



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MÁRCIO MATTOS CARVALHO CABRAL E SILVA

**MONITORAMENTO DO NÍVEL DO AÇUDE SÃO GONÇALO POR MEIO DO USO
DO GOOGLE EARTH ENGINE**

JOÃO PESSOA - PB
JUNHO - 2023

MÁRCIO MATTOS CARVALHO CABRAL E SILVA

**MONITORAMENTO DO NÍVEL DO AÇUDE SÃO GONÇALO POR MEIO DO USO
DO GOOGLE EARTH ENGINE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro de Tecnologia
da Universidade Federal da Paraíba,
como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida

JOÃO PESSOA - PB
JUNHO - 2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586m Silva, Márcio Mattos Carvalho Cabral e.
MONITORAMENTO DO NÍVEL DO AÇUDE SÃO GONÇALO POR MEIO
DO USO DO GOOGLE EARTH ENGINE / Márcio Mattos Carvalho
Cabral e Silva. - João Pessoa, 2023.
48 f. : il.

Orientação: Cristiano das Neves ALMEIDA.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Google Earth Engine. 2. Sensoriamento Remoto. 3.
Volume de reservatórios. I. ALMEIDA, Cristiano das
Neves. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 624(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

MÁRCIO MATTOS CARVALHO CABRAL E SILVA

MONITORAMENTO DO AÇUDE SÃO GONÇALO ATRAVÉS DO USO DO GOOGLE EARTH ENGINE

Trabalho de Conclusão de Curso em 14/06/2023 perante a seguinte Comissão Julgadora:



Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental CT/UFPB

Aprovado



Prof. Dr. Hamilcar Jose Almeida Filgueira
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental CT/UFPB

APROVADO



Prof. Dr. Gerald Norbert Souza da Silva
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental CT/UFPB

APROVADO

Prof. Dr. Pablo Brilhante de Sousa
Matrícula Siape: 1483214
Coordenador do Curso de Graduação de Engenharia Civil

Em tudo dai Graças, porque esta é
a vontade de Deus - 1 Ts 5, 18.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o desenvolvimento deste trabalho primeiramente a Deus, que nos dá a vida, inteligência e capacidade para estarmos sempre crescendo, por Ele todas as coisas foram feitas e sem Ele nada teria sido feito.

Agradeço aos meus pais, Tarciso Cabral da Silva e Maria Betania Matos de Carvalho, que são exemplos para mim, sempre estiveram comigo e tiveram a educação como um grande tesouro a me entregar.

Agradeço a minha noiva Laryssa Macedo que esteve comigo, e vem iluminar os dias mais difíceis, e sempre traz leveza e paz para a rotina, me inspirando a ser uma pessoa melhor e ir sempre mais longe me mostrando todo o potencial que posso descobrir em mim.

Aos meus irmãos Elder Cabral e Tessa Cabral, minha cunhada Cristiane e meus sobrinhos Elder e Ana Beatriz, que sempre estiveram comigo e me impulsionam a desejar sempre o melhor.

Aos meus avós (*in memoriam*) que deixaram um grande rastro para mim e nunca serão esquecidos.

A todos os primos, primas, tios e tias que me transmitem todo amor e formam a minha família, por esse elo eterno.

Agradeço a todos os inúmeros amigos da Comunidade Católica Nova Berith, também agradeço aos amigos do Marista por sempre me apoiarem. Agradeço a todos os amigos que encontrei no curso, que trouxeram uma experiência de faculdade muito melhor.

Agradeço ao meu professor orientador Cristiano das Neves Almeida, que desde o estágio na Scientec já me ajudava, me orientava em diversas situações acadêmicas, levarei conhecimentos valiosos para a vida. Aos professores Gerald Souza que me ensinou muito na área de geoprocessamento e hidráulica e o professor Hamilcar Filgueira no qual pude ter o prazer de ser orientando do PIBIC, minha profunda gratidão a estes mestres.

Agradeço a todos os amigos da AESA, local onde tive um grande aprendizado na área de recursos hídricos, especialmente aos amigos da Gerência de Operação de Mananciais. E todos os outros locais onde estagiei: Construtora Habitare, ARME e Kanova.

Este trabalho é por todos vocês!

RESUMO

A água é um elemento fundamental para a vida e o desenvolvimento humano, sendo utilizada para diversas finalidades, como consumo humano, irrigação, dessedentação de animais e transporte. Com o aumento da população que residem nos centros urbanos, o consumo de água tem crescido significativamente, demandando uma melhor gestão desse recurso natural. Diante deste contexto, as barragens desempenham um papel fundamental para manutenção do progresso da sociedade, pois permitem o armazenamento e a liberação sistematizada de água, facilitando o controle, o armazenamento e a distribuição desse recurso. Porém, a construção de barragens pode ter impactos negativos no meio ambiente, como riscos de rompimento e consequentes danos ambientais e sociais, exigindo a avaliação prévia desses riscos e a adoção de medidas para minimizar esses efeitos adversos, bem como o constante monitoramento de seus níveis e uma gestão adequada dos recursos hídricos. Atualmente, existem diferentes métodos de medição disponíveis, réguas linimétricas, medidores de pressão, químicos, sensoriamento remoto. No entanto, o monitoramento ainda enfrenta desafios, como a necessidade de leituras manuais diárias e a falta de acessibilidade em algumas áreas. O uso do sensoriamento remoto, por meio de imagens de satélite, surge como uma solução complementar, permitindo uma cobertura ampla, alta precisão, praticidade nos processos de avaliação de volume e custo-benefício favorável. O presente trabalho usa a plataforma do Google Earth Engine (GEE) para processamento de imagens de satélite, avaliação de áreas e volumes para o reservatório São Gonçalo, gerando inclusive uma série histórica para comparar com os dados fornecidos pela Agência Executiva de Gestão da águas do estado da Paraíba (AESAs).

PALAVRAS-CHAVE: *Google Earth Engine*, Sensoriamento Remoto, Volume de reservatórios.

ABSTRACT

Water is a fundamental element for life and human development, and is used for various purposes, such as human consumption, irrigation, animal feeding, and transportation. With the increase in the population residing in urban centers, water consumption has grown significantly, demanding a better management of this natural resource. Given this context, dams play a fundamental role in maintaining the progress of society, because they allow the storage and systematic release of water, facilitating the control, storage and distribution of this resource. However, the construction of dams can have negative impacts on the environment, such as the risk of breakage and consequent environmental and social damage, requiring the prior assessment of these risks and the adoption of measures to minimize these adverse effects, as well as the constant monitoring of their levels and proper management of water resources. Currently, there are different measurement methods available, limnetic rulers, pressure gauges, chemicals, remote sensing. However, monitoring still faces challenges, such as the need for daily manual readings and the lack of accessibility in some areas. The use of remote sensing, through satellite imagery, emerges as a complementary solution, allowing wide coverage, high accuracy, practicality in volume assessment processes, and favorable cost-effectiveness. The present work uses the Google Earth Engine (GEE) platform to process satellite images, assess areas and volumes for the São Gonçalo reservoir, even generating a historical series to compare with the data provided by the Executive Agency for Water Management of the State of Paraíba (AESPA).

KEYWORDS: *Google Earth Engine*, Remote Sensing, Volume of reservoirs.

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO.....	11
2.0	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVOS GERAIS	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3.0	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	BREVE HISTÓRICO DO MONITORAMENTO DE AÇUDES NO BRASIL	15
3.2	EQUIPAMENTOS USADOS PARA MONITORAMENTO DE AÇUDES	19
3.3	CURVA COTA-ÁREA-VOLUME DE AÇUDES	21
3.4	SENSORIAMENTO REMOTO	22
3.5	ÍNDICES ESPECTRAIS.....	25
4.0	METODOLOGIA.....	28
4.1	ÁREA DE ESTUDO	28
4.2	ÍNDICES ESPECTRAIS IDENTIFICADORES DE ÁGUA.....	32
4.3	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE E GOOGLE EARTH ENGINE 34	
4.4	CÁLCULO DAS ÁREAS DE ESPELHO D'ÁGUA, DETERMINAÇÃO DOS VOLUMES RESERVADOS E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.	36
5.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5.1	IMAGENS COLETADAS E ÍNDICES ESPECTRAIS.....	38
5.2	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS, ÁREA E VOLUME DE ÁGUA	40
6.0	CONCLUSÃO.....	47
7.0	REFERENCIAS.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos do monitoramento do volume da água em reservatórios: a) régua linimétrica e b) torre de tomada d'água.....	20
Figura 2 – Sensor de nível Ampeq.	21
Figura 3 - Mapa de localização do açude São Gonçalo.....	28
Figura 4 – Imagem de satélite do açude São Gonçalo.....	29
Figura 5 - Vista do perfil da barragem	29
Figura 6 - Estrada e vista da tomada d'água do açude São Gonçalo	30
Figura 7 - Soleira do vertedouro.....	31
Figura 8 - Tubulação adutora	32
Figura 9 – Metodologia do processamento das imagens.....	35
Figura 10 - Apresentação dos índices aplicados nas imagens para determinação de água, imagens do dia 07/12/2021. a) Composição RGB b) MNDWI, Xu (2006), c) NDWI (Gao, 1996) e d) NDWI (McFeeters, 1996).	39
Figura 11 - Curva AV do reservatório São Gonçalo.	40
Figura 12 - Relação Área x Volume a partir do índice de Xu (2006)	41
Figura 13 - Coeficiente – coeficiente de determinação para os volumes calculados pela curva CAV e dos dados obtidos para os índices de a) Xu, b) Gao e c) McFeeters.	42
Figura 14 - Série histórica dos volumes obtidos pelo GEE.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índices de Água aplicados.....	32
Tabela 2 – Satélites e bandas utilizados na pesquisa.....	33
Tabela 3 – Quantidade de imagens após aplicação de cada filtro.	38
Tabela 4 – Resumo estatístico dos resultados.	45

