (Quipapá)	2,1262	9.319,60	21,6301
Pirapama	2,9574	5.033,02	13,8657
Plínio Amorim	2,8826	12.115,92	9,455
Poço da Areia	2,9965	1.454,74	8,9712

Fonte: O Autor (2024)

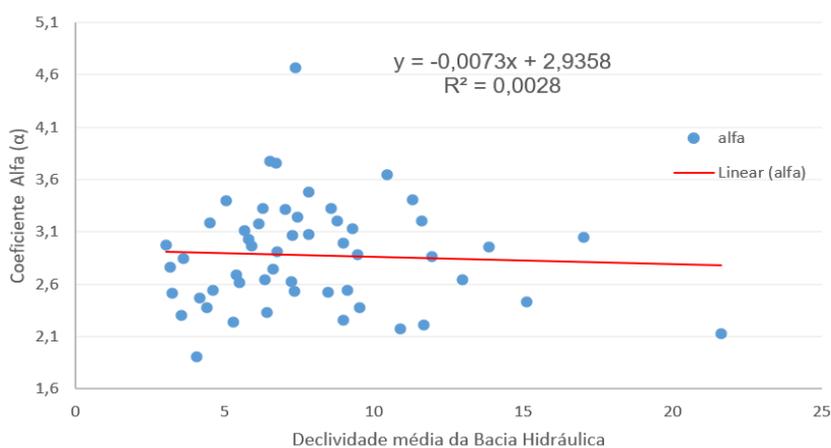
Tabela 12 - Relação entre os coeficientes K e  $\alpha$  com a declividade média da bacia hidráulica  
conclusão

Reservatório	$\alpha$	K	Declividade média da Bacia Hidráulica (%)
Poço da Cruz	3,7763	917,19	6,5161
Poço da Onça	3,3993	1.684,13	5,0607
Prata	2,6280	12.342,75	7,2269
Quebra Unha	2,6391	7.810,45	6,3518
Riacho Pequeno	3,2379	1.568,40	7,4506
Rosário	3,1103	5.994,75	5,6689
Salgueiro	2,1782	36.828,45	10,8658
São Bento	3,0310	1.977,32	5,8149
Serrinha	2,3733	8.746,32	4,3853
Soledade	3,2012	1.661,55	11,6110
Tapacurá	3,1317	2.432,00	9,2704
Terra Nova	2,7401	5.099,00	6,6283
Utinga	3,4839	424,40	7,8009

Fonte: O autor (2024)

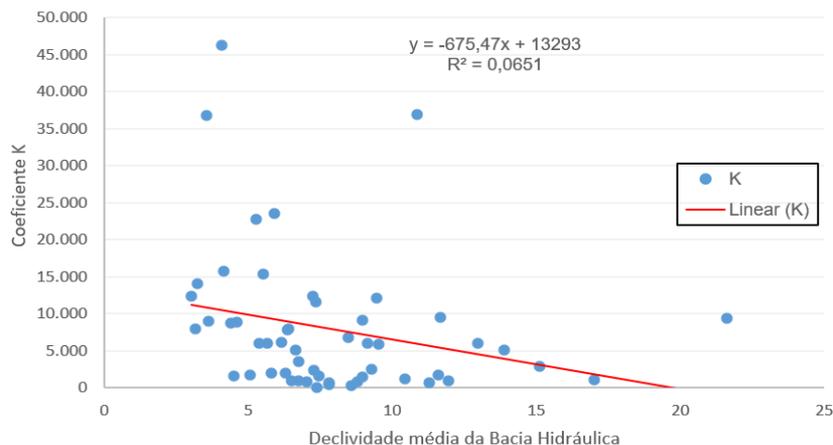
Em seguida, foram elaborados dois gráficos de dispersão mediante uma planilha eletrônica procurando identificar um padrão de correlação (características de semelhança) entre os coeficientes K e  $\alpha$  com a declividade média na bacia hidráulica, como mostra as Figuras 19 e 20.

Figura 19 - Gráfico de dispersão e linha de tendência linear entre os coeficientes K e  $\alpha$  com a declividade média da bacia hidráulica



Fonte: O autor (2024)

Figura 20 - Gráfico de dispersão e linha de tendência linear entre o coeficiente K e a declividade média da bacia hidráulica



Fonte: Autor (2024)

Foi observado na Figura 19 o valor de  $R^2 = 0,0028$  que denota que apenas 0,28% da variação do coeficiente  $\alpha$  é explicado pela variação da declividade média na bacia hidráulica. Na Figura 20 o valor de  $R^2 = 0,0651$  denota que apenas 6,51% da variação do coeficiente K é explicado pela variação da declividade média na bacia hidráulica, ou seja, com os dados utilizados, não se identificou correlação entre os coeficientes K e  $\alpha$  com a declividade média na bacia hidráulica.

#### 4.4.2 Avaliação dos erros percentuais entre os volumes da CAV-MDT e os volumes estimados para cada reservatório

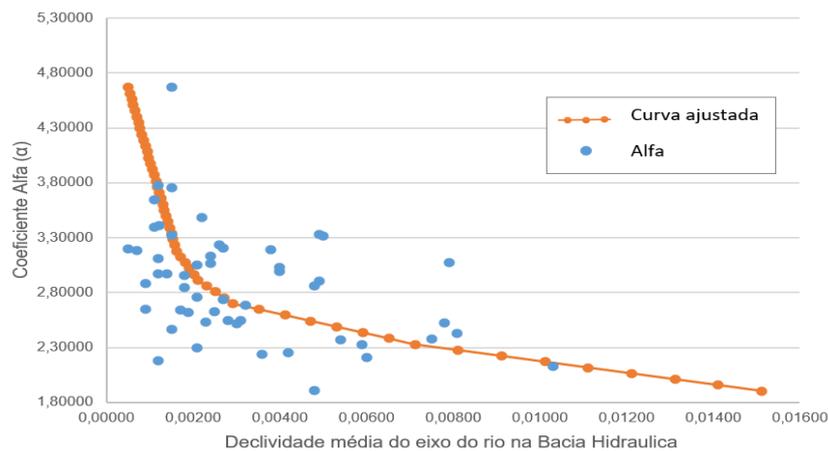
Devido a não correspondência dos coeficientes K e  $\alpha$  com as declividades da bacia hidráulica foram elaborados quatro testes contendo duas métricas cada. Foi por meio das métricas que se escolheu qual o teste tem melhor desempenho e, por conseguinte, os parâmetros K e  $\alpha$  do teste selecionado foram utilizados na ausência de informações.

Dentre as quatro relações citadas acima, a que teve um maior  $R^2$  foi a relação entre coeficiente  $\alpha$  e a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica. Devido a esse fato, foram escolhidos os gráficos que relacionam K e  $\alpha$  com a declividade média do rio na bacia hidráulica para se criar uma curva, que será descrita no teste 1. Em seguida, foram calculados todos os testes.

- Teste 1 - A partir da Figura 18 (gráfico de dispersão entre o coeficiente  $\alpha$  e a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica), foi criada uma curva ajustada onde enquanto os valores da declividade do eixo do rio crescem os valores do coeficiente  $\alpha$  decrescem, gerando a relação de valores tabulares, que representam a correspondência entre  $\alpha$  e a declividade média do eixo do rio, considerando os limites mínimo e máximo de cada parâmetro.

Foi gerada então, a Figura 21 com a relação dos valores de  $\alpha$  e a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica.

