



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

**VLADIMIR FONSECA NASCIMENTO**

**PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO DE ALTA RESOLUÇÃO  
APLICADOS À CARACTERIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DE RESERVATÓRIOS  
DE ÁGUA**

RECIFE  
2017

Vladimir Fonseca Nascimento

**PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO DE ALTA  
RESOLUÇÃO APLICADOS À CARACTERIZAÇÃO  
VOLUMÉTRICA DE RESERVATÓRIOS DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Alfredo Ribeiro Neto,  
D.Sc.

**Recife**

2017

Catálogo na fonte  
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

N244p Nascimento, Vladimir Fonseca.  
Produtos de sensoriamento remoto de alta resolução aplicados à caracterização volumétrica de reservatórios de água / Vladimir Fonseca Nascimento. – Recife, 2017.  
103 f.: il., fig. tab.  
  
Orientador: Prof. Alfredo Ribeiro Neto, D.Sc.  
  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2017.  
Inclui referências.  
  
1. Engenharia Civil. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Bacia do Rio Pajeú. 3. Bacia do Riacho Quixaba. 4. Geoprocessamento. 5. Sistema de informações Geográficas (SIG). 6. Modelo Digital de Terreno (MDT). 7. LiDAR. I. Ribeiro Neto, Alfredo (Orientador). II. Título.

624 CDD (22. Ed.)

UFPE-BIBCTG/2017-263



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO DE ALTA RESOLUÇÃO  
APLICADOS À CARACTERIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DE RESERVATÓRIOS  
DE ÁGUA**

defendida por

Vladimir Fonseca Nascimento

Considera o candidato APROVADO

Recife, 22 de fevereiro de 2017

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto – UFPE  
(Orientador)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leijdane Maria Maciel de Oliveira – UFPE  
(Examinadora externa)

---

Prof. Dr. José Almir Cirilo – UFPE  
(Examinador interno)

Dedico este trabalho ao *TODO* que me permitiu realizar a incrível experiência de viver, aos meus pais por todo o carinho e dedicação incondicional e ao meu filho que irá chegar e transformar minha vida.

# AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que me apoiou e contribuiu diretamente e indiretamente nessa jornada e namorada pela paciência e suporte.

Agradeço de modo especial ao meu orientador Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto, pela confiança e orientação deste trabalho.

A todos os professores do programa de mestrado em recursos hídricos, pelos conhecimentos e experiências transmitidas.

A Secretaria do PPGEC/UFPE, em nome da Secretária da Coordenação Andréa Negromonte Vieira Matoso, pelo apoio administrativo e disponibilidade.

A meus amigos Fellipe Alves, Cristiane Ribeiro e Paulo Abadie que foram essenciais e contribuíram diretamente para a conclusão desse trabalho através de apoio técnico, incentivo e amizade.

Agradeço à Secretaria de Desenvolvimento Econômico (SDEC), em nome do Dr. José Almir Cirilo e Dr.<sup>a</sup> Lorenzza Leite, pelo apoio, amizade e informações disponibilizadas.

Agradeço também à Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) pelos dados fornecidos que contribuíram fortemente para os resultados encontrados nesse trabalho.

Por último, gostaria de deixar minha gratidão a todos os meus amigos e familiares que são de grande importância na minha vida e fazem parte do que eu sou hoje.

*“Dificuldades preparam pessoas comuns para destinos extraordinários”*

**C. S. Lewis**

# RESUMO

Resumo da Tese apresentada ao PPGEC/UFPE como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO DE ALTA RESOLUÇÃO APLICADOS À CARACTERIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DE RESERVATÓRIOS DE ÁGUA

VLADIMIR FONSECA NASCIMENTO  
Fevereiro/2017

Orientador: Prof. Alfredo Ribeiro Neto, D.Sc.

NASCIMENTO, F. N. **Produtos de Sensoriamento Remoto de Alta Resolução Aplicados à Caracterização Volumétrica de Reservatórios de Água.** Dissertação, (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 103 p., 2017.

Utilizando ferramentas de geoprocessamento e informações de sensoriamento remoto, este estudo tem o objetivo de detectar as barragens existentes na bacia do Riacho Quixaba, sub-bacia do Rio Pajeú e delimitar as feições das bacias hidráulicas desses açudes com eficiência, bem como comparar as curvas Cota x Área x Volume das barragens monitoradas na bacia do Pajeú, com as curvas obtidas por modelos digitais do terreno de alta resolução. 79 barragens foram identificadas através de ortofotos na bacia do Riacho Quixaba, e com base nos modelos digitais do terreno fornecidos pelo programa Pernambuco Tridimensional e usando programas de sistema de informações geográficas, foram aplicadas técnicas de detecção simultânea dos barramentos existentes na área de estudo, detectando corretamente 66,30% dos açudes da região. Empregando os mesmos programas e base de dados, foram realizados estudos para identificação de bacias hidráulicas, com a finalidade de representar com maior fidelidade os lagos formados pelos reservatórios quando cheios. Levantaram-se, a partir de modelos digitais do terreno, as curvas Cota x Área x Volume de 29 reservatórios cadastrados e inseridos na bacia do Pajeú. A capacidade de acumulação dos reservatórios secos somadas foi 12,41% inferior ao disponibilizado pelos gestores de recursos hídricos.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Bacia do Rio Pajeú. Bacia do Riacho Quixaba. Geoprocessamento. Sistema de Informações Geográficas (SIG). Modelo Digital do Terreno (MDT). LiDAR.

# ABSTRACT

Abstract of Thesis presented to PPGEC / UFPE as part of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

## HIGH RESOLUTION REMOTE SENSING PRODUCTS APPLIED TO THE VOLUMETRIC CHARACTERIZATION OF WATER RESERVOIRS

VLADIMIR FONSECA NASCIMENTO

February/2017

Advisor: Prof. Alfredo Ribeiro Neto, D.Sc.

NASCIMENTO, V. F. **High Resolution Remote Sensing Products Applied to the Volumetric Characterization of Water Reservoirs.** Masters dissertation (Master in Civil Engineering), Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil, 103 p., 2017.

Using geoprocessing tools and remote sensing information, this study aims to detect existing dams in the Quixaba Creek Basin, sub-basin of Pajeú River, and to delineate the hydraulic basin features of these dams efficiently, as well as compare Area x Capacity curves of the reservoirs registered in the Pajeú basin and currently used by the water management agencies, with the curves obtained by high resolution Digital Terrain Models. 79 dams were identified through orthophotos in the Quixaba Creek Basin, and based on the digital terrain models provided by the Pernambuco Tridimensional program and using GIS programs, simultaneous detection techniques were applied to existing dams in the study area, detecting 66.30% dams of the region correctly. Using the same programs and database, studies were carried out to identify hydraulic basins, in order to represent with greater fidelity the lakes formed by the reservoirs when filled. From the digital terrain models, the Area x Capacity curves of 29 reservoirs registered and inserted in the Pajeú basin were developed. The accumulation capacity of the combined dry reservoirs was 12.41% lower than that provided by the water resource managers.

Keywords: Remote Sensing. Pajeú River Basin. Quixaba Creek Basin. Geoprocessing. Geographic Information System (GIS). Digital Terrain Model (DTM). LiDAR.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva Cota x Área.....	19
Figura 2 – Representação do MDE com células alagadas.....	20
Figura 3 – Representações de um terreno.....	23
Figura 4 – Interação da energia incidente com corpo d'água.....	27
Figura 5 – Reflectâncias da água, neve e nuvens de acordo com o comprimento de onda.....	28
Figura 6 – Comparação da reflectância da água de um rio turvo e um rio limpo.....	29
Figura 7 – Distribuição dos Açudes da Bacia do Rio Pajeú.....	33
Figura 8 – Diâmetro do ponto projetado no solo em função da altura de voo	36
Figura 9 – Representação de primeiro e segundo pulsos de um mesmo feixe laser .....	36
Figura 10 – Largura da faixa coberta pela varredura do laser.....	37
Figura 11 – Mapa de locação da bacia do Pajeú .....	39
Figura 12 – Municípios inseridos na Bacia do Pajeú.....	40
Figura 13 – Mapa geomorfológico da Bacia do Pajeú.....	41
Figura 14 – Mapa da rede hidrográfica da Bacia do Pajeú .....	42
Figura 15 – Mapa Pluviométrico da bacia do Pajeú .....	43
Figura 16 – Localização da bacia hidrográfica do Riacho Quixaba.....	44
Figura 17 – Rede Hidrográfica do Riacho Quixaba .....	45
Figura 18 – Divisão do estado de Pernambuco em 5 blocos de mapeamento	46
Figura 19 – Exemplos dos produtos obtidos a partir do mapeamento PE Tridimensional. 19a – Ortofoto; 19b – Composição de intensidade-hipsométrica; 19c – Modelo Digital de Elevação, 19d – Modelo Digital do Terreno.....	47
Figura 20 – Comparativo entre seções obtidas a partir do MDE e do MDT com resolução espacial de 50 cm. ....	48
Figura 21 – MDT da bacia do Riacho Quixaba.....	51
Figura 22 – Exemplo de preenchimento de depressões simples D8.....	52
Figura 23 – Cálculo da direção de fluxo a partir do algoritmo D8.....	53
Figura 24 – Determinação da direção de fluxo de uma matriz 3x3 em perspectiva .....	54

Figura 25 – MDT original (a), MDT preenchido (b) e perfis correspondentes à linha vermelha mostrada em (a) e (b). .....	55
Figura 26 – (a) Mapa de identificação de açudes com limiar de classificação nulo; (b) Mapa de identificação de açudes com limiar de classificação diferente de zero. ....	57
Figura 27 – Polígono criado a partir do modelo numérico classificado .....	59
Figura 28 – Mapa de localização das barragens estudadas na bacia do Rio Pajeú .....	64
Figura 29 – Ortofoto do eixo da barragem Mãe D'água, com detalhe da localização do corte (a); Perfil do Vertedouro da Barragem Mãe D'água (b) ...	65
Figura 30 – Açude equivalente.....	67
Figura 31 – Mapa com açudes identificados através de MDT.....	69
Figura 32 – Açudes detectados, não detectados e ruídos na bacia do Riacho Quixaba .....	70
Figura 33 – Classificação de açudes utilizando limiar zero .....	75
Figura 34 – Mapa com a bacia hidráulica dos açudes na cota da soleira do vertedouro .....	76
Figura 35 – Identificação das bacias hidráulicas na área da bacia do Riacho Quixaba .....	77
Figura 36 – Comparação entre a bacia hidráulica obtida a partir da curva de nível correspondente à cota da soleira da barragem e a bacia hidráulica detectada automaticamente.....	78
Figura 37 – Composição do MDE da barragem José Antônio.....	80
Figura 38 – Comparação entre as curvas Cota x Volume das barragens parcialmente secas .....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre MDT formado por Raster e TIN.....	24
Tabela 2 – Capacidade dos Açudes da Bacia do Rio Pajeú .....	33
Tabela 3 – Matriz de confusão .....	61
Tabela 4 – Exemplo de matriz de confusão para 2 classes .....	62
Tabela 5 – Matriz de confusão da identificação de açudes através de MDT .	71
Tabela 6 – Classificação dos açudes por capacidade de acumulação em ordem decrescente.....	71
Tabela 7 – Comparação entre as curvas Cota x Área x Volume da ficha técnica e MDT da barragem Bom Sucesso.....	79
Tabela 8 – Tabela com as principais informações das barragens estudadas	81
Tabela 9 – Tabela com as barragens secas e com Ficha Técnica.....	83
Tabela 10 – Diferença entre a acumulação total das barragens obtidas por Fichas Técnicas e MDT.....	84
Tabela 11 – Taxa de sedimentos por ano na bacia do Pajeú .....	85
Tabela 12 – Tabela comparando Ficha e MDT de Barragem parcialmente secas .....	87
Tabela 13 – Comparação entre os volumes $V_{Total}$ e $V'_{Total}$ das Fichas, Fichas 80% e MDT.....	94
Tabela 14 – Constantes das curvas obtidas através do índice de forma das barragens .....	95
Tabela 15 – Comparação entre $\alpha$ e $K$ obtidas através das Fichas 100%, Fichas 80% e MDT .....	96

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ALS	Airborne LASER Scanning
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ATLAS	Airborne Topographic Laser Altimeter System
ABRH	Associação Brasileira de Recursos Hídricos
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DECART	Departamento de Engenharia Cartográfica
DECIVIL	Departamento de Engenharia Civil
DEM	Digital Elevation Model
DTM	Digital Terrain Model
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESRI	Environmental Systems Research Institute
GIS	Geographic Information System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LADAR	Laser Detection And Ranging
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LiDAR	Light Detection and Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PLIRHINE	Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste
PE 3D	Pernambuco Tridimensional
RN	Referência de Nível
SLICER	Scanning Lidar Imager of Canopy by Echo Recovery
SR	Sensoriamento Remoto
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
TIN	Triangular Irregular Network
USGS	U.S. Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
USP	Universidade de São Paulo
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
WGS84	World Geodetic System 1984

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	Objetivo Geral.....	16
1.2	Objetivos Específicos .....	17
1.3	Estrutura do texto.....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
2.1	Caracterização do volume em reservatórios .....	19
2.2	Modelo Digital do Terreno .....	22
2.3	Uso do Sensoriamento Remoto para determinação de área e volume de corpos d'água .....	25
2.3.1	Sensores óticos.....	26
2.3.2	LiDAR.....	33
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>38</b>
3.1	Região de estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú .....	38
3.1.1	Localização .....	38
3.1.2	Geomorfologia e relevo .....	40
3.1.3	Rede hidrográfica .....	41
3.1.4	Características climáticas.....	42
3.1.5	Bacia hidrográfica do Riacho Quixaba .....	44
3.2	Projeto Pernambuco Tridimensional.....	45
3.3	Detecção de açudes através de MDT.....	49
3.3.1	Criação de mosaico e delimitação da bacia hidrográfica.....	50
3.3.2	Definições de direções de escoamento e preenchimento de depressões .....	52
3.3.3	Detecção de açudes.....	55
3.3.4	Identificação de bacias hidráulicas .....	59
3.3.5	Determinação da acurácia na detecção de açudes através de MDT .....	60
3.4	Obtenção das curvas Cota x Área x Volume das barragens cadastradas da bacia do Pajeú a partir do MDT .....	63

3.4.1	Definição da bacia hidráulica de um reservatório a partir de MDT .....	64
<b>3.5</b>	<b>Estimativa da curva cota x área x volume de reservatórios com trecho alagado .....</b>	<b>66</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>69</b>
<b>4.1</b>	<b>Acurácia do método de detecção de açudes através de MDT .....</b>	<b>69</b>
4.1.1	Acurácia do método de identificação de bacias hidráulicas .....	75
<b>4.2</b>	<b>Determinação das curvas Cota x Área x Volume .....</b>	<b>79</b>
4.2.1	Barragens secas .....	82
4.2.2	Barragens parcialmente secas .....	87
4.2.3	Avaliação dos coeficientes de forma dos reservatórios.....	92
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>98</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>99</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A humanidade durante sua história sempre teve grande influência na disponibilidade hídrica, como pode ser observado no desenvolvimento das grandes civilizações que prosperaram na margem de rios e nascentes. Nos dias atuais, conforme Souza (2009), a demanda por água no mundo é cada vez maior, por um lado causado pela grande dimensão populacional com intensa atividade industrial e agrícola, e por outro pela degradação das fontes de água potável como rios e mananciais. Segundo Santos et al. (2014), a disponibilidade de água para diversos usos, especialmente para o abastecimento humano, é uma preocupação da população que vive principalmente nas regiões semiáridas.

O semiárido brasileiro tem como característica apresentar chuvas irregulares espacial e temporalmente, com um curto período chuvoso, de 3 a 5 meses ao ano. A maioria dos rios apresenta regime intermitente, com pouca ou nenhuma vazão durante a maior parte do ano. Outro limitador do acesso à água na região é a ocorrência de água salobra devido às características do solo, geologia e a elevada evaporação, que apresenta tendência de concentração de sais nas águas superficiais. O convívio com as características climáticas nessa região é um desafio para a população local e o atendimento à demanda de água é um problema de difícil solução. Para minimizar os efeitos da seca, a construção de barragens se apresenta como uma alternativa muito utilizada para regularizar as vazões dos rios e promover melhores condições de infraestrutura para o semiárido (FONTES et al., 2015; PESSÔA et al., 2015).

Em locais com grande vulnerabilidade hídrica como no semiárido nordestino, a boa gestão dos recursos hídricos é vital para a população e o meio ambiente. Kyrillos (2000) afirmou que os recursos devem ser gerenciados de maneira integrada com os aspectos econômicos, sociais e físicos da região, bem como os índices de qualidade da água devem ser monitorados visando sua potabilidade.

A bacia hidrográfica do Rio Pajeú é a maior bacia do estado de Pernambuco e está inserida na região do semiárido. Para mitigar os efeitos da seca na região e possibilitar um melhor desenvolvimento, dezenas de barragens foram construídas pelo governo, com a finalidade de melhor aproveitamento da baixa oferta hídrica da região. Outra prática muito adotada é a construção de pequenos barreiros, onde a construção costuma ser privada com o objetivo de

acumular água da chuva dentro de propriedades rurais. Há milhares de barreiros construídos ao longo de todo sertão nordestino.

De acordo com Silva (2015), nas últimas décadas, o avanço tecnológico possibilitou uma grande variedade de mecanismos e procedimentos que fornecem aos especialistas em recursos hídricos fontes de informação bem qualificadas e quantificadas. Inseridas nesse contexto, encontra-se o avanço das interfaces homem-máquina, a disponibilidade de imagens de satélite mais precisas e com melhor qualidade, o uso de supercomputadores, softwares inteligentes, sensores mais precisos para mapeamento, dentre outras.

O Sistema de Perfilamento a LASER ALS (*Airborne LASER Scanning*) é um sistema que adquire dados digitais de elevação do terreno com alta precisão e eficiência, através de um sensor principal instalado em uma aeronave, capaz de investigar o relevo de uma superfície com uma velocidade muito superior aos levantamentos convencionais (BRANDALIZE, 2002). Os Modelos Digitais do Terreno (MDT) são representações do relevo, onde cada célula ou *pixel* tem como atributo o valor da elevação do terreno em relação a um referencial. A utilização de MDT's adquiridos por aerolevantamento com sensor laser é cada vez mais frequente em estudos hidrológicos, principalmente na caracterização física de bacias hidrográficas e sistema de drenagem aplicadas a Sistemas de Informações Geográficas (CASTRO et al., 2015).

Dentro desse contexto, esse trabalho visa apresentar métodos para auxiliar na quantificação da capacidade de armazenamento dos reservatórios do Estado de Pernambuco para melhor gestão de recursos hídricos, utilizando técnicas de geoprocessamento através de modelos digitais do terreno adquiridos por tecnologia LiDAR e ortofotos.

## **1.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo geral definir métodos de detecção de açudes e identificação de bacias hidráulicas, bem como levantar curvas Cota x Área x Volume em reservatório para abastecimento de água. Com isso, pretende-se auxiliar a gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas do semiárido, por meio de ferramentas de geoprocessamento e uso de dados de sensoriamento remoto.

## 1.2 Objetivos Específicos

Para se alcançar os objetivos gerais, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Avaliar o potencial de uso de produtos da tecnologia LiDAR para determinação da capacidade de armazenamento em reservatórios de abastecimento de água;
- Comparar as curvas Cota x Área x Volume das barragens obtidas por geoprocessamento com MDT de alta resolução, com as curvas empregadas pelos gestores dos recursos hídricos;
- Estimar o volume das barragens estudadas para reservatórios parcialmente alagados;
- Estimar o volume de sedimentos assoreados nos reservatórios.

## 1.3 Estrutura do texto

Este trabalho foi estruturado em 5 capítulos:

O Capítulo 1 aborda a Introdução, onde é apresentado, de maneira geral, a importância da pesquisa realizada, assim como o objetivo geral e os objetivos específicos que o compõe.

O Capítulo 2 reúne a Revisão Bibliográfica sobre os assuntos tratados no trabalho, referenciando o uso de sensoriamento remoto para a determinação de área e volume de corpos d'água, bem como a utilização da tecnologia LiDAR e Modelos Digitais do Terreno;

O Capítulo 3 versa sobre a Metodologia Aplicada, onde é apresentada inicialmente a área de estudo e a base de dados usada no desenvolvimento do projeto. Nesse capítulo, também é apresentada as 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;

No Capítulo 4 são apresentados os Resultados encontrados nesta dissertação, mostrando a eficiência dos métodos utilizados para a detecção de barragens e identificação de bacias hidráulicas, assim como é realizada a

comparação entre as curvas Cota x Área x Volume adquiridas por MDT de alta resolução e os dados atualmente utilizados pelos órgãos gestores dos recursos hídricos da região. Também é apresentado nesse capítulo a efetividade dos métodos aplicados na estimativa do volume assoreado nos reservatórios;

O Capítulo 5 apresenta as Conclusões e Recomendações, ressaltando os principais pontos dos resultados obtidos neste trabalho e apresentando as possibilidades dos trabalhos que podem ser realizados na continuidade dessa linha de pesquisa.

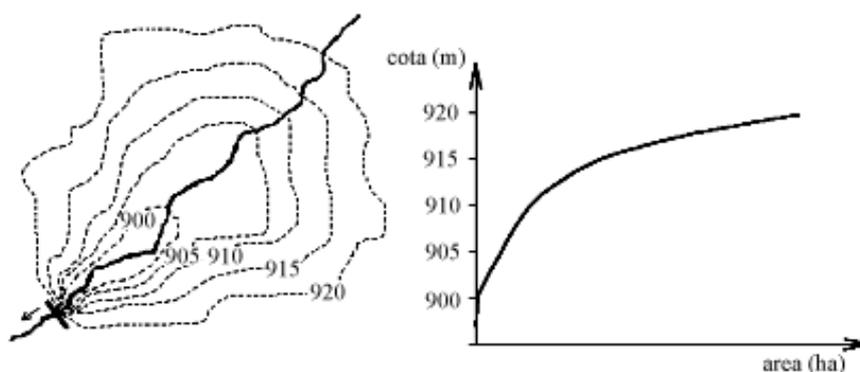
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Caracterização do volume em reservatórios

A capacidade de armazenamento de um reservatório, segundo Ladeira et al. (2011) depende da altura do vertedouro da barragem e das características topográficas da região onde o barramento foi ou será construído. Para o cálculo do volume de barragens através de Sensoriamento Remoto (SR) existem duas formas mais utilizadas. A primeira usa como dado de entrada um mapa topográfico em escala adequada e, a segunda, um Modelo Digital do Terreno. Os dois métodos consideram o espelho d'água gerado pelo reservatório como plano e de mesma cota, apesar da superfície do lago não se apresentar exatamente dessa maneira na natureza.

No primeiro método, o mapa é utilizado para a criação de um modelo de isolinhas onde são definidas curvas que descrevem a área alagada para cada cota do reservatório. Através dessas isolinhas, pode ser gerado um gráfico com os pares de valores (Cota; Área) onde é descrita uma curva suave ligando os pontos chamada de Curva Cota x Área (Figura 1). A capacidade de armazenamento de um reservatório é encontrada através da Curva Cota x Volume, que por sua vez pode ser obtida pela integração (cálculo integral) da curva Cota x Área. Obtida a Curva Cota x Volume, a capacidade de armazenamento do reservatório pode ser calculada pela soma dos volumes parciais das fatias limitadas pelos planos de nível consecutivos (LADEIRA, 2013).

Figura 1 – Curva Cota x Área

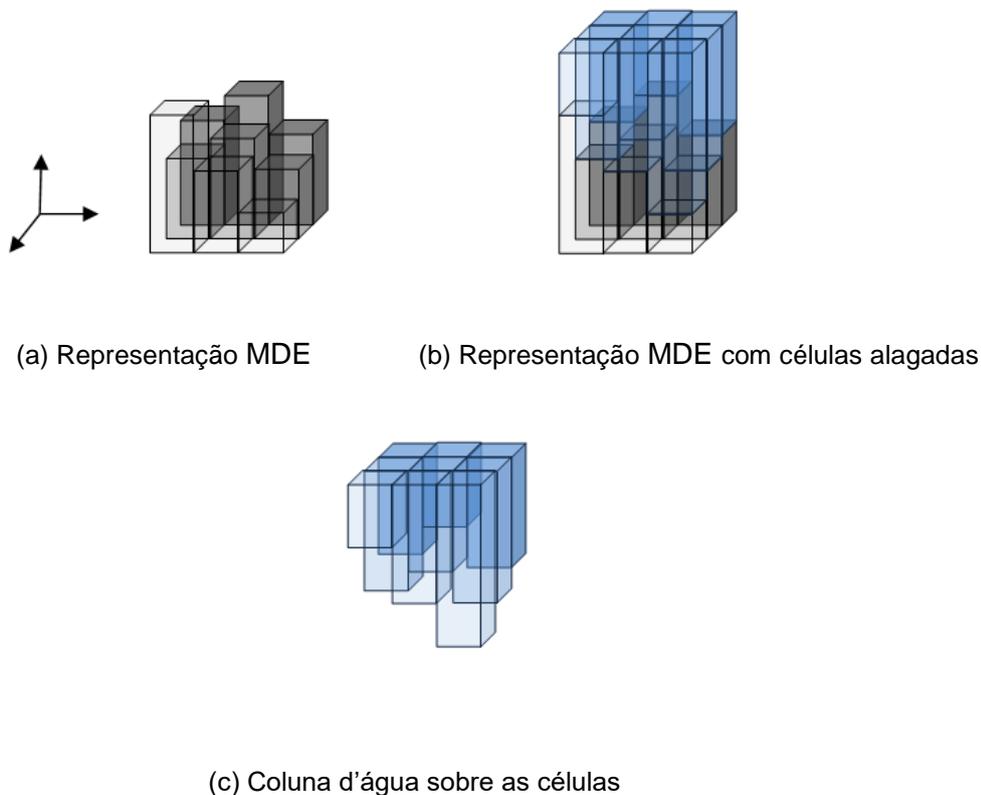


Fonte: Ladeira (2013)

No segundo método, para o cálculo da capacidade de armazenamento de um reservatório, deve-se ter como condições iniciais o posicionamento da barragem, a altura, sua extensão e o terreno onde se encontra a bacia hidráulica representado por um MDE. O volume da barragem, segundo Ladeira (2013), pode ser obtido pela soma dos prismas de coluna d'água sobre cada célula da bacia hidráulica, conforme mostrado na Figura 2. O número de células alagadas tem uma relação direta com o nível do reservatório, tendo o reservatório em sua cota máxima o maior número possível de células alagadas. A capacidade de armazenamento pode ser calculada pelo somatório dos volumes armazenados em cada célula alagada. O volume armazenado em cada célula ( $V_{Cel}$ ) é dado pelo produto entre a área do *pixel* ( $A_{Cel}$ ) e a diferença de altura entre o nível do reservatório ( $H_{Cel Res}$ ) e a elevação do terreno ( $H_{Cel Terreno}$ ), como demonstra a Equação 1.

$$V_{Cel} = A_{Cel} \times (H_{Cel Res} - H_{Cel Terreno}) \quad (1)$$

Figura 2 – Representação do MDE com células alagadas



A forma de um açude, segundo Molle (1994), pode ser caracterizada por três parâmetros simples que são: a sua profundidade (H), a sua superfície (S) e seu volume (V). O valor da profundidade varia entre 0 e um valor máximo H, correspondendo à cota do sangradouro. A relação entre o volume (V), a área da superfície (S) e a profundidade (H) de um reservatório, pode ser alcançada através dos coeficientes de forma  $\alpha$  e  $K$ , que variam de acordo com o formato do terreno onde se encontra a bacia hidráulica do açude. A correspondência entre os parâmetros H, S e V e os coeficientes de forma, podem ser observados nas equações 2, 3 e 4. A equação 2 relaciona o volume em função da profundidade de um determinado açude, a equação 3 relaciona a superfície do espelho d'água em função também da profundidade e, a Equação 4, relaciona o volume em função da profundidade e da superfície.

$$V = K \times H^\alpha \quad (2)$$

$$S = \alpha \times K \times H^{(\alpha-1)} \quad (3)$$

$$V = \frac{H \times S}{\alpha} \quad (4)$$

Para a região do semiárido nordestino, Molle (1994) realizou um estudo sobre a geometria dos pequenos açudes da localidade. Esse estudo efetivou-se com dados de 420 pequenos açudes, estabelecendo inúmeras correlações estatísticas entre os parâmetros físicos e geométricos encontrados. Entre essas correlações, destaca-se a correspondência entre a superfície e o volume dos açudes, onde objetivou-se estimar os volumes estocados a partir de fotos aéreas. Como um dos resultados, podemos destacar um valor médio de  $\alpha$  para pequenos açudes na região semiárida, sendo assim possível fazer uma relação direta entre o volume, a profundidade e a superfície dos pequenos açudes da região, conforme equação abaixo:

$$V = \frac{H \times S}{2,70} \quad (5)$$

## 2.2 Modelo Digital do Terreno

Para a identificação das formas de relevo, segundo Folharini et al. (2015), é fundamental a análise de variáveis morfométricas, como a declividade e o aspecto das vertentes. A construção de um MDT baseado em um conjunto de coordenadas tridimensionais é necessária para a análise dessas variáveis.