1.0 INTRODUÇÃO

A água é um elemento fundamental para a sobrevivência e desenvolvimento da vida. As civilizações humanas antigas buscavam sempre se instalar às margens de cursos d'água, para facilitar a sua obtenção para diversas finalidades como o consumo humano, irrigação, dessedentação de animais, piscicultura ou até mesmo transporte, entre outros.

Nos dias de hoje, o aumento das populações nos centros urbanos vem crescendo cada vez mais causando um aumento do consumo da água, esse recurso natural vital para o desenvolvimento humano. O aumento da demanda pelos recursos hídricos provoca a necessidade de, cada vez mais, ter uma melhor organização e gestão a fim de que possa haver atendimento de suas atividades.

Segundo Cabral da Silva (2022) denomina-se barragem o elemento estrutural construído transversalmente ao curso d'água, com o objetivo principal de reter ou represar as suas águas, a fim de atender necessidades específicas. Segundo o mesmo autor, essas estruturas são obtidas por meio de uma alocação ordenada e racional de materiais diversos, constituindo aterros flexíveis ou muros rígidos.

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), na Resolução nº 143 de 2012 (CNRH, 2012), define um barramento como sendo qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas.

A barragem possibilita o armazenamento e a liberação de água, de maneira controlada, feita geralmente, inundando uma parte da bacia hidrográfica e eventualmente as planícies aluviais a jusante. As barragens são importantes ferramentas para o controle, armazenamento e distribuição de água para a cidade, possibilitando a ocupação humana em regiões sujeitas a ocorrências os problemas oriundos da escassez hídrica com destaque para as secas.

A construção de barramentos para açudes também pode ter seus impactos negativos no meio ambiente. Os riscos mais notáveis podem ser citados como: rompimento e consequentes impactos ambiental e social. Importante notar que esses riscos podem ser avaliados previamente, bem como estabelecidas propostas para contornar ou minimizar os efeitos negativos, a fim de tornar viável a construção da barragem.

Para o bom aproveitamento obtido da construção de barragens, é necessário o estudo das áreas inundáveis, compreendendo a bacia hidráulica, desde a concepção de projeto do

barramento, bem como após a construção por meio do monitoramento do reservatório e dos níveis da água com o máximo de precisão e melhor resolução temporal possível.

O monitoramento dos volumes armazenados nos reservatórios fluviais, é fundamental para a boa e sustentável gestão das águas. A partir desse monitoramento coleta-se dados quanto ao volume disponível para distribuição da água em seus diferentes usos. De posse dessa informação é possível tomar decisões importantes para o uso racional da água para, em benefício da vida de todos os seres vivos que usufruem do açude.

Estão disponíveis para os técnicos e pesquisadores da área, uma diversidade de instrumentos e métodos para medição de volume em reservatórios, réguas linimétricas, medidores de pressão, medidores químicos ou sensoriamento remoto.

Apesar de toda a diversidade de métodos, ainda hoje o monitoramento de volume de reservatórios apresenta uma grande deficiência. A maioria dos grandes reservatórios do Nordeste brasileiro tem como sistema de medição de volume o uso de réguas linimétricas.

O método de medição aplicado na região demanda a necessidade de um leitorista que todos os dias vá até o local fazer a leitura do nível do reservatório e registrar. Esse deslocamento, que muitas vezes são em lugares de difícil acesso, pode explicar uma possível causa de tais dificuldades e defasagens no monitoramento dos volumes dos açudes. Além disso, há problemas de calibragem e manutenção dos equipamentos que ocorrem.

Vale ressaltar que, muitas vezes, existem as dificuldades de falta de recurso e investimento para a área de monitoramento de reservatórios, impedindo a aquisição de ferramentas que possam fazer uma melhor medição e precisão dos dados reais.

A Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AESAPB) realiza o monitoramento de cerca de 135 açudes no estado da Paraíba, com a avaliação do volume dos reservatórios por meio do uso de réguas linimétricas e da curva cota-área-volume, dando possibilidade de erros devido à leitura ser completamente manual. Ocorrem às vezes, até mesmo a falta das leituras dos níveis de água, dificultando assim a compreensão da variação dos volumes armazenados nos reservatórios fluviais.

O sensoriamento remoto, por meio de produtos de imagens e sensores providos por satélite, pode ser uma boa ferramenta para o monitoramento de açudes, e a problemática decorrente da imprecisão de dados de níveis d'água e da curva cota área volume.

O sensoriamento remoto pode ser solução como uma medida complementar e trazer inúmeros benefícios para o monitoramento dos açudes. Entre eles podem ser citados: cobertura de imagens disponíveis, precisão que vem aumentando ao longo do tempo, relação custo-

benefício favorável, praticidade nos processos de avaliação de volume, resolução temporal e espectral compatíveis, custo de máquina razoável, dentre outros.

A empresa americana Alphabet, administradora serviços do Google, disponibiliza a plataforma do Google Earth Engine (GEE), gratuitamente, que pode ser uma ferramenta para processamento de imagens nas nuvens. Apresenta considerável contribuição para a gestão das águas, mais especificamente o monitoramento de reservatórios e rios de maior porte.

As grandes vantagens do GEE são: o fornecimento de grande quantidade de imagens com alta resolução de maneira prática, por meio da linguagem de programação Javascript ou a linguagem de código aberto Python; série histórica das imagens de satélite; e escala compatível com o monitoramento. Pode ser efetivado, com poucas linhas de código, um processamento de imagens para uma grande área; possibilidade de compartilhamento de projetos entre os usuários da plataforma; entre outras vantagens. Além da elaboração de gráficos, interface simples, acesso fácil e custos reduzidos.

O presente trabalho teve o objetivo determinar e analisar os volumes armazenados no reservatório de São Gonçalo, no sertão do estado da Paraíba, a partir da ferramenta GEE, utilizando a metodologia proposta Condeça et al. (2022). São feitas também comparações entre os dados fornecidos pelos órgãos de monitoramento e os resultados alcançados.

2.0 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho teve por objetivo determinar volumes armazenados no reservatório São Gonçalo, no período de 1994 a 2019, por meio de metodologia que utiliza imagens de satélite, e realizar comparações com os resultados obtidos da avaliação tradicional, com uso da curva cota-área-volume.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.** Prospectar imagens de satélites do reservatório com resolução temporal compatíveis com a metodologia a ser empregada;
- 2.** Aplicar os índices para identificação de água utilizando o Google Earth Engine;
- 3.** Construir uma série temporal do volume do reservatório;
- 4.** Avaliar a eficiência do método para possível monitoramento de volumes em reservatórios na Paraíba.

3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BREVE HISTÓRICO DO MONITORAMENTO DE AÇUDES NO BRASIL

O monitoramento sistemático das águas no Brasil iniciou com a criação da Comissão de Estudos de Forças Hidráulicas, em 1920. Segundo o memorial da Agência Nacional de Águas ANA (ANA, 2022), o monitoramento objetivava fomentar a exploração do potencial hidráulico para a geração de energia pelo governo federal.

No Brasil, historicamente houve um forte interesse no monitoramento do nível de água dos reservatórios fluviais devido ao setor elétrico, pois as hidrelétricas necessitavam de um nível de água mínimo para operação das turbinas e geração de energia.

Nos anos de 1933 houve uma reorganização do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil e criou-se a diretoria de Águas, mas já em 1934 essa passa a ser chamada de Serviço de Águas e é incorporado ao Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), em consequência da reforma empreendida pelo ministro da Agricultura do governo de Getúlio Vargas, Juarez Távora.