Figura 21 - Gráfico de dispersão e curva ajustada entre o coeficiente  $\alpha$  e a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica



Fonte: Autor

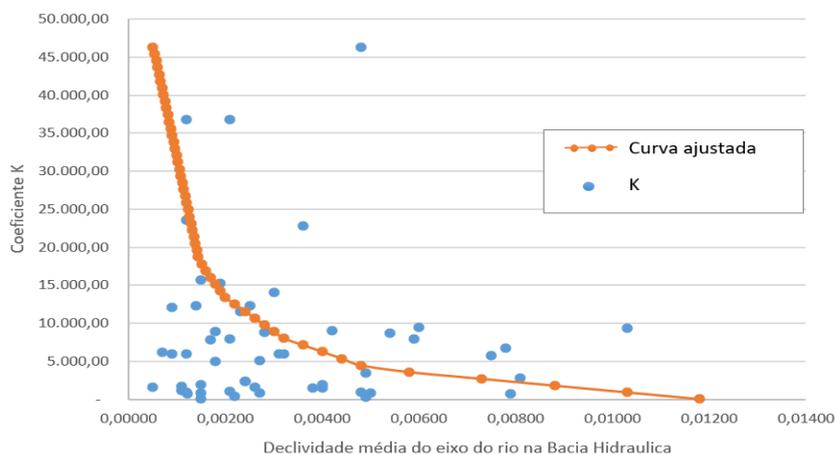
A partir dos dados do gráfico na Figura 21 (curva ajustada, que representa a relação do coeficiente  $\alpha$  e a declividade do eixo) foi realizada uma interpolação linear para estimar o coeficiente  $\alpha$  de cada reservatório, utilizando a declividade média do rio na bacia hidráulica calculada pelo MDT.

A metodologia se repete para o coeficiente K, da seguinte forma:

A partir da Figura 18 (gráfico de dispersão e linha de tendência entre o coeficiente K e a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica) foi criada uma curva ajustada, onde enquanto os valores da declividade média do rio crescem, os valores de K decrescem admitindo os valores mínimo e máximo de cada parâmetro.

Foi gerado então, a Figura 22 com a relação entre os valores de K e a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica.

Figura 22 - Gráfico de dispersão e curva ajustada entre o coeficiente K e a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica



Fonte: O autor

A partir dos dados do gráfico na Figura 22, foi realizada uma interpolação linear para estimar o coeficiente K de cada reservatório, utilizando a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica calculada pelo MDT.

No teste 1, foram utilizados os valores de  $\alpha$  e K estimados para cada reservatório por meio das curvas ajustadas.

- Teste 2 – foi utilizado o valor da média de  $\alpha$  e K referente ao trabalho desenvolvido por Molle (1994):  $K=1.500$  e  $\alpha=2,7$ .
- Teste 3 – foi utilizado o valor da média de  $\alpha$  e K referente a essa pesquisa:  $K= 7.971,07$  e  $\alpha= 2,87$ .
- Teste 4 – foram utilizados os mesmos valores do teste 1, porém com a condição de limitar o valor de K a no máximo 20.000.

A partir dos coeficientes K e  $\alpha$  de cada teste, foi calculado o volume estimado (para cada teste e para cada profundidade), e o erro percentual entre o volume estimado em cada teste e o volume da CAV-MDT.

A métrica 1 foi definida como sendo o erro percentual entre o volume estimado máximo menos o volume máximo da CAV-MDT dividido pelo volume máximo da CAV-MDT.

A métrica 2 foi definida como a média dos erros percentuais de todas as profundidades do reservatório para cada volume estimado.

Na Tabela 13, são apresentados os valores das métricas referentes ao reservatório de Abóboras.

Tabela 13 - Valores de  $\alpha$  e K para os 4 testes com os volumes estimados para as profundidades do reservatório Abóboras e os valores das métricas 1 e 2.

Volume CAV-MDT	Volume estimado 1	Teste 1 %	Volume estimado2	Teste 2 %	Volume estimado 3	Teste 3 %	Volume estimado 4	Teste 4 %
0,00								
4,41	28788,35	652697,04	1500,00	33913,61	7971,07	180649,98	20000,00	453414,74
53,92	420864,84	780435,68	9747,03	17976,83	58596,82	108573,64	292385,53	542158,03
3093,93	2021066,46	65223,60	29128,54	841,47	188217,75	5983,45	1404086,38	45281,97
51390,64	6152739,37	11872,49	63336,38	23,24	430755,97	738,20	4274464,85	8217,59
287585,35	14591195,86	4973,69	115693,85	-59,77	818721,20	184,69	10136875,64	3424,82
747758,86	29546529,27	3851,34	189277,78	-74,69	1383623,06	85,04	20526726,91	2645,10
1426325,09	53650918,28	3661,48	286982,87	-79,88	2156200,15	51,17	37272660,27	2513,20
2390928,41	89948597,50	3662,08	411561,01	-82,79	3166565,87	32,44	62489583,11	2513,61
3713755,54	141887595,00	3720,60	565647,71	-84,77	4444309,34	19,67	98572928,39	2554,27
5401490,81	213312725,36	3849,15	751780,85	-86,08	6018569,19	11,42	148193786,78	2643,57
7450991,62	308459519,31	4039,85	972414,69	-86,95	7918089,90	6,27	214294689,45	2776,06
			139817,00		4745,48		26939,63	97103,90
Teste 1 - Variáveis (tabela)	Teste 2 - Variáveis (Média Molle)		Teste 3 - Variáveis (Média desta pesquisa)			Teste 4 - Variáveis (Tabela, c) K até 20 mil)		
K = 28.788,35	K = 1.500,0		K = 7.971,07			K = 20.000		
$\alpha = 3,8698$	$\alpha = 2,7000$		$\alpha = 2,878$			$\alpha = 3,8698$		

Fonte: O autor

Temos na Tabela 14 os valores das métricas em percentual para cada teste de cada um dos 53 reservatórios.

Tabela 14 - Valores das métricas em percentual para cada teste e cada reservatório continua

Reservatório	M1 - Teste 1 (%)	M1 - Teste 2 (%)	M1 - Teste 3 (%)	M1 - Teste 4 (%)	M2 - Teste 1 (%)	M2 - Teste 2 (%)	M2 - Teste 3 (%)	M2 - Teste 4 (%)
Abóboras	4040	87	6	2776	139817	4745	26940	97104
Araripina	79	65	185	79	69	66	140	69
Barra de Melancia	2566	48	312	2566	6715	173	1647	6715
Barra do Chapéu	874	74	87	874	2346	43	727	2346

Fonte: O Autor (2024)

Tabela 14 - Valores das métricas em percentual para cada teste e cada reservatório  
continuação