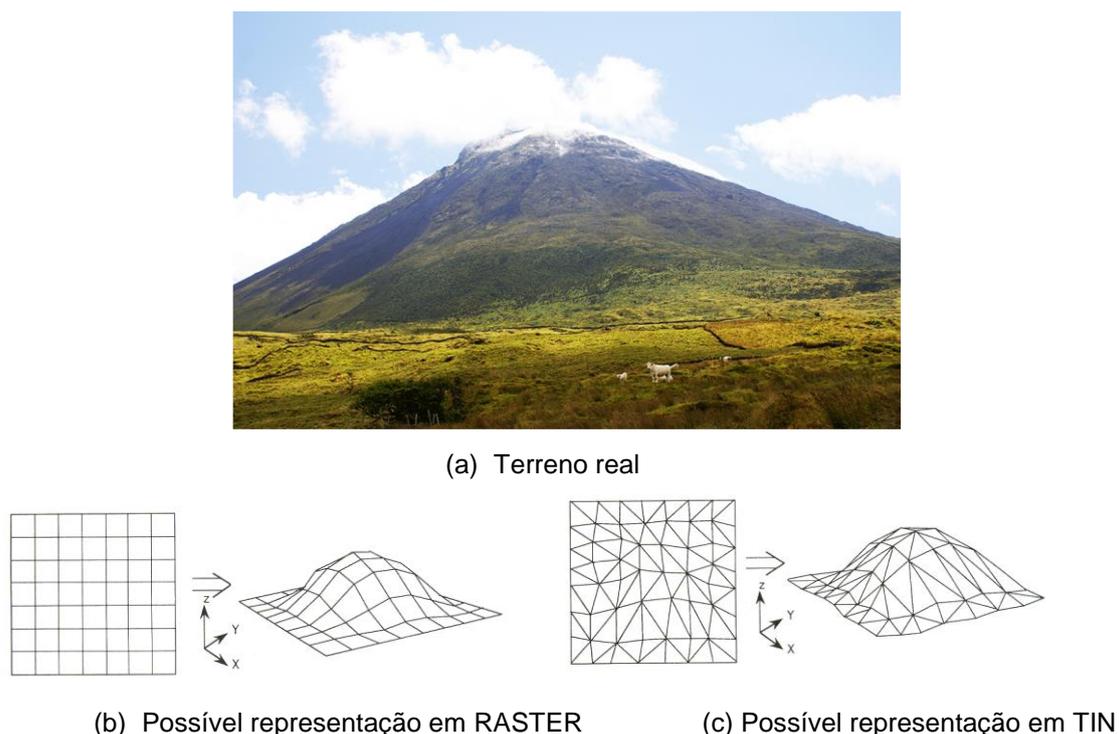
Liporaci et al. (2003) define o Modelo Digital do Terreno (MDT) como a representação matemática da realidade geográfica, onde, a partir da interpolação de um conjunto finito de pontos com coordenadas em três dimensões, pode-se obter inúmeras informações relativas à superfície formada por esses pontos. O resultado prático, afirma Burrough (1986), é que os dados altimétricos armazenados podem gerar mapas topográficos, dimensionamento de corte e aterros para projetos de estradas e barragens, elaboração de cartas de declividade, suporte a análises geomorfológicas, geofísicas, geoquímicas, entre outros.

O MDT é um produto topográfico com uma grande variedade de aplicações em muitas áreas de estudo. Os métodos tradicionais para criação de um MDT dependiam no passado de levantamentos topográficos com equipamentos de campo clássicos, sendo essa uma técnica muito dispendiosa e demorada, principalmente para grandes áreas. Com o passar dos anos, a fotogrametria tornou-se um dos métodos mais utilizados para geração de MDT. Atualmente, a utilização de sistemas aerotransportados LiDAR tornaram-se poderosas ferramentas para desenvolvimento de MDT's, devido às vantagens como a coleta de informações tridimensionais com eficiência sobre grandes áreas, mantendo uma boa precisão e com rápida execução (POLAT; UYSAL, 2015).

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é definido, conforme Burrough (1986), como a representação digital da variação contínua do relevo no espaço. Porém, deve-se salientar que alguns trabalhos, como esta dissertação, empregam o termo Modelo Digital do Terreno (MDT) não como sinônimo de MDE, mas com outro significado, pois o MDE inclui em seus componentes não apenas a superfície do terreno, mas também edificações, vegetação e outros obstáculos. Os métodos para obtenção de elevação digital podem ser obtidos por levantamento topográfico ou sensoriamento remoto.

Os MDT's são representados normalmente por uma matriz de células retangulares regulares (RASTER) ou como uma rede de triângulos irregulares (TIN). A Figura 3 apresenta, respectivamente, um terreno real (Figura 3(a)), e as possíveis representações do MDT através de um RASTER (Figura 3(b)) e através de uma rede de triângulos TIN (Figura 3(c)).

Figura 3 – Representações de um terreno



Fonte: Ladeira (2013)

Um RASTER foi definido por Felgueiras e Câmara (2001) como a representação de uma superfície no formato de uma matriz formada por uma distribuição regular das elevações de um terreno. Cada elemento da matriz é formado por células (*pixels*) que contém valores que representam para MDT's a cota do terreno para cada célula. A resolução do terreno pode ser definida como as dimensões de cada *pixel*, e a resolução será maior quanto menor for a célula. É importante destacar que a qualidade do MDT está ligada à exatidão de cada ponto e à quantidade de pontos utilizados no levantamento. Assim, um MDT pode ter uma resolução alta e mesmo assim não ter uma boa representação do terreno.

Câmara et al. (1998) define uma TIN como a representação vetorial de um terreno composta por uma distribuição irregular de nós e linhas com

coordenadas definidas em três dimensões, que são dispostas em uma rede de triângulos não sobrepostos. Em um MDT formado a partir de uma TIN, um dado ponto (x, y) qualquer, contido no terreno, terá sua elevação determinada pela interpolação dos pontos do triângulo, cuja projeção plana contenha o ponto em questão. Uma das vantagens da utilização da rede de triângulos irregulares é a possibilidade de locação de mais pontos para uma representação mais detalhadas de áreas do terreno, como as áreas de grandes declividades ou a utilização de menos pontos para áreas planas (LADEIRA, 2013). A Tabela 1 apresenta as principais diferenças entre a representação por RASTER e TIN.

Tabela 1 – Comparação entre MDT formado por Raster e TIN

<b>Grade Regular Retangular</b>	<b>Grade Irregular Triangular</b>
Apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do modelo	Não apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do modelo
Os vértices dos retângulos são estimados a partir das amostras	Os vértices dos triângulos pertencem ao conjunto da amostra
Apresenta problemas para representar superfícies com variações locais acentuadas	Representa melhor superfícies não homogêneas com variações locais acentuadas
Estrutura de dados mais simples	Estrutura de dados mais complexa
Relações topológicas entre os retângulos são explícitas	É necessário identificar e armazenar as relações topológicas entre os triângulos
Mais utilizado em aplicações qualitativas e para análises multiníveis no formato “raster”	Mais utilizado em aplicações quantitativas

Fonte: Felgueiras e Câmara (2001)

Os MDT's dentro de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) podem melhorar significativamente a visualização de um terreno acidentado. Spark e Williams (1996) afirmam que a partir de MDT's é possível a visualização de superfícies de paisagens, a partir de qualquer ponto, podendo fundir-se o MDT a mapas geológicos, imagens de satélite ou qualquer imagem de mapa bidimensional coberta sobre a superfície. Essa fusão de imagens com MDT pode

gerar mapas em três dimensões, fornecendo ao pesquisador um aspecto mais próximo do ambiente real para várias áreas de interesse.

A reprodução do relevo em computadores é utilizada crescentemente em hidrologia, sendo sua aplicação utilizada para a delimitação de bacias, identificação de rios e riachos e determinação de volume de barragens. Fan et al. (2013) afirmaram que em SIG's a representação matricial do relevo a partir de MDE's e MDT's é a forma mais utilizada para analisar a geomorfometria. Em um MDE, cada célula ou pixel tem como atributo o valor de elevação do terreno em relação a um determinado referencial. O advento desses modelos digitais e o avanço dos modelos computacionais para analisá-los, resultaram no desenvolvimento de uma variedade de métodos para derivar redes de fluxo e determinação dos limites de bacias hidrográficas semi-automaticamente (KHAN et al., 2014).

Um estudo desenvolvido por Wang et al. (2005), utilizou MDE's adquiridos pelo programa espacial da NASA SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 90 metros, para realizar o cálculo da área e volume do reservatório de Três Gargantas, no município de Chongqing na China. Foram utilizados MDE's antes do processo de acumulação de água ocorrer no reservatório. Essa pesquisa teve como um dos resultados a comparação entre os dados oficiais (disponibilizados pelo governo chinês) e os obtidos no trabalho realizado. A superfície do espelho d'água do reservatório na cota de 175m encontradas nesse estudo e divulgada oficialmente foram respectivamente 1077 km<sup>2</sup> e 1084 km<sup>2</sup>, representando uma diferença de apenas 7 km<sup>2</sup>, ou 0,6% da área total. É importante destacar que a Barragem de Três Gargantas é a segunda maior represa do mundo e suas grandes dimensões possibilitam que utilizando MDE's com resolução espacial de 90 m seja possível obter-se resultados satisfatórios.

### **2.3 Uso do Sensoriamento Remoto para determinação de área e volume de corpos d'água**

O sensoriamento remoto (SR), segundo Novo (2015), pode ser definido como a técnica de obtenção de informações sobre objetos da superfície da terra, a partir da captação das mudanças impostas pelos mesmos objetos ao campo eletromagnético terrestre. Lillesand et al. (2015) definem o sensoriamento

remoto como a capacidade de se obter informação sobre um objeto (alvo), área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos por um dispositivo (sensor) que não está em contato direto com o objeto, área ou fenômeno sob investigação.

A tecnologia de SR pode ser concebida, também, como um sistema de aquisição de informações sobre a superfície terrestre, que por sua vez pode ser subdividido em dois subsistemas: Aquisição de Dados de Sensoriamento Remoto e Produção de Informações. O Subsistema de Aquisição de Dados de Sensoriamento Remoto é composto por: Fonte de Radiação, Plataforma (Satélite, Aeronave), Sensor, Centro de Dados (Estação de Recepção e Processamento de Dados de Satélite e Aeronave). Já o Subsistema de Produção de Informações pode ser dividido em Aquisição de Informações de Solo para Calibragem dos Dados de Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens e Sistema de Geoprocessamento. As Fontes de Radiação para o sensoriamento remoto da superfície terrestre são principalmente o Sol, a Terra, e as fontes artificiais como as antenas dos sistemas de radar, emissão de luz artificial, entre outros. A radiação incidente sobre a superfície interage com ela, sendo refletida de volta para os sensores a bordo de plataformas inseridas em diferentes altitudes. Os sensores são os sistemas responsáveis pela conversão da energia proveniente da superfície em um registro permanente na forma de imagem ou gráfico que permita associar a distribuição da energia que deixa um dado objeto com suas propriedades físicas, químicas, biológicas e geométricas (NOVO, 2015).

### 2.3.1 Sensores óticos

De acordo com Lillesand et al. (2015), quando a energia eletromagnética incide em algum objeto da superfície terrestre, três interações fundamentais de energia são possíveis. A energia incidente no elemento pode ser refletida, absorvida e/ou transmitida. A capacidade de refletir a energia incidente indica a reflectância de um objeto, assim como a absorvância indica a capacidade de um objeto absorver essa energia. A capacidade de um objeto transmitir a energia incidente é chamada de transmitância (FERREIRA; PEREIRA FILHO, 2009). Aplicando o princípio de conservação de energia, é possível chegar à seguinte relação:

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda) \quad (6)$$

$E_I$  = Energia Incidente

$E_R$  = Energia Refletida

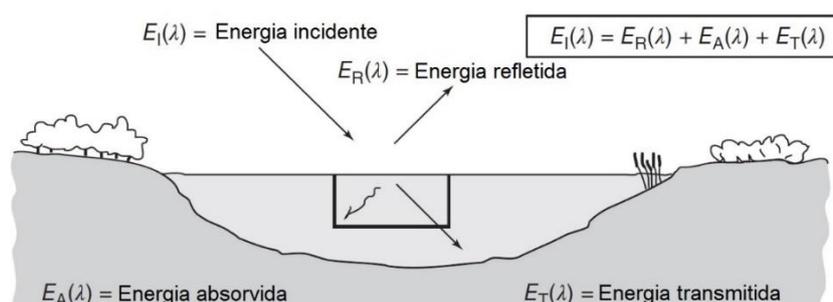
$E_A$  = Energia Absorvida

$E_T$  = Energia Transmitida

Sendo os componentes de energia em função do comprimento de onda  $\lambda$ .

Essas interações podem ser observadas na Figura 4, que representa a interação da energia incidente com um corpo d'água.

Figura 4 – Interação da energia incidente com corpo d'água



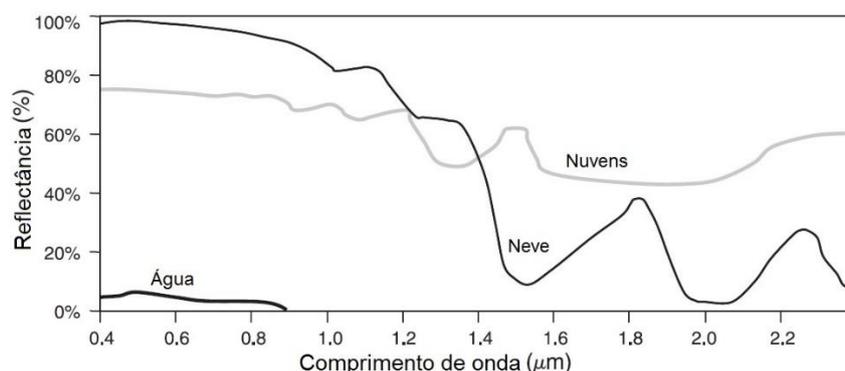
Fonte: Lillesand et al. (2015)

Ainda de acordo com Lillesand et al. (2015), a proporção de energia refletida, absorvida e transmitida pode variar para os diferentes alvos terrestres, dependendo do seu tipo, material e condição. Essas diferenças de comportamento permitem ao observador distinguir diferentes objetos em uma mesma imagem. Outro fator essencial para a identificação de objetos é a faixa do comprimento de onda que o objeto está sendo observado. Um mesmo objeto pode ter diferentes proporções de energia refletida, absorvida e transmitida, a depender do comprimento de onda. Logo, dois objetos podem ser indistinguíveis em uma faixa espectral e bem diferentes em outra banda de comprimento de onda.

A água pura no estado líquido, conforme Ferreira e Pereira Filho (2009), se distingue dos demais alvos pois a maior parte da energia incidente é absorvida ou transmitida e não refletida, como ocorre no solo e na vegetação. A

água tem como característica a absorção de radiação eletromagnética em comprimentos de onda menores que 380  $\mu\text{m}$  e maiores que 700  $\mu\text{m}$ , e mesmo nessa faixa a reflectância é ligeiramente maior que 5%. De um modo geral, a reflectância da água limpa diminui com o aumento dos comprimentos de onda. Verificam-se as maiores reflectâncias na região do visível, mais especificamente, nos comprimentos de onda do azul e verde, decrescendo gradualmente na direção do infravermelho. Isso ocorre porque como a água não apresenta matéria orgânica ou sólidos em suspensão, a radiação do infravermelho próximo incidente é toda absorvida pelo alvo. A Figura 5 apresenta a comparação entre a reflectância da água, neve e nuvens entre as faixas espectrais 0,4  $\mu\text{m}$  e 2,4  $\mu\text{m}$ .

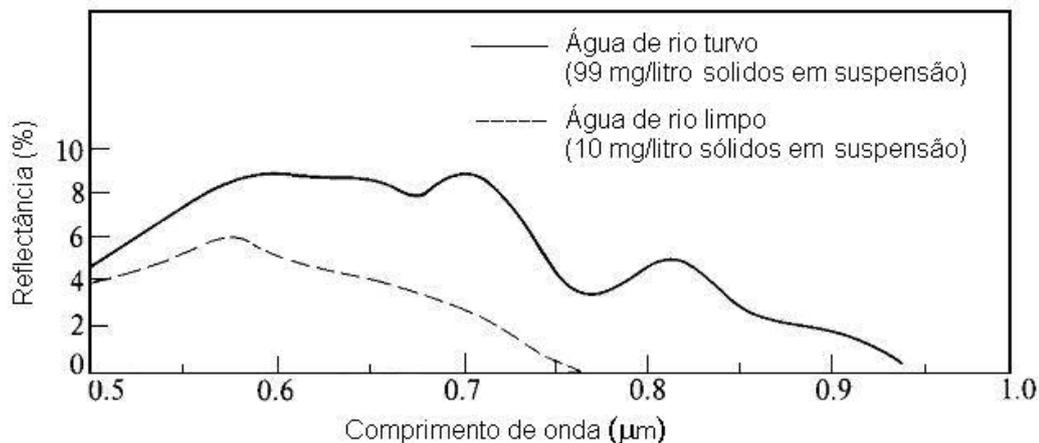
Figura 5 – Reflectâncias da água, neve e nuvens de acordo com o comprimento de onda



Fonte: Lillesand et al. (2015)

A reflectância espectral de corpos d'água depende das características espectrais de seus componentes. Ela pode variar por vários fatores, onde a concentração do total de sólidos em suspensão, a concentração de clorofila e a concentração de carbono orgânico dissolvido são os mais relevantes. As partículas em suspensão como detritos orgânicos e inorgânicos, bactérias e fitoplânctons são os principais responsáveis pelo espalhamento da radiação na água, enquanto os pigmentos fotossintéticos, a matéria orgânica e os detritos orgânicos são os principais absorvedores de energia. A quantidade de sólidos em suspensão e a cor da água influenciam fortemente o comportamento espectral da água (CABRAL et al., 2003). A Figura 6 mostra a diferença na resposta espectral entre um rio de água limpa e um rio de água turva.

Figura 6 – Comparação da reflectância da água de um rio turvo e um rio limpo



Fonte: Ferreira e Filho (2009)

A classificação supervisionada pode ser dividida nas fases de treinamento e classificação. O treinamento é a fase onde é desenvolvida a seleção de amostras representativas do comportamento espectral dos variados tipos de uso e cobertura do solo da área analisada. Sabendo as características que diferem os corpos d'água dos demais objetos terrestres através de SR, é possível classificar as imagens de satélite ou aerofotogrametria em água e outros elementos. Há uma grande variedade de métodos para a classificação de água através de imagens, as mais usuais são a classificação supervisionada por pixel e por região. A classificação por região demanda a segmentação prévia da imagem, sendo dividida em polígonos que contém atributos espectrais e espaciais relativamente homogêneos para serem utilizados como amostras de treinamento, enquanto que a classificação por pixel funciona a partir da utilização das informações espectrais de cada pixel para encontrar regiões homogêneas (JENSEN, 1996). Soma-se a isso, os métodos de extração de informações de corpos d'água utilizando o índice espectral, os quais apresentam maior acurácia que os métodos gerais de classificação. Esses métodos podem realçar o sinal espectral, contrastando a reflectância entre os diferentes comprimentos de onda e destacando os corpos d'água presentes na imagem dos demais objetos (FERREIRA; FILHO, 2009).

Collischonn e Clarke (2016) realizaram uma pesquisa com o objetivo de estimar as curvas Cota x Área x Volume de reservatórios do semiárido brasileiro utilizando imagens de satélite. O estudo foi produzido nos reservatórios Boqueirão (PB) e Bico da Pedra (MG), onde foram monitorados com aferições

diárias. Utilizaram-se as imagens dos satélites LANDSAT 5, LANDSAT 7, LANDSAT 8, IRS e CBERS 2 entre os anos de 1994 a 2014, e as cotas do nível d'água fornecidas no sítio web dos respectivos órgãos de gestão. Para o reservatório Boqueirão, o volume total do reservatório, resultante da estimativa por sensoriamento remoto, foi de 411 hm<sup>3</sup>, 0,2% inferior ao volume obtido por batimetria convencional (411,7 hm<sup>3</sup>). Para o reservatório Bico da Pedra, o volume máximo encontrado através de SR foi 502 hm<sup>3</sup>, mais de 10% inferior ao volume máximo obtido da curva atualmente usada. A justificativa para o segundo reservatório ter mostrado um erro maior foi por conta de inconsistências no balanço hídrico dos dados fornecidos pelos órgãos de controle para essa barragem. Os resultados apresentados mostraram que para obter-se respostas dentro do intervalo de confiança, a curva cota-volume utilizada deve ser confiável.

Gao et al. (2012) desenvolveram um estudo para o monitoramento do volume de água em grandes reservatórios, utilizando uma combinação de dados obtidos pelos satélites altimétricos TOPEX/POSEIDON, Jason-1, Jason-2 e OSTM, e pelo sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) no período entre 1992 e 2010. Através da obtenção da cota dos reservatórios fornecidas pelos dados altimétricos e da superfície do espelho d'água extraídas das imagens MODIS, foram desenvolvidas as curvas Cota x Área para 34 grandes reservatórios ao redor do mundo. O volume dos reservatórios pôde ser estimado pela relação entre a área das superfícies do espelho d'água e as cotas correspondentes na mesma data. Também foram utilizadas as informações documentadas dos reservatórios, principalmente para volumes abaixo ou acima dos captados pelas imagens no período estudado.

Ovakoglou et al. (2016) realizaram uma pesquisa semelhante também utilizando imagens do satélite Terra MODIS e satélites altimétricos para a elaboração de um modelo digital de profundidades de um lago. O estudo foi desenvolvido no lago Kerkini, na Grécia, onde foram coletadas todas as imagens captadas pelo sensor MODIS para a área de estudo no ano de 2007 e a validação dos dados altimétricos foi realizada através de GPS *in situ*. Através das superfícies calculadas por métodos automáticos de reconhecimento e profundidades captadas na mesma data durante todo um ano, o perfil da parte do leito do rio (trecho que ficou aparente durante o ano) foi construído e comparado com os dados batimétricos realizados em 1991. A partir dessa

comparação foi possível medir-se a perda da capacidade de acumulação do lago através da sedimentação.

Ran e Lu (2012) desenvolveram um trabalho com objetivo de estimar a superfície e a capacidade de acumulação de reservatórios através de sensoriamento remoto e com imagens captadas pelo satélite Landsat 5. O trabalho foi desenvolvido na bacia hidrográfica do Rio Amarelo, na China, abrangendo uma área de 752.000 km<sup>2</sup> onde 2816 reservatórios foram extraídos das imagens de satélite, equivalendo a 89,5% do total de reservatórios construídos na bacia. Foi desenvolvida uma equação empírica relacionando a capacidade de acumulação dos reservatórios da bacia hidrográfica com a área da superfície dos mesmos. Como resultado, a capacidade total de acumulação dos reservatórios da bacia hidrográfica, adquirida através de SR nesse trabalho, representaram em torno de 92,7% do volume relatado pelas autoridades responsáveis.

No estudo realizado por Yang e Lu (2013), foram delineados os lagos e reservatórios encontrados na bacia hidrográfica do rio Yangtze, na China a partir de informações de sensoriamento remoto. Utilizaram-se imagens Landsat TM/ETM+ para a extração de corpos d'água com o auxílio de ferramentas de geoprocessamento. Foram extraídas as superfícies de aproximadamente 43.600 reservatórios e 42.700 lagos, bem como foram estimados 0,7 milhões de pequenos reservatórios (área da superfície <0,0036 km<sup>2</sup>) e 0,5 milhões de pequenas lagoas. Para a estimativa da capacidade de armazenamento dos reservatórios e lagos, foram relacionados o volume e a área da superfície através da equação 7, onde "V" representa o volume do reservatório, "S" a área da superfície e "a" e "b" são constantes. Os autores calcularam a capacidade de armazenamento dos reservatórios através das equações 8, 9, 10 e 11, com constantes específicas para grandes reservatórios, pequenos reservatórios, grandes lagos e pequenos lagos. As constantes foram determinadas através de documentos oficiais do governo chinês, como relatórios dos reservatórios construídos na bacia e estudos previamente realizados.

$$\text{Equação Geral} \quad V = aS^b \quad (7)$$

$$\begin{array}{l} \text{Grandes} \\ \text{reservatórios} \\ (A \geq 3,3 \text{ km}^2) \end{array} \quad V = 28,386S^{1,0516} \quad (8)$$

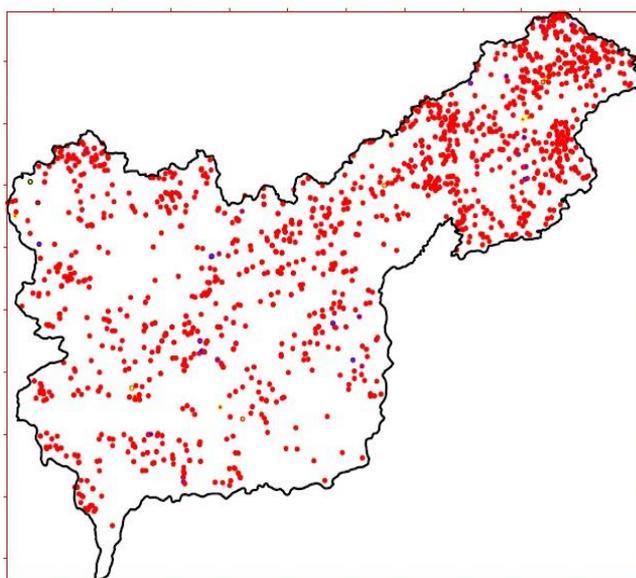
$$\begin{array}{l} \text{Pequenos} \\ \text{reservatórios} \\ (A < 3,3 \text{ km}^2) \end{array} \quad V = 30,382S^{0,9859} \quad (9)$$

$$\begin{array}{l} \text{Grandes lagos} \\ (A \geq 10 \text{ km}^2) \end{array} \quad V = 1,5018S^{1,1104} \quad (10)$$

$$\begin{array}{l} \text{Pequenos lagos} \\ (A < 10 \text{ km}^2) \end{array} \quad V = 1,625S^{1,0611} \quad (11)$$

Está inserido no Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) (PERNAMBUCO, 1998), um estudo para a estimativa da capacidade de armazenamento dos reservatórios existentes na bacia hidrográfica do Rio Pajeú. Os pequenos açudes foram identificados através de imagens do satélite Landsat 5, obtidas em novembro de 1994 e outubro de 1995. A partir das superfícies dos açudes, obtidas pelas imagens de satélite, foram estimados os respectivos volumes utilizando-se estudos amostrais do Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste (PLIRHINE), que relacionam a área do espelho d'água com o volume acumulado. A Figura 7 apresenta a distribuição espacial dos açudes na bacia e a Tabela 2 apresenta a classificação desses açudes pela capacidade de armazenamento.

Figura 7 – Distribuição dos Açudes da Bacia do Rio Pajeú



Fonte: Pernambuco (1998)

Tabela 2 – Capacidade dos Açudes da Bacia do Rio Pajeú

CAPACIDADE MÁXIMA (m <sup>3</sup> )	SIMBOLO	NÚMERO DE AÇUDES
abaixo de 500.000	●	1338
500.000 – 1.000.000	●	11
1.000.000 – 10.000.000	●	24
acima de 10.000.000	●	8
TOTAL		1381

Fonte: Pernambuco (1998)

### 2.3.2 LiDAR

O sistema a laser aerotransportado LiDAR (*Light Detection and Ranging*) é uma tecnologia de sensoriamento remoto usada em várias áreas de estudo como modelagem hidrológica, monitoramento costeiro, inventário florestal, classificação do uso e ocupação do solo (POLAT; UYSAL, 2015).

A tecnologia LiDAR, também, conhecida como LADAR (*Laser Detection and Ranging*) já existe desde a década de 1970, apesar de ser considerada uma tecnologia recente de sensoriamento remoto. Porém, segundo Pires (2005), somente a partir da década de 1990 os resultados do sistema obtiveram um grande avanço tecnológico, com o desenvolvimento de sensores mais confiáveis como o *Shuttle Laser Altimeter* (SLA). Outro fator essencial para evolução dessa tecnologia, de acordo com Santos (2013), foi a determinação de coordenadas

tridimensionais globais de alta precisão e de rápida determinação obtidas através do GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Os programas e equipamentos utilizados em um Sistema de Perfilamento a laser, conforme Brandalize (2002), podem ser divididos em componentes instalados na aeronave que fará o levantamento, componentes instalados no terreno em tempo real de execução do levantamento e componentes utilizados em pós-processamento. Os principais componentes a bordo da aeronave usada para o levantamento são:

- Sensor laser (*LRF-LASER Range Finder*) composto pelo gerador do pulso laser, ótica de transmissão e recepção do raio, detector de sinal, amplificador e outros componentes eletrônicos;
- Sistema de Medição Inercial (SMI);
- Receptor GPS e seus respectivos componentes;
- Computador de bordo e respectivos programas para controlar a aquisição dos dados;
- Unidades de armazenamento dos dados brutos do laser, do GPS e da Navegação Inercial;
- Receptor GPS para navegação da aeronave.

O componente principal instalado em solo e em tempo real são os receptores GPS de base, cuja função é a correção diferencial dos pontos medidos pelo laser. Para o pós-processamento, os principais componentes são os programas para descarga dos dados brutos do laser, GPS e Medição Inercial, bem como o tratamento de dados para gerar produtos derivados do levantamento como MDE, MDT e curvas de nível (BRANDALIZE, 2002).

Existe no mercado atual uma vasta gama de sensores altimétricos aerotransportados, desenvolvidos para finalidades específicas e que contribuem para diversas aplicações científicas. Podem ser citados como exemplo os sistemas ATLAS (*Airborne Topographic Laser Altimeter System*) e o SLICER (*Scanning Lidar Imager of Canopy by Echo Recovery*) (PIRES, 2005).

A técnica do imageamento por LiDAR consiste na medição do tempo de ida e volta da energia de um pulso laser entre o sensor e o alvo. O funcionamento baseia-se na emissão de um feixe laser infravermelho em direção à superfície

terrestre. Essa técnica pode ser utilizada como uma ferramenta para o mapeamento direto da superfície física através de emissão de pulsos laser em direção a essa superfície. Quando atingem a Terra, esses feixes são refletidos por obstáculos como a vegetação, água e construções, e são captados pelo sensor. Para todo feixe de luz emitido é registrado o tempo de percurso entre a aeronave, o objeto, o retorno à aeronave e o ângulo do espelho de varredura correspondente ao instante da emissão do pulso. Com esses dados, associados à altitude e posição relativa da aeronave, são determinadas as coordenadas tridimensionais dos alvos na superfície (PIRES, 2005; SANTOS, 2013).

A intensidade do sinal de retorno, de acordo com Pires (2005), depende de diversos fatores como: a energia total do pulso transmitido, a fração do pulso laser que é interceptada pela superfície, a reflectância da superfície interceptada no comprimento de onda do laser e a fração da iluminação refletida que se desloca em direção ao sensor.

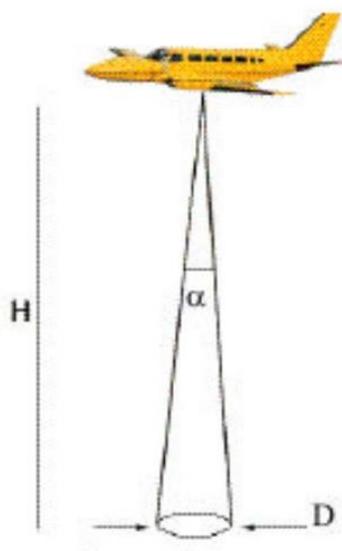
O emprego das tecnologias LiDAR e imageamento aéreos digitais fornecem produtos com alta qualidade e precisão. A utilização dessas tecnologias, conforme Santos (2013), pode reduzir o tempo de aquisição das informações, variação dos dados obtidos pelos diferentes sensores (laser e câmera aerotransportada) e custos na execução de projetos.