Em 1934, por meio do Decreto nº 24.643, foi instituído o Código de Águas, esse fazendo distinção de alguns usos da água, no que diz respeito, principalmente aos seus proprietários (público ou particular). Em 1939 com a criação do Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica (CNAEE), pelo Decreto-lei nº 1.285, diretamente ligado à Presidência da República, as suas atribuições eram de ser um órgão de consulta, orientação e controle no tocante à utilização dos recursos hidráulicos e de energia elétrica no Brasil. Mais adiante começou a ter funções também executivas.

Em 1960 foi criado o ministério de Minas e Energias, englobando o CNAEE. No ano seguinte foi instituída a Eletrobrás (Centrais Elétricas Brasileiras S.A.) que recebeu diversas atribuições que antes eram do CNAEE.

Em 1965, a Divisão de Águas, que antes pertencia ao DNPM, foi absorvida pelo Departamento Nacional de Águas e Energia (DNAEE), este criado por meio da Lei nº 4.904 de 1965. Vale ressaltar que o DNAEE e o CNAEE coexistiram nesse breve período. Em 1969 foi extinta completamente a CNAEE e todas as suas atribuições sendo destinadas ao DNAEE. Até que em 1996 é extinto o DNAEE, com a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Deve-se notar que, os anos 1960 foram anos de intensa atividade para o avanço das legislações e atividades executivas relacionadas à água no Brasil. Nessa década, além de diversas movimentações relacionadas ao DNAEE, foram instalados os primeiros equipamentos automáticos de medição de chuvas e níveis de rios (ANEEL, 2022).

Na Constituição Federal de 1988, nos artigos 21 e 22, é previsto o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Esse sistema, que em 1997 viria a ser objeto da Lei nº 9.433, a Lei das Águas (BRASIL, 1997), que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e estrutura o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).

No ano 2000 é criada a Agência Nacional de Águas (ANA), por meio da Lei nº 9.984/2000, com finalidade de implementar a Lei das Águas e fazer o monitoramento das redes hidrometeorológicas do país. No ano de 2010 é conferido à ANA as atribuições de organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e promover a articulação entre os órgãos fiscalizadores de barragens e coordenar a elaboração do Relatório de Segurança de Barragens (RSB). Com a publicação da Lei nº 14.026/2020 (BRASIL, 2020), a ANA passa a se chamar “Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico” e recebe competência para instituir normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico, entre outras atribuições (BRASIL, 2020).

3.1.1 CONSTRUÇÃO E MONITORAMENTO DE AÇUDES NO NORDESTE

Na região Nordeste do Brasil não podem ser esquecidas as ações da Inspetoria de Obras Contra as Secas – IOCS, criada por meio do Decreto nº 7.619, de 21 de outubro de 1909, pelo Presidente Nilo Peçanha. Esse órgão foi o primeiro a estudar a problemática do semiárido relacionada, principalmente, ao combate às secas por meio da implantação de açudes e perfuração de poços. Em seguida, recebeu em 1919, segundo o Decreto nº 13.687/1919, no governo de Delfim Moreira, o nome de Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas (IFOCS). Isso antes de assumir sua denominação atual, Departamento Nacional de Obras Contara as Secas (DNOCS), que lhe foi conferida em 1945 pela Lei nº 8.486, de 1945, sendo transformada em uma autarquia federal, por meio da Lei nº 4.229, de 1963. Nota-se que o IFOCS, entre suas atribuições, em sua lei de criação já contemplava ações de hidrometria em rios, entre outras funções correlatas.

Entre os anos de 1911 e 1930, o Eng. Miguel Arrojado Ribeiro Lisboa, então diretor da IFOCS, fez uma vasta coleta de dados pluviométricos e instalação de estações fluviométricas.

Esses dados foram o que possibilitaram ao Engenheiro do DNOCS, Francisco Aguiar, empreender uma grande síntese hidrológica, confeccionando métodos empíricos para determinação do escoamento superficial e de volumes de açudes no semiárido, deixando uma grande contribuição para os estudos hidrológicos e hidrométricos para o Nordeste brasileiro.

O DNOCS, na primeira metade do Século 20, foi praticamente o único órgão estatal que executava obras de engenharia na região Nordeste. Vale destacar que realizava todo tipo de obra para o desenvolvimento da região: barragens, açudes, rodovias, usinas hidrelétricas, redes de energia elétrica, entre outras.

O ano de 1959 foi um marco para a questão das secas no Nordeste devido à criação da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). Esse órgão foi criado inicialmente como uma Autarquia Federal, com a missão de “combater” o quadro de seca e a difícil situação socioeconômica na região. Muitas das atividades que antes eram atribuídas ao DNOCS, passaram a ser de responsabilidade da SUDENE. A Superintendência inicialmente considerava o uso das águas armazenadas sendo destinadas com destaque para a irrigação. Também teve importante atuação na cartografia do Nordeste brasileiro, tendo sido um dos primeiros órgãos a fazer um mapeamento detalhado com cartas planialtimétricas em quase toda a Região. A rede de monitoramento pluviométrico e o estudo de bacias hidrográficas experimentais tiveram grande destaque entre as atividades da SUDENE. Com o tempo a SUDENE foi perdendo investimentos públicos e força política, até sua extinção temporária em 2001, e replantada com a Lei Complementar nº 125/2007, sem, no entanto, retomar com as funções de estudos e monitoramento hidrológico.

3.1.2 CONSTRUÇÃO E MONITORAMENTO DE AÇUDES NA PARAÍBA

O estado da Paraíba tem uma grande parte do seu território sujeito a um clima semiárido, onde ocorrem baixos índices pluviométricos e secas frequentes. Em virtude disso, já no começo do Século 20, salvo poucas iniciativas de natureza não governamental, foram encomendadas ao DNOCS as primeiras barragens na Paraíba, a fim de armazenar grandes quantidades de água e suprir o abastecimento de água na região.

Um dos primeiros açudes que se tem registro de construção na Paraíba é o Açude Velho na cidade de Campina Grande, construído entre 1828 e concluído em 1830. Segundo Pereira (2014) a construção foi realizada pelo governo provincial da Paraíba para “combate” à uma forte seca que assolou o Estado entre os anos de 1824 e 1828. De acordo com o SNISB, a

barragem mais antiga que se em seus registros na Paraíba é a do Açude de Santa Luzia, datada do ano de 1933.

No ano de 1996 foi instituído o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH) pelo Decreto nº 6.308. Com isso é instituída a Política Estadual de Recursos Hídricos. Essa Política tinha como órgão executivo a Secretaria de Planejamento do Paraíba, que contava com um grupo gestor de recursos hídricos dedicado a essa função.

Em 2005 é criada a Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs) pela Lei nº 7.779 de 07 de julho de 2005, substituindo a Agência de Águas, Irrigação e Saneamento (AAGISA), sob a forma jurídica de uma autarquia estadual. Isso em cumprimento com as normas descritas nos planos de recursos hídricos estadual e federal, tendo recebido alterações introduzidas pela Lei nº 8.042, de 27 junho de 2006. A lei de criação dispõe como objetivos da AESA, o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais nos limites da Paraíba, de águas originárias de bacias hidrográficas localizadas em outros Estados que lhe sejam transferidas através de obras implantadas pelo Governo Federal e, por delegação, de águas de domínio da União que ocorrem em território do Estado da Paraíba.

O Decreto nº 26.224 de 2005, que aprovou a estrutura básica da AESA, descreve as seguintes competências: implantação de cadastro de usuários de recursos hídricos no estado; análise, pareceres, licenças relacionadas a obras hídricas; desenvolver campanhas educativas relacionadas à água; fiscalizar construção e as condições operacionais de poços, barragens e outras obras de aproveitamento hídrico, os usos dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e da infraestrutura hídrica pública nos corpos de água de domínio estadual e, mediante delegação expressa, nos de domínio da União que ocorrem em território paraibano; operar, manter e atualizar a rede hidrometeorológica do Estado; exercer as atividades de monitoramento e previsão do tempo e do clima; atividades de cobrança relacionadas ao uso dos recursos hídricos; fomentar, coordenar e apoiar a criação de comitês de bacia hidrográfica; elaborar o Relatório Anual sobre a situação dos recursos hídricos do Estado.

Além das obrigações citadas anteriormente, a ANA faz outras exigências aos órgãos fiscalizadores como monitoramento dos empreendedores, cadastro de barragens para incorporação do SNISB, comunicação entre as autoridades competentes em caso de ruptura e operação de barragens.