Reservatório	M1 - Teste 1 (%)	M1 - Teste 2 (%)	M1 - Teste 3 (%)	M1 - Teste 4 (%)	M2 - Teste 1 (%)	M2 - Teste 2 (%)	M2 - Teste 3 (%)	M2 - Teste 4 (%)
Barra do Júa	662	97	73	490	341	96	73	242
Barragem Lagoa das Pedras	895	74	90	895	1970	161	1033	1970
Belo Jardim	9386	79	101	7369	17296	105	1275	13597
Bitury	58	77	112	58	12144	3223	14657	12144
Bom Sucesso	66	77	75	66	82	73	62	82
Bom Viver	16	57	242	16	2266	610	3492	2266
Cacimba Velha	135	83	27	135	218	57	97	218
Caiçara	396	93	47	396	314	89	27	314
Camara	127	81	52	127	321	45	179	321
Chinelo	44	74	106	44	214	43	253	214
Cocos	104	65	166	104	80	69	104	80
Conceição	5	58	225	5	17	69	115	17
Conceição Criolas	8	85	8	8	17	86	12	17
Cruz Salina	6852	90	26	3321	5703	34	271	2756
Duas Unas	199	87	9	199	239	77	52	239
Eixo da Serra	25	67	161	25	131	45	255	131
Extrema	180	88	4	180	172	83	12	172
Gurjau	12075	72	115	6914	5617	68	107	3194
José Antônio	114	5	778	114	440	73	947	440
Juá	456	27	436	456	3534	436	2693	3534
Jucazinho	689	66	273	689	609	55	262	609
Jureminha	64	85	15	64	78	91	40	78
Lagoa da Pedra	212	70	133	212	874	18	583	874
Laje do Gato	61	47	321	61	57	59	189	57
Livino	31	84	19	31	33	85	4	33
Manuíno	32	40	412	32	44	59	217	44
Monte Orebe	42	57	240	42	46	68	130	46
Morros	97	2	704	97	321	73	1095	321
Oitis	49	21	1002	49	8	19	796	8
Parnamirim	27	91	31	27	8	92	48	8
Pau Branco	62	25	547	62	38	20	504	38
Pau Ferro (Petrolina)	510	85	13	510	266	87	15	266
Pau Ferro (Quipapa)	89	12	993	89	85	17	601	85
Pirapama	358	87	24	358	288	84	25	288
Plinio Amorim	3445	91	34	1942	1764	90	36	974
Poço da Areia	48	54	297	48	66	52	269	66
Poço da Cruz	2354	96	64	1800	2095	91	27	1600
Poço da Onça	4221	77	73	2902	3914	9	409	2688
Prata	62	85	43	62	99	78	61	99
Quebra Unha	490	78	69	490	6616	614	3490	6616
Riacho Pequeno	129	74	114	129	3470	442	2364	3470

Fonte: O Autor (2024)

Tabela 14 - Valores das métricas em percentual para cada teste e cada reservatório conclusão

Reservatório	M1 - Teste 1 (%)	M1 - Teste 2 (%)	M1 - Teste 3 (%)	M1 - Teste 4 (%)	M2 - Teste 1 (%)	M2 - Teste 2 (%)	M2 - Teste 3 (%)	M2 - Teste 4 (%)
Rosário	3066	93	34	2352	20729	1076	6058	16032
Salgueiro	2665	86	13	2041	1135	90	29	857
São Bento	32	62	197	32	13506	2705	11100	13506
Serrinha	43	66	156	43	34	68	112	34
Soledade	33557	60	184	14423	19480	822	3366	8349
Tapacurá	79	86	40	79	153	76	91	153
Terra Nova	104	73	99	104	123	70	100	123
Utinga	450	64	221	450	1138	22	661	1138
<b>Média</b>	<b>1744</b>	<b>68</b>	<b>185</b>	<b>1064</b>	<b>5229</b>	<b>334</b>	<b>1658</b>	<b>3899</b>

Fonte: O autor

Como foi visto na Tabela 14, na métrica 1 e na métrica 2 foi obtido o melhor resultado com os parâmetros de K e  $\alpha$  do teste 2, referente aos estudos de Molle (1994). Assim, quando se tem uma situação com reservatório parcialmente cheio e não houver nenhuma informação dos valores de K e  $\alpha$  será razoável admitir os valores de K=1.500 e  $\alpha=2,7$  estudados por Molle (1994).

#### 4.5 ESTIMATIVA DA CAV PARA RESERVATÓRIOS PARCIALMENTE CHEIO.

Para estimativa do volume submerso serão utilizados os coeficientes K e  $\alpha$  referente ao melhor teste visto no item 3.6.3, que foi o teste com valores de Molle (1994), calculado como volume estimado a partir da equação 1 para esses coeficientes. Foram utilizados alguns dos reservatórios parcialmente cheios listados na Tabela 8. Os valores de K e  $\alpha$  apresentados na Tabela 8, os quais se referem a coeficientes da parte não submersa do reservatório, foram determinados inicialmente com a análise em SIG e posteriormente pela profundidade versus volume da CAV-MDT em planilha eletrônica.

Partindo do pressuposto que Molle (1994) em sua pesquisa teve 99,29% da sua amostra definida com reservatórios de capacidade de até 2 hm<sup>3</sup>, limitou-se o cálculo da estimativa da CAV para 8 (oito) reservatórios parcialmente cheios da nossa lista (Tabela 8) que tem capacidade teórica inicial de até 2 hm<sup>3</sup> como visto na Tabela 15.

Tabela 15 - Reservatórios parcialmente cheios, com coeficiente K e  $\alpha$  referente a parte não submersa

<b>Reservatório</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>K</b>
Barrinha	1,474	161.745,00
Cachoeirinha	1,8053	17.486,00
Monte Alegre	2,45	12.234,00
Muzumbú	1,5418	127.186,00
Rancharia	1,6779	69.384,00
Recreio	2,6585	20.681,00
Umburanas	1,8677	19.740,00
Zumbi	1,4242	78.677,00

Fonte: Autor

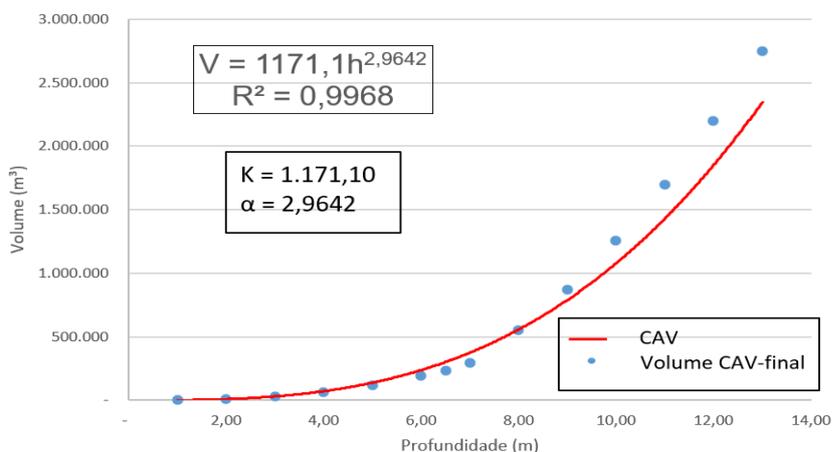
De acordo com a metodologia vista no item 3.7, apresenta-se a seguir as Tabelas 16 a 23 de cálculo das CAV's e as respectivas Figuras 23 a 30 das CAV's com os valores dos coeficientes K e  $\alpha$  de cada um dos 8 reservatórios parcialmente cheios, citados na Tabela 15.