Uma das características do pulso laser é divergir à medida que se propaga no meio. Essa divergência é diretamente proporcional à altura do voo, pois quanto maior a distância entre o sensor laser e a superfície alvo, maior o diâmetro do pulso projetado no objeto. O diâmetro do ponto projetado no alvo ( $D$ ), varia em função da altura da aeronave ( $H$ ) e do ângulo de abertura do raio laser ( $\alpha$ ), e são demonstrados na Equação 12 e Figura 7. O ângulo de divergência pode ser ajustado por meio de elementos óticos apropriados do transmissor para um ponto projetado de dimensões controladas de acordo com a superfície levantada. O aumento no diâmetro do feixe laser pode ocasionar que uma fração de um mesmo feixe encontre mais de um objeto com alturas distintas. Essa capacidade de distinção de várias reflexões de um pulso laser, permite a identificação de objetos que se projetam acima do solo como edificações e árvores por exemplo. Com a correta interpretação dos pontos processados, é possível a criação de um MDT através da operação chamada de Remoção Virtual da Camada de Vegetação e Edificações. Esse fenômeno pode

ser observado na Figura 8, onde, no exemplo, um feixe laser atinge duas superfícies de alturas diferentes, gerando duas cotas (Z) distintas em um mesmo sinal de retorno. Normalmente, é considerada como a cota do terreno o pulso de retorno com cota mais baixa (BRANDALIZE, 2002; SANTOS, 2013).

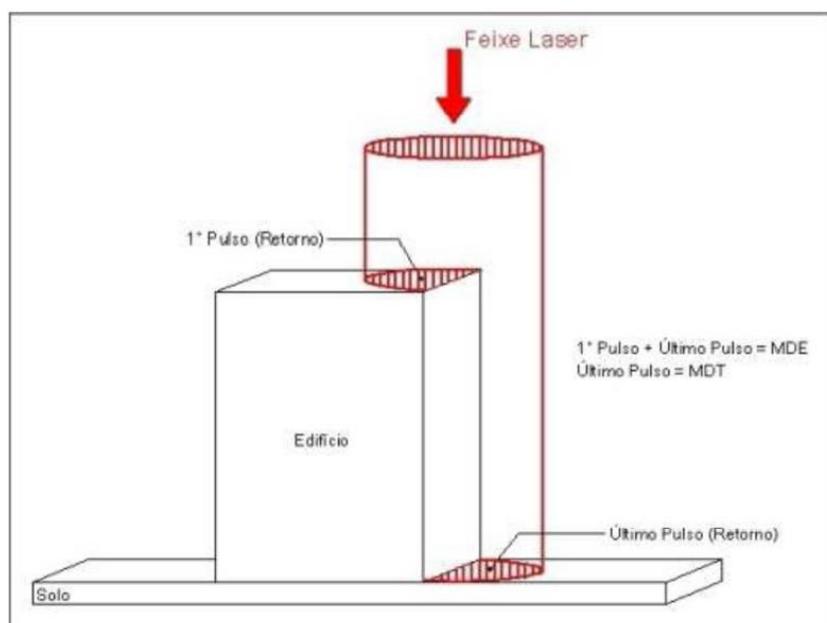
$$D = \alpha \times H \quad (12)$$

Figura 8 – Diâmetro do ponto projetado no solo em função da altura de voo



Fonte: Brandalize (2002)

Figura 9 – Representação de primeiro e segundo pulsos de um mesmo feixe laser

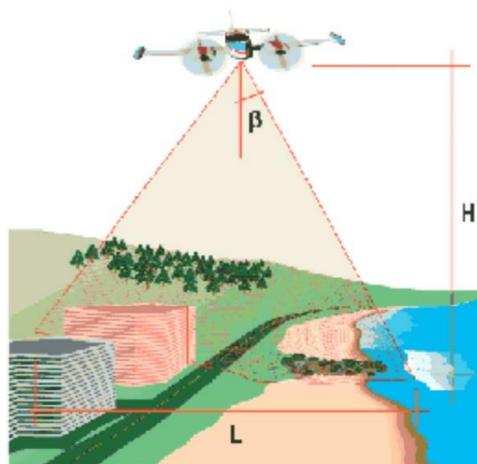


Fonte: Santos (2013)

O levantamento de superfície realizado através do sistema LiDAR aerotransportado é executado transversalmente à direção da linha de voo, como pode ser observado na Figura 9. A largura da faixa de varredura ( $L$ ) varia em função da altura da aeronave ( $H$ ) e do seu ângulo de abertura ( $\beta$ ), que está descrita pela Equação 13.

$$L = 2 \times H \times \tan \beta \quad (13)$$

Figura 10 – Largura da faixa coberta pela varredura do laser



Fonte: Brandalize (2002)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Propõem-se duas aplicações dos produtos da tecnologia LiDAR. A primeira é a caracterização volumétrica de reservatórios de pequeno e grande porte localizados na bacia do rio Pajeú. A outra aplicação diz respeito à detecção de açudes e identificação de suas bacias hidráulicas na bacia do riacho Quixaba, afluente do riacho do Navio.

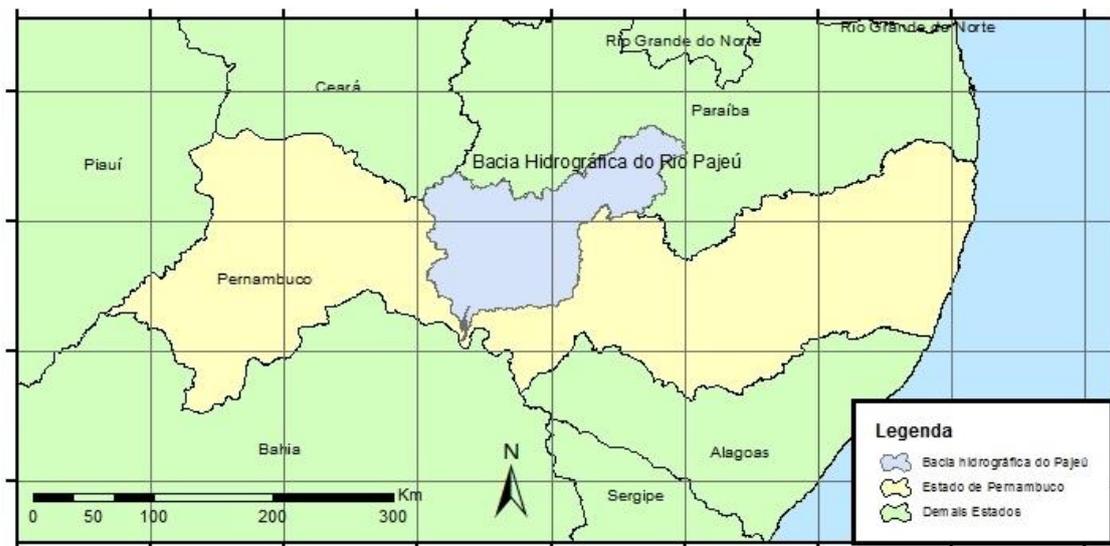
#### 3.1 Região de estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú

As principais características da bacia do rio Pajeú e riacho Quixaba são descritas a seguir.

##### 3.1.1 Localização

A bacia hidrográfica do rio Pajeú, que também forma a Unidade de Planejamento Hídrico UP9, localiza-se inteiramente no Estado de Pernambuco (Figura 10), entre coordenadas geográficas 7°16'20" e 8°56'01" de latitude sul e 36°59'00" e 38°57'45" de longitude oeste (Figura 11). Está inserida na região fisiográfica do Sertão Pernambucano e nas microrregiões do Pajeú, do Sertão do Moxotó, do Salgueiro e de Itaparica. A bacia possui uma área de 16.838,74 km<sup>2</sup>, correspondendo a 17,02% do território pernambucano, sendo a maior bacia hidrográfica do Estado. O rio Pajeú percorre 355 km de extensão, da nascente, até a foz, que está localizada no lago de Itaparica no submédio do São Francisco. A bacia limita-se ao norte com os estados do Ceará e Paraíba; ao sul com o terceiro grupo de bacias de pequenos rios interiores GI3 (UP22) e a bacia hidrográfica do Moxotó (UP8); a leste com a bacia hidrográfica do Moxotó (UP8) e o Estado da Paraíba e a oeste com a bacia hidrográfica do rio Terra Nova (UP10) e o quarto grupo de pequenos rios interiores GI4 (UP23) (PERNAMBUCO, 1998).

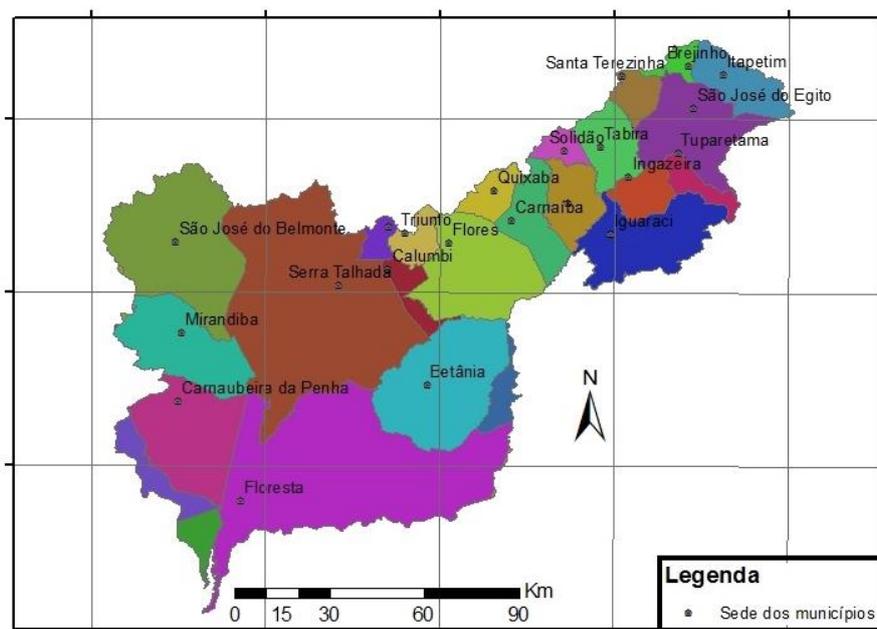
Figura 11 – Mapa de localização da bacia do Pajeú



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com Feitosa (2012), 29 municípios do Estado de Pernambuco são drenados pela bacia do Pajeú, sendo dezesseis deles totalmente inseridos na bacia (Afogados da Ingazeira, Betânia, Brejinho, Calumbi, Flores, Ingazeira, Itapetim, Quixabá, Santa Cruz da Baixa Verde, Santa Terezinha, São José do Egito, Serra Talhada, Solidão, Tabira, Triunfo e Tuparetama), cinco com a maior parte de suas áreas e sedes inseridas na bacia (Carnaíba, Floresta, Mirandiba, Iguaraci e São José do Belmonte), quatro com parte de suas áreas dentro da bacia (Belém do São Francisco, Carnaubeira da Penha, Custódia e Itacuruba) e quatro com apenas uma pequena parte de suas terras inseridas na área da bacia (Ibimirim, Salgueiro, Sertânia e Verdejante), conforme pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – Municípios inseridos na Bacia do Pajeú



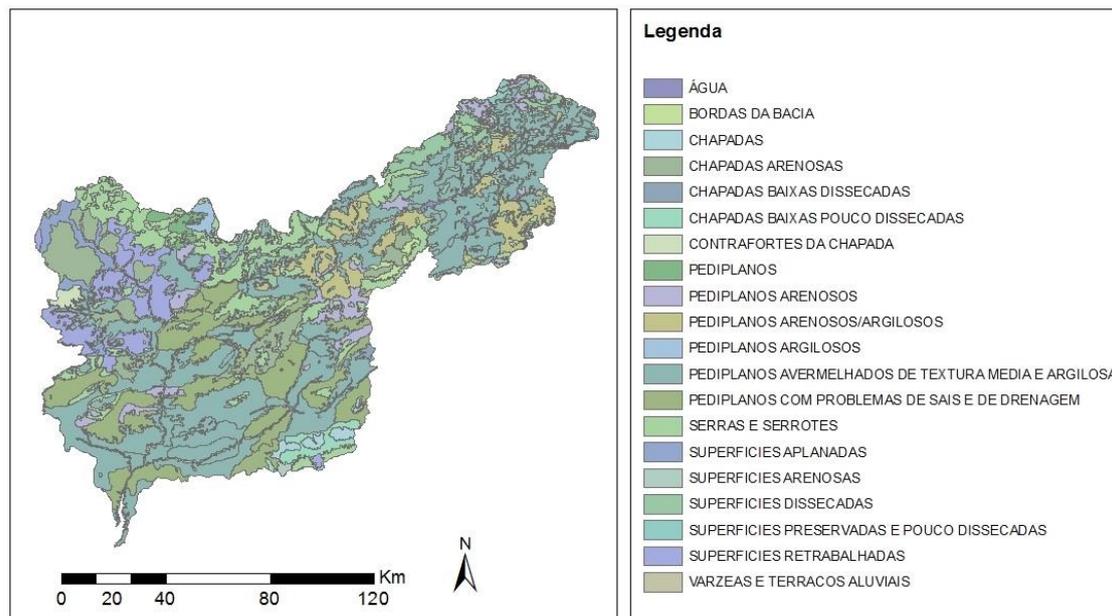
Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.1.2 Geomorfologia e relevo

A bacia do rio Pajeú apresenta como formas predominantes os relevos ondulados e colinosos de pequenas e médias estruturas. Essas elevações aparecem em altitudes e comprimentos variados, principalmente em estruturas cristalinas, vales encaixados, dissecados e serras, como demonstra a Figura 13. As serras se demonstram com declividades médias entre 20 e 42%, e rampas que variam de 400 a 900 metros. Os relevos ondulados e colinosos apresentam declividades médias entre 2,5 e 14% e rampas que variam de 130 a 1600 metros (PERNAMBUCO, 1998; ARAÚJO, 2000).

A bacia do Pajeú, segundo Feitosa (2012), tem uma grande variedade de formas e estruturas, especialmente pela presença das grandes bacias sedimentares, das estruturas cristalinas e da Depressão Sertaneja. As bacias sedimentares de Betânia, Fátima, Mirandiba, São José do Belmonte e Jatobá, apresentam-se dissecadas, pouco dissecadas e retrabalhadas. Já as estruturas cristalinas localizadas no Planalto da Borborema apresentam-se dissecadas, escarpadas e preservadas.

Figura 13 – Mapa geomorfológico da Bacia do Pajeú



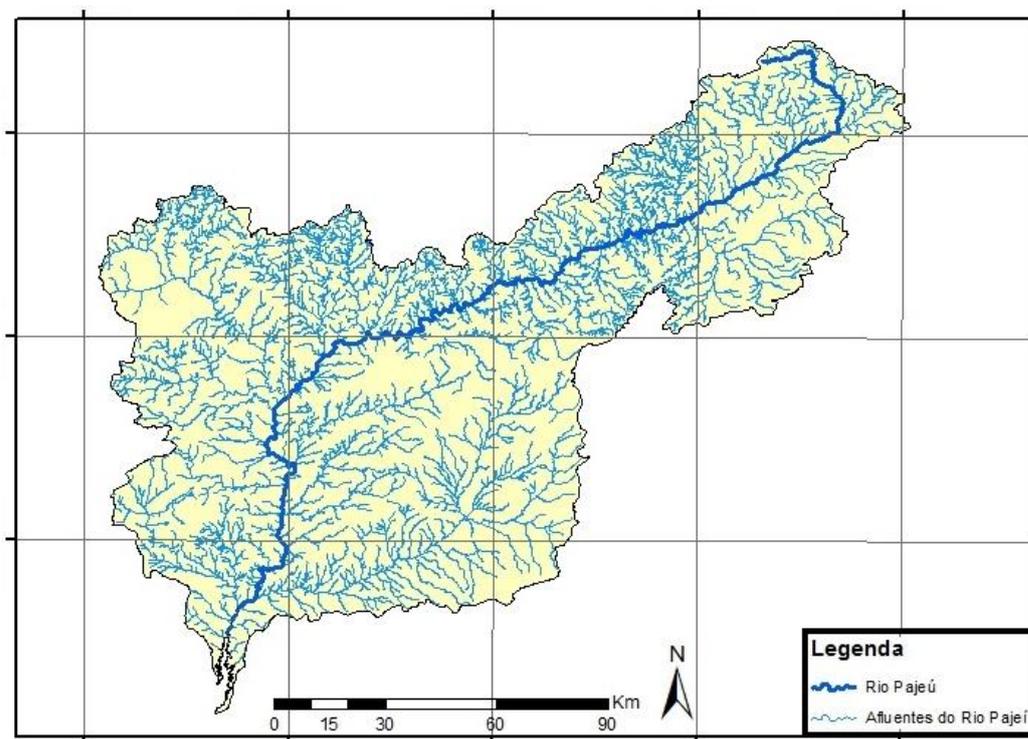
Fonte: CPRM (2012)

No trecho norte da bacia, conhecida como alto Pajeú, o relevo se apresenta mais serrano e colinoso, por vezes intercalado por vales encaixados e dissecados. Nessa área, o substrato revela-se mais rochoso e composto por rochas do embasamento cristalino. Nas áreas do médio e do baixo Pajeú, onde ocorre o domínio da depressão sertaneja, apresenta-se predominantemente as grandes bacias sedimentares, além da ocorrência de estruturas cristalinas e vales bastante dissecados (FEITOSA, 2012).

### 3.1.3 Rede hidrográfica

O rio Pajeú nasce no município de Brejinho, nos limites entre os estados de Pernambuco e Paraíba, a aproximadamente 800m de altitude. Ele segue por 343,21 km até desaguar no lago da barragem Itaparica, no Rio São Francisco. O rio apresenta regime fluvial intermitente, e margeia as cidades de Itapetim, Tuparetama, Ingazeira, Afogados da Ingazeira, Carnaíba, Flores, Calumbi, Serra Talhada e Floresta. Os principais afluentes pela margem direita são os riachos Tigre, Barreira, Brejo, São Cristóvão e Belém e, pela margem esquerda, os riachos do Cedro, Quixabá, São Domingos, Poço do Negro e do Navio (PERNAMBUCO, 1998). A rede hidrográfica do Rio Pajeú pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 – Mapa da rede hidrográfica da Bacia do Pajeú



Fonte: Elaborado pelo autor

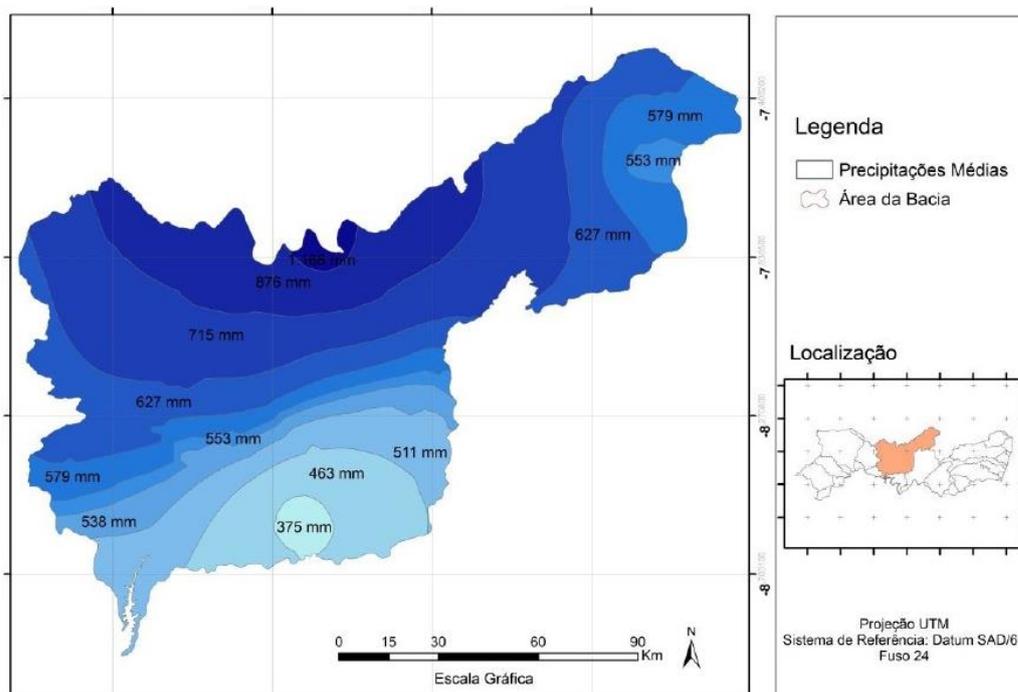
O riacho do Navio é o principal afluente do rio Pajeú, nascendo a aproximadamente 750 metros de altitude, na serra das Piabas, limite entre os municípios de Betânia e Custódia. Ele percorre 135,24km até desaguar no rio Pajeú drenando inteiramente os municípios de Betânia e de Floresta. A rede hidrográfica da bacia do Pajeú apresenta regime sazonal-intermitente em todos os rios e riachos que a compõe, manifestando interrupção do curso d'água nos períodos de estiagem. Isso ocorre principalmente pelas condições climáticas da região, onde a precipitação média anual é de 700 milímetros, distribuindo-se de maneira irregular e concentrada (FEITOSA, 2012).

#### 3.1.4 Características climáticas

A bacia do Pajeú possui um clima quente do tipo Tropical semiárido, apresentando evapotranspiração de até 2500 mm/ano. O período chuvoso dessa região varia entre os meses de janeiro a maio, sendo os meses com maiores índices pluviométricos março e abril, com precipitações médias em torno de 112,3 mm/mês. Os meses mais secos são agosto e setembro, quando as precipitações raramente ultrapassam os 10 mm/mês. A precipitação média anual

é de 647 milímetros, podendo haver grande variação ao longo da bacia em função da variação de altitude. Nas áreas com menor altitude, ao sul da bacia, a precipitação média varia entre 375 mm/ano a 538 mm/ano. Já nas áreas mais elevadas da bacia, ao norte e noroeste, a precipitação média varia entre 876 mm/ano e 1168 mm/ano (ARAÚJO FILHO et al., 2000; BRASIL, 2011; FEITOSA, 2012). A Figura 15 apresenta o mapa pluviométrico da bacia do Rio Pajeú.

Figura 15 – Mapa Pluviométrico da bacia do Pajeú



Fonte: Feitosa (2012)

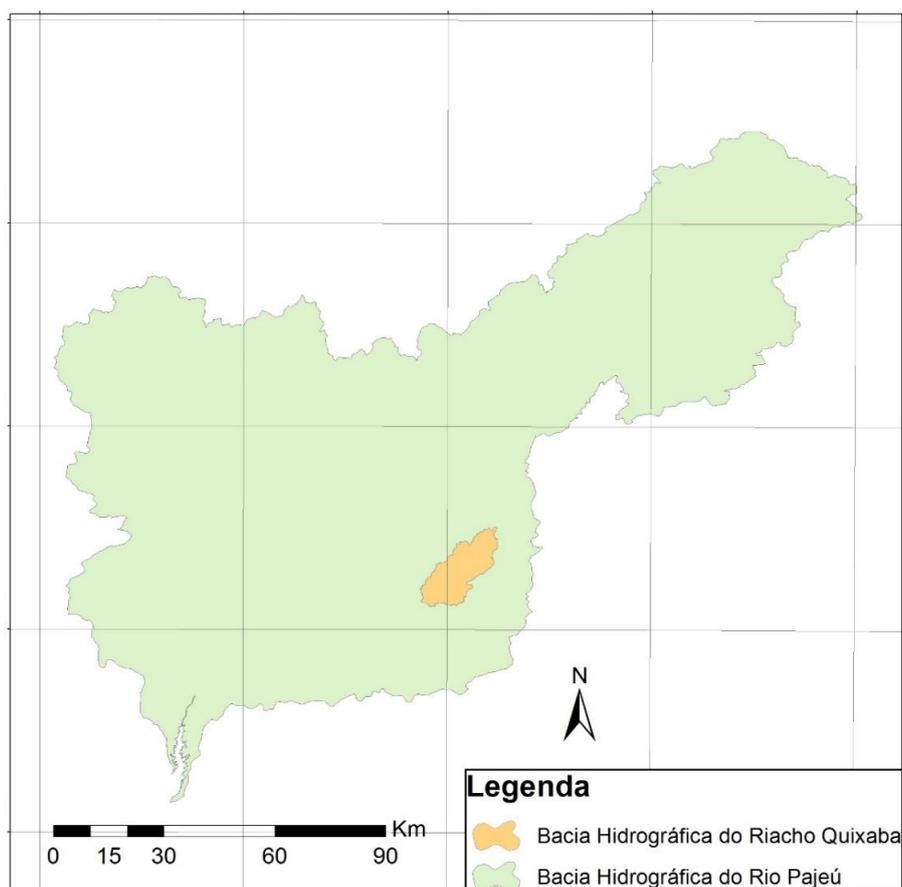
Na região do local de estudo, de acordo com Feitosa (2012), bem como no sertão do estado de Pernambuco, os efeitos das estiagens prolongadas são percebidos com grande intensidade, com precipitações pluviométricas bastante irregulares, contrastando secas prolongadas com chuvas torrenciais efêmeras. O município que apresenta a maior temperatura anual média da bacia é Tabira com 27,2°C e o município com a menor temperatura anual é Triunfo com 21,0°C.

### 3.1.5 Bacia hidrográfica do Riacho Quixaba

Para identificação de barramentos através do MDT, foi escolhida como área de estudo a bacia hidrográfica do Riacho Quixaba, localizada na bacia do Rio Pajeú. A bacia hidrográfica do riacho Quixaba fica na mesorregião do Sertão Pernambucano e na microrregião do Pajeú.

As características fisiográficas dessa bacia se assemelham às características da bacia do rio Pajeú descritas nas seções anteriores de maneira geral, e particularmente ao sudeste da bacia, onde encontra-se completamente inserida no município de Betânia, entre coordenadas geográficas  $8^{\circ}14'45''$  e  $8^{\circ}26'36''$  de latitude sul e  $37^{\circ}52'58''$  e  $38^{\circ}03'55''$  de longitude oeste. A bacia do Riacho Quixaba localiza-se inteiramente na depressão sertaneja (Figura 18). Aproximadamente 60% de sua área é composta por Luvissole crômico, abrangendo do centro ao leste de todo o seu território. Os 40% restantes são compostos por planossolo nátrico, abrangendo todo o oeste da região.

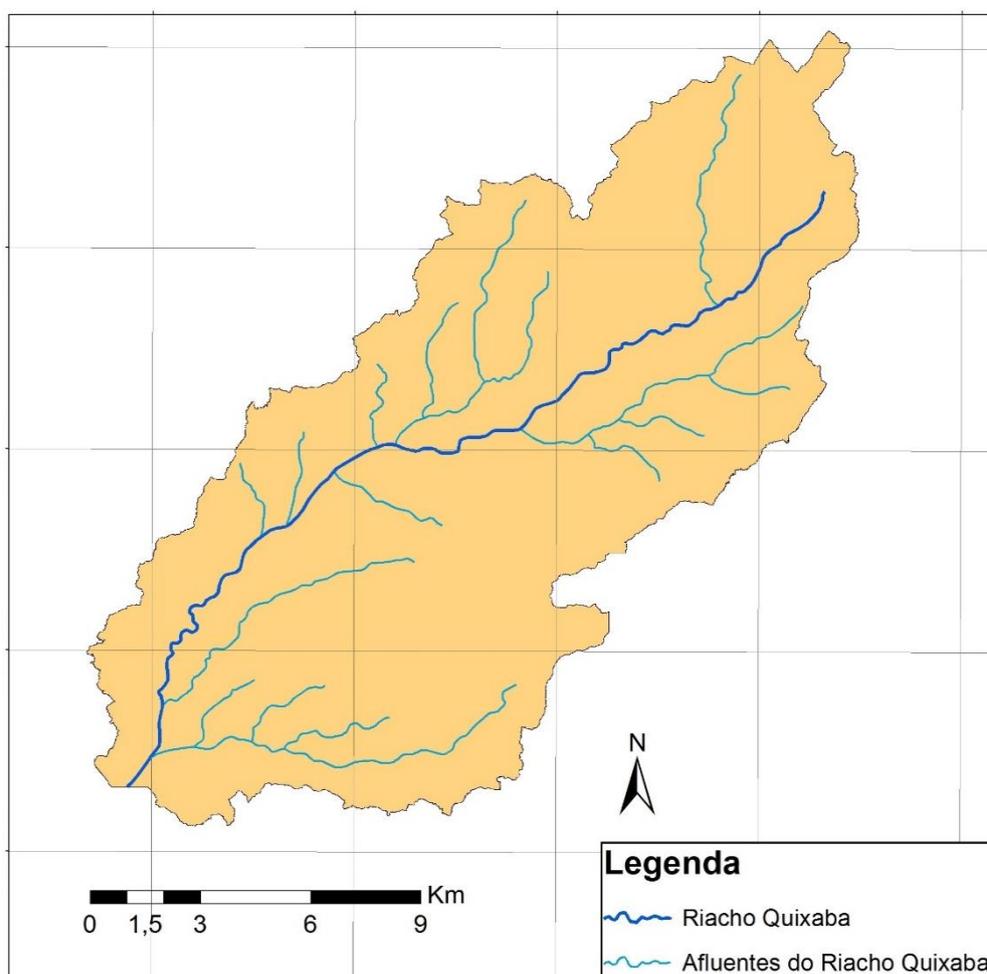
Figura 16 – Localização da bacia hidrográfica do Riacho Quixaba



Fonte: Elaborado pelo autor

O Riacho Quixaba nasce ao leste do município de Betânia, próximo aos limites entre os municípios de Betânia e Custódia, a aproximadamente 507m de altitude e sua bacia abrange uma área de 226,67 km<sup>2</sup>. Segue por 28 km até desaguar no lago da barragem Barra do Juá, no Riacho do Navio. O riacho e seus afluentes apresentam regime fluvial sazonal-intermitente, manifestando interrupção do curso d'água nos períodos de estiagem. Sua rede hidrográfica pode ser observada na Figura 19.