A AESA faz o acompanhamento diário de cerca de 135 açudes distribuídos em todo o território do estado da Paraíba. A malha de monitoramento desses açudes consiste, principalmente, no uso de réguas linimétricas para medição dos níveis de água do barramento,

de forma que o procedimento se dá da seguinte maneira: durante a fase projetos e construção do barramento é feito o estudo a respeito da curva cota-área-volume do reservatório; após isso, são instaladas réguas as margens do açude de forma que possa ser determinado a altura que o nível da água no reservatório estiver, em seguida uma pessoa no local da régua e anota o nível da água; em seguida, após a informação desse nível é lançada na curva cota-área-volume e disponibilizado o volume do açude para publicação.

Uma questão importante a se ressaltar é que, a leitura por meio de réguas linimétricas e leitor está relacionada às diversas fontes de erro, a começar pela pessoa que irá fazer a leitura da régua linimétrica. Pode acontecer diversas situações que a impeçam de fazer uma leitura precisa, fornecendo valores superestimados ou subestimados ou até mesmo não sendo feita a leitura do dado de nível de água do reservatório naquele dia.

Outra possibilidade de fonte de erro está na atualização das curvas cota-área-volume dos reservatórios, pois sofre com o efeito do assoreamento que se trata do acúmulo de solo trazido pelo rio, fazendo com que a profundidade do reservatório vá diminuindo com o tempo. Diante disso se faz necessária a atualização das curvas cota-área-volume dos reservatórios, por meio de levantamentos topobatimétricos.

3.2 EQUIPAMENTOS USADOS PARA MONITORAMENTO DE AÇUDES

O monitoramento dos volumes dos reservatórios fluviais, basicamente é feito a partir do conhecimento dos níveis da água no açude, que são associados aos volumes pela curva cota-área-volume, calculados previamente na etapa de projetos das barragens.

Como já foi descrito anteriormente, normalmente no estado da Paraíba são utilizadas réguas linimétricas instaladas nas proximidades da barragem, ou na torre da tomada d'água como apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Exemplos do monitoramento do volume da água em reservatórios: a) régua linimétrica e b) torre de tomada d'água



a)



b)

Fonte: AESA, 2023.

Modernamente tem sido utilizado sensores de água com gravação automática dos níveis, permitindo leituras com frequências alta de até minutos, aumentando assim, a precisão na avaliação dos volumes de água armazenados. A Ampeq é uma empresa especializada em desenvolvimento de tecnologias para monitoramento de água se tem um sensor de nível eletrônico desenvolvido para esse fim (Figura 2).

Figura 2 – Sensor de nível Ampeq.



Fonte: catálogo da AMPEQ.

Nas últimas décadas, técnicas que usam ultrassom e outras com sensoriamento remoto, também têm sido empregadas como alternativas inovadoras para a medição de níveis de água em cursos d'água e açudes.

3.3 CURVA COTA-ÁREA-VOLUME DE AÇUDES

Cadier e Molle (1992) definem a curva cota-área-volume (CAV), ou curva característica, como aquela que apresenta a relação entre a cota do nível da superfície da água, área superficial do espelho d'água e volume armazenado de um açude. Geralmente essas curvas são determinadas previamente à construção de um barramento, apesar de ser possível atualizar esta curva após a implantação do manancial. É importante salientar que muitas vezes os reservatórios precisam de atualizações de sua curva característica, pois com o passar do tempo vai sendo acumulado sedimentos trazidos pelos segmentos à montante do rio, provocando o assoreamento do açude.

Segundo Kuhnán (2020 *apud* MATOS, 2012) A relação da curva cota-área-volume é indispensável para a definição de normas operacionais de reservatórios, de análises da relação disponibilidade e demanda. Além de ser utilizada para a determinação de volume de reservatórios, para controle de cheias e abastecimento de água.

A curva característica para açudes ainda não construídos é determinada da seguinte forma: primeiramente são elaboradas as curvas de nível do terreno que será inundado; em seguida é feita a determinação da área de inundação para cada cota do terreno; o terceiro passo é determinar o volume aproximado entre cada cota e em seguida soma-se todo o volume até a respectiva cota; e, por fim, plota-se a curva cota-área-volume do reservatório.

No caso de reservatórios já construídos, segundo Colischon e Clarke (2016), a determinação da curva cota-área-volume é feita por meio da batimetria do manancial, medindo as profundidades em vários pontos da área de inundação e fazendo suas relações com o volume. Segundo esses autores, no caso de o reservatório não estar cheio, o complemento do volume pode ser determinado por imagens provenientes de sensoriamento remoto ou métodos de determinação topográfica convencional.

No mesmo trabalho supracitado, os autores indicam um alto custo financeiro e operacional para realização de atualizações da curva cota-área-volume para um reservatório. O custo financeiro, segundo os dados levantados na época pela ANA, girando em torno de R\$ 1.200,00 a R\$ 4.400,00 por hectômetro cúbico (hm^3); já os custos operacionais envolvem as questões de logística, acesso a área de inundação, acesso ao barramento, questões climáticas, mobilização de equipes para tais medições.

Segundo as Resoluções de nº 396/1998 da ANEEL e atualizada em 2010 em conjunto com a ANA, na Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 3, os órgãos reguladores devem exigir a atualização da curva CAV periódica a cada 10 anos. Em 2011 e 2013 a ANA também publicou normativas para direcionar a atualização dessas curvas.

3.4 SENSORIAMENTO REMOTO

Em países em que, por fatores diversos, a aquisição de dados é um trabalho árduo ou mesmo a inexistência deles em algumas regiões do mundo, incluindo o Brasil, produtos do sensoriamento remoto e vêm se mostrando como uma possibilidade de ser uma maneira viável, para prover informações de precipitações nestas áreas (PAULA, 2015 *apud* LEMOS, 2021). As tecnologias relacionadas às imagens de satélite vêm sendo melhoradas e ganhando espaço no

meio científico, como uma boa solução para obtenção de dados e desenvolvimento de trabalhos nos variados campos das geociências.

Collischonn e Clarke (2016) explicam que o sensoriamento remoto para medir o nível de água em reservatórios vem sendo uma alternativa que se apresenta como eficiente aos métodos convencionais para monitoramento. Nesse estudo, os autores relatam ainda que esta prática é utilizada em monitoramentos de dados de chuva, neve, evaporação, ocupação humana, entre outras finalidades para estudos ambientais e geológicos que podem ser usadas.

O sensoriamento remoto, segundo Zanotta et al. (2019), é a prática de obtenção de informações da superfície da terra a partir de imagens adquiridas remotamente, por meio de sensores em um satélite ou câmeras a bordo de uma aeronave. Esses autores citados destacam o sensoriamento remoto como uma boa forma de obtenção de informações de maneira não invasiva e capacidade de fornecer imagens com intervalos regulares. Essa ferramenta viabiliza o acompanhamento de grandes áreas em variadas escalas de tempo e espaço, contribuindo assim, para a boa gestão dos recursos naturais e possibilita o desenvolvimento de diversas pesquisas em variadas áreas do conhecimento.

A técnica do sensoriamento remoto consiste na emissão e captação da radiação eletromagnética refletida, por meio de sensores instalados em instrumentos aéreos ou orbitais, ou captação da radiação emitida pela superfície terrestre. A radiação captada é transformada em imagens digitais e, em seguida, são processadas e analisadas para a obtenção de informações sobre diferentes características da superfície terrestre, como a cobertura vegetal, identificação de corpos hídricos, a umidade do solo, a temperatura, a altitude, qualidade da água, entre outros.

Zanotta et al. (2019) explicam que as imagens de sensoriamento remoto são armazenadas em matrizes, e que cada posição em uma matriz, é chamada de *pixel* definido por uma linha e coluna no arranjo da dessa. Portanto o *pixel* é o menor elemento não divisível de uma imagem. A cada *pixel* pode ser atribuída uma informação, ou um valor relacionado a outros deles, ou uma banda diferente. Outra característica das imagens de satélite são as resoluções, sendo elas: espacial, temporal, radiométrica e espectral.

Ainda segundo Zanotta et al. (2019), a resolução espacial de uma imagem diz respeito à geometria, a capacidade de um sensor captar o objeto alvo, e consiste basicamente na dimensão de cada *pixel*, ou a distância entre dois deles. A resolução temporal é a frequência com que um sensor é capaz de adquirir as imagens de um determinado alvo. Diz respeito ao intervalo de tempo entre duas imagens. A resolução radiométrica pode ser explicada como a quantificação, ou a capacidade de escala de cores que ele pode chegar. Por sua vez, a resolução

espectral está relacionada à capacidade do sensor em descrever o comportamento espectral do objeto alvo, como por exemplo, cor ou temperatura, e cada banda registra a quantidade de radiação em um intervalo de comprimento de onda.