Tabela 16 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle, 1994), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Barrinha - município Cedro

<b>Descrição dos pontos</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Volume estimado (Molle)</b>	<b>Volume (CAV-MDT)</b>	<b>Volume (CAV-Final)</b>
Fundo a Jusante	512,00	-			
	513,00	1,00	1.500,00		1.500,00
	514,00	2,00	9.747,03		9.747,03
	515,00	3,00	29.128,54		29.128,54
	516,00	4,00	63.336,38		63.336,38
	517,00	5,00	115.693,85		115.693,85
	518,00	6,00	189.277,78		189.277,78
Espelho d'água a 50%	518,50	6,50	234.940,19		234.940,19
	519,00	7,00	286.982,87	57.934,54	292.874,73
	520,00	8,00	411.561,01	315.222,33	550.162,52
	521,00	9,00	565.647,71	638.586,72	873.526,91
	522,00	10,00	751.780,85	1.022.306,06	1.257.246,25
	523,00	11,00	972.414,69	1.465.618,08	1.700.558,27
	524,00	12,00	1.229.930,65	1.962.183,25	2.197.123,44
Cota Coroamento	525,00	13,00	1.526.645,88	2.512.963,68	2.747.903,87

Fonte: Autor

Figura 23 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da barragem Barrinha no município Cedro



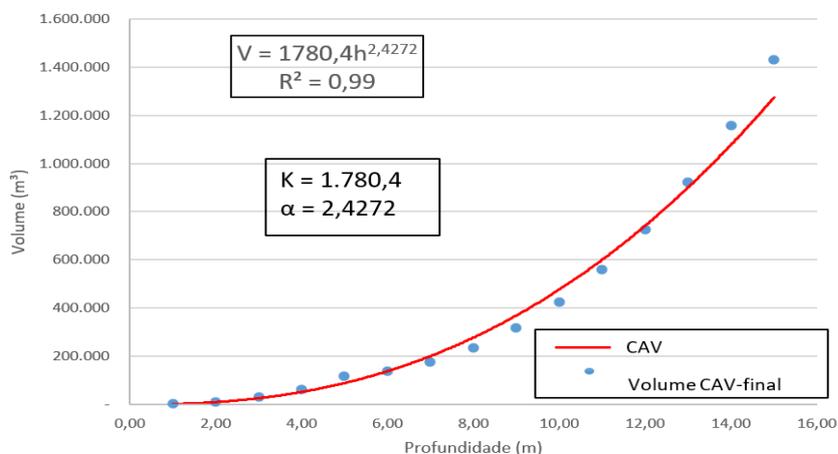
Fonte: Autor

Tabela 17 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Cachoeirinha em Mirandiba

Descrição dos Pontos	Cota (m)	Profundidade e (m)	Volume estimado	Volume CAV-MDT	Volume (CAV-final)
Fundo a Jusante	493,00	0,00	-	-	-
	494,00	1,00	1.500,00	-	1.500,00
	495,00	2,00	9.747,03	-	9.747,03
	496,00	3,00	29.128,54	-	29.128,54
	497,00	4,00	63.336,38	-	63.336,38
Espelho d'água-33%	498,00	5,00	115.693,85	-	115.693,85
	499,00	6,00	189.277,78	22.307,68	138.001,53
	500,00	7,00	286.982,87	61.020,51	176.714,36
	501,00	8,00	411.561,01	118.776,72	234.470,57
	502,00	9,00	565.647,71	200.216,67	315.910,52
	503,00	10,00	751.780,85	307.984,43	423.678,28
	504,00	11,00	972.414,69	443.002,47	558.696,32
	505,00	12,00	1.229.930,65	608.143,46	723.837,31
	506,00	13,00	1.526.645,88	805.777,04	921.470,89
	507,00	14,00	1.864.820,16	1.040.254,26	1.155.948,11
Cota de coroamento	508,00	15,00	2.246.661,58	1.314.459,13	1.430.152,98

Fonte: Autor

Figura 24 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da barragem Cachoeirinha no município de Mirandiba



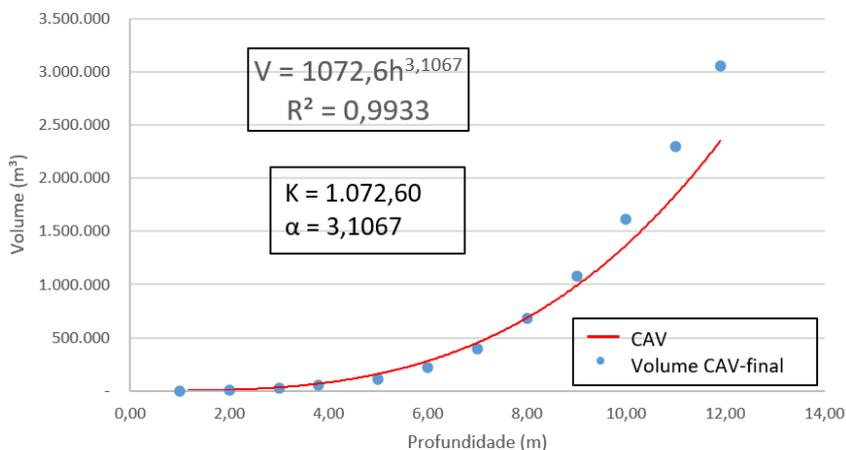
Fonte: Autor

Tabela 18 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Monte Alegre em Floresta

Descrição dos pontos	Cota (m)	Profundidade (m)	Volume estimado (Molle)	Volume CAV-MDT	Volume (CAV-final)
	362,00				
Fundo a Jusante	363,00	1,00	1.500,00		1.500,00
	364,00	2,00	9.747,03		9.747,03
	365,00	3,00	29.128,54		29.128,54
Espelho d'água (40%)	365,80	3,80	55.145,11		55.145,11
	367,00	5,00	115.693,85	50.273,57	105.418,68
	368,00	6,00	189.277,78	161.072,97	216.218,08
	369,00	7,00	286.982,87	343.098,17	398.243,28
	370,00	8,00	411.561,01	626.252,64	681.397,75
	371,00	9,00	565.647,71	1.026.056,33	1.081.201,44
	372,00	10,00	751.780,85	1.563.362,50	1.618.507,61
	373,00	11,00	972.414,69	2.246.314,51	2.301.459,62
Cota de coroamento	373,90	11,90	1.202.452,85	3.001.311,87	3.056.456,98

Fonte: Autor

Figura 25 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da Barragem Monte Alegre no município de Floresta



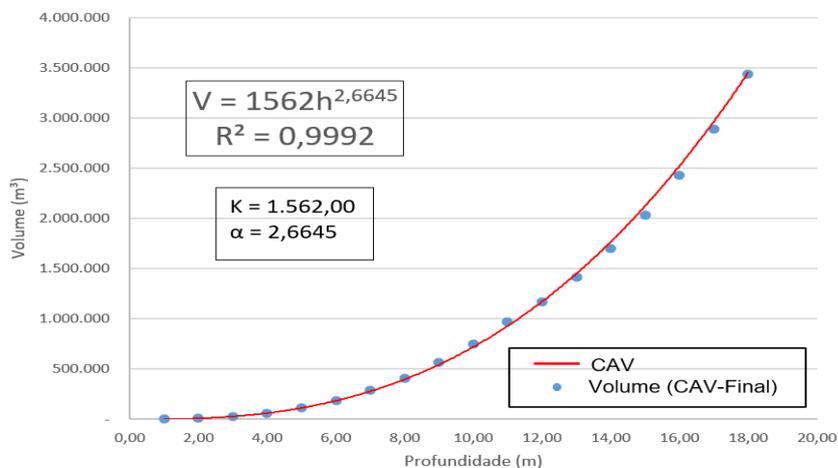
Fonte: Autor

Tabela 19 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Muzumbú em Itambé

Descrição dos pontos	Cota (m)	Profundidade (m)	Volume estimado (Molle)	Volume (CAV-MDT)	Volume (CAV-Final)
Cota de Fundo	101,00				
	102,00	1,00	1.500,00		1.500,00
	103,00	2,00	9.747,03		9.747,03
	104,00	3,00	29.128,54		29.128,54
	105,00	4,00	63.336,38		63.336,38
	106,00	5,00	115.693,85		115.693,85
	107,00	6,00	189.277,78		189.277,78
	108,00	7,00	286.982,87		286.982,87
	109,00	8,00	411.561,01		411.561,01
	110,00	9,00	565.647,71		565.647,71
	111,00	10,00	751.780,85		751.780,85
Espelho d'água (61%)	112,00	11,00	972.414,69		972.414,69
	113,00	12,00	1.229.930,65	197.211,94	1.169.626,63
	114,00	13,00	1.526.645,88	443.540,96	1.415.955,65
	115,00	14,00	1.864.820,16	730.206,58	1.702.621,27
	116,00	15,00	2.246.661,58	1.062.578,09	2.034.992,78
	117,00	16,00	2.674.331,33	1.454.845,46	2.427.260,15
	118,00	17,00	3.149.947,73	1.917.458,51	2.889.873,20
Cota de coroamento	119,00	18,00	3.675.589,67	2.467.438,18	3.439.852,87