Figura 17 – Rede Hidrográfica do Riacho Quixaba



Fonte: Elaborado pelo autor

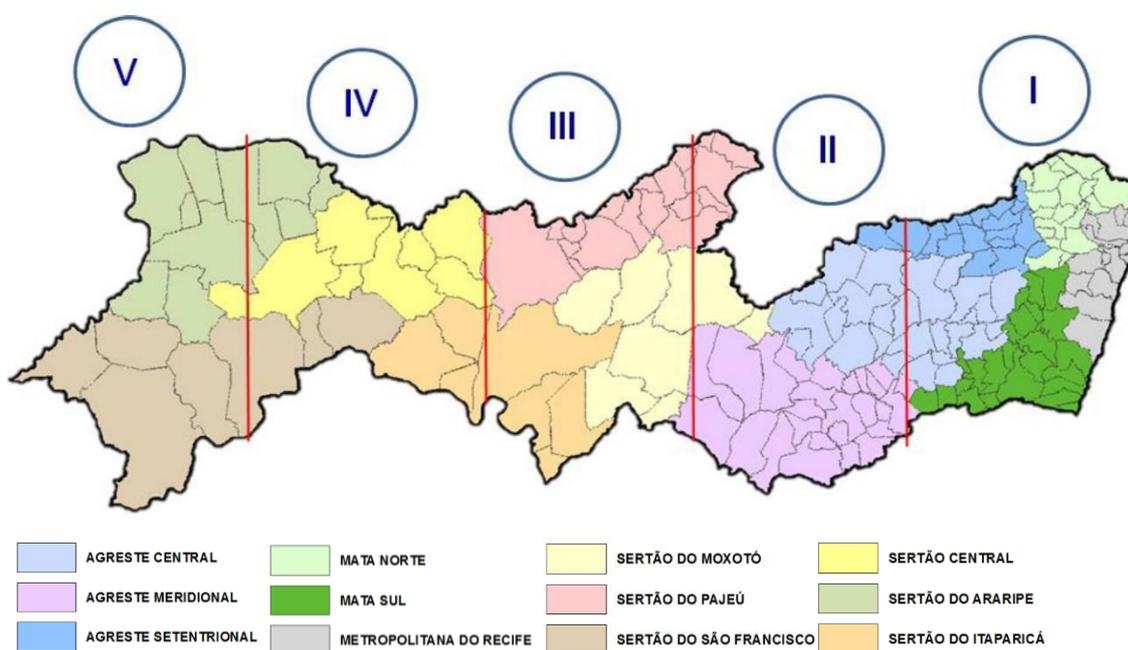
### 3.2 Projeto Pernambuco Tridimensional

Pernambuco Tridimensional (PE 3D) é um projeto do Governo de Pernambuco que visa mapear todo o território estadual através de levantamento aerofotogramétrico digital e perfilamento a laser do relevo. O trabalho foi realizado com o auxílio de 8 aviões equipados com câmeras digitais de alta

resolução e sensores, onde os mesmos foram operados por empresas em cinco frentes simultâneas, divididas territorialmente de acordo com a Figura 20, cobrindo as 12 regiões de desenvolvimento do estado de Pernambuco (CIRILO et al., 2015).

O perfilamento a laser realizado nesse trabalho, capta 3 pontos cotados para cada 4 m<sup>2</sup>. Considerando a área coberta pelo levantamento, a base de dados conta com 75 bilhões de pontos com coordenadas planas e altitudes conhecidas (CIRILO et al., 2014; PERNAMBUCO, 2017).

Figura 18 – Divisão do estado de Pernambuco em 5 blocos de mapeamento

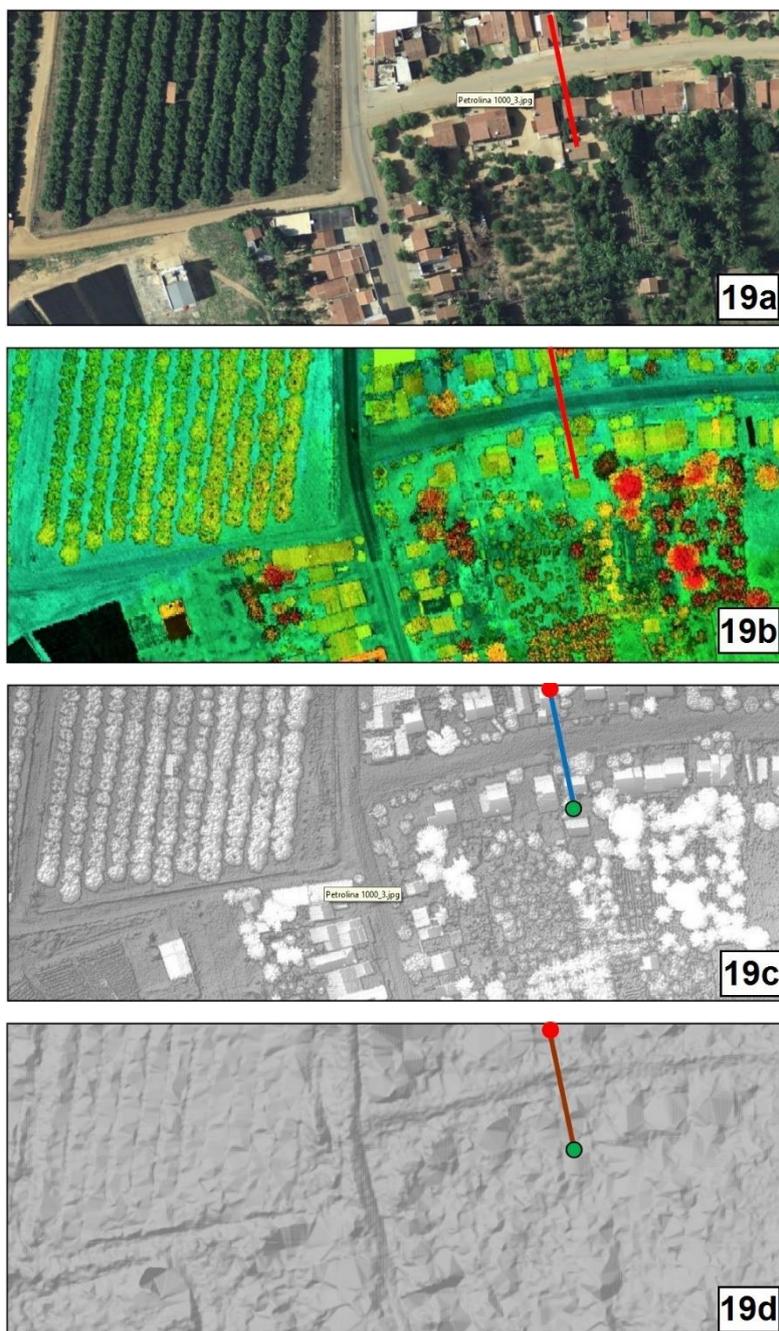


Fonte: Cirilo et al. (2014)

O projeto consiste no recobrimento aerofotogramétrico digital, perfilamento a laser e implantação de marcos geodésicos. O recobrimento aerofotogramétrico digital realizado, de acordo com Pernambuco (2013), utiliza resolução espacial de 12 cm, ou melhor, geração de ortoimagem na escala de 1:1.000, o perfilamento a Laser tem erro máximo altimétrico menor que 10 cm e geração do MDT para a extensão de 870 km<sup>2</sup> correspondente às áreas urbanas de 26 municípios do estado de Pernambuco. Para o restante da área do Estado, foi utilizada resolução espacial de 50 cm (aerofotogrametria), ou maior, e geração de ortoimagem na escala de 1:5.000, assim como foi adotado erro máximo altimétrico menor que 25 cm e geração do Modelo Digital do Terreno

cobrindo uma extensão total de 98.146km<sup>2</sup>. Pode ser observado, conforme Figura 19, exemplos dos produtos entregues pelo programa PE 3D.

Figura 19 – Exemplos dos produtos obtidos a partir do mapeamento PE Tridimensional. 19a – Ortofoto; 19b – Composição de intensidade-hipsométrica; 19c – Modelo Digital de Elevação, 19d – Modelo Digital do Terreno.



Fonte: Cirilo et al. (2015)

Na Figura 19a é mostrado um exemplo de ortofoto do mapeamento da escala 1:1000 da área urbana do município de Petrolina. Na Figura 19b, ilustra-

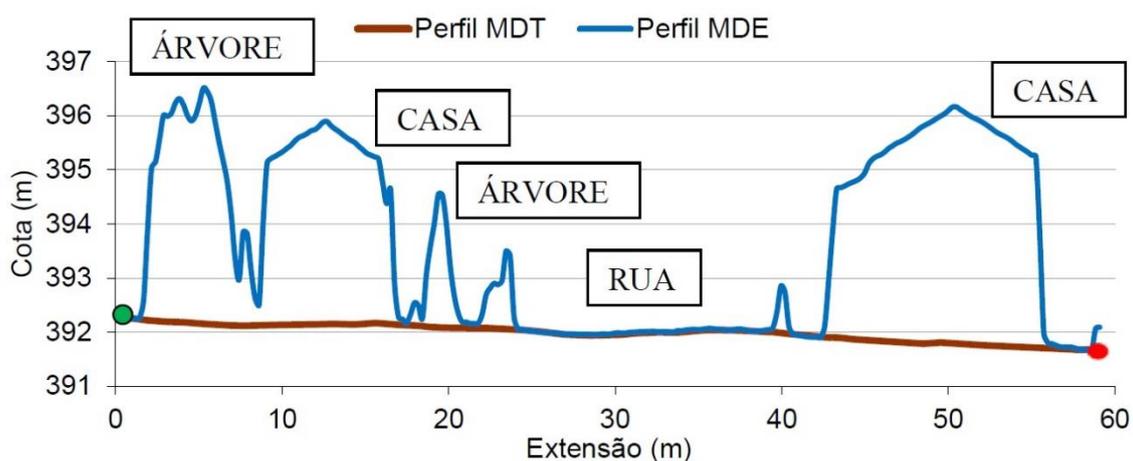
se uma imagem de composição de intensidade-hipsometria para o mesmo local. Essa composição é gerada entre a intensidade de retorno do pulso luminoso emitido pelo laser e a hipsometria que representa a altitude numa escala de cores (CIRILO et al., 2015).

Na Figura 19c é mostrado o MDE, que consiste na amostragem de todos os pontos que retornam após a emissão do feixe de luz. Esse produto é entregue num arquivo tipo “. x,y,z,i” que contém três coordenadas e o percentual de intensidade do retorno de luz. Este conjunto de pontos representa todos os alvos da superfície como edifícios, pontes, vegetação e corpos d’água.

Na Figura 19d, é mostrado o MDT, onde é utilizado um algoritmo de classificação para filtrar os pontos correspondentes aos alvos citados. Esse produto é entregue num arquivo “.x,y,z” que contém as coordenadas e cotas que representam efetivamente a superfície do terreno. A nuvem de pontos para representação de cada modelo é processada e convertida para arquivos de imagens *GEOTIFF* com resolução espacial de 1m.

De acordo com a Figura 20, podem ser observadas as diferenças do MDE e MDT a partir do perfil de uma mesma seção. O perfil do MDE acompanha o topo dos alvos encontrados, sendo uma resposta direta aos feixes de luz emitidos. Já o perfil do MDT acompanha a topografia do terreno, corrigindo os alvos que não são identificados como terrenos, árvores e casas.

Figura 20 – Comparativo entre seções obtidas a partir do MDE e do MDT com resolução espacial de 50 cm.



Fonte: Cirilo et al. (2015)

## **Ortofotos**

A ortorretificação consiste na correção geométrica das imagens, onde são eliminadas as distorções provenientes do relevo, projeção perspectiva da câmera, altitude e velocidade da aeronave. Esta correção nada mais é do que uma transformação geométrica onde a perspectiva central da fotografia é transformada para a projeção ortogonal. A geração das ortofotos será a partir das imagens da cobertura aerofotogramétrica e MDT obtido através do perfilamento laser (PERNAMBUCO, 2013).

No programa PE 3D, foram geradas ortofotos digitais coloridas de toda a área incluída no levantamento aerofotogramétrico. A correção geométrica utilizada nesse projeto foi realizada a partir da comparação entre as coordenadas tridimensionais do terreno e as coordenadas planas da fotografia, adotando-se o sistema de projeção UTM e Datum SIRGAS 2000. Visando também eliminar mudanças de luminosidade entre imagens adjacentes e uniformizar o contraste e tonalidade das ortofotos sem perda de informações visuais, a ortorretificação foi complementada por ajuste radiométrico das imagens (PERNAMBUCO, 2013).

### **3.3 Detecção de açudes através de MDT**

A detecção dos açudes através de MDT realizada neste estudo consiste na identificação de barramentos em uma área através das características topográficas particulares que esses barramentos contêm. O processo de identificação de barragens utiliza como base de dados o MDT da área de estudo e as ortofotos correspondentes.

Quando a área escolhida para o estudo precisa de dois ou mais modelos numéricos de sua base de dados para ser completamente abrangida, é necessária a criação de um mosaico, que consiste na união de imagens ou modelos numéricos em uma única imagem ou modelo numérico.

Esse estudo foi desenvolvido para a bacia hidrográfica do Riacho Quixaba, no sertão pernambucano e utilizou como base de dados MDT's e ortofotos provenientes do projeto Pernambuco Tridimensional.

As etapas podem ser resumidas da seguinte forma:

- Criação do mosaico abrangendo toda a área da bacia do Riacho Quixaba;
- Delimitação da bacia;
- Extração do MDT da área da bacia;
- Criação do MDT com as depressões preenchidas a partir do MDT original;
- Subtração do MDT com as depressões preenchidas do MDT original;
- Criação dos polígonos (Vetorização) a partir do produto da subtração realizada;
- Identificação dos barramentos a partir dos polígonos criados e ortofotos.

Essas etapas são descritas em detalhes a seguir.

### 3.3.1 Criação de mosaico e delimitação da bacia hidrográfica

O MDT da região de estudo foi obtido após um longo período de estiagem, e a maioria dos reservatórios estava parcialmente ou completamente vazios. Para o método utilizado, essa é a condição ideal para a identificação desses açudes.

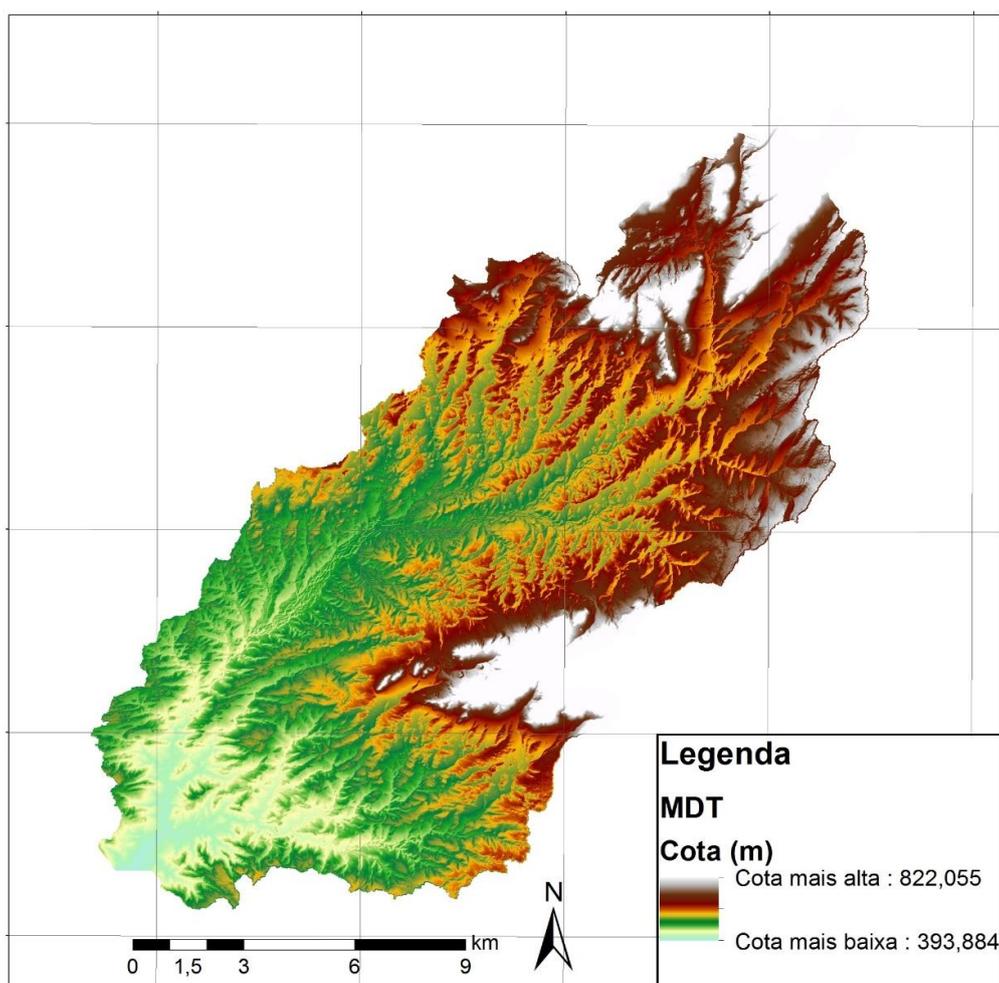
Para determinação da bacia hidrográfica da região de estudo, primeiramente é necessária a criação de mosaicos das imagens e modelos numéricos disponíveis para a formação de uma única figura abrangendo toda a área de interesse. Os mosaicos são definidos, segundo Feitosa (2012), como representações sinóticas de determinadas áreas com vistas à atualização de dados superficiais sobre as diversas modalidades de uso e ocupação do solo, da área imageada, visando revelar de forma fiel a situação atual dessas áreas. De modo geral, pode-se dizer que consiste num processo de junção de duas ou mais imagens retificadas geometricamente para formar uma imagem maior.

Inicialmente, foram obtidos os MDT's e ortofotos que abrangem toda a área da Bacia do Riacho Quixaba. Os arquivos MDT e ortofotos utilizados tem como características a adoção do sistema de coordenadas projetadas UTM, Datum SIRGAS 2000, fuso 24, com 1 metro de resolução espacial compatíveis com a escala de 1:5.000. O tipo de processamento adotado foi o matricial (*raster*)

de 32 *bits* no formato *GEOTIFF*. Com este material disponível, foi possível desenvolver o método de estudo apresentado a seguir.

Com a obtenção dessas informações, foi montado um mosaico de 65 quadros dos arquivos correspondes ao MDT e 65 imagens dos arquivos correspondentes às ortofotos em ambiente de SIG. Realizado o mosaico, pode ser iniciado o processo de determinação da sub-bacia da área de estudo, onde a ferramenta utilizada para este trabalho é o *ArcHydro Tools* do software *ArcGIS 10.1* (ESRI, 2012). Essa ferramenta utiliza como base para os cálculos o MDE ou MDT. O processo consiste numa sequência de procedimentos que criam arquivos tipo *Raster (GRID)* e vetores que servirão de base para a definição da sub-bacia de interesse. A Figura 21 apresenta o MDT da área do Riacho Quixaba.

Figura 21 – MDT da bacia do Riacho Quixaba



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.3.2 Definições de direções de escoamento e preenchimento de depressões

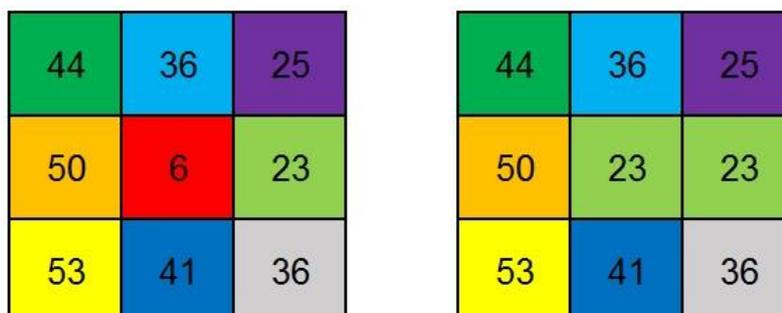
O conceito de como é determinada as direções de escoamento através de MDT ou MDE é fundamental para entender a importância do preenchimento de depressões. Para determinar a rede de drenagem, bacias hidrográficas e sub-bacias de uma área através de MDT pelo programa ArcGIS, no conjunto de ferramentas Arc-hydro e no *Terrain Analysis System* (TAS), primeiramente é realizado o preenchimento das depressões contidas na matriz.

Para definição das direções de escoamento baseados em MDT existem vários métodos. Dentre esses métodos, a maior parte deles se baseiam no algoritmo chamado D8 (*deterministic eight-neighbors*), onde é definida uma entre oito direções de escoamento utilizando como critério a maior declividade, ou seja, cada célula escoará apenas para uma das oito células vizinhas mais próximas (FAN et al., 2013).

Para a elaboração deste trabalho o algoritmo utilizado para a determinação da direção do fluxo de uma rede de drenagem foi o algoritmo de Jenson e Domingue. O algoritmo de Jenson e Domingue pode ser descrito resumidamente nas seguintes etapas (BUARQUE et al., 2009):

- Identificação e preenchimento de depressões simples, que são aquelas células isoladas cuja altitude é inferior a altitude das suas 8 células vizinhas. A altitude da célula que é considerada uma depressão simples é aumentada para o valor da altitude da célula vizinha mais baixa, conforme exemplo da Figura 22;

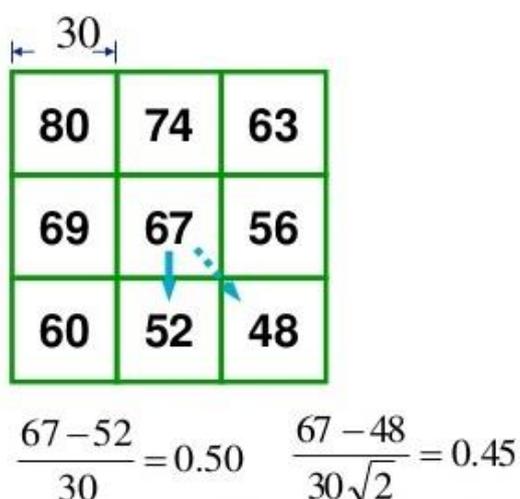
Figura 22 – Exemplo de preenchimento de depressões simples D8



Fonte: Adaptado pelo autor a partir do modelo proposto por Maidment (2002)

- Cálculo das direções de fluxo, onde, para cada célula determina-se a sua declividade em relação a cada uma das 8 células vizinhas, dada pela diferença de altitudes dividida pela distância entre os centros das células, como demonstra a Figura 23. Para as células vizinhas ortogonalmente, a distância é tomada como a largura da célula. Para as demais células, vizinhas diagonalmente, a distância é  $\sqrt{2}$  vezes a largura da célula. A Figura 24 exemplifica em perspectiva como é determinada a direção de fluxo segundo algoritmo D8.

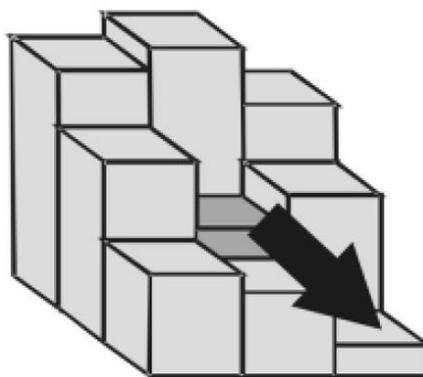
Figura 23 – Cálculo da direção de fluxo a partir do algoritmo D8



Fonte: Adaptado pelo autor a partir do modelo proposto por Maidment (2002)

- Identificação e tratamento das grandes depressões, que são células agrupadas e com direção de fluxo indefinida. Para cada grande depressão identifica-se qual célula da borda tem a célula vizinha de menor altitude. Tal célula vizinha é tida como potencial exutório da depressão. Verifica-se também se as depressões compartilham uma mesma célula exutória, o que possibilita considerá-las como uma única depressão, ou seja, elas se fundem. Para corrigir e possibilitar o fluxo, todas as células da depressão que têm altitude inferior à altitude da célula exutória da depressão, passam a ter esse valor.

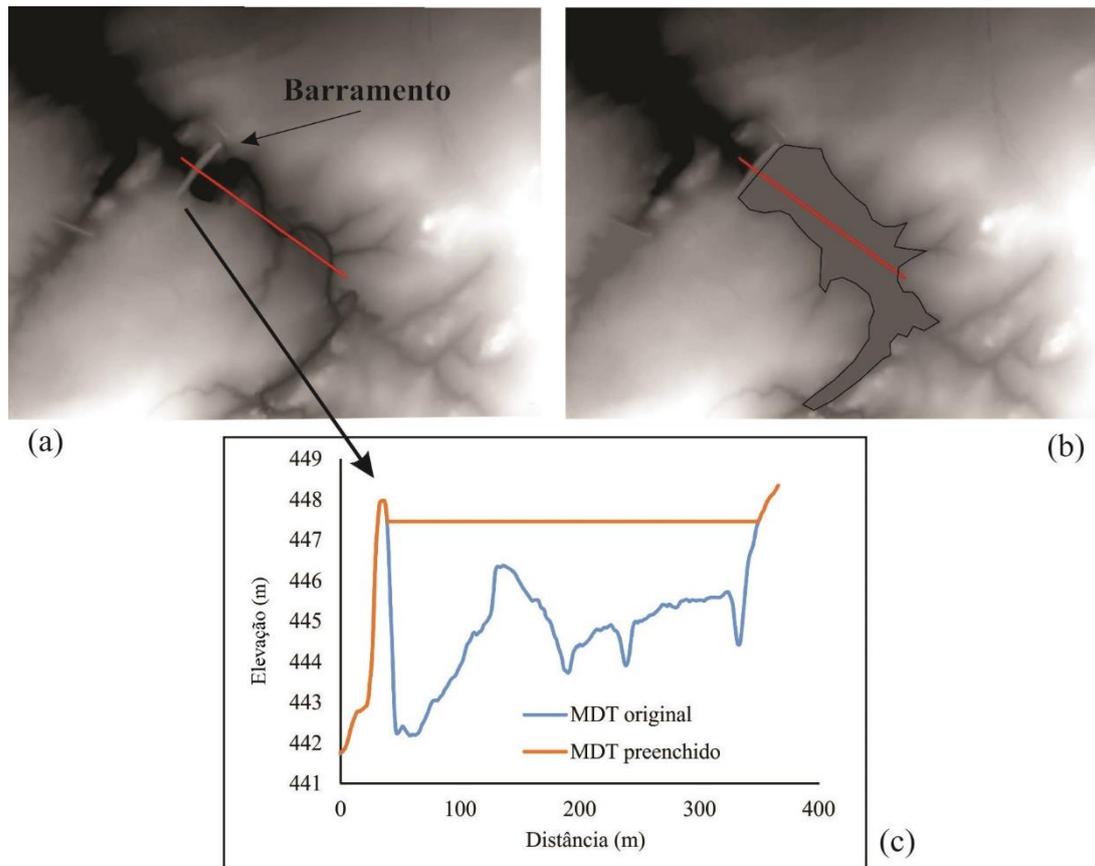
Figura 24 – Determinação da direção de fluxo de uma matriz 3x3 em perspectiva



Fonte: Buarque et al. (2009)

A eficácia do método será diretamente proporcional a maior taxa de pontos utilizados na área de interesse e também a maior precisão de cada ponto. O primeiro passo é a aplicação do preenchimento das depressões contidas no MDT da área de estudo. Essas depressões são identificadas como células de cota mais baixa circundados por células de cota mais alta (Figura 22). Para a determinação das linhas de drenagem da área e determinação das bacias e sub-bacias hidrográficas, esse procedimento é o primeiro a ser realizado para o correto funcionamento do método, pois sem essa correção a contribuição para a drenagem das células de cota mais baixa não aconteceria, ficariam contidas e não haveria fluxo. O preenchimento dessas depressões além de corrigir as falhas contidas no MDT, também preenchem os lagos secos, tanto naturais quanto artificiais. Para a utilização desse método foi utilizada a ferramenta “*Fill*”.

Figura 25 – MDT original (a), MDT preenchido (b) e perfis correspondentes à linha vermelha mostrada em (a) e (b).



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do PE 3D

Para ser efetuada a identificação dos lagos formados, utilizou-se o MDT com as depressões preenchidas (Figura 25b) formado pela operação anterior, e subtraiu-se dele o MDT original (Figura 25a). O produto dessa operação é um arquivo *Raster (Grid)* onde os trechos em que havia depressões assumem o valor correspondente à diferença de cota e os trechos onde o MDT original e o MDT com as depressões preenchidas teriam o mesmo valor assumem o valor (Z) igual a zero. Essa operação pode ser realizada por meio de álgebra de mapas.

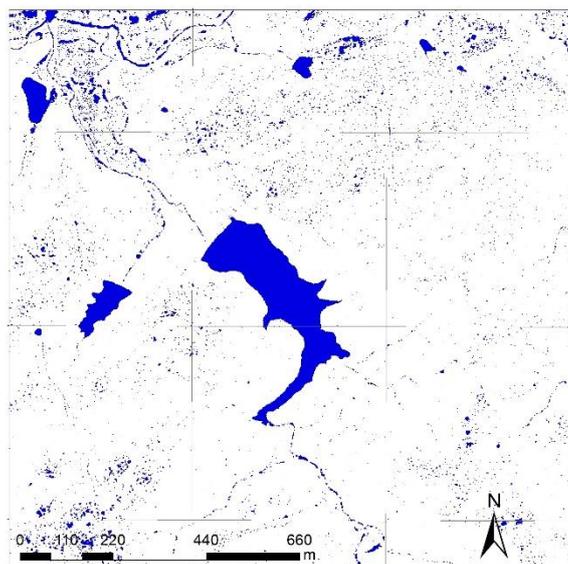
### 3.3.3 Detecção de açudes

Uma vez realizada a operação de subtração do MDT com as depressões preenchidas do MDT original, pode ser desenvolvida a classificação do modelo numérico. Essa classificação pode ser executada em duas classes, uma com as células com valor (Z) igual a zero, podendo ser classificada como Terreno e a

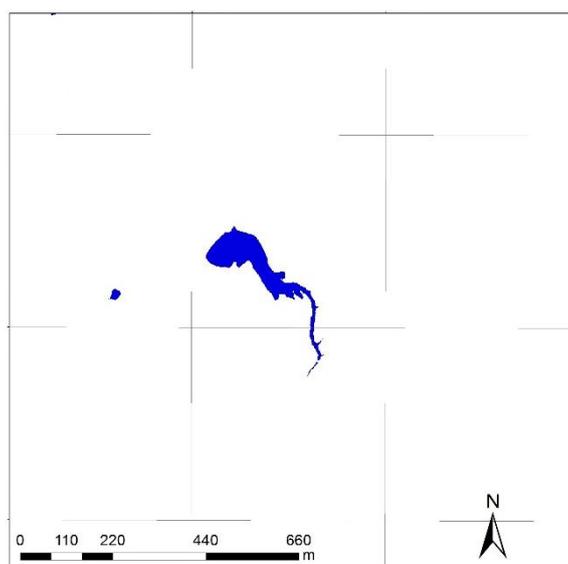
outra com as células com valores diferentes de zero, podendo ser classificada como Açudes. Ocorrida essa classificação, todos os trechos onde encontravam-se depressões e falhas no MDT original serão classificadas como Açudes e serão identificados no modelo numérico.