3.4.1 GOOGLE EARTH ENGINE

O grupo *Alphabet*, proprietária do *Google*, disponibiliza a ferramenta do Google Earth Engine (GEE) (Gorelick, 2017), que é uma plataforma de análise de geoprocessamento em nuvem utilizando os próprios servidores do Google, com todas as suas informações. Na plataforma do GEE uma grande variedade de dados de satélite foi centralizada, permitindo que o usuário tenha acesso a diversas imagens e seus respectivos produtos e sensores. Somado a isso, é possível fazer o processamento de uma grande quantidade de imagens em poucos minutos, graças aos potentes servidores da empresa.

A interface do GEE utiliza linguagem de programação aberta para processamento das imagens, sendo disponibilizada as expressões presentes no Python ou Javascript para manipulação da ferramenta, com qualquer uma das duas linguagens é dada o acesso a toda a série de dados, inclusive de todos os anos fornecidos.

A grande vantagem da plataforma do Google Earth Engine está em que não é necessário computadores com processadores potentes ou *softwares* específicos. Assim, a plataforma provê aos pesquisadores um grande poder de processamento de muitas imagens de maneira gratuita e simples, com o requisito de uso da linguagem de programação em JavaScript ou Python. Portanto, a ferramenta combina o poder de análise de áreas em larga escala, servidores com alta potência de processamento de dados e uma interface de fácil usabilidade com as linguagens de programação.

O código em JavaScript para desenvolvimento da aplicação do índice identificador de água está disponibilizado ao final da seção Metodologia deste presente trabalho. Foi utilizado o editor de códigos, da interface do GEE, para aplicar todas as equações, filtros e demais funções para todas as imagens, além da delimitação temporal e espacial da região de estudo de interesse.

No trabalho de Hansen (2015) foram usadas imagens do satélite *Landsat 7*, por meio do Google Earth Engine, para fazer um monitoramento da qualidade da água a partir de um modelo da estimativa da clorofila, presente na água em uma região de estudo no Noroeste do estado do Michigan, nos Estados Unidos da América.

Lemos et al. (2021) por meio do GEE realizaram um estudo comparativo entre dados de sensoriamento remoto para identificação de precipitação dos CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station*) e do IMERG (*Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement*) e aplicaram um índice de anomalias. Segundo os autores, os resultados apresentaram boa concordância entre os dois produtos, e constataram uma grande vantagem do GEE por ser uma ferramenta de geoprocessamento na nuvem, baixo custo computacional, e escalabilidade.

Os estudos de Li et al. (2021) fizeram uma análise utilizando o Google Earth Engine, para estimar a série de área da superfície de água, inclusive a superfície de água coberta por algas e plantas, no período de 40 anos de dados. Esse estudo foi feito a partir de uma combinação de dados, entre eles sensoriamento remoto e coleta de dados em campo de um trecho do Lago Chad, na África.

Condeça et al. (2022) apresentaram metodologia para monitoramento da variação do volume de quatro reservatórios de água, por meio de sensoriamento remoto usando o GEE no Norte de Portugal. Nesse estudo o objetivo dos autores foi de usar índices identificadores de água através do GEE, fazer o tratamento das imagens e, automaticamente, calcular a área do espelho de água represada, aplicar esta metodologia ao longo dos anos para obter uma série histórica. De posse das curvas cota-volume dos barramentos, determinaram o volume de água nos respectivos reservatórios na série temporal.

Entre os quatro reservatórios, para aqueles de volumes de armazenamento entre 40 e 150 hm³ estudados pelos autores supracitado, três deles mostraram resultados com coeficiente de determinação maior que 0,90. O de menor valor apresentou valor de 0,69, mostrando assim, uma boa eficácia da metodologia empregada, indicando bons resultados para a técnica aplicada. O estudo conclui que “a relação custo/benefício da utilização da plataforma GEE é sem dúvida uma importante contribuição para a monitorização das águas superficiais em países em desenvolvimento”. Também é concluído pelos autores que o uso da ferramenta, viabiliza uma rápida elaboração de redes de monitoramento para áreas alagadas ao longo de grandes períodos.

3.5 ÍNDICES ESPECTRAIS

Os índices espectrais são resultados de operações matemáticas entre valores numéricos de resoluções espectrais dos *pixels* em uma imagem. Essas equações são amplamente aplicadas no sensoriamento remoto e funcionam de acordo com a finalidade do objeto para o qual deseja-

se salientar em uma imagem, como água, solo, vegetação, um tipo específico de plantação, gelo, construções, entre outros. Um índice bastante consolidado no meio acadêmico é o Índice de Vegetação Diferencial Normalizada (NDVI, do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*).

No sensoriamento remoto contemporâneo, os índices espectrais são uma ferramenta valiosa para a análise e processamento de imagens de satélite, pois permitem extrair informações e gerar produtos úteis do terreno e da área de estudo que o pesquisador estiver trabalhando. Produtos que não seriam aparentes ou em alguns casos visíveis na análise apenas a olho nu das imagens, se escolhidos corretamente as faixas espectrais adequadas, torna possível fazer identificações de corpos hídricos com grande facilidade e nitidez.

O Índice de Água de Diferença Normalizada (NDWI – *Normalized Difference Water Index*) de McFeeters (1996) é um dos primeiros índices espectrais específicos para água. É semelhante ao NDVI apontado pelo mesmo autor. O NDWI proposto utiliza a banda da faixa do espectro eletromagnético visível verde e subtrai o espectro próximo ao infravermelho (NIR), que tem comprimento de onda na faixa espectral de 533nm~590nm, para fazer uma delimitação das áreas de água, destacando a reflectância do comprimento de onda verde do solo e minimizando a do corpo hídrico, salientando a água nas imagens.

Uma abordagem para monitorar as moléculas de água na copa da vegetação foi proposta por Gao (1996), utilizando o mesmo princípio de destacar a vegetação e a água. Esse índice faz a distinção entre água e vegetação por meio de duas bandas na faixa do espectro infravermelho (NIR e MIR), na faixa dos 860nm e 124nm. O autor faz um estudo mais aprofundado com relação ao espectro de onda que as vegetações refletem a faixa do vermelho. Essa em uma faixa de forte absorção da clorofila das plantas, enquanto o infravermelho está mais presente nas copas das árvores, além de não remover os espectros vegetação presente no solo como no índice anterior. Por isso, o autor constatou que ao usar o infravermelho e o meio infravermelho, os resultados apresentados seriam de maior acurácia ao tentar identificar os corpos hídricos.

Xu (2006) propôs uma alteração na equação do NDWI de Mcfeeters (1996), da troca da banda *Near Infrared* (NIR) de faixa espectral de 851nm~879nm pela *Midle Infrared* (MIR) com 1.566nm~1.651nm. A partir dessa modificação, o trabalho resultou em uma diminuição no ruído das imagens provocado pelas construções, solo e vegetação, em comparação com o NDWI dos trabalhos anteriores e consequente melhora na identificação e nos contornos de corpos hídricos das imagens. O novo índice aplicado ficou chamado de NDWI modificado (MNDWI).

A aplicação dos índices espectrais resulta, em termos de valores e tem uma variação numérica de -1 a 1, nos quais, consensualmente quanto mais próximo de valor 1 maior a probabilidade de ser água. É importante salientar que nos estudos de Xu (2006), foi feita uma avaliação para identificar quais valores seriam ótimos para identificação de *pixels* de água por meio de índices espectrais. Chegou à conclusão que, de fato, utilizando-se o valor de 0 obtêm-se os melhores resultados para a identificação de água.

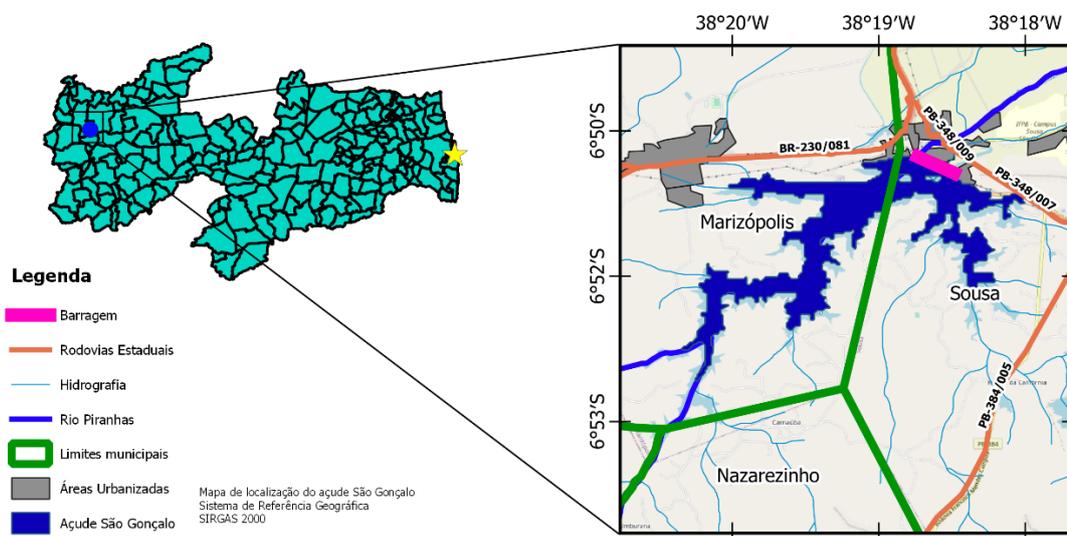
4.0 METODOLOGIA

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é o reservatório São Gonçalo, que foi escolhido, principalmente por estar localizado em uma área de poucas nuvens e índice pluviométrico em torno de 700 mm anuais, segundo dados da AESA.