Fonte: Autor

Figura 26 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da barragem Muzumbú no município de Itambé



Fonte: Autor

Tabela 20 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Rancharia em Araripina

continua

Descrição dos Pontos	Cota (m)	Profundidade (m)	Volume estimado (Molle)	Volume CAV-MDT	Volume (CAV-final)
Fundo a Jusante	575,50	-			
	576,00	0,50	230,84		230,84
	576,50	1,00	1.500,00		1.500,00
	577,00	1,50	4.482,68		4.482,68
	577,50	2,00	9.747,03		9.747,03
	578,00	2,50	17.804,48		17.804,48
	578,50	3,00	29.128,54		29.128,54
Espelho d'água a 33%	578,63	3,13	32.663,37		32.663,37
	579,00	3,50	44.164,67	3.181,14	35.844,51
	579,50	4,00	63.336,38	45.645,65	78.309,02
	580,00	4,50	87.049,25	99.204,86	131.868,23
	580,50	5,00	115.693,85	161.834,53	194.497,90
	581,00	5,50	149.647,86	236.724,92	269.388,29
	581,50	6,00	189.277,78	324.361,60	357.024,97
	582,00	6,50	234.940,19	422.529,64	455.193,01
	582,50	7,00	286.982,87	532.037,75	564.701,12
	583,00	7,50	345.745,61	654.744,52	687.407,89
	583,50	8,00	411.561,01	791.268,74	823.932,11
	584,00	8,50	484.755,07	942.318,71	974.982,08
	584,50	9,00	565.647,71	1.109.519,02	1.142.182,39
	585,00	9,50	654.553,26	1.297.193,87	1.329.857,24
	585,50	10,00	751.780,85	1.506.787,81	1.539.451,18
	586,00	10,50	857.634,74	1.739.263,49	1.771.926,86
	586,50	11,00	972.414,69	1.981.855,67	2.014.519,04

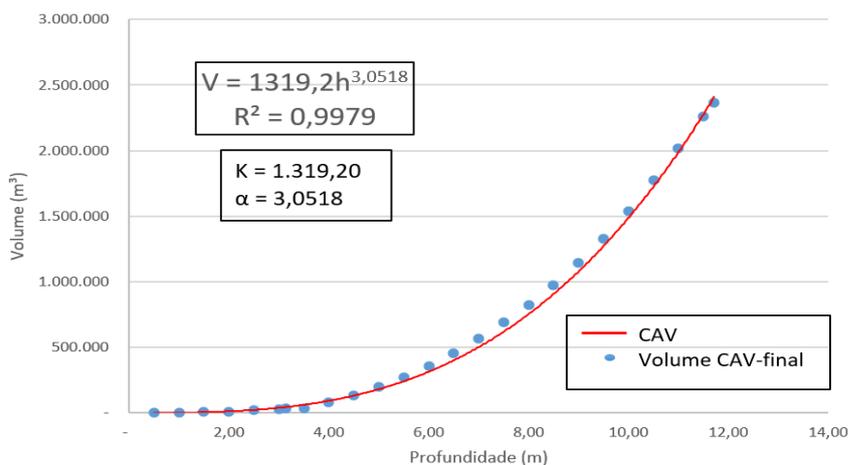
Fonte: O Autor (2024)

Tabela 20 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Rancharia em Araripina  
conclusão

Descrição dos Pontos	Cota (m)	Profundidade (m)	Volume estimado (Molle)	Volume CAV-MDT	Volume (CAV-final)
	587,00	11,50	1.096.416,16	2.224.438,57	2.257.101,94
Cota de coroamento	587,22	11,72	1.153.973,43	2.331.174,93	2.363.838,30

Fonte: O Autor (2024)

Figura 27 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da barragem Rancharia em Araripina



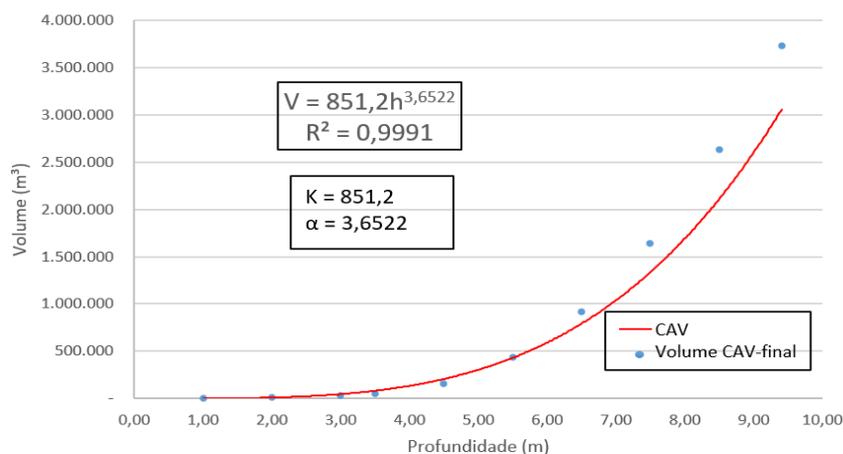
Fonte: Autor

Tabela 21 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Recreio em Lagoa Grande

Descrição dos Pontos	Cota (m)	Profundidade (m)	Volume estimado (Molle)	Volume (CAV-MDT)	Volume (CAV-final)
Fundo a Jusante	383,50				
	384,50	1,00	1.500,00		1.500,00
	385,50	2,00	9.747,03		9.747,03
Espelho d'água a 32%	386,50	3,00	29.128,54		29.128,54
	387,00	3,50	44.164,67	19.336,10	48.464,64
	388,00	4,50	87.049,25	132.596,90	161.725,44
	389,00	5,50	149.647,86	408.856,19	437.984,73
	390,00	6,50	234.940,19	887.417,04	916.545,58
	391,00	7,50	345.745,61	1.608.789,63	1.637.918,17
	392,00	8,50	484.755,07	2.603.556,81	2.632.685,35
Cota de Coroamento	392,91	9,41	637.945,01	3.702.994,21	3.732.122,75

Fonte: Autor

Figura 28 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da barragem Recreio em Lagoa Grande



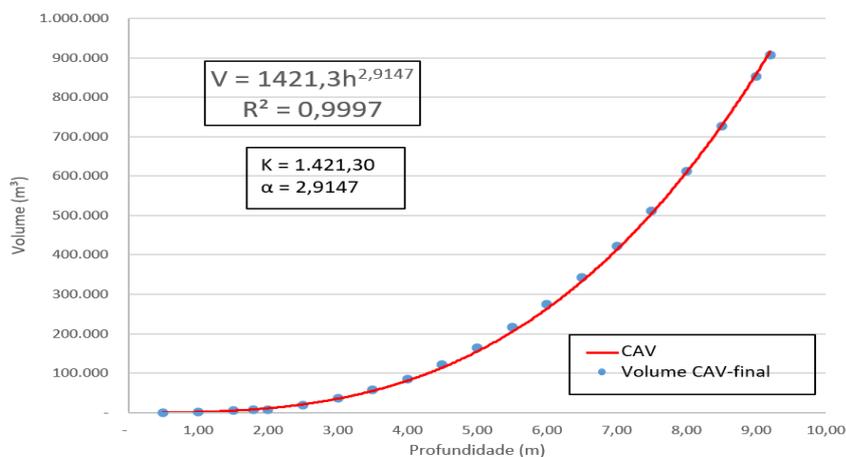
Fonte: Autor

Tabela 22 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Umburanas no município de Custódia