Para a classificação, pode ser alterado o valor (z) limite entre as classes Terreno e Açudes. Quando escolhido o valor limite nulo (0), todo o modelo numérico com valor (z) diferente de zero, será identificado como Açude. Esse limiar de classificação é definido como a altura (m) limite entre as classes a serem classificadas. Quanto mais se aumenta esse limiar, menos células são classificadas como depressões preenchidas, bem como menor é a área das depressões encontradas. Para a área de estudo em questão, essa operação identificará pequenos afundamentos no terreno, a rede de drenagem, falhas formadas na própria composição do MDT obtido através da nuvem de pontos e os barramentos presentes na área. A Figura 26 compara açudes identificados utilizando o limite de classificação nulo (0) e utilizando um limite diferente de zero escolhido pelo usuário.

Figura 26 – (a) Mapa de identificação de açudes com limiar de classificação nulo; (b) Mapa de identificação de açudes com limiar de classificação diferente de zero.



(a) Identificação de açudes usando limiar 0



(b) identificação de açudes limiar diferente de 0

Fonte: Elaborado pelo autor

O objetivo dessa operação é encontrar os açudes presentes na área de estudo, porém quando utilizamos o limiar de classificação igual a zero, além dos barramentos, são classificadas inúmeras correções de depressões que não se caracterizam por barramentos. A escolha do limite para classificação, depende da capacidade do usuário discernir visualmente (com o auxílio do modelo

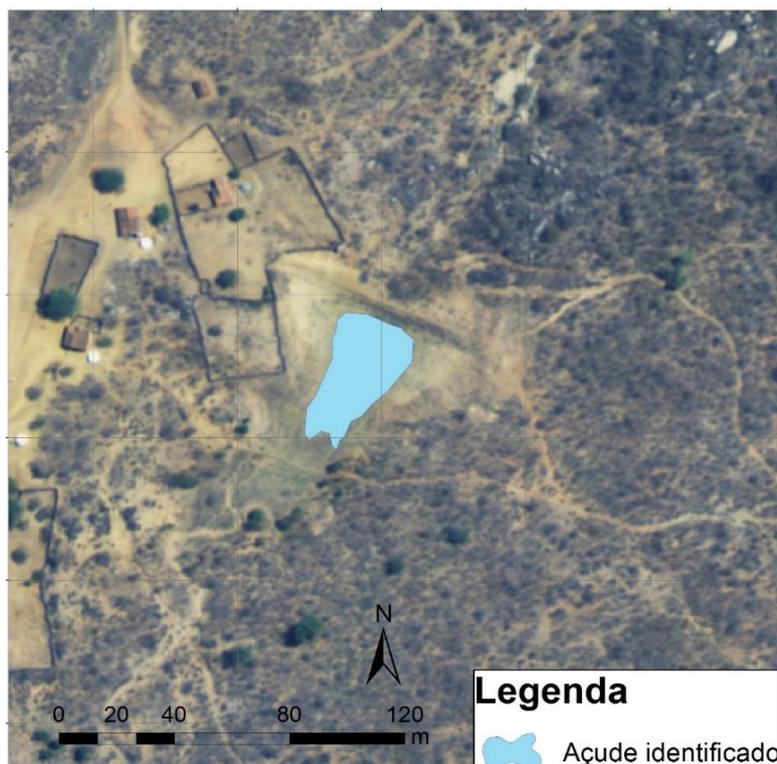
numérico contendo as depressões preenchidas e ortofotos da área de estudo), qual limite identifica o maior número de açudes e o menor número de ruídos.

Foram realizados dois procedimentos para detecção de barramentos na bacia hidrográfica do Riacho Quixaba. No primeiro procedimento, foi utilizado um limite entre as classes com o objetivo de detectar o máximo de barragens com o mínimo de ruídos. Num segundo momento, com todos os barramentos identificados, foram criados pontos de controle nas coordenadas correspondentes a cada barragem encontrada. Com os polígonos resultantes da etapa realizada para detecção de açudes com limiar de classificação igual a zero e com os pontos de controle, foram identificadas as bacias hidráulicas correspondentes a cada barramento identificado.

Com o auxílio das ortofotos do local de estudo e o arquivo do modelo numérico após classificação, é possível perceber que os trechos onde se encontram as barragens coincidem com o modelo numérico classificado, como também é possível identificar o ruído correspondente à correção dos erros presentes no mosaico do MDT. Esses ruídos podem ser amenizados através da alteração do limite estabelecido para classificação, onde originalmente eram descartadas apenas as células com valor igual a zero. O observador pode descartar também células com valores maiores. É importante salientar que quem manipula o modelo numérico deve buscar uma classificação onde se amenize o ruído sem deixar de identificar os lagos onde existam açudes.

Estabelecido o valor limite entre as classes, o arquivo contendo o modelo numérico classificado deve ser exportado utilizando a opção “*Use Renderer*” para que o resultado contenha células com valores binários. Essa condição é premissa para a transformação do modelo numérico em vetores tipo polígono. Cada polígono representará uma depressão ou falha do MDT original. Em uma região típica do semiárido Pernambuco num período seco, esses polígonos representaram as bacias hidráulicas de barragens. A Figura 27 apresenta um exemplo de um polígono representando a bacia hidráulica de um reservatório a partir de um modelo numérico classificado.

Figura 27 – Polígono criado a partir do modelo numérico classificado



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.3.4 Identificação de bacias hidráulicas

Para a identificação da bacia hidráulica dos barramentos, foi utilizado método semelhante à identificação de açudes, porém foi utilizado como limite entre as classes o valor zero (todas as depressões encontradas no MDT devem ser classificadas como Açude). A classificação sendo desenvolvida com limiar igual a zero, significa que todas as correções de depressões serão identificadas como barramentos. A quantidade de ruído gerado por essa operação é muitas vezes superior ao número de barramentos da área.

Quando os barramentos da área forem identificados por pontos ou polígonos com coordenadas correspondentes aos locais onde elas se encontram, esses dados podem ser utilizados como pontos de controle. Através da identificação visual dos polígonos criados e ortofoto do local, foram criados pontos com a localização dos açudes identificados. Esses pontos podem ser usados como parâmetro para eliminação do ruído proveniente da classificação utilizando o limiar igual a zero. Para ser produzida essa eliminação do ruído e identificar apenas as bacias hidráulicas geradas pelos barramentos da área,

usou-se a ferramenta *Spatial Join* do programa ArcGIS 10.1. Essa ferramenta irá ter como dados de entrada os polígonos gerados pela identificação de açudes utilizando a classificação com limiar igual a zero e os pontos de controle. Essa tarefa resultará em polígonos correspondentes às bacias hidráulicas das barragens no local de estudo, com tamanho e forma com maior precisão que os polígonos gerados para identificação de açudes, e eliminando todos os ruídos (polígonos que não representam açudes).

### 3.3.5 Determinação da acurácia na detecção de açudes através de MDT

Nessa pesquisa, existe uma grande variação da capacidade dos reservatórios. Por essa razão, é importante dividir os reservatórios por classes e categorias de armazenamento. As classes foram divididas em pequenos reservatórios (menores que 1 milhão m<sup>3</sup>), reservatórios de porte médio (1 – 3 milhões m<sup>3</sup>) e grandes reservatórios (maiores que 3 milhões m<sup>3</sup>). Os pequenos reservatórios também podem ser divididos em três categorias de acordo com Rodrigues et al. (2012) baseados em Liebe et al. (2005): Categoria 1, com área da superfície entre 1 e 3 ha; Categoria 2 entre 3 e 10 ha; Categoria 3 entre 3 e 10 ha.

No estudo, foi produzida a classificação das possíveis barragens através da criação de polígonos que correspondem aos lagos dos barramentos quando cheios. Para determinar a acurácia do trabalho realizado, foi comparado através de percepção visual os açudes, utilizando como base de dados as ortofotos da área da bacia hidrográfica do Riacho Quixaba, e os polígonos gerados pelo trabalho apresentado, conforme pode ser observado na Figura 27.

A partir da observação do mosaico das ortofotos da bacia hidrográfica do Riacho Quixaba e dos polígonos gerados para identificação de açudes através de MDT, foi gerada a identificação visual dos polígonos e dos açudes. Para isso, através do programa ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012), foi criado um arquivo *Shapefile* tipo ponto, onde cada ponto representa um açude identificado, ou um açude não identificado ou ainda um ruído. Se o polígono coincidir com um açude visualizado através de ortofoto, o ponto será classificado como identificado. Se o polígono coincidir em um trecho da ortofoto onde não existam barramentos, será classificado como ruído (falso positivo) e se for identificado um barramento através da ortofoto onde não foi criado um polígono, será considerado como um

açude não identificado (falso negativo). O desempenho da classificação foi avaliado através da exatidão global e das exatidões do produtor e do usuário calculadas para a classe de barramentos. Esses parâmetros foram calculados com base na Matriz de Confusão, também conhecida como Matriz de Erros.

A matriz de confusão é uma das técnicas mais utilizadas para avaliação da acurácia da classificação de dados de sensoriamento remoto. Ela se caracteriza, de acordo com Suarez e Candeias (2012), por uma matriz quadrada de números definidos em linhas e colunas que representam o total da amostra (pixels, grupos de pixels ou polígonos), onde é efetuado o cruzamento dos dados de referência (verdadeira), e da classificação gerada (predita). A diagonal principal da matriz corresponde aos dados que foram corretamente classificados e os valores que não estão na diagonal da matriz corresponde aos dados erroneamente classificados. Pode ser observado a partir da Tabela 3 uma matriz de confusão genérica.

Tabela 3 – Matriz de confusão

Classe	Verdadeira $C_1$	Verdadeira $C_2$	...	Verdadeira $C_n$
<i>Predita <math>C_1</math></i>	$M(C_1, C_1)$	$M(C_1, C_2)$	...	$M(C_1, C_n)$
<i>Predita <math>C_2</math></i>	$M(C_2, C_1)$	$M(C_2, C_2)$	...	$M(C_2, C_n)$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<i>Predita <math>C_n</math></i>	$M(C_n, C_1)$	$M(C_n, C_2)$	...	$M(C_n, C_n)$

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a classificação de açudes através de MDT, foram definidas duas classes, açudes e não açudes. A matriz de confusão utilizada tem como objetivo aferir a qualidade dessa classificação, considerando as classes positivo para açudes e negativo para não açudes e, verdadeiro para corretamente classificado e falso para erroneamente classificado, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Exemplo de matriz de confusão para 2 classes

Classe	Condição Positiva	Condição Negativa
Condição Positiva Preditada	Verdadeiro positivo	Falso positivo
Condição Negativa Preditada	Falso negativo	Verdadeiro negativo

Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo Congalton (1991), a exatidão global é calculada pela divisão da soma da diagonal principal da matriz de erros  $x_{ii}$  (que correspondem às amostras corretamente classificadas), pelo número total de amostras coletadas  $n$  e relaciona os elementos da diagonal com o total de pontos amostrados ou seja:

$$EG = \frac{\sum_{i=1} X_i}{n} \quad (14)$$

Onde:

$EG$  = Exatidão Global

$X_i$  = células que correspondem à concordância observada

$n$  = Número total de elementos

Conforme Francisco e Almeida (2012), a exatidão do usuário se caracteriza pela relação entre o número de amostras classificadas corretamente e o número total de amostras de uma classe obtida a partir da classificação. A exatidão do produtor, por sua vez, caracteriza-se pela relação entre o número de amostras classificadas corretamente e o número total de amostras de uma classe obtida a partir dos dados de referência.

$$E_u = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} \quad (15)$$

$$E_p = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \quad (16)$$

Onde:

$E_u$  = Exatidão do usuário

$E_p$  = Exatidão do produtor

$X_{ii}$  = Total de elementos que correspondem à concordância observada (diagonal)

$X_{i+}$  = Total de amostras de uma classe obtida a partir da classificação (linha)

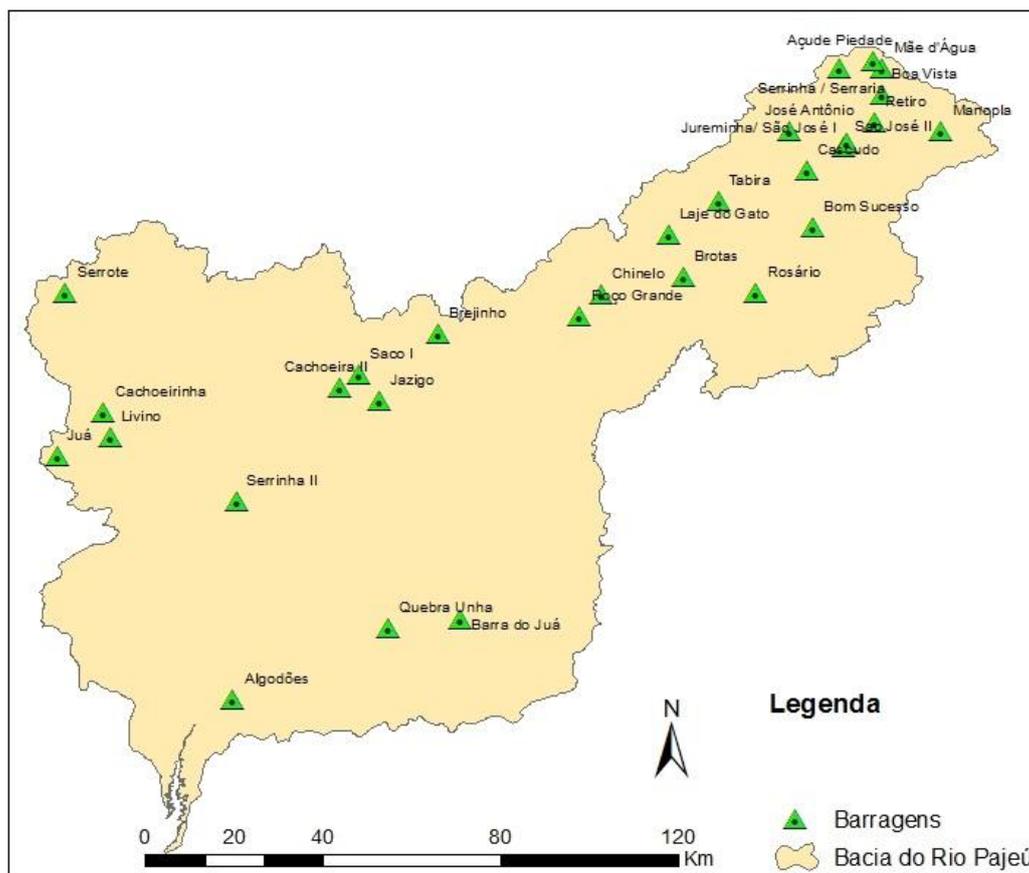
$X_{+i}$  = Total de amostras de uma classe obtida a partir dos dados de referência (coluna)

### **3.4 Obtenção das curvas Cota x Área x Volume das barragens cadastradas da bacia do Pajeú a partir do MDT**

Para obtenção da área e do volume em função da cota de barragens, foi utilizado como base de dados as ortofotos, MDT e MDE provenientes do programa Pernambuco Tridimensional. Essas imagens e modelos numéricos foram divididos em quadrantes de aproximadamente 3,5 km x 2,4 km. As ortofotos utilizadas tem resolução espacial de 50 cm, ou melhor, e escala de 1:5.000. O MDE e MDT utilizados apresentam erro máximo altimétrico menor que 25 cm e escala também de 1:5.000.

O estudo foi realizado nas barragens cadastradas pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), inseridas na bacia hidrográfica do rio Pajeú, onde haviam sido disponibilizadas até a data de 19/09/2016 as ortofotos, MDT e MDE. O mapa com a localização das barragens pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 – Mapa de localização das barragens estudadas na bacia do Rio Pajeú



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.4.1 Definição da bacia hidráulica de um reservatório a partir de MDT

Para definir a bacia hidráulica de um reservatório a partir de MDT, deve-se ter a localização do eixo da barragem de interesse, onde a partir dessa informação é possível encontrar as ortofotos, MDT's e MDE's correspondentes. Através de ortofotos foi possível fazer uma estimativa da área do lago gerado pela barragem e assim determinar quais os quadrantes das imagens e modelos numéricos serão necessários para definir a bacia hidráulica.

Antes de definir a bacia hidráulica do reservatório, foi necessária a criação de um mosaico com os MDT's onde o lago está inserido. Com o auxílio das ortofotos onde se encontra a barragem, pode ser identificado o vertedouro através de observação visual. Identificado o sangradouro e com o auxílio do MDE da mesma área, pode ser obtida a cota de sua soleira, através do programa ArcGis 10.1, do conjunto de ferramentas *3D analyst* e das ferramentas *interpolate line* para a definição da linha onde pretende-se obter as cotas e *profile*

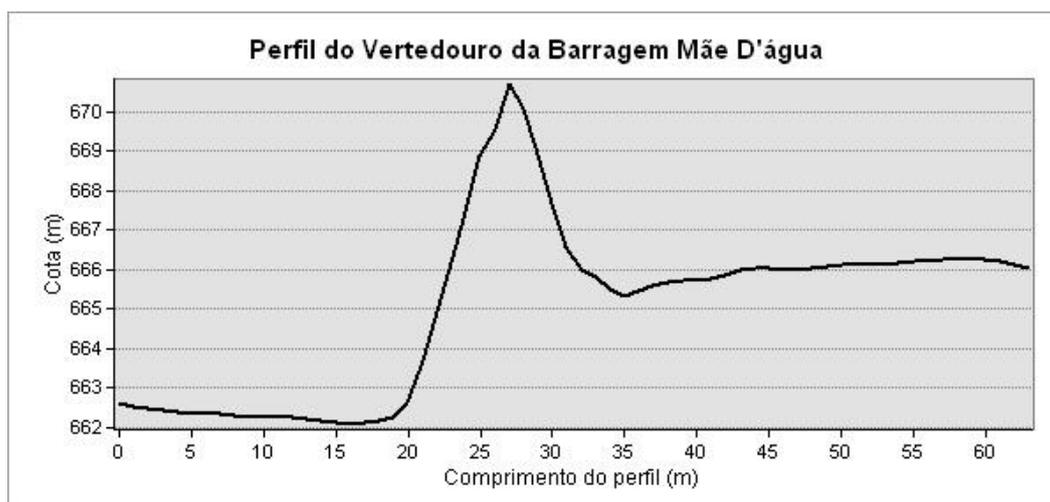
*graph*, para geração do perfil. A partir do perfil gerado, é possível obter a cota da soleira do vertedouro. A Figura 29(a) apresenta a barragem Mãe D'água através de ortofoto, onde a linha representa o local do corte mostrado na Figura 29(b). A Figura 29(b) representa o perfil do vertedouro da barragem obtido através do geoprocessamento do MDE.

Figura 29 – Ortofoto do eixo da barragem Mãe D'água, com detalhe da localização do corte (a); Perfil do Vertedouro da Barragem Mãe D'água (b)

(a)



(b)



Fonte: Elaborado pelo autor

Sabendo-se a cota da soleira do sangradouro, podem ser obtidas as linhas de mesma cota, através da ferramenta *Contour list* do conjunto de ferramentas *Raster surface*, do programa *ArcGIS 10.1*. Essa operação foi

executada no mosaico criado com os MDT's onde o lago está inserido. Com as curvas de mesma cota geradas por essa ferramenta, pode ser definida a bacia hidráulica do reservatório, através da ferramenta *Editor*, onde podem ser editadas as linhas e fechado o polígono que define o açude. Se a bacia hidráulica não estiver totalmente inserida dentro do mosaico, podem ser anexados novos MDT's, até que toda a bacia hidráulica esteja inserida dentro do mesmo. A partir do vetor linha criado que define a bacia hidráulica do reservatório, pode ser gerado um vetor tipo polígono, através da ferramenta *Features to polygon*, do conjunto de ferramentas *features*. Utilizando como dado de entrada o polígono gerado, pode ser extraído do mosaico a bacia hidráulica do reservatório, através da ferramenta *Extract by mask*, do conjunto de ferramentas *Extraction*.

Utilizando como dado de entrada o MDT extraído, pode ser obtido os dados da curva cota x área x volume, através da ferramenta *area and volume* do conjunto de ferramentas *3D analyst*. Através dessa ferramenta pode ser gerado um arquivo de texto com a área e volume para cada cota do reservatório. As informações contidas no arquivo texto são utilizadas para alimentar uma planilha eletrônica, onde podem ser geradas as curvas Cota x Área x Volume para cada barragem estudada.

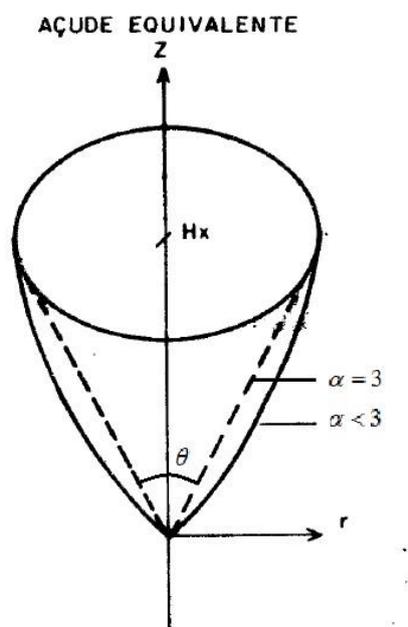
### **3.5 Estimativa da curva cota x área x volume de reservatórios com trecho alagado**

Algumas barragens podem não estar completamente secas no momento de obtenção da nuvem de pontos cotados e georreferenciados obtidos através do sensor LiDAR, o que acaba por diminuir a precisão na aferição da capacidade de acumulação das barragens levantadas. Para a obtenção da curva Cota x Área x Volume das barragens através do MDT a capacidade de acumulação da barragem é levantada com a precisão máxima quando o reservatório está completamente vazio no momento da captação dos pontos.

Com o objetivo de estimar a capacidade de acumulação dos reservatórios com trecho alagado (MDT), foi utilizada uma relação entre volume e profundidade das cotas conhecidas para obter-se constantes que definem o volume e a área para as cotas alagadas. Essa relação foi apresentada por Molle (1994), através da equação  $V = K \times H^\alpha$ , onde  $V$  representa o volume do reservatório,  $H$  representa a profundidade do reservatório,  $K$  é uma constante

chamada de coeficiente de abertura e  $\alpha$  é uma constante chamada de coeficiente de forma. Essa equação representa geometricamente um cone equivalente ao açude, onde o coeficiente  $K$  relaciona-se à abertura geral do cone e o coeficiente  $\alpha$  a concavidade das encostas. Essa relação pode ser observada na Figura 30, onde o valor de  $K$  aumenta quando  $\theta$  também aumenta. O  $K$  também pode ser definido como o volume armazenado para a profundidade de um metro. Esse estudo de forma de açudes elaborado por Molle (1994), foi desenvolvido para pequenos açudes com até 100.000 m<sup>3</sup> de capacidade de armazenamento, porém nesta pesquisa realizada nos açudes da bacia do Rio Pajeú, esse método foi aplicado para barragens de pequeno, médio e grande porte.

Figura 30 – Açude equivalente.



Fonte: Molle (1994)

Para a estimativa do trecho alagado dos reservatórios, onde não foi possível saber a área e o volume para as cotas submersas a partir do MDT, aplicou-se o modelo de forma dos açudes proposto por Molle (1994). Para a determinação dos coeficientes  $K$  e  $\alpha$ , utilizou-se a ferramenta de otimização Solver do Microsoft Excel com o método iterativo *Generalized Reduced Gradient (GRG2)*.

Os dados de entrada para estimativa do volume alagado são a profundidade do reservatório para cada cota obtida através do MDT, as áreas e os volumes correspondentes a cada profundidade. As fichas técnicas com Cota

x Volume disponibilizadas pela APAC, apresentam cotas que divergem da cota real dos reservatórios, pela falta de parâmetros utilizados pelos diversos levantamentos topográficos realizados para marcação das réguas linimétricas. Foi aplicado como critério de comparação entre as fichas e os dados obtidos através de MDT, a área formada pela bacia hidráulica dos reservatórios, sendo usada como referência de profundidade para as duas bases de dados diferentes. Sabendo-se a profundidade dos reservatórios para os dados obtidos pela ficha e MDT, é possível ter conhecimento de quais as cotas estavam alagadas no momento de obtenção das informações LiDAR.

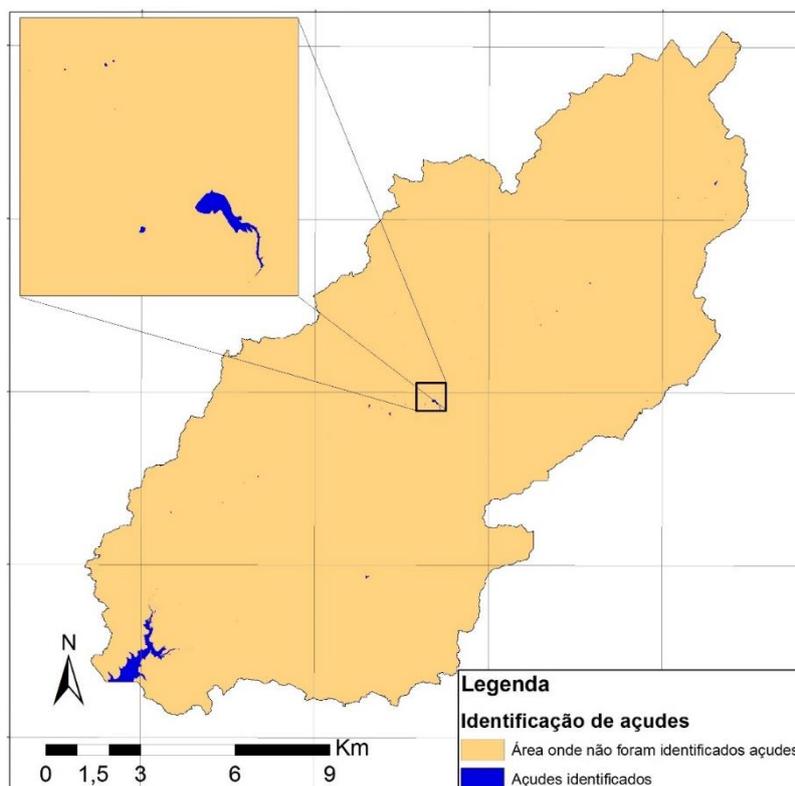
Foram obtidas as curvas Cota x Área x Volume através da função  $V = K \times H^\alpha$  para três situações diferentes. A primeira utilizando as fichas técnicas com cota x volume disponibilizadas pela APAC para todas as cotas disponíveis. A segunda também utilizando as fichas, mas desprezando as primeiras cotas até 20% do volume total do reservatório. A terceira utilizando a Cota x Área x Volume obtida através do MDT. Essa operação tem como objetivo gerar uma curva através da função  $V = K \times H^\alpha$  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.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Acurácia do método de detecção de açudes através de MDT

Para a detecção de açudes através de MDT realizada na área da bacia hidrográfica do Riacho Quixaba e utilizando a base de dados do programa PE 3D, foi utilizado como limiar entre classes 2,243 metros (correspondente a 23,14% da profundidade máxima preenchida no MDT original), onde a profundidade mínima é igual a zero e a máxima é igual a 9,692 metros. Isso quer dizer que todas as células com valor inferior a esse limiar não foram classificadas como açudes, eliminando a maior parte dos ruídos da área de estudo e facilitando a identificação dos açudes. Em contrapartida, a área da bacia hidráulica dos barramentos não preservou as dimensões da cota máxima de acumulação, bem como pequenos açudes e barragens com diferença de cota para vertimento menor ou igual ao limiar usado (2,243 metros), não foram identificados. O resultado da identificação de açudes utilizando esse limiar pode ser observado na Figura 31.

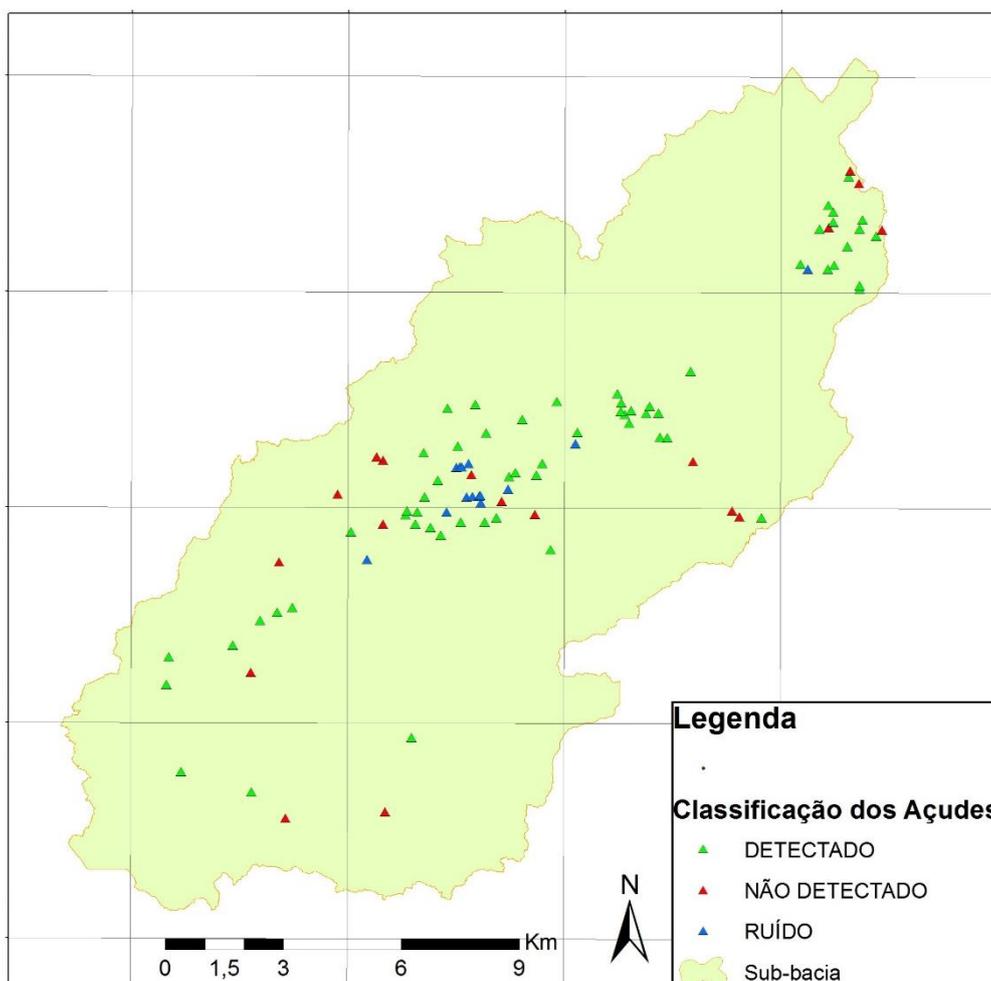
Figura 31 – Mapa com açudes identificados através de MDT



Fonte: Elaborado pelo autor

As ortofotos foram utilizadas para identificar visualmente o total de açudes existentes na bacia. Dessa forma, foram criados vetores tipo ponto, onde, para cada barragem existente e ruídos (falso positivo), foi marcado um ponto indicando se a barragem foi detectada corretamente, erroneamente ou não foi detectada, conforme mostra a Figura 32.