O reservatório, conhecido como açude São Gonçalo, está situado no distrito de São Gonçalo município de Sousa, estado da Paraíba, como mostrado no mapa de localização da Figura 3. O açude (Figura 4) foi construído no rio Piranhas, na região hidrográfica da bacia do Alto Piranhas. Teve o início de sua construção pelo IFOCS no ano de 1921 e concluída em 1936, inicialmente com capacidade de armazenar 40 milhões de metros cúbicos (m³). Após o recebimento das águas da transposição do rio São Francisco, em 2022, passou a ter uma capacidade de 44,6 milhões m³, segundo as informações da AESA.

Figura 3 - Mapa de localização do açude São Gonçalo



Fonte: elaboração do autor.

Figura 4 – Imagem de satélite do açude São Gonçalo



Fonte: Imagem CNES/ Airbus e Maxar Technologies (2023).

O material que constitui a barragem principal é do tipo terra homogênea, possui uma altura de 25,30 m e comprimento do coroamento de 380 m (**Figura 5**). De acordo com os dados da AESA a bacia hidráulica do açude é de 700 ha. A demanda d'água da região é suprida por meio de torres de tomada d'água e comportas. Além disso, por cima do coroamento existe trecho de uma rodovia (PB-348), como está mostrado na **Figura 6**.

Figura 5 - Vista do perfil da barragem



Fonte: DNOCS (2022).

Figura 6 - Estrada e vista da tomada d'água do açude São Gonçalo



Fonte: AESA (2019).

A barragem aproveita a topografia favorável da região de maneira que, possui um barramento principal, o vertedouro fica localizado ao lado com 230 m de largura e extensão em leito natural e uma soleira para marcar o nível do reservatório. O perfil do vertedouro é do tipo de concreto com perfil Creaguer (**Figura 7**).

O açude São Gonçalo foi construído, a princípio, para abastecimento humano e amenizar os efeitos da seca na região. Posteriormente, foi implantado o perímetro de irrigação de São Gonçalo que irriga uma área de cerca de 5.500 hectares, sendo que o principal cultivo é a produção de coco.

Em 2017, por meio do projeto para o aporte das águas do Programa de integração do rio São Francisco (PISF), foi feita uma recuperação da barragem. Foram reformadas as comportas, adicionando duas adutoras de tubulações de 2.500 mm (Figura 8) e também foram implementados sistemas de automação e controle de vazão.

Segundo engenheiros do DNOCS em entrevista (DNOCS, 2013), a função principal dessas alterações é de que, nos períodos de secas, essa água do PISF seja bombeada desde o rio São Francisco, entrando nos reservatórios do DNOCS e, a dessas válvulas, elas saem na vazão necessária para atendimento dos municípios a jusante, que se abastecem dessas águas.

Figura 7 - Soleira do vertedouro



Fonte: DNOCS (2022).

Figura 8 - Tubulação adutora



Fonte: DNOCS (2022).

4.2 ÍNDICES ESPECTRAIS IDENTIFICADORES DE ÁGUA

Neste trabalho a identificação de corpos hídricos foi feita por meio da aplicação de índices espectrais, que basicamente identifica o espectro de radiação refletido por um dado objeto.

Os índices aplicados às imagens de satélite neste trabalho, foram os propostos por McFeeters (1996), Gao (1996) e Xu (2006) que, segundo os trabalhos de Condeça *et al.* (2022) apresentam bons resultados para identificação de áreas inundadas, além de que estes índices espectrais são amplamente estudados na comunidade científica. A Tabela 1, adaptada de Condeça *et al.* (2022), apresenta os índices e suas respectivas equações.

Tabela 1 - Índices de Água aplicados.

Index	Autor	Equação
NDWI _{McFeeters}	McFeeters (1996)	$\frac{Verde - NIR}{Verde + NIR}$

NDWI _{GAO}	GAO (1996)	$\frac{NIR - MIR}{NIR + MIR}$
MNDWI	XU (2006)	$\frac{Verde - MIR}{Verde + MIR}$

Fonte: adaptado de Condeça *et al.* (2022).

As bandas utilizadas serão as bandas propostas pelos índices, que são as bandas que correspondem a faixa visível do espectro eletromagnético verde, infravermelho próximo (NIR, da sigla em inglês *Near Infrared*) e infravermelho médio (MIR, *Mid Infrared*). Essas bandas correspondem a faixa espectral captada pelo sensor do satélite, por exemplo, a banda verde é a banda que capta a frequência da faixa do espectro eletromagnético que representam a cor verde, no caso da faixa do infravermelho próximo e do meio infravermelho não visível ao olho humano.

As bandas correspondentes aos espectros utilizados presentes nos satélites Landsat 4, 5 e 8 são as apresentadas na Tabela 2, que foi retirada da página de *datasets* do Google Earth Engine. Também apresenta as bandas, identificação dos satélites, comprimento de onda e descrição do espectro utilizados neste trabalho.

Tabela 2 – Satélites e bandas utilizados na pesquisa

Satélite	Banda	Comprimento de onda	Espectro
Landsat 4 = Landsat 5	B2	0,52 – 0,60 μm	Verde
	B4	0,77 – 0,90 μm	NIR
	B5	1,55 – 1,75 μm	MIR
Landsat 8	B3	0,53 – 0,59 μm	Verde
	B5	0,85 – 0,88 μm	NIR
	B6	1,57 – 1,65 μm	SWIR1 (MIR)

Fonte: Datasets do GEE.

A área de estudo para processamento das imagens foi delimitada pelo arquivo geométrico tipo *shapefile*. Por meio dos valores aplicados dos índices foi feita a delimitação da região de água na imagem de satélite.

No estudo também foi feita uma análise da composição Vermelha, Verde e Azul que compõe o espectro de luz visível, e basicamente todas as cores que o olho humano pode

enxergar estão dentro dessa faixa do espectro, essa composição de bandas também é chamada de RGB (da sigla *Red, Green and Blue*).

4.3 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE E GOOGLE EARTH ENGINE

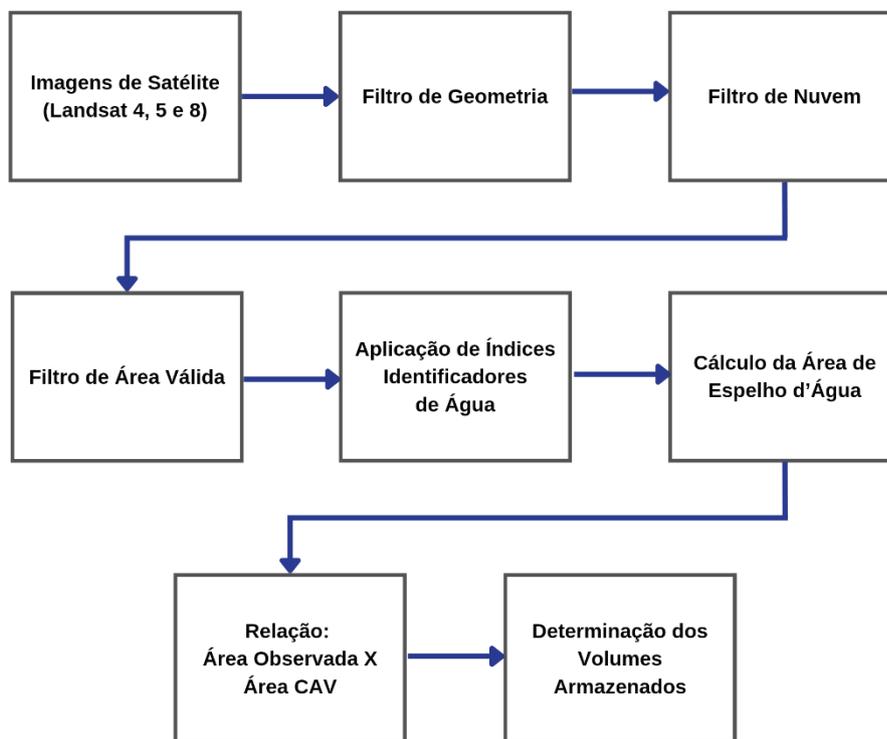
As imagens foram todas coletadas do banco de dados aberto do Google Earth Engine e o processamento delas foi feito por meio da plataforma de maneira que o código em JavaScript fez o cálculo das áreas de água dentro de uma delimitação de cada uma das imagens de satélite.