Descrição dos Pontos	Cota (m)	Profundidade (m)	Volume estimado (Molle)	Volume CAV-MDT	Volume (CAV-final)
Fundo a Jusante	524,50	-			
	525,00	0,50	230,84		230,84
	525,50	1,00	1.500,00		1.500,00
Espelho d'água a 17%	526,00	1,50	4.482,68		4.482,68
	526,29	1,79	7.224,28		7.224,28
	526,50	2,00	9.747,03	75,14	7.299,42
	527,00	2,50	17.804,48	10.644,04	17.868,32
	527,50	3,00	29.128,54	28.076,90	35.301,18
	528,00	3,50	44.164,67	49.382,53	56.606,81
	528,50	4,00	63.336,38	77.688,91	84.913,19
	529,00	4,50	87.049,25	114.206,49	121.430,77
	529,50	5,00	115.693,85	157.889,68	165.113,96
	530,00	5,50	149.647,86	208.726,14	215.950,42
	530,50	6,00	189.277,78	267.573,94	274.798,22
	531,00	6,50	234.940,19	335.736,02	342.960,30
	531,50	7,00	286.982,87	414.287,48	421.511,76
	532,00	7,50	345.745,61	504.105,66	511.329,94
	532,50	8,00	411.561,01	605.847,40	613.071,68
	533,00	8,50	484.755,07	720.098,25	727.322,53
	533,50	9,00	565.647,71	846.557,40	853.781,68
Cota de Coroamento	533,70	9,20	600.230,96	900.678,91	907.903,19

Fonte: Autor

Figura 29 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da barragem Umburanas no município de Custodia



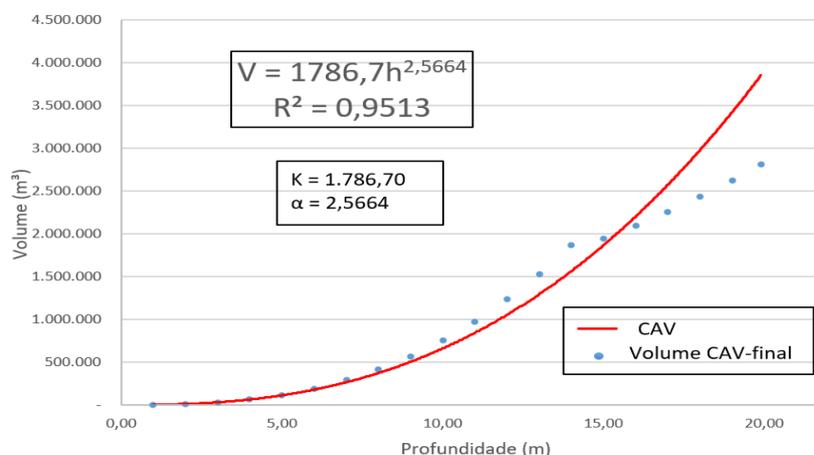
Fonte: Autor

Tabela 23 - Cálculo das cotas, volume estimado (Molle), volume da CAV-MDT para cada cota da parte descoberta e o volume da CAV-final no reservatório Zumbi no município de Camutanga

Descrição dos Pontos	Cota (m)	Profundidade (m)	Volume estimado (Molle)	Volume (CAV-MDT)	Volume (CAV-final)
Fundo a Jusante	89,00	-			
	90,00	1,00	1.500,00		1.500,00
	91,00	2,00	9.747,03		9.747,03
	92,00	3,00	29.128,54		29.128,54
	93,00	4,00	63.336,38		63.336,38
	94,00	5,00	115.693,85		115.693,85
	95,00	6,00	189.277,78		189.277,78
	96,00	7,00	286.982,87		286.982,87
	97,00	8,00	411.561,01		411.561,01
	98,00	9,00	565.647,71		565.647,71
	99,00	10,00	751.780,85		751.780,85
	100,00	11,00	972.414,69		972.414,69
	101,00	12,00	1.229.930,65		1.229.930,65
	102,00	13,00	1.526.645,88		1.526.645,88
Espelho d'água a 70,35%	103,00	14,00	1.864.820,16		1.864.820,16
	104,00	15,00	2.246.661,58	80.823,98	1.945.644,14
	105,00	16,00	2.674.331,33	230.160,23	2.094.980,39
	106,00	17,00	3.149.947,73	391.465,01	2.256.285,17
	107,00	18,00	3.675.589,67	567.269,45	2.432.089,61
	108,00	19,00	4.253.299,66	759.258,32	2.624.078,48
Cota Coroamento	108,90	19,90	4.819.417,67	946.002,87	2.810.823,03

Fonte: Autor

Figura 30 - Gráfico da Profundidade versus volume (CAV) da barragem Zumbi no município de Camutanga



Fonte: Autor

A seguir vemos na Tabela 24 os valores dos coeficientes K e  $\alpha$  depois da aplicação da metodologia para a construção da CAV nos reservatórios parcialmente cheios, ou seja, coeficientes K e  $\alpha$  únicos para toda a profundidade do reservatório.

Tabela 24 – Valores dos coeficientes K e  $\alpha$  depois da aplicação da metodologia da construção da CAV, em reservatórios parcialmente cheios

<b>Reservatório</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>K</b>
Barrinha	2,9642	1.171,10
Cachoeirinha	2,4272	1.780,40
Monte Alegre	3,1067	1.072,60
Muzumbú	2,6645	1.562,00
Rancharia	3,0518	1.319,20
Recreio	3,6522	851,20
Umburanas	2,9147	1.421,30
Zumbi	2,5664	1.786,70

Fonte: Autor

#### 4.6 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Assim como os pesquisadores Nascimento (2017), Avisse (2017), Oliveira (2018), Costa (2019) e Moura (2021) usaram o sensoriamento remoto para atualizar as CAV's e estimar a capacidade de armazenamento, esta pesquisa também se utilizou de ferramentas relacionadas ao sensoriamento remoto para obter a CAV e o armazenamento de reservatórios.

Moura (2021) procurou estimar coeficientes geométricos dos reservatórios através de uma associação com dados do relevo do estado, oriundo do plano estadual de recursos hídricos por uma equipe multidisciplinar. Como a não correlação linear desta pesquisa entre os coeficientes  $K$ ,  $\alpha$  e dados de declividade foram elaborados na própria pesquisa, talvez fosse necessária uma análise não linear mais criteriosa, utilizando de redes neurais para uma possível correlação.

Um aspecto pela não correlação espacial entre os coeficientes  $K$ ,  $\alpha$  e as declividades foi a amostra reduzida de dados de reservatórios utilizados na pesquisa. Devido a quantidade de reservatórios utilizada nessa pesquisa ter sido menor que comparado com a pesquisa de Molle (1994), verificou-se que a média do valor do coeficiente  $K$  de Molle (1994) teve melhor desempenho dentre os quatro testes, em comparação à média do valor de  $K$  nessa pesquisa.