Figura 32 – Açudes detectados, não detectados e ruídos na bacia do Riacho Quixaba



Fonte: Elaborado pelo autor

Essa classificação realizada na bacia do Riacho Quixaba obteve os seguintes resultados:

- 61 barragens foram detectadas corretamente;
- 18 barragens não foram detectadas;
- 13 barragens foram detectadas erroneamente.

Utilizando os dados resultantes, a matriz de confusão apresentou o seguinte aspecto:

Tabela 5 – Matriz de confusão da identificação de açudes através de MDT

<b>Classe</b>	<b>Açudes (Referência)</b>	<b>Não açudes (Referência)</b>	<b>Total</b>
<b>Açudes (Classificação)</b>	61,00	13,00	<b>74,00</b>
<b>Não açudes (Classificação)</b>	18,00	0,00	<b>18,00</b>
<b>Total</b>	<b>79,00</b>	<b>13,00</b>	<b>92,00</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando todos os barramentos presentes na área de estudo, com exceção do trecho pertencente a bacia hidráulica da barragem Barra do Juá, e através da Tabela 5, foi possível obter a Exatidão Global (66,30%), a Exatidão do produtor para a classe Açudes (82,43%) e a Exatidão do usuário também para a classe Açudes (77,22%). Esses resultados mostram que 77,22% dos açudes existentes na área de estudo foram classificados corretamente, 82,43% de todos os polígonos criados, identificaram corretamente os açudes e 66,30% foi a acurácia total, considerando as barragens detectadas (verdadeiro positivo), não detectadas (falso negativo) e o ruído (falso positivo).

Na Tabela 6, apresenta-se em ordem decrescente de área da bacia hidráulica, a classificação dos açudes presentes na bacia hidrográfica do Riacho Quixaba em Açudes detectados, açudes não detectados e ruídos.

Tabela 6 – Classificação dos açudes por capacidade de acumulação em ordem decrescente

<b>Classificação</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Perímetro (m)</b>	<b>Superfície (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>
Açude detectado	0,80	1.850,50	94.348,12	27.955,00
Açude detectado	4,60	1.813,80	48.007,92	81.791,27
Açude não detectado	1,70	1.959,91	35.910,26	22.610,16
Açude detectado	3,80	1.168,98	29.196,04	41.090,72
Açude não detectado	0,80	1.107,64	29.167,99	8.642,37
Açude detectado	3,90	1.244,16	19.929,35	28.786,84
Açude não detectado	1,20	714,57	19.300,41	8.577,96

<b>Classificação</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Perímetro (m)</b>	<b>Superfície (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>
Açude detectado	2,80	1.169,35	19.078,26	19.784,86
Açude detectado	2,70	1.706,71	18.003,26	18.003,26
Açude detectado	3,40	999,1	17.950,30	22.604,08
Açude detectado	3,00	832,54	17.576,14	19.529,04
Açude detectado	2,00	1.482,02	15.013,05	11.120,78
Açude detectado	3,10	682,41	14.092,85	16.180,68
Açude não detectado	0,90	919,05	13.847,23	4.615,74
Açude detectado	1,70	627,28	12.953,37	8.155,83
Açude detectado	2,30	824,98	12.328,36	10.501,94
Açude detectado	3,30	901,5	11.565,20	14.135,24
Açude detectado	1,90	669,59	9.379,68	6.600,51
Açude detectado	2,80	537,93	9.137,04	9.475,45
Açude detectado	2,80	536,45	8.245,44	8.550,83
Açude detectado	2,50	739,64	7.964,16	7.374,23
Açude detectado	2,30	491,87	7.411,37	6.313,39
Açude detectado	2,30	834,46	7.303,94	6.221,88
Açude detectado	2,60	463,68	6.733,66	6.484,27
Açude detectado	2,50	489,63	6.727,51	6.229,17
Açude detectado	1,10	424,49	6.084,80	2.478,99
Açude detectado	2,60	479,75	6.038,90	5.815,24
Açude não detectado	1,10	369,31	5.656,57	2.304,53
Açude detectado	2,40	466,61	5.637,66	5.011,25
Açude detectado	2,80	325,26	5.494,25	5.697,74
Açude detectado	1,00	327,57	5.103,98	1.890,36
Açude detectado	2,20	346,53	4.734,38	3.857,64
Açude não detectado	1,20	356,43	4.301,42	1.911,74
Açude detectado	3,10	391,8	4.115,74	4.725,48
Açude detectado	2,10	365,87	3.720,35	2.893,61
Açude detectado	2,00	263,72	3.570,57	2.644,87
Açude detectado	2,30	337,86	3.568,55	3.039,87
Açude detectado	2,60	320,69	3.528,59	3.397,90
Açude detectado	1,80	380,56	3.440,98	2.293,99
Ruído	4,00	485,66	3.367,40	4.988,73
Açude detectado	2,20	380,13	3.193,30	2.601,95
Açude detectado	2,70	286,32	3.171,31	3.171,31
Açude detectado	3,00	267,89	3.136,78	3.485,31
Açude detectado	2,20	488,52	3.063,81	2.496,44
Ruído	1,00	431,69	2.903,80	1.075,48
Açude detectado	2,30	216,48	2.776,72	2.365,35
Açude detectado	1,40	284,16	2.633,48	1.365,51
Açude detectado	1,60	230,66	2.409,68	1.427,96
Açude detectado	1,90	243,16	2.304,26	1.621,52
Açude detectado	2,10	214,5	2.243,39	1.744,86
Açude detectado	2,80	217,49	2.215,00	2.297,04

<b>Classificação</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Perímetro (m)</b>	<b>Superfície (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>
Açude detectado	1,90	236,76	2.050,27	1.442,78
Açude detectado	2,20	213,63	2.009,58	1.637,44
Açude detectado	3,00	197,64	1.987,55	2.208,39
Ruído	1,30	401,58	1.928,58	928,57
Açude detectado	3,40	248,76	1.863,77	2.346,97
Açude detectado	2,00	220,29	1.771,13	1.311,95
Açude não detectado	1,10	189,3	1.740,16	708,95
Açude detectado	1,90	249,06	1.660,60	1.168,57
Açude detectado	1,70	184,74	1.526,09	960,87
Ruído	3,70	325,76	1.436,23	1.968,17
Açude não detectado	1,20	266,67	1.355,67	602,52
Açude detectado	2,00	166,09	1.342,28	994,28
Açude detectado	2,10	244,18	1.292,24	1.005,07
Açude detectado	1,70	173	1.214,33	764,58
Açude detectado	2,30	172,23	1.113,64	948,65
Açude detectado	1,80	147,26	1.080,55	720,37
Açude detectado	1,80	156,07	1.058,61	705,74
Açude detectado	2,10	146,41	1.002,70	779,88
Açude detectado	2,10	131,54	883,09	686,85
Ruído	1,60	184,11	865,08	512,64
Açude detectado	2,30	112,44	834,65	711,00
Açude não detectado	1,40	143,83	826,49	428,55
Açude não detectado	1,10	126,19	820,20	334,16
Açude não detectado	1,40	118,87	748,18	387,94
Ruído	2,30	222,4	742,98	632,91
Açude não detectado	0,40	122,24	734,70	108,84
Açude não detectado	1,60	103,97	651,20	385,90
Ruído	1,20	117,33	549,94	244,42
Açude não detectado	1,80	91,18	528,92	352,61
Ruído	2,80	192,8	507,05	525,83
Açude detectado	2,30	148,11	406,11	345,95
Açude não detectado	0,90	78,55	392,39	130,80
Ruído	2,40	74,06	293,67	261,04
Ruído	2,10	90,57	286,12	222,54
Açude detectado	2,80	87,17	281,68	292,11
Ruído	2,80	80,17	190,88	197,95
Ruído	1,10	55,23	178,96	72,91
Ruído	1,80	84,86	166,52	111,01
Açude não detectado	0,36	48,87	144,28	19,24
Açude não detectado	Desconhecido	Desconhecido	Desconhecido	Desconhecido
Açude não detectado	Desconhecido	Desconhecido	Desconhecido	Desconhecido

Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando a área da bacia hidráulica dos barramentos presentes na bacia como parâmetro para medir a acurácia do estudo, e através da Tabela 6, podemos concluir:

- Todos os açudes presentes na bacia do Riacho Quixaba com área da bacia hidráulica com dimensões de no mínimo 3,6 ha foram identificados corretamente.
- 86,67% dos açudes presentes na bacia do Riacho Quixaba com área da bacia hidráulica com dimensões de no mínimo 0,3 ha foram identificados corretamente.
- 66,67% dos açudes presentes na bacia do Riacho Quixaba, independente da área da bacia hidráulica foram identificados corretamente.

Esses dados mostram que o método utilizado para detecção de açudes aplicado na área de estudo e com a base de dados do projeto PE 3D, obtiveram 100% de acertos para barramentos com bacia hidráulica de no mínimo 3,6 ha. É possível observar também que a acurácia do método de detecção de açudes com dimensões de bacia hidráulica maiores ou iguais a 0,3 ha obteve um bom resultado, com uma confiabilidade de aproximadamente 90% na identificação de todas as barragens da área de estudo com essas características.

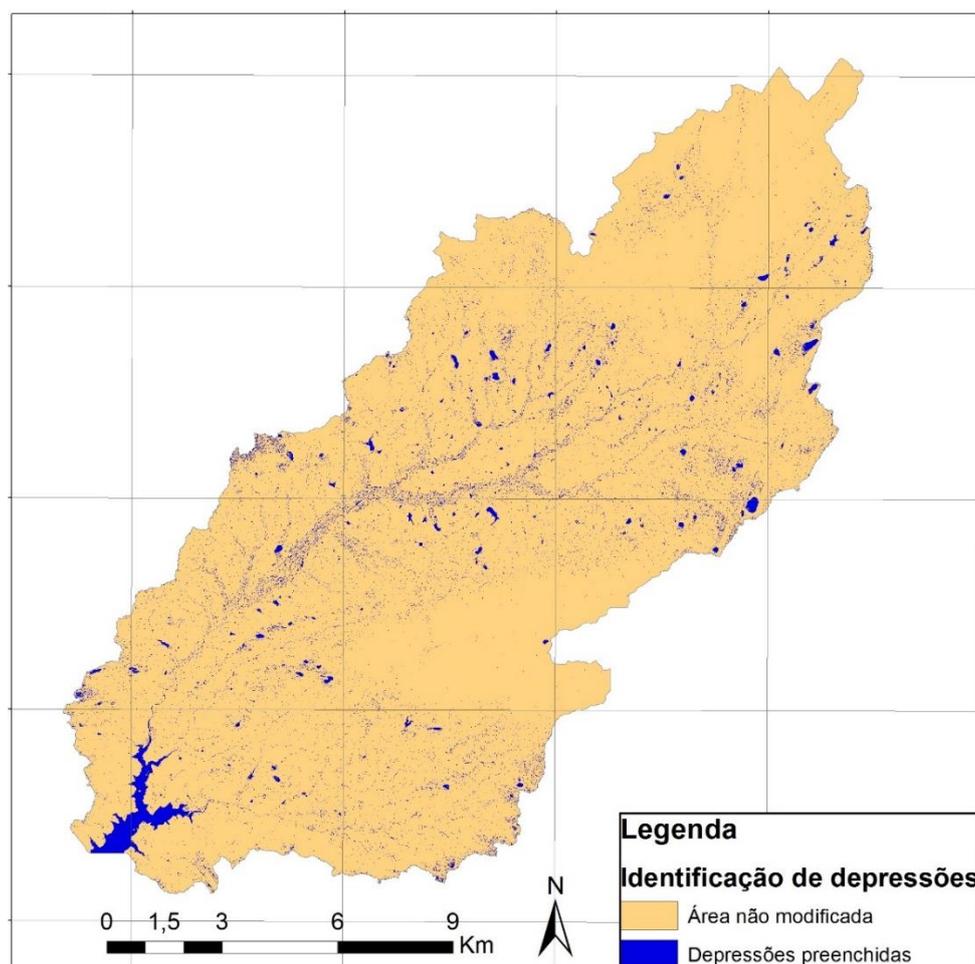
Comparando com a sensibilidade de detecção de açudes através de imagens Landsat, o resultado obtido na bacia do Riacho Quixaba foi muito melhor. Por exemplo, Liebe et al. (2005) desenvolveu um estudo no leste de Gana onde 504 reservatórios foram classificados, porém 348 foram desconsiderados por terem área da superfície inferiores a 1 ha. Na bacia do Riacho Quixaba, 59 pequenos reservatórios puderam ser classificados na categoria 1 (menores que 3 ha) de acordo com a classificação mencionada anteriormente. Carvalho et al. (2009) usou as imagens do satélite CBERS-2 para desenvolver um acervo dos reservatórios do território brasileiro. No Nordeste, foram identificados 17.083 reservatórios com superfície maiores que 5 ha. No presente estudo, 48 de 61 reservatórios menores que 1 ha foram detectados corretamente. O método utilizado, além de detectar reservatórios menores que 1 há, ainda é capaz de calcular a capacidade de armazenamento, com a vantagem de comparar com outros trabalhos que utilizam imagens de satélite.

#### 4.1.1 Acurácia do método de identificação de bacias hidráulicas

O método de identificação da bacia hidráulica dos barramentos utilizando limiar de classificação igual a zero, utiliza como base de dados o *shape* tipo polígono, onde é executada a identificação de todo o preenchimento de depressões da área da bacia e os pontos de controle, que tem a finalidade de filtrar os ruídos presentes no *shape*.

O resultado da classificação de açudes utilizando limiar zero, pode ser observado na Figura 33, onde foram criados 4714 polígonos, identificando todas as depressões presentes no MDT original da área da bacia do Riacho Quixaba.

Figura 33 – Classificação de açudes utilizando limiar zero

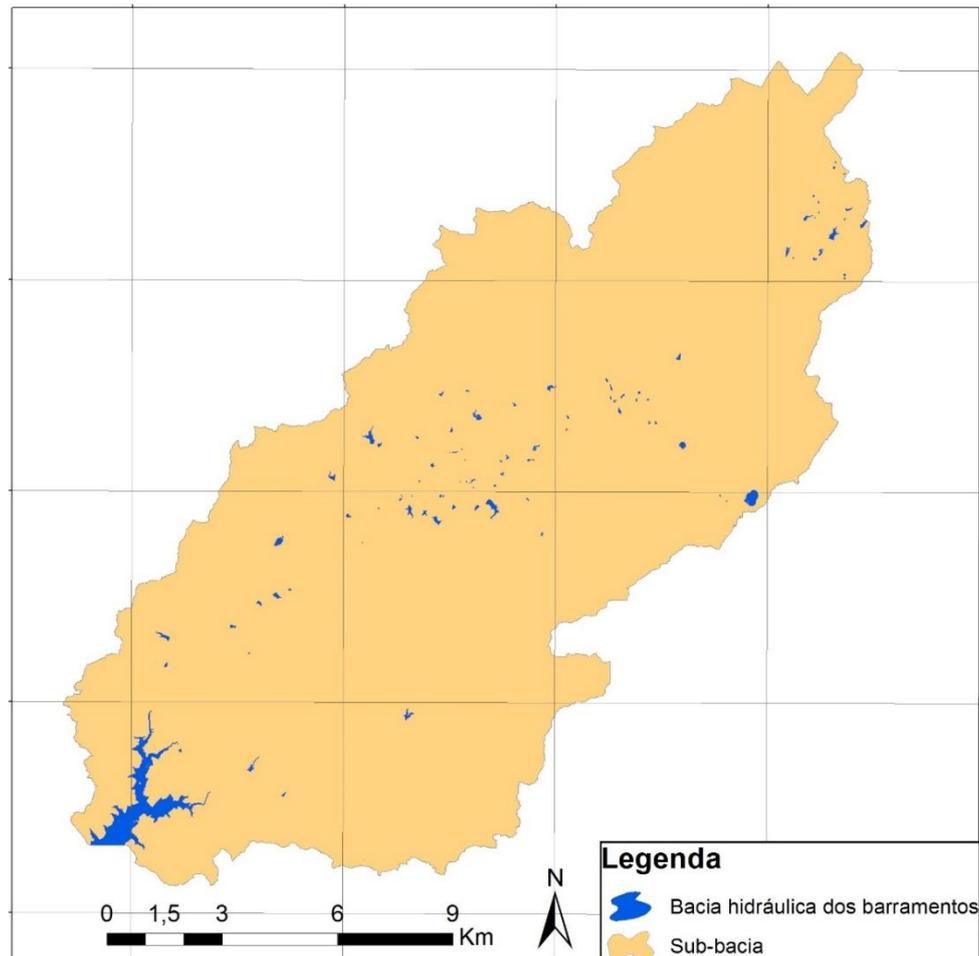


Fonte: Elaborado pelo autor

Os ruídos (polígonos que não representam açudes na bacia) foram eliminados utilizando-se como pontos de controle o *shape* empregado para a classificação da Figura 32.

O resultado dessa operação é a obtenção da bacia hidráulica, com volume de acumulação na soleira do vertedouro, das barragens existentes na Bacia hidrográfica do Riacho Quixaba, conforme pode ser observado na Figura 34.

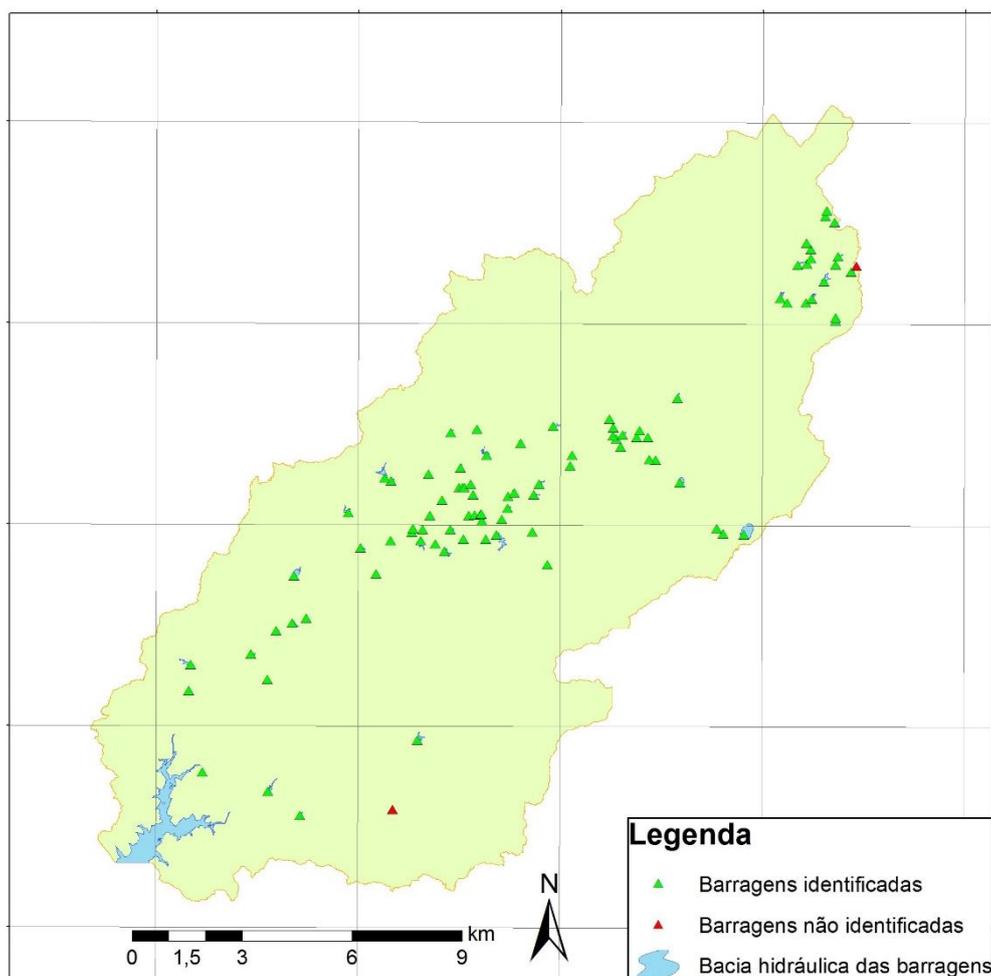
Figura 34 – Mapa com a bacia hidráulica dos açudes na cota da soleira do vertedouro



Fonte: Elaborado pelo autor

A técnica utilizada para identificação da bacia hidráulica dos barramentos na bacia hidrográfica do Riacho Quixaba aplicada nesse trabalho não identificou duas barragens existente na área, como observado na Figura 35.

Figura 35 – Identificação das bacias hidráulicas na área da bacia do Riacho Quixaba



Fonte: Elaborado pelo autor

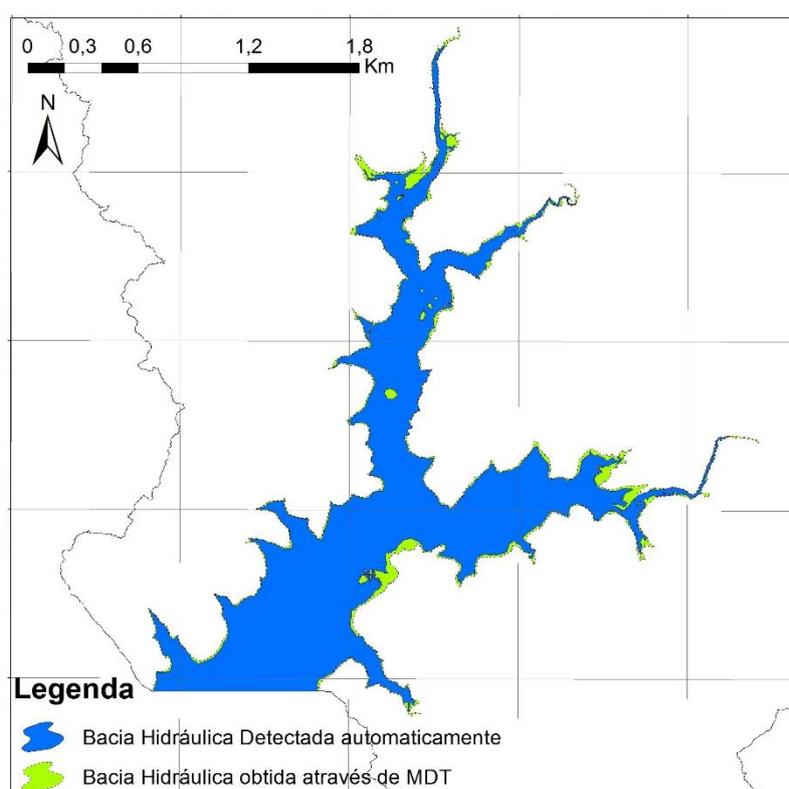
- 77 bacias hidráulicas foram identificadas;
- 02 bacias hidráulicas não foram identificadas.

Esse resultado mostra que a acurácia do método utilizado para identificação de bacias hidráulicas do estudo teve um acerto de 97,47%. Praticamente todos os açudes existentes na área de estudo foram identificados, assim como, diferentemente do método para identificação de açudes utilizando limiar entre classes 2,243 metros, as bacias hidráulicas das barragens apresentaram dimensões compatíveis com as de quando a barragem tem volume de acumulação na cota da soleira do vertedouro (100% da capacidade de acumulação).

A barragem Barra do Juá tem um trecho de sua bacia hidráulica inserida na bacia do Riacho Quixaba, sendo a única barragem da bacia monitorada pelos

órgãos de gestão com ficha técnica e curva Cota x Área x Volume. A determinação da acurácia na detecção de bacia hidráulica foi realizada comparando o trecho da bacia hidráulica do reservatório Barra do Juá determinada através da curva de nível correspondente à cota da soleira da barragem com a bacia hidráulica determinada através do método de detecção automática. Essa comparação pode ser observada na Figura 36.

Figura 36 – Comparação entre a bacia hidráulica obtida a partir da curva de nível correspondente à cota da soleira da barragem e a bacia hidráulica detectada automaticamente.



Fonte: Elaborado pelo autor

A bacia hidráulica do trecho do reservatório Barra do Juá pertencente a bacia do Riacho Quixaba e adquirida através de MDT, teve como área 1.885.630,61 m<sup>2</sup>. Enquanto a bacia hidráulica correspondente ao mesmo trecho e obtida automaticamente pela técnica de detecção de bacia hidráulica, obteve 1.694.741,58 m<sup>2</sup> de área. A diferença entre a área da bacia hidráulica obtida pelos dois métodos foi de 190.889,03 m<sup>2</sup>, sendo a bacia hidráulica determinada automaticamente 10,12% menor que a obtida através de MDT.

## 4.2 Determinação das curvas Cota x Área x Volume

As curvas Cota x Área x Volume das barragens tem como objetivo principal informar aos gestores e usuários desses reservatórios o volume disponível de acordo com a cota da superfície da água no momento da aferição.

A cota mais baixa dos reservatórios levantados através do MDT, na maioria dos casos é mais alta que a menor cota apresentada nas fichas técnicas das barragens. A razão para essa diferença pode ser pela água acumulada no momento da obtenção dos pontos a laser, assoreamento ou mesmo imprecisão dos dados das fichas técnicas.

Uma das dificuldades encontradas para realizar a comparação entre as curvas Cota x Área x Volume das fichas técnicas e adquiridas por MDT das barragens, foram as cotas discriminadas em cada curva, que utilizaram níveis de referência distintos. Foi aplicado como critério para comparação entre a profundidade do reservatório apresentada na ficha técnica e adquiridas por MDT, a área da bacia hidráulica para as duas bases de dados. Na Tabela 7, pode ser observada a comparação entre as curvas da ficha técnica e MDT da barragem Bom Sucesso, onde a bacia hidráulica está na profundidade 10,50 m, porém nas cotas 529,50 m e 562,5 m, na ficha técnica e MDT, respectivamente. Essas cotas correspondem à elevação da soleira do vertedouro.

Tabela 7 – Comparação entre as curvas Cota x Área x Volume da ficha técnica e MDT da barragem Bom Sucesso

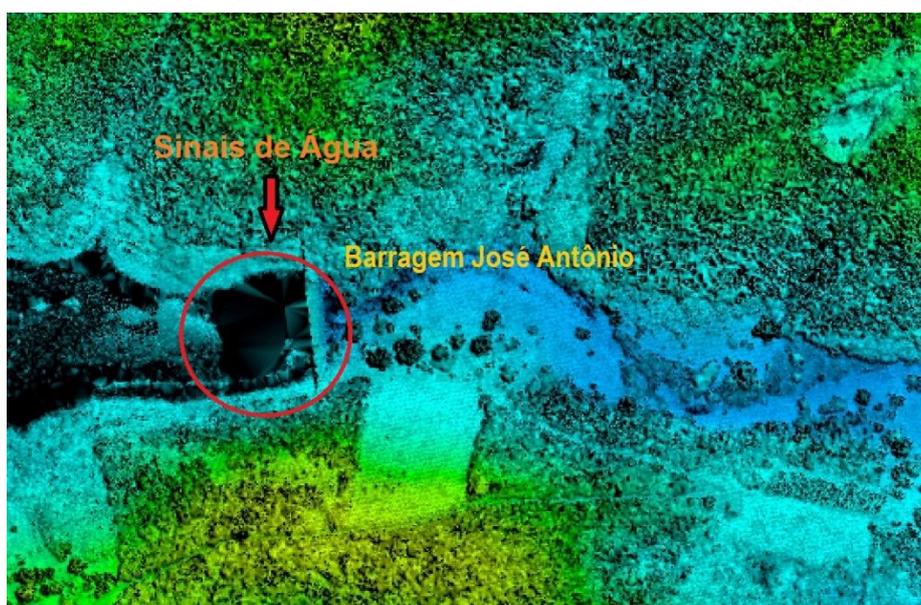
Ficha técnica				MDT		
Cota (m)	Profundidade (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Cota (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
520,00	1,00	120,00	60,00			
521,00	2,00	3.600,00	1.920,00			
522,00	3,00	12.200,00	9.820,00			
523,00	4,00	48.400,00	40.120,00	556,15	-	-
524,00	5,00	94.000,00	111.320,00	557,00	65.911,49	25.630,51
525,00	6,00	144.400,00	230.520,00	558,00	114.889,59	115.142,79
526,00	7,00	213.600,00	409.520,00	559,00	179.201,68	260.623,22
527,00	8,00	308.800,00	670.320,00	560,00	262.607,74	476.839,58
528,00	9,00	467.200,00	1.057.920,00	561,00	371.774,36	790.948,85

Ficha técnica				MDT		
Cota (m)	Profundidade (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Cota (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
529,00	10,00	542.800,00	1.562.920,00	562,00	504.658,95	1.227.645,07
529,50	10,50	584.200,00	1.855.000,00	562,50	582.713,03	1.498.202,63
530,00	11,00			563,00	661.334,11	1.807.678,34
531,00	12,00			564,00	840.789,19	2.553.064,58
532,00	13,00			565,00	1.036.499,41	3.490.264,60

Fonte: Elaborado pelo autor

As barragens estudadas foram divididas em duas categorias. Barragens secas e parcialmente secas. Foram considerados como reservatórios secos, os reservatórios onde não foram encontrados sinais de água a partir das imagens de composição do MDE, ou com volume submerso inferior a 1%. Os reservatórios com sinais de água observados a partir das imagens de composição MDE e com volume submerso superior a 1%, foram classificados como parcialmente secos. A Figura 37 mostra a barragem José Antônio a partir da composição do MDE, onde pode ser observado como se apresenta os sinais de água nesse tipo de modelo numérico.