Os satélites utilizados para o estudo foram os Landsat 4,5 e 8, cuja resolução espacial é de 30x30 metros. 30mx30m. Esses satélites foram escolhidos devido, principalmente, à resolução temporal ser consideravelmente abrangente. A imagens obtidas com os três satélites resultou na faixa temporal de 1982 até os dias de hoje.

Na fase de processamento foi necessário ter uma boa qualidade das imagens de satélites. Assim como, a garantia de que o reservatório esteja completamente dentro de todas as cenas, que não exista nuvem em cima da sua área e que os *pixels* sobre esse sejam válidos ao calcular os índices de identificação de água.

A Figura 9 mostra o fluxograma de processamento das imagens. Foi necessária a formulação de funções para automatizar e tratar as imagens que seriam úteis ao desenvolvimento do trabalho. As funções foram todas desenvolvidas dentro do ambiente de códigos do GEE.

Figura 9 – Metodologia do processamento das imagens



Fonte: elaboração do autor.

Ao fazer a importação das imagens das imagens, no mesmo comando foi feita a seleção de bandas que seriam utilizadas. Os espectros escolhidos para trabalho foram: Azul, Verde, Vermelho, Infravermelho próximo, Infravermelho curto, e o algoritmo de CFMASK que é uma banda chamada *pixel_qa*, proposto por Foga *et al.* (2017), na qual usa um modelo de árvores de decisões para fazer a identificação de cada pixel entre, nuvem, sombra, limpo, neve, entre outros. Especificamente na importação dos dados do Landsat 8, para fins de compatibilização com os dados dos outros dois satélites, foi feita uma renomeação das bandas manter uma padronização. Também na fase de importação dos dados foram inseridas as coordenadas da região de interesse.

Para superar a adversidade de separar as imagens que o reservatório não esteja completamente dentro das cenas captadas pelo satélite, foi estabelecida uma relação de área mínima do açude e a área do espelho d'água, de maneira que a imagem que tivesse valores de correlação abaixo dos valores mínimos do açude fosse automaticamente descartada. No código esta função está intitulada de *RejectImagesThatDontFullyOverlapROI*.

A função de correção das nuvens é dada em duas etapas, uma para cada conjunto de satélites Landsat 4 e 5 e outra para o Landsat 8. A operação utiliza o algoritmo de Foga (2017),

que propôs a utilização da função FMask, a partir da linguagem C, (daí o nome CFMASK) para fazer a determinação de nuvens *pixel a pixel* na imagem. As imagens com muita presença de nuvens são classificadas como tempo de sistema igual a nulo e. E em outro momento são removidas as imagens com o tempo nulo ao atualizar o tempo de sistema de cada imagem.

E o último passo para o tratamento das imagens foi a aplicação da função intitulada *rejectImagesWithValidAreaUnderLimit*. Esta função remove imagens que ainda contenham *pixels* afetados por nuvens, sombras, ou algum outro elemento que atrapalhe a leitura radiométrica daquela área. Ao fim desse passo é possível ter um conjunto de imagens tratadas com boa resolução, para aplicação dos índices de água e determinação das áreas de espelho d'água e posteriormente o volume do reservatório.

4.4 CÁLCULO DAS ÁREAS DE ESPELHO D'ÁGUA, DETERMINAÇÃO DOS VOLUMES RESERVADOS E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.

Nas últimas décadas o uso de índices espectrais para identificação de elementos geográficos tem sido amplamente estudado pelos cientistas da área. Para identificar áreas inundadas, a técnica consiste basicamente na diferenciação espectral da água, solo e vegetação nas proximidades dos reservatórios.

A aplicação dos índices apresentados na Tabela 1 para cálculo da área de espelho d'água foi feito a partir da função intitulada no código de *waterfunction*. A função primeiramente aplicou um índice a imagem, em seguida foram coletados os valores maiores que 0, pois nesses índices esses valores indicam *pixel* de água, para fazer a delimitação e identificação de água na imagem. O cálculo da área de água do açude de estudo na imagem é feito pelo método convencional de contagem de *pixels* na região. Em seguida, a multiplicação pela área de um *pixel*, resultando assim, em um valor de área de espelho d'água para a cena. No código, o valor da área de espelho d'água é armazenado na banda criada '*waterArea*'.

Vale ressaltar que a princípio, conforme metodologia de Condeça et al. (2022) foi aplicada essa classificação para índices com valor maior do que 0, entretanto foi necessário fazer uma correção, pela percepção de que este valor ainda estava encontrando muitos ruídos, e não estava chegando em uma faixa ótima para os valores de área, sendo necessário diminuir esse valor para o valor de -0,35 no caso dos índices de Xu e McFeeters e -0,1 para o índice de GAO.

A determinação do volume foi dada por meio da relação de área de espelho d'água e volume reservado pela curva cota-área-volume (CAV) do reservatório São Gonçalo. Essa curva foi feita a partir da topografia e batimetria da região do reservatório e fornecido para o trabalho pela AESA. A obtenção do volume das imagens de satélite se deu por meio da inserção dos valores de área na CAV e obtidos valores de volume correspondentes as respectivas áreas de espelho d'água da função de água do GEE.

A validação dos resultados dos volumes de água obtidos por meio das imagens de satélite, foi feita a partir da comparação com os valores de volume do reservatório disponibilizados no site da AESA, que são calculados mediante à leitura da cota *in loco* e relacionado com a área e o volume da curva CAV do reservatório.

Neste trabalho, os volumes encontrados com o uso das imagens de satélite foram chamados de Volume GEE (V_{gee}), enquanto os volumes da série histórica disponibilizados pela agência executiva, obtidas por um leitorista que anotou a cota de nível do reservatório e calculou na CAV, foram chamadas de Volume observado (V_{obs}), e respectivamente as áreas, A_{gee} e A_{obs} . Os valores obtidos também foram separados por índice estudado, sendo nomeado o autor de cada índice em um valor de volume e área.

O código de desenvolvimento deste trabalho está disponível na própria plataforma do Google Earth Engine e pode ser acessado pelo link: <https://code.earthengine.google.com/b39689d01ff0bff857c5ef6b87b2ac2><https://code.earthengine.google.com/b39689d01ff0bff857c5ef6b87b2ac21>

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 IMAGENS COLETADAS E ÍNDICES ESPECTRAIS

O recorte temporal das imagens de satélites foi realizado entre os anos de 1984 e 2022, período de 38 anos. O ano de 1984 foi escolhido em razão de ser o das primeiras imagens do Landsat 4 na região e 2022 por ser o último ano de imagens completo. Entretanto, devido a escassez de dados oficiais de volume do reservatório obtidos com as leituras das cotas de nível em anos anterior ao de 1994 e a indisponibilidade após o ano de 2019, ficou delimitado ao período de 1994 a 2019.

O Tabela 3 apresenta a quantidade de imagens coletadas em cada etapa de processamento ao aplicar uma função. Após o resultado do processamento das imagens no GEE e obtenção das áreas de espelho d'água, ainda foi necessário fazer uma filtragem de comparação com as datas dos dados de área e volume obtidos pela AESA.

Tabela 3 – Quantidade de imagens após aplicação de cada filtro.

Imagens Iniciais	Aplicação da função 'rejectImagesThatDontFullyOverlapROI'	Aplicação das funções 'CloudMask' e 'rejectImagesWithValidAreaUnderLimit'	Filtro de datas compartilhadas pelos dois conjuntos de dados
508	508	367	204

Fonte: elaboração do autor.