Molle (1994) em suas considerações faz uma caracterização entre os coeficientes geométricos  $K$  e  $\alpha$ , com aspectos do relevo. Devido a essa consideração deve-se buscar outras metodologias no intuito de correlacionar os coeficientes geométricos e aspectos do relevo.

A correlação dos coeficientes geométricos  $K$  e  $\alpha$  com a declividade pode não ser linear. Com uso de redes neurais ou métodos convencionais não lineares pode-se chegar a um melhor resultado. Com o uso de machine learning pode-se estimar os valores de  $K$  e  $\alpha$  a partir da declividade média da região em que o reservatório está inserido. Por exemplo, através da elaboração do mapa de relevo do estado de Pernambuco em escala adequada e a partir da classificação adotada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e EMBRAPA (Plano 0 a 3%, suave ondulado 3 a 8%, ondulado 8 a 20%, forte ondulado 20 a 45%, montanhoso 45 a 75% e escarpado > 75%), tomando como base o modelo digital do terreno do PE3D onde cada pixel (1 metro por 1 metro) teria um atributo ou classificação da declividade adotada. Com esta informação seria possível fazer uma análise espacial entre o limite da bacia hidráulica de cada reservatório e a quantidade de pixel que esse limite intercepta, e o percentual de cada classe interceptada na bacia hidráulica. Este resultado pode ser interpretado a partir da caracterização entre os coeficientes  $K$ ,  $\alpha$  e o relevo mostrado na Figura 9 dessa pesquisa.

A partir da não correlação entre as variáveis exploratórias, declividade da bacia hidráulica e a declividade do eixo do rio com os coeficientes  $\alpha$  e  $K$  da equação de

potência foram realizadas outras análises. Daí observou-se que para o teste 2 com os coeficientes de Molle (1994) foi identificado o melhor resultado, ou seja, o melhor valor da métrica 1 e o menor valor da métrica 2. Com isso, foi possível definir a CAV dos reservatórios parcialmente cheios com o uso dos parâmetros médios  $K$  e  $\alpha$  de Molle (1994) para a parte submersa do reservatório, e na parte descoberta do reservatório foi usado o cálculo do volume com o uso do GIS.

Foi observado nos 8 gráficos das figuras de 23 a 30 uma tendência de quanto maior for (em metros) o 1º ramo do gráfico (parte submersa do reservatório), em relação ao 2º ramo (parte descoberta do reservatório) haverá um maior desalinhamento entre os pontos e a linha de tendência do gráfico. O motivo para este comportamento é que, como o 1º ramo da curva (parte submersa do reservatório) foi definida pelos parâmetros médios de Molle (1994), que é uma aproximação da realidade topo batimétrica do reservatório, quanto maior for esse trecho maiores serão os erros gerais do processo. É citado como exemplo os gráficos dos reservatórios de Barrinha (Figura 23), Cachoeirinha (Figura 24) e Zumbi (Figura 30) que possuem um nítido desalinhamento entre o 1º ramo do gráfico (parte submersa do reservatório) e a linha de tendência do gráfico. E também entre o 2º ramo do gráfico (parte descoberta do reservatório) e a sua linha de tendência. Na Tabela 25, apresenta-se a estimativa do volume máximo e a CAV de 8 reservatórios parcialmente cheios citados na Tabela 8.

Tabela 25 – Definição da CAV e do volume estimado para a capacidade máxima dos reservatórios parcialmente cheios, com os coeficientes  $K$  e  $\alpha$  referente a parte submersa e não submersa

<b>Barragem</b>	<b>CAV</b>	<b>Volume Estimado (M³)</b>
Monte Alegre	$V = 1072,6h^{3,1067}$	3.056.456,98
Recreio	$V = 851,2h^{3,6522}$	3.732.122,75
Cachoeirinha	$V = 1780,4h^{2,4272}$	1.430.152,98
Barrinha	$V = 1171,1h^{2,9642}$	2.747.903,87
Muzumbu	$V = 1562h^{2,6645}$	3.439.852,87
Zumbi	$V = 1786,7h^{2,5664}$	2.810.823,03
Rancharia	$V = 1319,2h^{3,0518}$	2.363.838,30
Umburanas	$V = 1421,3h^{2,9147}$	907.903,19

Fonte: Autor

A partir das equações das CAV's citadas na Tabela 25, foi realizada a estatística descritiva dos coeficientes  $K$  e  $\alpha$  para os 8 (oito) reservatórios parcialmente

cheios. Na Tabela 26, apresenta-se a estatística descritiva dos valores de K e  $\alpha$  referente a parte submersa e não submersa.

Tabela 26 - Análise da estatística descritiva dos valores de K e  $\alpha$ , para os 8 reservatórios parcialmente cheios

	$\alpha$	K
Média	2,9184625	1370,5625
Erro padrão	0,135189869	118,117848
Mediana	2,93945	1370,25
Desvio padrão	0,382374693	334,087726
Variância da amostra	0,146210406	111614,608
Curtose	1,021099473	-0,9979875
Assimetria	0,768556197	-0,1357119
Intervalo	1,225	935,5
Mínimo	2,4272	851,2
Máximo	3,6522	1786,7
Soma	23,3477	10964,5
Contagem	8	8
Nível de confiança (95,0%)	0,319673243	279,304328

Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÕES

A pesquisa tinha como intuito usar ferramentas de sensoriamento remoto para a elaboração de curvas cota-área-volume em reservatórios secos e parcialmente cheios, utilizando-se de imagens oriundo da batimetria de reservatórios e do sensor lidar, que gera modelos tridimensionais do terreno.

A precisão de uma curva que relaciona cota, área e volume é fundamental no planejamento dos recursos hídricos devido à variedade de necessidades existentes, como na operação dos reservatórios, simulação da evaporação da água, dimensionamento de vertedouro, entre outros.

Devido ao sensor Lidar ter gerado as imagens raster a 10 anos atrás, é recomendado nas próximas pesquisas sobre o assunto, a introdução da modelagem dos sedimentos nas bacias hidráulicas devido ao possível assoreamento nos reservatórios.

A pesquisa também procurou investigar possíveis correlações entre as características de relevo dos reservatórios com relação a geométricos dos mesmos.

A pesquisa criou uma base de dados de 53 reservatórios em Pernambuco com a correspondência profundidade versus volume, ou seja, relação profundidade-volume atualizados a partir das imagens raster.

As tentativas de correlacionar, através da regressão linear, características físicas dos reservatórios como a declividade média do eixo do rio na bacia hidráulica e a declividade média da bacia hidráulica com os parâmetros  $K$  e  $\alpha$  não foram bem-sucedidas devido a amostra reduzida de dados utilizada. Doravante a pesquisa procurou definir 4 (quatro) testes com diferentes valores dos coeficientes  $K$  e  $\alpha$  para melhor estimar a CAV dos reservatórios quando da ausência de parâmetros geométricos.

Esta pesquisa estimou o volume submerso e a CAV dos reservatórios que se encontram parcialmente cheios através da estimativa da profundidade submersa e do uso dos parâmetros médios  $K$  e  $\alpha$  oriundo de Molle (na parte submersa do açude) e na parte descoberta do reservatório foi usado o cálculo do volume com uso do GIS, melhorando assim o suporte a decisão para gestores.