Figura 37 – Composição do MDE da barragem José Antônio



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do MDE proveniente do PE 3D

A Tabela 8 apresenta as barragens estudadas e informações como: presença de ficha técnica com curva Cota x Área x Volume ou não; o volume dos reservatórios segundo as fichas e MDT; a condição da barragem no momento de captação do MDT (seca ou parcialmente seca); e o volume submerso da barragem no MDT.

Tabela 8 – Tabela com as principais informações das barragens estudadas

Barragens	Ficha Técnica	Capacidade Reservatório Ficha (m³)	Capacidade Reservatório MDT (m³)	Volume Submerso (%)	Condição
Barra do Juá	Sim	71.474.000,00	59.518.314,37	0,14%	Seca
Boa Vista	Sim	1.632.188,00	1.125.271,90	0,16%	Seca
Bom Sucesso	Sim	1.855.000,00	1.498.202,63	2,16%	Parcialmente seca
Brejinho	Sim	282.840,00	287.833,69	0,32%	Parcialmente seca
Brotas	Sim	19.639.577,00	9.231.836,48	32,74%	Parcialmente seca
Cachoeira II	Sim	21.031.145,00	9.549.344,05	53,23%	Parcialmente seca
Chinelo	Sim	3.453.700,00	2.933.648,14	0,83%	Seca
Jazigo	Sim	15.543.300,00	6.035.277,71	38,88%	Parcialmente seca
José Antônio	Sim	710.500,00	812.807,29	16,15%	Parcialmente seca
Laje do Gato	Sim	1.102.940,00	992.573,63	0,41%	Seca
Mãe D'água	Sim	1.498.988,00	1.340.754,70	0,01%	Seca
Poço Grande	Sim	3.922.390,00	1.178.963,55	57,74%	Parcialmente seca
Quebra Unha	Sim	3.190.000,00	3.050.169,78	2,63%	Parcialmente seca
Rosário	Sim	36.532.000,00	36.451.142,77	2,83%	Parcialmente seca
Saco I	Sim	36.707.351,43	18.063.666,22	28,80%	Parcialmente seca
São José I	Sim	1.210.488,00	1.668.396,87	4,85%	Seca
São José II	Sim	7.152.875,00	6.157.556,60	3,29%	Parcialmente seca
Serrinha Serraria	Sim	1.256.504,00	856.622,29	4,85%	Seca
Serrinha II	Sim	311.080.000,00	239.488.544,86	18,74%	Parcialmente seca
Serrote	Sim	1.622.115,00	1.353.736,57	3,83%	Parcialmente seca

Barragens	Ficha Técnica	Capacidade Reservatório Ficha (m <sup>3</sup> )	Capacidade Reservatório MDT (m <sup>3</sup> )	Volume Submerso (%)	Condição
Açude Piedade	Não		373.624,00		Seca
Algodões	Não		110.463,14		Parcialmente seca
Cachoeirinha	Não		805.866,62		Parcialmente seca
Cascudo	Não		1.254.336,23		Parcialmente seca
Juá	Não		339.070,45		Seca
Livino	Não		2.352.747,05		Seca
Manopla	Não		2.692.736,81		Parcialmente seca
Retiro	Não		297.056,06		Parcialmente seca
Tabira	Não		202.197,26		Parcialmente seca

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com o estudo realizado nesse trabalho, foi avaliada as diferenças encontradas entre os dados das barragens utilizados pelos gestores da água na bacia do Rio Pajeú, e os encontrados a partir de MDT de alta resolução. Essas diferenças foram avaliadas para barragens secas e parcialmente secas.

#### 4.2.1 Barragens secas

Em um primeiro momento, entre todas as barragens estudadas, apenas as barragens secas (sem detecção de água ou com volume submerso inferior a 1%) e com Ficha Técnica com Curva Cota x Área x Volume foram comparadas, como pode ser observado na Tabela 9. Foram 7 as barragens nessas condições, sendo a menor a barragem Laje do Gato com capacidade de acumulação de água, segundo a Ficha Técnica, igual a 1.102.940,00 m<sup>3</sup> e a maior a barragem Barra do Juá, com capacidade de acumulação igual a 71.474.000,00 m<sup>3</sup>.

Tabela 9 – Tabela com as barragens secas e com Ficha Técnica

<b>Barragens</b>	<b>Capacidade do Reservatório Ficha (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Capacidade do Reservatório MDT (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume Submersmo (%)</b>
Barra do Juá	71.474.000,00	59.518.314,37	0,14%
Boa Vista	1.632.188,00	1.125.271,90	0,16%
Chinelo	3.453.700,00	2.933.648,14	0,83%
Laje do Gato	1.102.940,00	992.573,63	0,41%
Mãe D'água	1.498.988,00	1.340.754,70	0,01%
São José I	1.210.488,00	1.668.396,87	4,85%
Serrinha			
Serraria	1.256.504,00	856.622,29	4,85%

Fonte: Elaborado pelo autor

A capacidade de acumulação das 7 barragens somadas, segundo os dados que os órgãos gestores têm disponíveis é de 81.628.808,00 m<sup>3</sup>. A capacidade de volume disponível de água, segundo a curva Cota x Área x Volume das barragens obtidas através do MDT, é de 71.501.023,40 m<sup>3</sup>, 12,41% a menos de água disponível que o cadastrado nas Fichas Técnicas. A relação com a diferença de volume de cada barragem pode ser observada na Tabelas 10.

Tabela 10 – Diferença entre a acumulação total das barragens obtidas por Fichas Técnicas e MDT

Barragens	Capacidade do Reservatório Ficha (m <sup>3</sup> )	Capacidade do Reservatório MDT (m <sup>3</sup> )	Diferença (m <sup>3</sup> )	Diferença (%)
Barra do Juá	71.474.000,00	59.518.314,37	11.955.685,63	16,73%
Boa Vista	1.632.188,00	1.125.271,90	506.916,10	31,06%
Chinelo	3.453.700,00	2.933.648,14	520.051,86	15,06%
Laje do Gato	1.102.940,00	992.573,63	110.366,37	10,01%
Mãe D'água	1.498.988,00	1.340.754,70	158.233,30	10,56%
São José I	1.210.488,00	1.668.396,87	457.908,87	-37,83%
Serrinha Serraria	1.256.504,00	856.622,29	399.881,71	31,82%

Fonte: Elaborado pelo autor

Pelo que pode ser observado na Tabela 10, os dados alcançados através do MDT tiveram volume menor em 85,71% dos casos. Considerando que as curvas Cota x Área x Volume tenham tendência semelhante, é um resultado coerente quando se leva em consideração o volume assoreado e de água no momento de obtenção do MDT. A barragem que teve uma maior diferença entre o volume da ficha e do MDT foi a Barragem São José I, que teve a capacidade obtida no MDT 37,83% maior que a obtida na Ficha Técnica. O somatório da diferença entre os volumes das barragens obtidos através das fichas e MDT foi igual a 13.193.226,10 m<sup>3</sup>, a média da diferença de volume das 7 barragens foi 1.884.746,59 e o desvio padrão da diferença foi 3.395.978,53 m<sup>3</sup>. Esses resultados mostram que as amostras (diferenças de volume entre ficha e MDT) não tem regularidade, o que é justificado pela grande diferença entre a capacidade de acumulação das barragens estudadas.

Para as barragens completamente secas, a diferença entre a capacidade de acumulação entre as fichas técnicas e MDT (considerando os dados utilizados pelos gestores como confiável), representam o assoreamento ocorrido nas barragens entre o tempo de construção e o aerolevanteamento a laser realizado. A Tabela 11 apresenta a diferença do volume de acumulação total dos reservatórios secos quando realizado o aerolevanteamento e a taxa de sedimentos por ano das barragens para os reservatórios com data de construção conhecida. Não foi possível fazer a estimativa de assoreamento da barragem São José I, pois foi apresentada uma capacidade de acumulação no MDT maior que a mostrada na Ficha Técnica.

Tabela 11 – Taxa de sedimentos por ano na bacia do Pajeú

Barragens	Diferença entre as capacidade Ficha e MDT (m <sup>3</sup> )	Data levantamento MDT	Data de Construção	Idade da barragem	Sedimentos/ ano (m <sup>3</sup> )	Sedimentos/ ano (%)
Barra do Juá	11.955.685,63	2015	1982	33	362.293,50	0,51%
Boa Vista	506.916,10	2015	Não informado			
Chinelo	520.051,86	2015	Não informado			
Laje do Gato	110.366,37	2015	1970	45	2.452,59	0,22%
Mãe D'água	158.233,30	2015	1991	24	6.593,05	0,44%
Serrinha Serraria	399.881,71	2015	1981	34	11.761,23	0,94%

Fonte: Elaborado pelo autor

A diferença da capacidade dos reservatórios Barra do Juá, Boa Vista, Chinelo, Laje do Gato, Mãe D'água e Serrinha/Serraria adquiridas por fichas técnicas e MDT, apresentaram uma redução na capacidade de armazenamento total de 13,19 hm<sup>3</sup>, causada por deposição de sedimentos desde a suas construções. A taxa média de acumulação de sedimentos observada foi de 0,36 Mm<sup>3</sup>/ano para barragem Barra do Juá, 2,45.10<sup>-3</sup> Mm<sup>3</sup>/ano para barragem Laje do Gato, 6,59.10<sup>-3</sup> Mm<sup>3</sup>/ano para a barragem Mãe D'água e 1,18. 10<sup>-3</sup> Mm<sup>3</sup>/ano para a barragem Serrinha/Serraria. As barragens Barra do Juá, Laje do Gato, Mãe D'água e Serrinha/Serraria apresentaram uma perda de 0,51%, 0,22%, 0,44% e 0,94% de sua capacidade de armazenamento a cada ano respectivamente.

Uma pesquisa realizado por Gil (2017) na Barragem Bocaína localizada no estado do Piauí e com capacidade de armazenamento igual a 114.949.602 m<sup>3</sup>, encontrou a taxa média de acumulação de sedimentos igual a 0,12 Mm<sup>3</sup>/ano, o que corresponde a uma perda de 0,11% do seu volume a cada ano.

Almeida et al. (2012) estimaram a taxa de assoreamento da barragem do Quincoé, no Ceará, com capacidade de 7,13 hm<sup>3</sup> e bacia hidrográfica de 166 km<sup>2</sup>. A taxa de assoreamento foi estimada em 2,25%, desde a sua construção 1990 até 2010, ou seja, 0,225% por ano.

Araújo (2003) desenvolveu um modelo para o cálculo do assoreamento de reservatórios do semiárido intitulado HidroSed. A validação desse modelo foi realizada em barragens do estado do Ceará, onde o autor obteve como taxa de assoreamento característica aproximadamente 2,7 t.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, o que corresponde à perda média de volume de 1,85% a cada década.

A taxa de assoreamento nos reservatórios estudados foi superior às taxas encontradas no estudo realizado por Gil (2017), para o reservatório de Bocaína, no estado do Piauí. A taxa de assoreamento por ano da média das barragens Barra do Juá, Laje do Gato, Mãe D'água e Serrinha/Serraria foi 0,41% maior que a encontrada na barragem Bocaína.

Comparando os resultados encontrados para a bacia do Pajeú, com os encontrados por Almeida et al. (2012) no reservatório de Quincoé, no Ceará, que encontrou a taxa de 0,225% ao ano, os resultados foram semelhantes, principalmente com a barragem Laje do Gato (0,222% ao ano). A proximidade dos resultados pode ser explicada por serem reservatórios com dimensões semelhantes e estarem inseridos em regiões com características fisiográficas próximas.

Os valores encontrados nos reservatórios estudados no Pajeú tiveram uma média de 5,26% de perda média de volume por década, valores superiores aos resultados encontrados por Araújo (2003), que encontrou uma taxa de 1,85%. A perda de volume por década da barragem de Laje do Gato teve resultado semelhante ao encontrado no estudo realizado por Araújo (2003) no estado do Ceará, com taxa de 2,22%.

#### 4.2.2 Barragens parcialmente secas

Para as barragens parcialmente secas, foram comparados os volumes para as cotas não alagadas no MDT e na ficha técnica. Foi considerado como volume da primeira cota da curva Cota x Área x Volume do MDT o volume de mesma profundidade constante na ficha ( $V_{0\text{ Novo MDT}} = V_{n\text{ Ficha}}$ ). Para determinação dos volumes dos reservatórios para as cotas acima da cota 0 do MDT ( $V_{n\text{ Novo MDT}}$ ), soma-se a  $V_{0\text{ MDT}}$  os volumes encontrados no MDT para as cotas subsequentes ( $V_{n\text{ MDT}}$ ).

As barragens com trecho submerso no MDT e com ficha técnica com curva Cota-Área-Volume foram os reservatórios de Bom Sucesso, Brejinho, Brotas, Cachoeira II, Jazigo, José Antônio, Poço Grande, Quebra Unha, Rosário, Saco I, São José II, Serrinha II e Serrote.

Comparando as curvas Cota x Volume encontradas nas Fichas Técnicas e através de MDT, e considerando os volumes apresentados nas fichas para a profundidade mais baixa do MDT como volume do MDT para a mesma cota, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 12. A Figura 38 apresenta a comparação entre as curvas Cota x Volume fornecidas pelas Fichas Técnicas e obtidas por MDT dos trechos não alagados dos reservatórios.

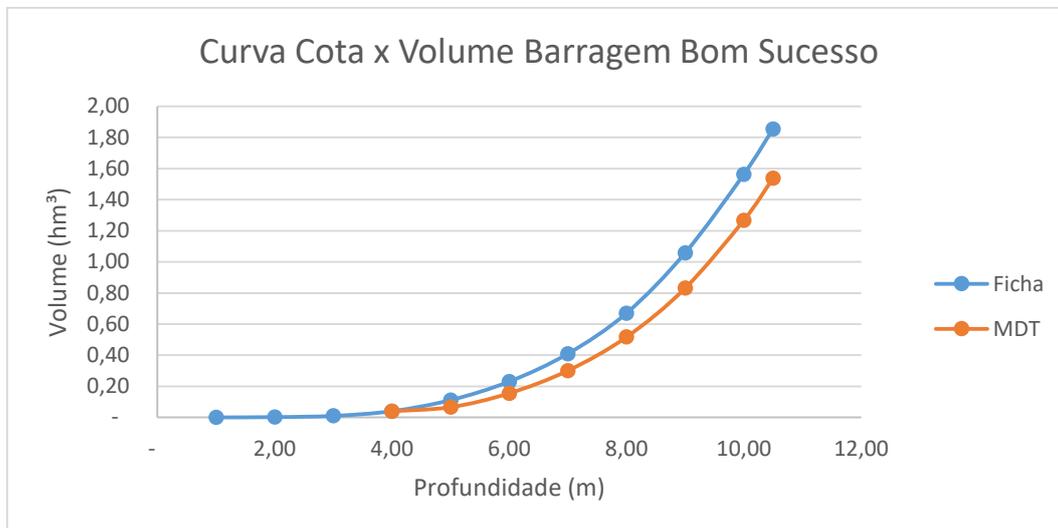
Tabela 12 – Tabela comparando Ficha e MDT de Barragem parcialmente secas

<b>Barragem</b>	$V_{Total\ Ficha} - V_{Total\ MDT} (m^3)$	$V_{Total\ Ficha} - V_{Total\ MDT} (\%)$
Bom Sucesso	316.677,37	17,45%
Brejinho	-5.193,69	-1,84%
Brotas	2.052.156,02	10,45%
Cachoeira II	329.550,24	1,57%
Jazigo	1.775.782,34	11,42%
José Antônio	217.047,29	-30,55%
Poço Grande	519.605,65	13,25%
Quebra Unha	111.330,22	3,52%
Rosário	-382.142,77	-1,06%
Saco I	6.647.164,80	18,11%
São José II	882.318,40	12,53%
Serrinha II	14.049.272,25	4,52%
Serrote	206.188,43	13,22%

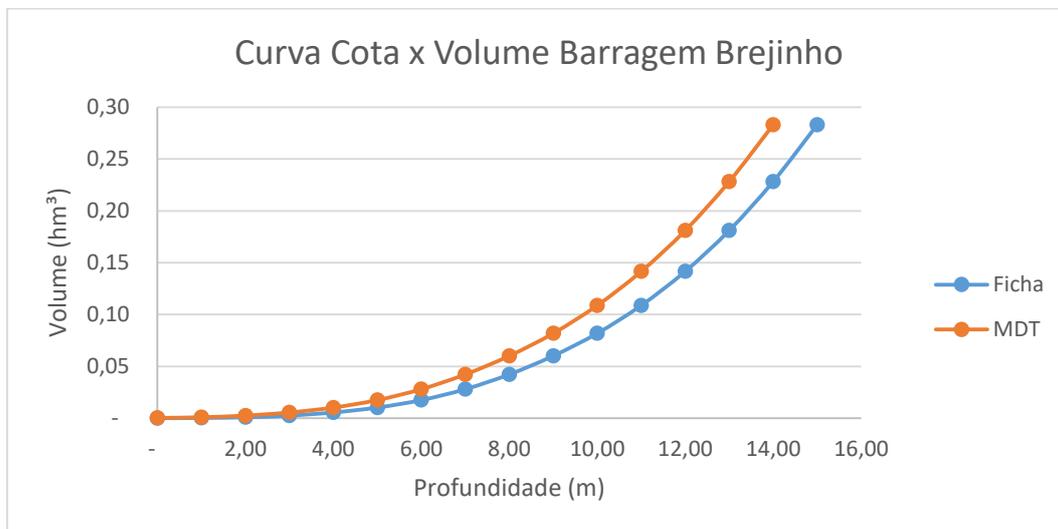
Fonte: Elaborado pelo autor

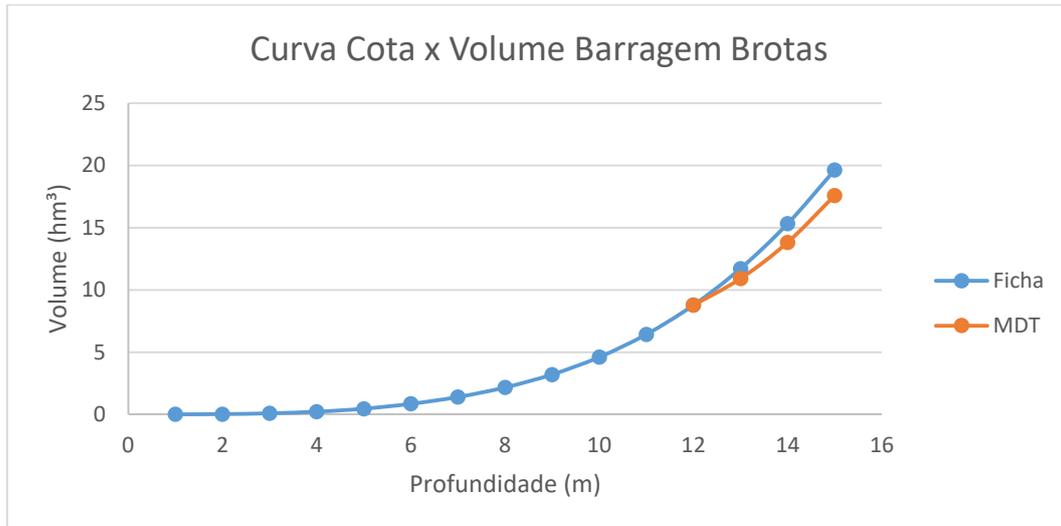
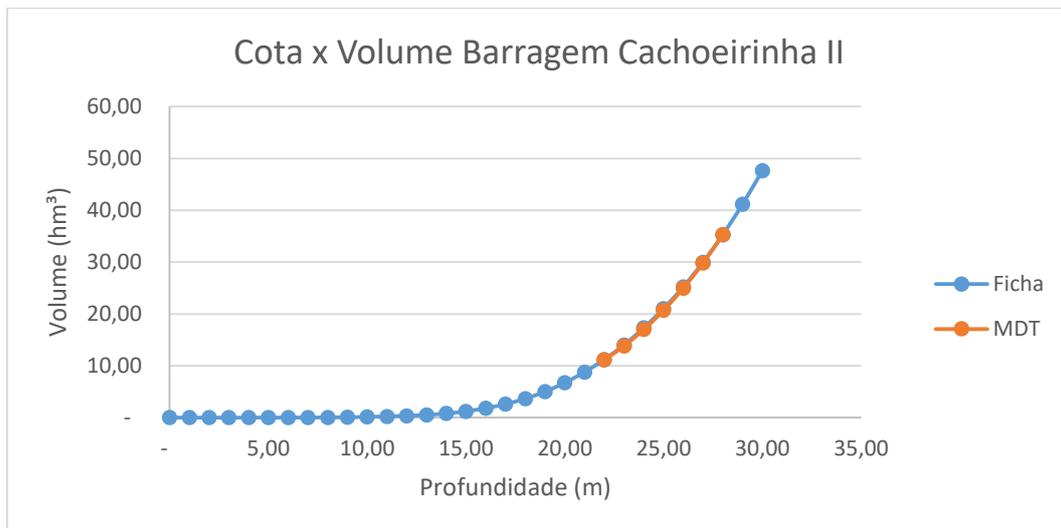
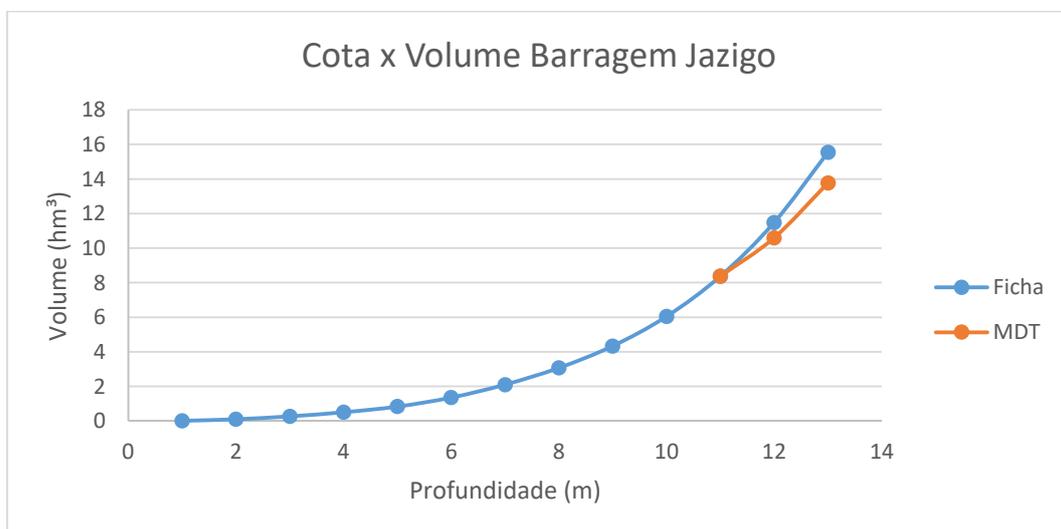
Figura 38 – Comparação entre as curvas Cota x Volume das barragens parcialmente secas

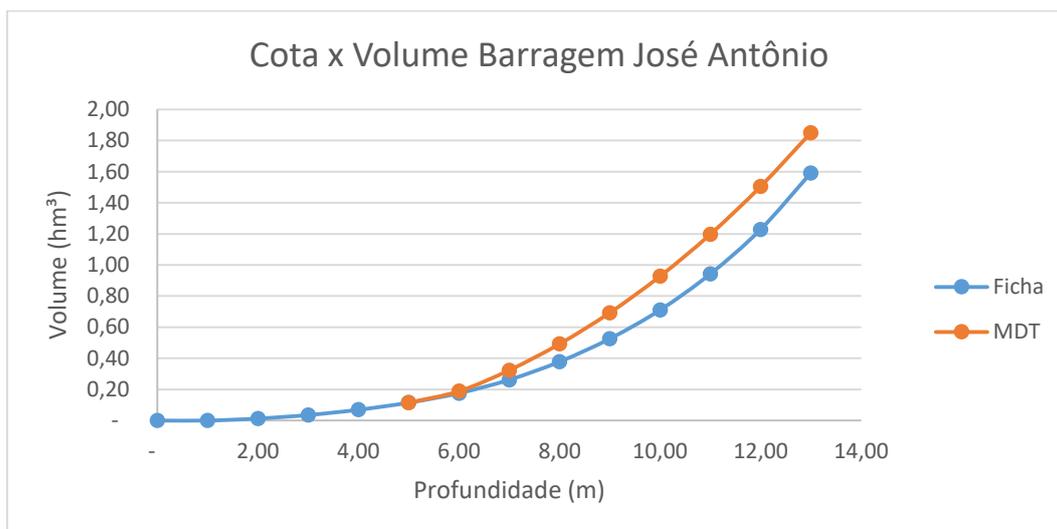
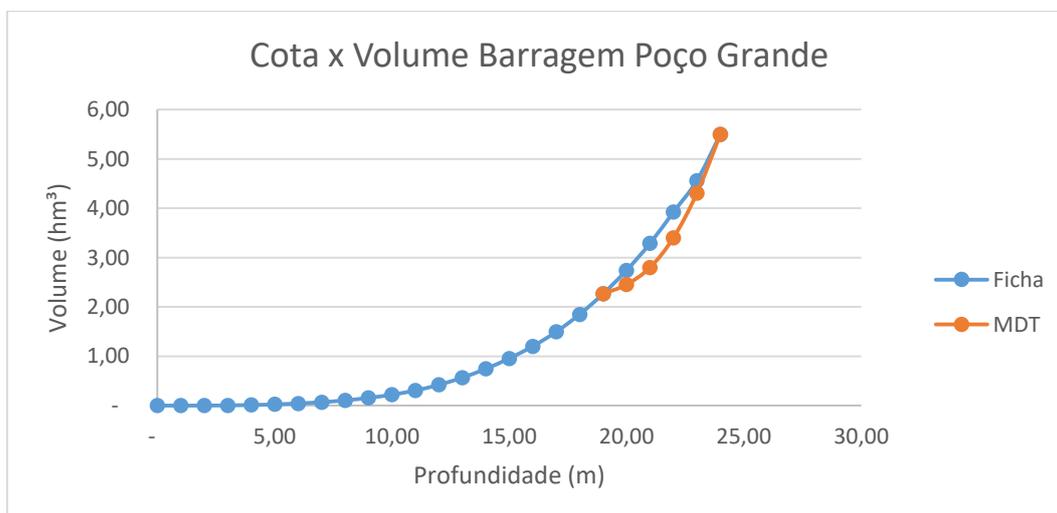
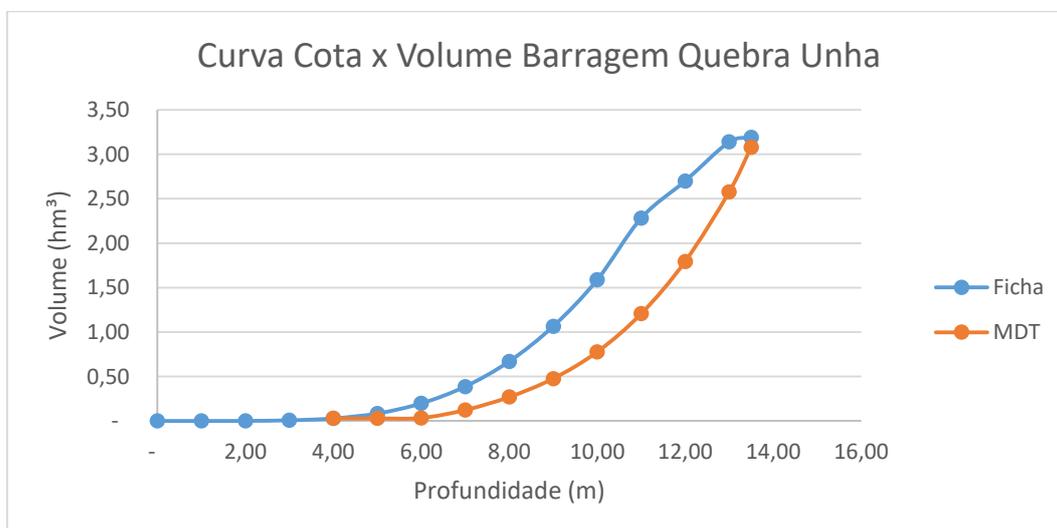
**(a) Barragem Bom Sucesso**

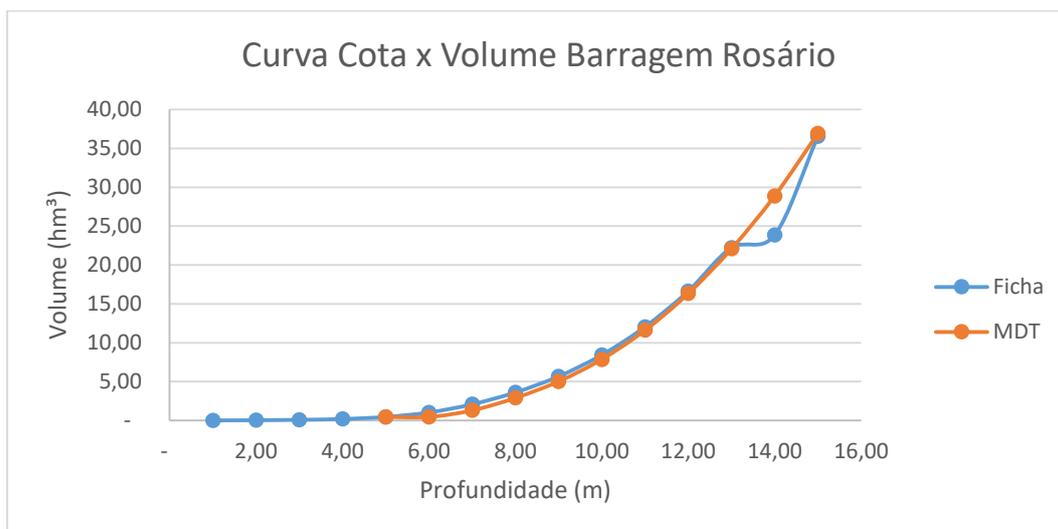
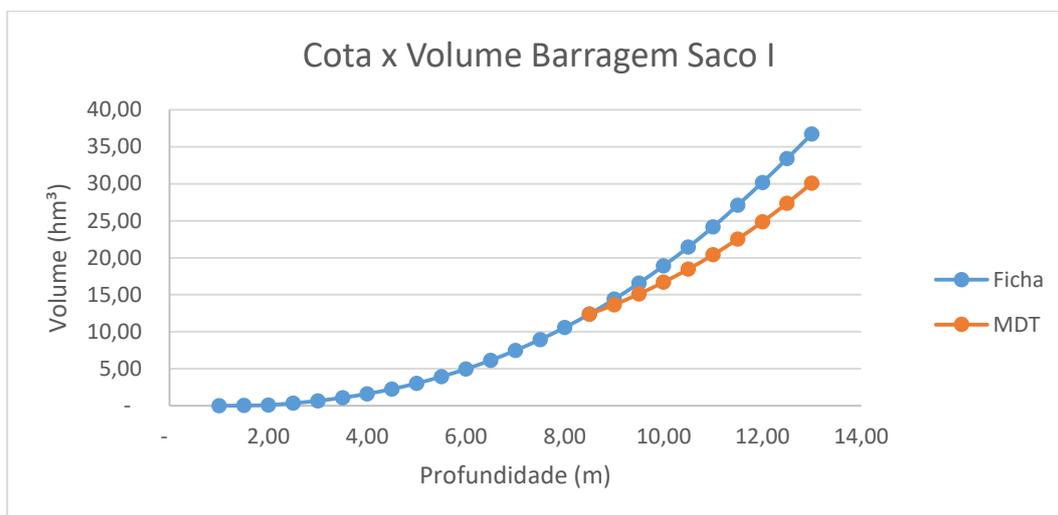
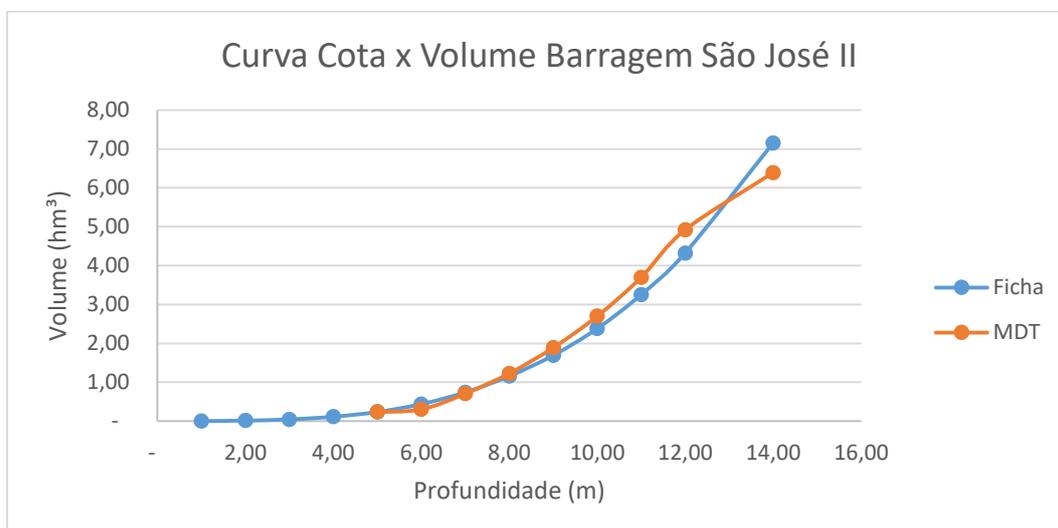


**(b) Barragem Brejinho**

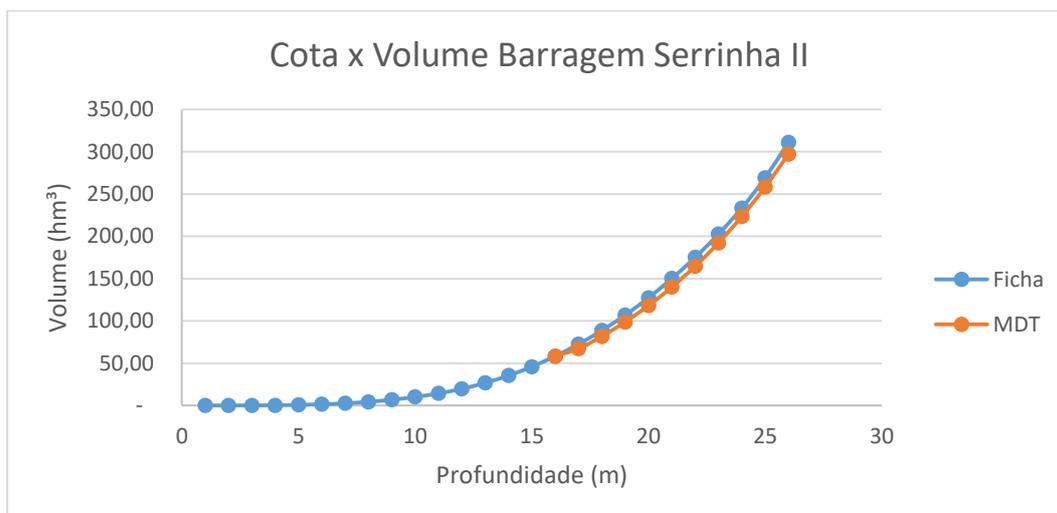


**(c) Barragem Brotas****(d) Barragem Cachoeirinha****(e) Barragem Jazigo**

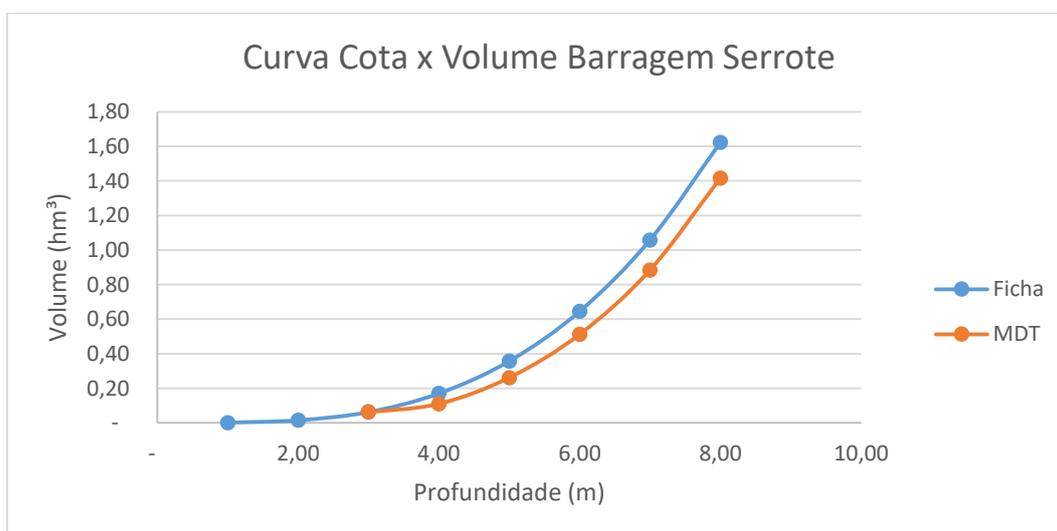
**(f) Barragem José Antônio****(g) Barragem Poço Grande****(h) Barragem Quebra Unha**

**(i) Barragem Rosário****(j) Barragem Saco I****(k) Barragem São José II**

### (i) Barragem Serrinha II



### (j) Barragem Serrote



#### 4.2.3 Avaliação dos coeficientes de forma dos reservatórios

Foram obtidas as constantes  $K$  e  $\alpha$  de todas as barragens estudadas utilizando como base de dados os volumes e profundidades apresentadas nas Fichas técnicas e MDT's. Definiram-se as constantes  $K$  e  $\alpha$  para três situações distintas. Ficha Técnica das barragens utilizando todos os dados disponíveis na ficha, Ficha Técnica das barragens desprezando 20% do volume das cotas mais baixas e utilizando os dados obtidos através de MDT. As constantes  $K$  e  $\alpha$  para a ficha desprezando 20% do volume foram definidas com o objetivo de avaliar se é possível estimar com uma precisão aceitável o volume total de um reservatório parcialmente cheio no momento de obtenção dos dados do MDT.

Podemos definir  $V$  como os volumes adquiridos diretamente pelas fichas técnicas e MDT e  $V'$  como os volumes encontrados pela equação  $V = K \times H^\alpha$ . Os volumes encontrados através da função proposta por Molle (1994) ( $V'$ ) apresentaram bons resultados e grande semelhança entre os volumes fornecidos pelas Fichas Técnicas ( $V_{Ficha}$ ) e MDT ( $V_{MDT}$ ). Quando desprezado 20% do volume das cotas mais baixas da curva Cota x Volume da ficha, os valores obtidos ( $V'_{Ficha\ 80\%}$ ) se afastam dos valores originais da Ficha Técnica, encontrando-se valores próximos ao fornecido ( $V_{Ficha\ 80\%}$ ) e distintos do valor original ( $V_{Ficha}$ ). Para as Curvas Cota x Volume obtidas através de MDT e para os reservatórios secos no momento de captação dos pontos através do LiDAR, os resultados foram bons e com grande semelhança entre o volume do reservatório obtidos através de MDT ( $V_{MDT}$ ) e o volume obtido através das constantes  $K$  e  $\alpha$  ( $V'_{MDT}$ ). As barragens onde o MDT apresentou trechos alagados, os volumes encontrados através da função  $V = K \times H^\alpha$  foram semelhantes aos valores obtidos no levantamento. Os volumes de  $V'_{MDT}$  para barragens com trecho alagado, foram próximos de  $V_{MDT}$ , porém com valores distantes de  $V_{Ficha}$  para a maioria dos casos, por não ser possível computar os volumes diretamente das cotas alagadas no MDT.

Um dos critérios utilizados para medir a acurácia da determinação das curvas Cota x Área x Volume obtidas através da função  $V = K \times H^\alpha$  é a verificação da diferença entre os volumes máximos das fichas e MDT, com os obtidos pela equação proposta por Molle (1994). A Tabela 13 apresenta a comparação entre os volumes máximos encontrados nas curvas Cota x Volume das fichas técnicas ( $V_{Total\ Ficha}$  e  $V_{Total\ Ficha\ 80\%}$ ) e MDT ( $V_{Total\ MDT}$ ), com os valores obtidos através da equação  $V = K \times H^\alpha$  ( $V'_{Total\ Ficha}$ ,  $V'_{Total\ Ficha\ 80\%}$  e  $V'_{Total\ MDT}$ ).

Tabela 13 – Comparação entre os volumes  $V_{Total}$  e  $V'_{Total}$  das Fichas, Fichas 80% e MDT

Reservatório	$V_{Total\ Ficha} - V'_{Total\ Ficha}$ (%)	$V_{Total\ Ficha\ 80\%} - V'_{Total\ Ficha\ 80\%}$ (%)	$V_{Total\ MDT} - V'_{Total\ MDT}$ (%)	$V_{Total\ Ficha} - V'_{Total\ Ficha\ 80\%}$ (%)	$V_{Total\ Ficha} - V'_{Total\ MDT}$ (%)
Barra do Juá	-1,24%	1,74%	1,88%	16,47%	18,29%
Boa Vista	1,94%	5,20%	0,03%	16,42%	31,08%
Bom Sucesso	-5,05%	-6,76%	2,27%	6,50%	21,07%
Brejinho	0,74%	5,65%	-1,08%	19,72%	-2,87%
Brotas	0,27%	-3,00%	0,68%	13,81%	53,31%
Cachoeira II	2,68%	5,00%	-1,16%	21,55%	54,07%
Chinelo	1,91%	4,24%	2,38%	16,47%	17,08%
Jazigo	-1,93%	1,14%	23,68%	14,50%	70,37%
José Antônio	-9,00%	-23,58%	4,40%	7,00%	-9,36%
Laje do Gato	0,94%	-2,28%	1,89%	16,98%	11,71%
Mãe D'água	2,80%	5,13%	-2,10%	22,17%	8,68%
Poço Grande	-0,45%	2,88%	-16,28%	21,34%	65,05%
Quebra Unha	-8,78%	-8,49%	4,76%	4,69%	-6,05%
Rosário	2,42%	7,18%	2,20%	21,59%	2,42%
Saco I	-0,78%	-3,78%	6,12%	13,61%	53,80%
São José I	-0,35%	-1,62%	1,82%	9,79%	-35,32%
São José II	0,08%	2,42%	-6,94%	18,20%	7,94%
Serrinha Serraria	0,16%	2,70%	0,44%	19,04%	32,13%
Serrinha II	-1,68%	2,33%	-12,96%	20,64%	13,04%
Serrote	-3,24%	-3,60%	1,47%	7,25%	17,77%

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da Tabela 13, é possível obter as médias dos erros encontrados para as barragens estudadas, onde foram encontrados os seguintes resultados: a média da diferença dos valores de  $V_{Total\ Ficha} - V'_{Total\ Ficha}$ ;  $V_{Total\ Ficha\ 80\%} - V'_{Total\ Ficha\ 80\%}$ ; e  $V_{Total\ MDT} - V'_{Total\ MDT}$ , foram respectivamente, em módulo, 0,93%, 0,38% e 0,67%, representando erro abaixo de 1%. Esse resultado representa uma boa exatidão entre as curvas fornecidas com as obtidas pela equação de mesma base de dados. Quando comparadas às médias da diferença

dos valores dos volumes  $V_{Total\ Ficha} - V'_{Total\ Ficha\ 80\%}$  e  $V_{Total\ Ficha} - V'_{Total\ MDT}$ , os resultados encontrados foram 15,39% e 21,21% respectivamente. Esses valores representam um erro expressivo entre as curvas fornecidas e as obtidas pela equação de diferentes bases de dados, o que mostra que os volumes encontrados na Ficha 80% e no MDT não são próximos aos valores da Ficha e não devem ser utilizados como equivalentes.

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 obtidos através de MDT. As constantes obtidas para todas as barragens estudadas podem ser observadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Constantes das curvas obtidas através do índice de forma das barragens

Reservatório	$\alpha$			K		
	Ficha (100%)	Ficha (80%)	MDT	Ficha (100%)	Ficha (80%)	MDT
Barra do Juá	3,58	4,60	2,76	2.835,57	132,02	5.735,40
Boa Vista	3,97	4,69	4,51	60,51	8,20	10,68
Bom Sucesso	3,25	4,15	3,50	799,82	81,82	332,76
Brejinho	3,00	2,76	3,08	82,79	128,02	86,15
Brotas	3,56	5,31	8,71	1.263,79	9,60	0,00
Cachoeira II	4,73	5,54	6,87	5,02	0,30	0,00
Chinelo	3,17	3,70	2,85	1.711,41	404,09	4.044,39
Jazigo	3,71	4,23	5,32	1.172,01	256,28	5,43
José Antônio	2,87	3,05	3,14	1.054,89	594,66	560,94
Laje do Gato	2,45	3,87	2,75	3.860,82	123,52	1.729,92
Mãe D'água	2,98	3,55	3,64	460,82	78,69	71,19
Poço Grande	3,89	4,61	9,06	23,59	1,99	0,00
Quebra Unha	2,80	3,13	5,32	2.400,88	883,28	3,32
Rosário	3,56	4,32	3,60	2.268,80	239,19	2.085,29
Saco I	2,58	3,67	4,48	49.695,61	2.564,41	172,83
São José I	2,65	3,32	3,76	3.601,21	734,57	196,83
São José II	3,17	3,66	3,11	1.650,33	368,96	1.808,93

Reservatório	$\alpha$			K		
	Ficha (100%)	Ficha (80%)	MDT	Ficha (100%)	Ficha (80%)	MDT
Serrinha Serraria	1,61	1,99	2,49	70.386,80	28.815,93	9.836,24
Serrinha II	3,58	4,57	2,82	2.701,63	83,49	3.954,33
Serrote	2,83	3,02	3,79	4.646,67	2.797,01	504,03

Fonte: Elaborado pelo autor

Através da Tabela 14 é possível constatar que as constantes variam consideravelmente entre os valores obtidos através das fichas técnicas, fichas técnicas desprezando 20% do volume total e MDT. As curvas Cota x Volume adquiridas através do índice de forma proposto por Molle (1994) traçam formas consideravelmente diferentes para os três casos na maioria das barragens. Na Tabela 15 foram efetuadas comparações e mensuradas as diferenças entre os valores de  $\alpha$  e  $K$  para as três condições estudadas para todas as barragens que apresentavam Fichas Técnicas.

Tabela 15 – Comparação entre  $\alpha$  e  $K$  obtidas através das Fichas 100%, Fichas 80% e MDT

Reservatório	$\alpha_{\text{Ficha 100\%}}$ – $\alpha_{\text{Ficha 80\%}}$	$\alpha_{\text{Ficha 100\%}}$ – $\alpha_{\text{MDT}}$	$K_{\text{Ficha 100\%}}$ – $K_{\text{Ficha 80\%}}$	$K_{\text{Ficha 100\%}}$ – $K_{\text{MDT}}$
Barra do Juá	-28,33%	23,02%	95,34%	-102,27%
Boa Vista	-18,06%	-13,57%	86,45%	82,36%
Bom Sucesso	-27,74%	-7,58%	89,77%	58,40%
Brejinho	7,97%	-2,56%	-54,63%	-4,06%
Brotas	-49,07%	-144,48%	99,24%	100,00%
Cachoeira II	-17,15%	-45,38%	94,08%	99,95%
Chinelo	-16,90%	9,96%	76,39%	-136,32%
Jazigo	-14,13%	-43,51%	78,13%	99,54%
José Antônio	-6,28%	-9,62%	43,63%	46,82%
Laje do Gato	-57,84%	-12,18%	96,80%	55,19%
Mãe D'água	-19,17%	-22,40%	82,92%	84,55%
Poço Grande	-18,53%	-132,79%	91,57%	100,00%

Reservatório	$\alpha_{\text{Ficha 100\%}}$ – $\alpha_{\text{Ficha 80\%}}$	$\alpha_{\text{Ficha 100\%}}$ – $\alpha_{\text{MDT}}$	$K_{\text{Ficha 100\%}}$ – $K_{\text{Ficha 80\%}}$	$K_{\text{Ficha 100\%}}$ – $K_{\text{MDT}}$
Quebra				
Unha	-11,93%	-90,12%	63,21%	99,86%
Rosário	-21,14%	-0,98%	89,46%	8,09%
Saco I	-42,50%	-73,82%	94,84%	99,65%
São José I	-25,48%	-42,09%	79,60%	94,53%
São José II	-15,50%	2,07%	77,64%	-9,61%
Serrinha				
Serraria	-23,73%	-54,92%	59,06%	86,03%
Serrinha II	-27,67%	21,18%	96,91%	-46,37%
Serrote	-6,80%	-33,87%	39,81%	89,15%

Fonte: Elaborado pelo autor

Através da comparação realizada na Tabela 15 é possível observar que a curva Cota x Área x Volume descrita através das três diferentes bases de dados estudadas (Fichas 100%, Fichas 80%, MDT), tem curvaturas distintas e com diferenças relevantes. Comparando o  $\alpha$  obtido pelas Ficha 100% e a Ficha 80%, a maior diferença encontrada foi na barragem Laje do Gato, que obteve 57,84% de diferença e a menor diferença encontrada foi na barragem José Antônio, com diferença de 6,28%. Comparando o  $\alpha$  obtido pelas Ficha 100% e MDT, a maior diferença encontrada foi na barragem Brotas, que obteve 144,48% de diferença e a menor diferença encontrada foi na barragem Rosário, com diferença de 0,98%. Comparando o  $K$  obtido pelas Ficha 100% e a Ficha 80%, a maior diferença encontrada foi na barragem Chinelo, que obteve 97,85% de diferença e a menor diferença encontrada foi na barragem Serrote, com diferença de 39,81%. Comparando o  $K$  obtido pelas Ficha 100% e MDT, a maior diferença encontrada foi na barragem Chinelo, que obteve 136,32% de diferença e a menor diferença encontrada foi na barragem Brejinho, com diferença de 4,06%.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

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 ha foi bem superior aos métodos aplicados utilizando imagens de satélite com baixa resolução espacial. A mesma eficiência foi observada para a determinação da capacidade de armazenamento de médios e grandes reservatórios inseridos na bacia hidrográfica do Rio Pajeú. O levantamento realizado nesse trabalho atualizando a capacidade de armazenamento dos reservatórios é de grande utilidade aos gestores de recursos hídricos, especialmente nos longos períodos de estiagem. Por exemplo, valores corretos da capacidade de reservatórios são essenciais para a simulação de sistemas hídricos através de modelos matemáticos.

O fluxo superficial das águas e o regime de descargas nos rios são afetados pelos reservatórios localizados nas bacias semiáridas do Nordeste. As informações de capacidade de armazenamento são úteis para a modelagem de precipitação/escoamento dessas bacias, melhorando a qualidade dos resultados. Outra aplicação potencial desse estudo é a avaliação da sedimentação de reservatórios utilizando a capacidade estimada no ano de construção do reservatório e o valor calculado através de MDT. Para os reservatórios parcialmente vazios, deve-se definir equações que relacionem a superfície da água com o armazenamento obtido nos reservatórios vazios.

Considerando que o levantamento aerotransportado LiDAR cobre todo o território do estado de Pernambuco, é possível aplicar os métodos apresentados neste trabalho para a detecção e atualização da capacidade de armazenamento dos reservatórios nas bacias hidrográficas do Estado. Além disso, os resultados obtidos pelos métodos usados podem ser considerados como referência para a validação de outros métodos utilizando sensores laser com menor precisão.

Para detectar açudes e a capacidade de armazenamento de reservatórios utilizando LiDAR aerotransportado em outras regiões, para um melhor resultado, o planejamento deve levar em conta períodos em que o nível de água nos reservatórios é baixo ou nulo. Em outras palavras, a execução de levantamento aéreo durante a estação seca apresenta dois benefícios: ausência de nuvens (bom estado para adquirir imagens) e baixo nível de água nos reservatórios.

## 6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. L. de; TOLÊDO, C. E. de; MASCENA, A. M.; ARAÚJO, J. C. de. Estimativa do Assoreamento da Barragem Quincoé com Auxílio de Ferramentas SIG. IV Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação. **Anais...** . p.6, 2012. Fortaleza: INOVAGRI International Meeting.

ARAÚJO, J. C. de. Assoreamento em Reservatórios do Semi-árido : Modelagem e Validação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 39–56, 2003.

ARAÚJO FILHO, J. C.; BURGOS, N.; LOPES, O. F.; et al. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000.

BRANDALIZE, A. A. **Perfilamento a LASER: Comparação com Métodos Fotogramétricos**. Curitiba, 2002.

BRASIL. **Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável do Sertão do Pajeú**. Brasília, 2011.

BUARQUE, D. C.; FAN, F. M.; ROLIM, A.; COLLISCHONN, W. Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 2, p. 91–103, 2009.

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford: Oxford University Press, 1986.

CABRAL, J. B. P.; FERNANDES, L. A.; SCOPEL, I.; et al. Caracterização Geoambiental do Reservatório de Cachoeira Dourada – GO/MG (FASE – 1). X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA. **Anais...** . p.1–9, 2003. Rio de Janeiro.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. de; FELGUEIRAS, C. A.; et al. Geoprocessamento para projetos ambientais. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. 2ª ed., 36 p., 1998. São José dos Campos.

CARVALHO, M.S.B.S.; MARTINS, S.P.R.M.; SOARES, A.M.M. et al. Levantamento dos espelhos d'água acima de 20 ha em todo o território brasileiro através de sensoriamento remoto. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais...** . 2009. Natal.

CASTRO, V. L. S. de; LIMA, D. M.; COSTA, A. H. A.; PAZ, A. R. da. Processamento de modelo digital de elevação para estimativa do tempo de percurso do escoamento superficial. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais...** . p.6305–6312, 2015. João Pessoa.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C. da, CAMPOS, J. H. de A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, p. 755–763, 2014. Recife.

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

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

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 37, n. 1, p. 35–46, 1991.

CPRM. Mapa Geodiversidade do Estado de Pernambuco. , 2012. Brasília: CPRM.

ESRI. ArcGIS. , 2012. Redlands: ESRI.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; SORRIBAS, M. V.; RÓGENES, P.; PONTES, M. Sobre o Início da Rede de Drenagem Definida a Partir dos Modelos Digitais de Elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 241–257, 2013.

FEITOSA, A. **Zoneamento de pequenas bacias hidrográficas e caracterização de várzeas na Bacia do Pajeú, Pernambuco**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 139 p., 2012.

FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. **Introdução à ciência da geoinformação**, 2001. São José dos Campos: INPE. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>>.

FERREIRA, A. B.; FILHO, W. P. Avaliação da Reflectância Espectral de Corpos D' água em Santa Maria-RS por Meio de Espectrorradiometria de Campo. **Geoambiente**, v. 13, p. 194–207, 2009.

FOLHARINI, S. O.; OLIVEIRA, R. C.; FURTADO, A. L. S. **Metodologia para conversão de Modelo Digital de Elevação em Modelo Digital do Terreno**. João Pessoa, 2015.

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.

FRANCISCO, C. N.; ALMEIDA, C. M. de. Avaliação de Desempenho de Atributos Estatísticos e Texturais em uma Classificação de Cobertura da Terra Baseada em Objeto. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, p. 302–326, 2012. Curitiba.

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

GIL, M. M. L. **Análise de Cenários de Produção de Sedimentos na Relação Oferta-Demanda Hídrica da Barragem Bocaina – PI**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 110 p., 2017.

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 2ª ed. Upper Saddle River, 1996.

KHAN, A.; RICHARDS, K. S.; PARKER, G. T.; MCROBIE, A.; MUKHOPADHYAY, B. How large is the Upper Indus Basin? The pitfalls of auto-delineation using DEM's. **Journal of Hydrology**, v. 509, p. 442–453, 2014.

KYRILLOS, D. de S. **Sistema de Suporte ao Planejamento dos Recursos Hídricos. Estudo de Caso: Bacia do Rio São Francisco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 140 p., 2000.

LADEIRA, R. da C. **Um Método para Determinar a Posição do Terreno e a Altura de uma Barragem que seja Capaz de Gerar um Reservatório com um Dado Volume**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 100 p., 2013.

LADEIRA, R.; MAGALHÃES, S.; ANDRADE, M.; GRUPPI, M. Um método para o cálculo da barragem necessária para gerar um reservatório com um determinado volume. Xii Geoinfo. **Anais...** . p.123–128, 2011. Campos do Jordão.

LIEBE, J.; van de GIESEN, N.; ANDREINI, M. Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment: a case study in the Upper East Region of Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 30, n. 6, 448-454, 2005.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 7ª ed. Hoboken: Wiley, 2015.

LIPORACI, S. R.; RÖHM, S. A.; PEDRO, F. G.; CEREDA JUNIOR, A. Comparação entre diferentes técnicas digitais para elaboração do modelo digital do terreno e da carta de declividades, com aplicação em mapeamento geológico-geotécnico e análise ambiental. **Revista Holos Environment**, v. 3, n. 2, p. 85–102, 2003.

MAIDMENT, D. R. **Arc Hydro: GIS for water resources**. 1ª ed. Redlands: ESRI, 2002.

MOLLE, F. **Geometria dos Pequenos Açudes**. 3ª ed. Recife: SUDENE, 1994.

NOVO, E. M. L. de M. Monitoramento de Quantidade e Qualidade da Água e Sensoriamento Remoto. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** . p.1–20, 2015. São José dos Campos-SP.

OVAKOGLU, G.; ALEXANDRIDIS, T. K.; CRISMAN, T. L.; SKOULIKARIS, C.; VERGOS, G. S. Use of MODIS satellite images for detailed lake morphometry: Application to basins with large water level fluctuations. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 51, p. 37–46, 2016. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2016.04.007>>.

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

\_\_\_\_\_. EDITAL NCB N°002 / 2013: **Contratação de base cartográfica a partir perfilamento a laser em todo o território do estado de Pernambuco**. Recife, 2013.

\_\_\_\_\_. **Pernambuco Tridimensional**. Disponível em: <<http://www.pe3d.pe.gov.br/>>. Acesso em: 31/1/2017.

PESSÔA, Z. B.; FONTES, A. S.; MEDEIROS, Y. D. P. Enquadramento de corpos d'água para fins de consumo humano em regiões semiáridas: avaliação conforme Resolução CONAMA 357/2005 e Portaria MS 2914/2011. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, p. 496–506, 2015.

PIRES, J. M. **Uso do LiDAR (Light Detection And Ranging) para estimação da altura de árvores em povoamentos de eucalipto**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 39 p., 2005.

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

RAN, L.; LU, X. X. Delineation of reservoirs using remote sensing and their storage estimate: An example of the Yellow River basin, China. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 8, p. 1215–1229, 2012.

SANTOS, K. ALMEIDA DOS S. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. Estudo de caso: Bacia do Rio Mundaú**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 107 p., 2013.

SANTOS, L. L. DOS; CABRAL, J. J. S. P.; CIRILO, J. A.; et al. Aplicação da tecnologia de filtração em margem para população difusa no Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 49–58, 2014.

SILVA, E. R. **Modelagem Integrada para Controle de Cheias, Previsão e Alerta de Inundações: Estudo de Caso da Bacia do Rio Una em Pernambuco**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 145 p., 2015.

SOUZA, S. H. B. DE. **Avaliação da Eficácia de Barreiras Sanitárias em Sistemas para Aproveitamento de Águas de Chuva no Semi-Árido Pernambucano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, 179 p., 2009.

SPARK, R. N.; WILLIAMS, P. F. Digital Terrain Models and the Visualization of Structural Geology. **Structural Geology and Personal Computers**, v. Volume 15, p. 421–446, 1996. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B8H31-4NWMMJ8-14/2/81ff332d008dfb5c8e85f3d6b9384aef>>.

SUAREZ, ALERSON FALIERI; CANDEIAS, A. L. B. Avaliação De Acurácia Da Classificação De Dados De Sensoriamento Remoto Para O Município De Maragogipe. Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais...** . v. IV, p.1–10, 2012. Disponível em: <[https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIV/CD/artigos/SReFOTO/172\\_4.pdf](https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIV/CD/artigos/SReFOTO/172_4.pdf)>.

WANG, Y.; LIAO, M.; SUN, G.; GONG, J. Analysis of the water volume, length, total area and inundated area of the Three Gorges Reservoir, China using the SRTM DEM data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 18, p. 4001–4012, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01431160500176788>>.

YANG, X.; LU, X. X. Delineation of lakes and reservoirs in large river basins: An example of the Yangtze River Basin, China. **Geomorphology**, v. 190, p. 92–102, 2013.