Assim, em reservatórios parcialmente cheios de água e com dados desconhecidos dos parâmetros, é conveniente e preciso utilizar os coeficientes

médios de  $K$  e  $\alpha$  propostos por Molle (1994) para calcular de maneira confiável tanto a capacidade de armazenamento do reservatório quanto a sua curva cota-volume.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. **Monitoramento Hidrológico**. 2022. <https://www.apac.pe.gov.br/519-climatologia/>. Recife. 2022.
- ARAÚJO, Everton c. de, URIBE-OPAZO, Miguel A. e JOHANN, Jerry Adriani. **Modelo de regressão espacial para estimativa da produtividade da soja associada a variáveis agro meteorológicas na região oeste do estado do Paraná**. Engenharia Agrícola [online], 2014, Artigo científico, Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000200010>, 2014.
- ABILEAH, R.; VIGNUDELLI, S.; SCOZZARI, A. **A completely remote sensing approach to monitoring reservoirs water volume**. International Water Technology Journal, v. 1, n. 1, p. 59-72, 2011.
- AVISSE, Nicolas & Tilmant, AMAURY & MULLER, Marc & Zhang, Hua. (2017). **Monitoring small reservoirs' storage with satellite remote sensing in inaccessible areas**. Hydrology and Earth System Sciences. 21. 6445-6459. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6445-2017>.
- BACALHAU, J. R.; RIBEIRO NETO, A.; OLIVEIRA, L. M. M. **Aplicação de índice de vegetação no monitoramento da seca: açude Algodões no sertão pernambucano**. Journal of Environmental Analysis and Progress, v. 2, p. 283-293, 2017.
- BAUP, F., FRAPPART, F., MAUBANT, J. **Combining high-resolution satellite images and altimetry to estimate the volume of small lakes**. Hydrology and Earth System Sciences, v. 18, p. 2007–2020, 2014. doi:10.5194/hess-18-2007-2014.
- COLLISCHONN, B.; CLARKE, R. T. **Estimativa e incerteza de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 22, p.719-727, 2016.
- COSTA, F. A. **Sensoriamento Remoto Aplicado ao Monitoramento de Reservatório no Semiárido do Nordeste: Poço da Cruz (Pernambuco)**. 2019. Dissertação de Mestrado em Gestão e regulamentação de recursos hídricos. Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Recife, 2019.
- 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 de congresso ABRH, Porto Alegre, 2015.
- CIRILO, J. A. **Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido**. In: Estudos avançados. v. 22, n.63, p. 61-82, São Paulo - SP, 2008.
- Determinação dos polinômios cota x área x volume utilizando a sonda acoustic doppler profiler (adp) no reservatório de barra bonita – sp**. Minerva, 2(1): 79-90

ELMI, O. Dynamic water masks from optical satellite imagery. Stuttgart: University of Stuttgart, 2019. 183 p. Tese de doutorado.

N. El-Sheimy, R. Sharaf e A. Noureldin, A. Osman, "Integração INS/GPS online com uma rede neural de função de base radial", IEEE Aerosp. Elétron. Sist. Mag. , vol. 20, não. 3, pp. 8-14, março de 2005.

FONTES, A. S.; ZUCCHI, M. DO R.; MEDEIROS, Y. D. P.; AZEVEDO, A. E. G. de. **Avaliação dos fatores intervenientes no processo de salinização em reservatórios superficiais do semiárido brasileiro.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, p. 708–721, 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.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. **Mapa Das Regiões Geográficas de Pernambuco.** 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/divisao-egional/15778-divisoes-regionais-do-brasil.html?edicao=16163&t=downloads>. Acesso em: 16 de janeiro de 2024.

MAGALHÃES, Monica de Avelar Figueiredo Mafra e MEDRONHO, Roberto de Andrade. **Análise espacial da Tuberculose no Rio de Janeiro no período de 2005 a 2008 e fatores socioeconômicos associados utilizando microrredo e modelos de regressão espaciais globais.** Ciência & Saúde Coletiva [online]. 2017, v. 22, n. 3 [acessado 27 dezembro 2022], pp. 831-840. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1413-81232017223.24132015>>. ISSN 1678-4561. <https://doi.org/10.1590/1413-81232017223.24132015>.

MARTINS, et al. **“Utilização de imagens CBERS para mapeamento dos espelhos d’água do Brasil”**, 2007. Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p.969-976. 21-26 abril, 2007.

Manual do pequeno açude, por François Molle e Eric Cadier. Recife, SUDENE-DPG-PRN-DPP-WR, 1992.

MELLO, Flavio Miguez de. **A História Das Barragens No Brasil, Séculos XIX, XX E XXI: Cinquenta anos do comitê brasileiro de barragens.** 2011. Rio de Janeiro CBDB, 2011. 524 p.

McFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, vol 17, nº 7, 1425-1432, 1996.

MOLLE, François. **Geometria dos Pequenos Açudes.** SUDENE, DPG. PRN. HME, 1994.126p. Recife.

MOURA, M. P.; FERREIRA, M. E. S.; RIBEIRO NETO, E. **Relação volume em função da área superficial de reservatórios pernambucanos.** XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 2021.

NASCIMENTO, F. V. **Produtos de sensoriamento remoto de alta resolução aplicados à caracterização volumétrica de reservatórios de água.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPE, Recife, 2017.

Nash, JE e Sutcliffe, JV (1970) Previsão de vazão de rios por meio de modelo conceitual. Parte 1 — Uma discussão de princípios. *Jornal de Hidrologia*, 10, 282-290. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

OLIVEIRA, Tairone & Collischonn, Bruno. (2018). Estimativa Remota Da Capacidade De Armazenamento Do Reservatório Do Descoberto. Programa de Iniciação Científica - PIC/UniCEUB - Relatórios de Pesquisa. Dez. 2018. Doi: <https://doi.org/10.5102/pic.n3.2017.5772>. Acesso em: 6 fev. 2024.

PERNAMBUCO. Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco. Recife, 1998.

RODRIGUES, L.N., LIEBE, J. Small reservoirs depth-area-volume relationships in Savannah Regions of Brazil and Ghana. *Water Resources and Irrigation Management*, v.2, n.1, 1-10, 2013.

SANTIAGO, Sandra Maria Neri. Guia para elaboração e apresentação dos elementos pré-textuais de teses e dissertações conforme as normas da ABNT. Dissertação de Mestrado. DGDTI da UFPE. Recife, 2018, 56p.

SOBRAL, Maria do Carmo et al. Geotecnologias na gestão de reservatórios: uma revisão e uma proposta de integração. *Eng. Sanitária Ambiental*, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017111054>. Rio de Janeiro, v. 22, n.5, p. 841-852, Oct. 2017.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa De Declividade Em Percentual Do Relevo Brasileiro.** 2010. Disponível em: [https://www.sgb.gov.br/publique/media/geodiversidade/mapa\\_declive/nota\\_tecnica\\_mapa\\_declive.pdf](https://www.sgb.gov.br/publique/media/geodiversidade/mapa_declive/nota_tecnica_mapa_declive.pdf). Acesso em: 16 de janeiro de 2024.

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.

TULIO, S.; GAMARO, P. E. M.; MALDONADO, L. H. **Avaliação do uso do medidor de vazão doppler com feixe vertical em levantamentos batimétricos.** 2011. In *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Maceió/AL. p. 12. 2011.

Wolf, PR e Dewitt, BA (2000) *Elementos de Fotogrametria com Aplicações em GIS*. 3ª Edição.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006.

ZHANG, S.; FOERSTER, S.; MEDEIROS, P.; ARAÚJO, J.C.; MOTAGH, M.; WASKE, B. **Bathymetric survey of water reservoirs in north-eastern Brazil based on TanDEM-X satellite data.** 2016, *The Science of the Total Environment*, v. 571, p.575-593, 2016. PMID:27418521. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.02>