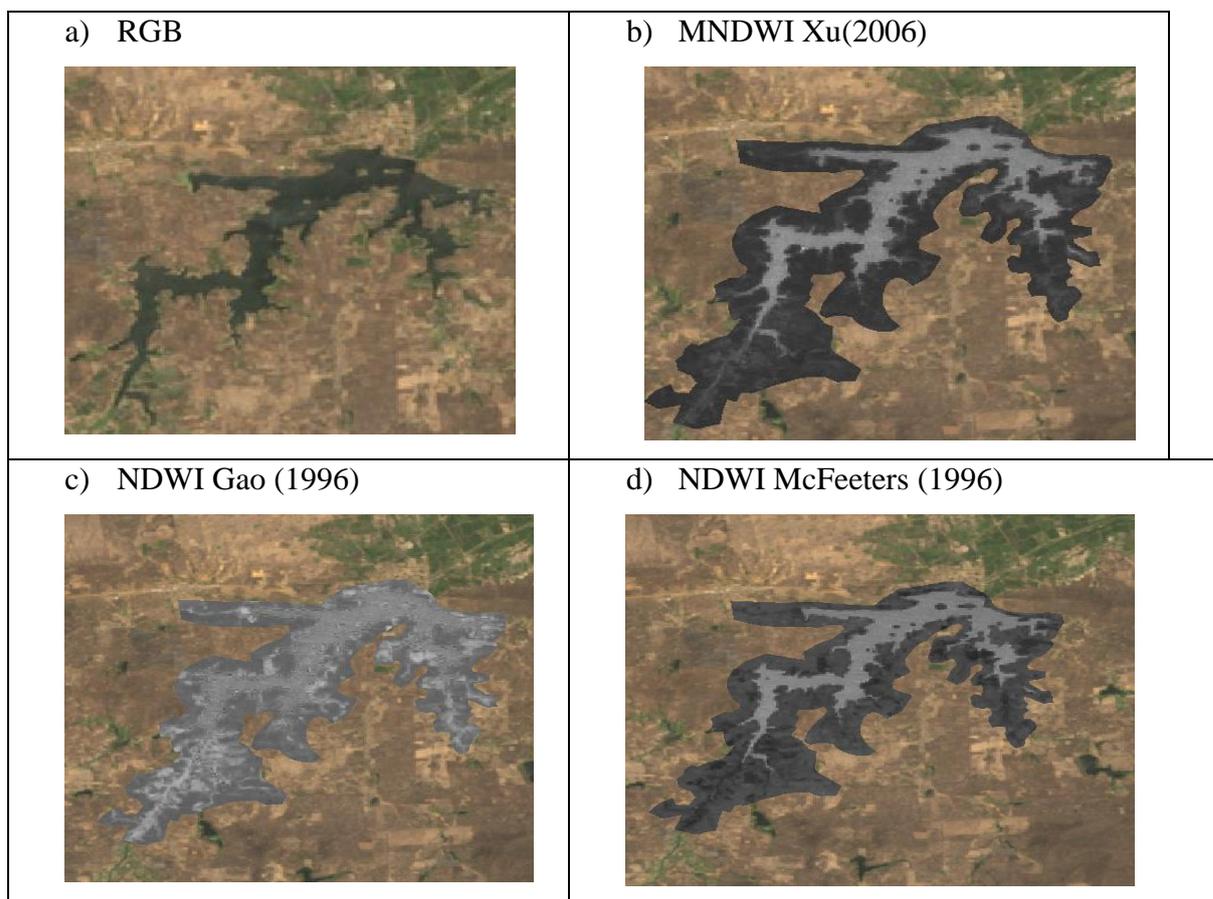
Apesar de ter sido necessário a redução do período de estudo devido à escassez de dados, o número de imagens obtidas foi considerado satisfatório e possibilitou a aplicação da metodologia do estudo com uma boa série temporal. Assim, a pesquisa se restringiu a 204 imagens no intervalo de 1994 a 2019, totalizando 25 anos de estudo.

Na Figura 10 estão apresentadas algumas das imagens das áreas obtidas por meio da aplicação de cada um dos três índices espectrais para a mesma cena capturada pelo satélite.

A mancha cinza nas imagens de cada índice representa os pontos que têm maior probabilidade de ocorrência de água, e a região mais próxima do preto indica a delimitação do açude e a maior proximidade das margens do açude ou até mesmo o próprio terreno, solo exposto, construções, pixels que não correspondem ao reservatório de fato.

Na Figura 10 também está apresentada a imagem com composição RGB de maneira que tenha visualização melhor de como é o terreno, uma boa demonstração da área de estudo.

Figura 10 - Apresentação dos índices aplicados nas imagens para determinação de água, imagens do dia 07/12/2021. a) Composição RGB b) MNDWI, Xu (2006), c) NDWI (Gao, 1996) e d) NDWI (McFeeters, 1996).



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir das imagens apresentadas pode-se notar um ressaltado e delimitação melhor para o índice MNDWI, por apresentar contornos mais bem definidos, uma região mais viva na parte da água e a região mais próxima das margens de fato estão mais escuras e aparentemente não houve uma grande minoração ou majoração da região que seria de água. A imagem c) já dá um bom indício de majoração dos valores das áreas de água pelo índice de Gao (1996) por não ter contornos bem definidos e apresentar uma homogeneidade com relação à água e a margem.

Vale reforçar a informação de que a região em preto nas imagens trata da delimitação feita para contagem dos pixels, e esta delimitação é maior do que a bacia hidráulica do reservatório, e a região que de fato é água corresponde a região cinza dentro da delimitação.

Portanto, nas imagens b) e d) nota-se que o algoritmo aplicado pelo GEE identificou regiões de água e de solo ou margem, já na imagem c) foi tudo majorado.

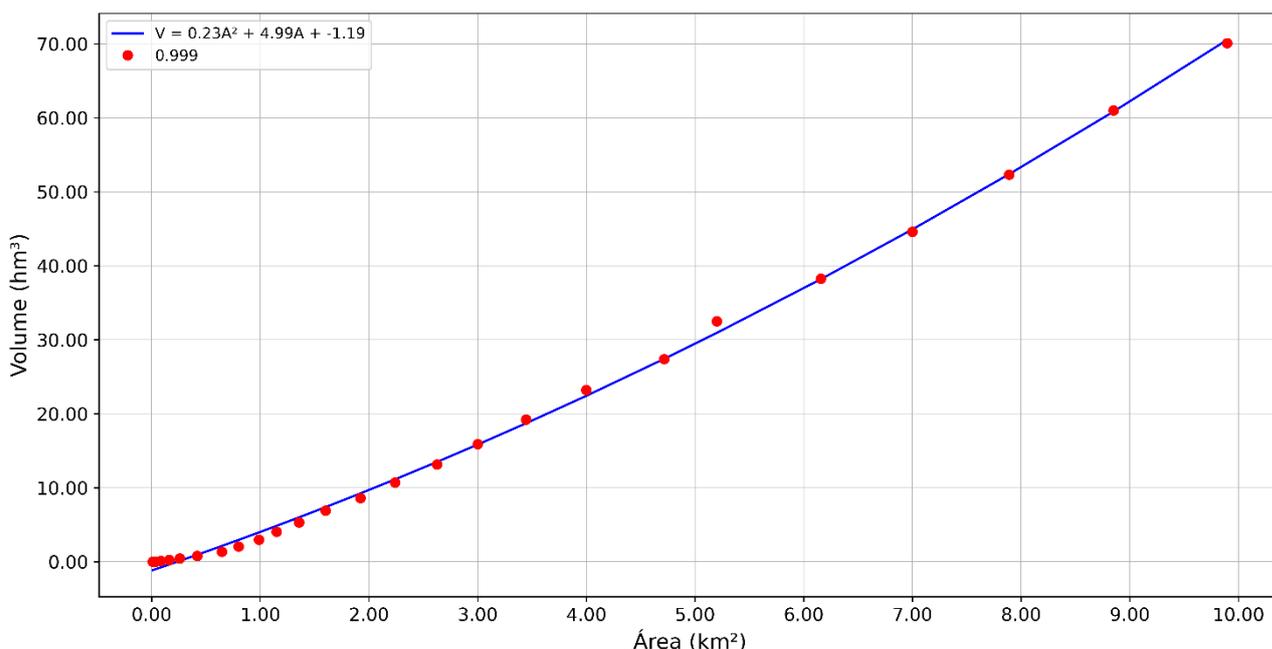
É importante salientar que os resultados de imagens confirmam os trabalhos de Xu (2006) e Condeça et al. (2022), ao relatarem essa vantagem do uso da banda MIR com o MNDWI sobre a banda RGB ou NIR no NDWI para delimitação de áreas inundadas, uma vez que áreas como construções, terreno, vegetação são menos saturados na imagem.

Outra questão que vale a pena ser levada em consideração é a resolução espacial dos dados de satélite que são de 30mx30m, uma vez que uma precisão melhor (10 mx10m, 8 mx8m, 5 mx5m, 1 mx1m...) poderia gerar resultados mais eficientes, e os objetos seriam delimitados com maior facilidade e nitidez. Por exemplo, alguns pontos onde não têm água e existem uma ilha, no caso das imagens possuem resolução espacial de 1m1mx1m, o contorno da ilha no meio do reservatório seria mais bem marcado.

5.2 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS, ÁREA E VOLUME DE ÁGUA

A curva CAV do reservatório São Gonçalo, gerada a partir da topografia da região obtido na AESA, está apresentada na **Figura 11**.

Figura 11 - Curva AV do reservatório São Gonçalo.



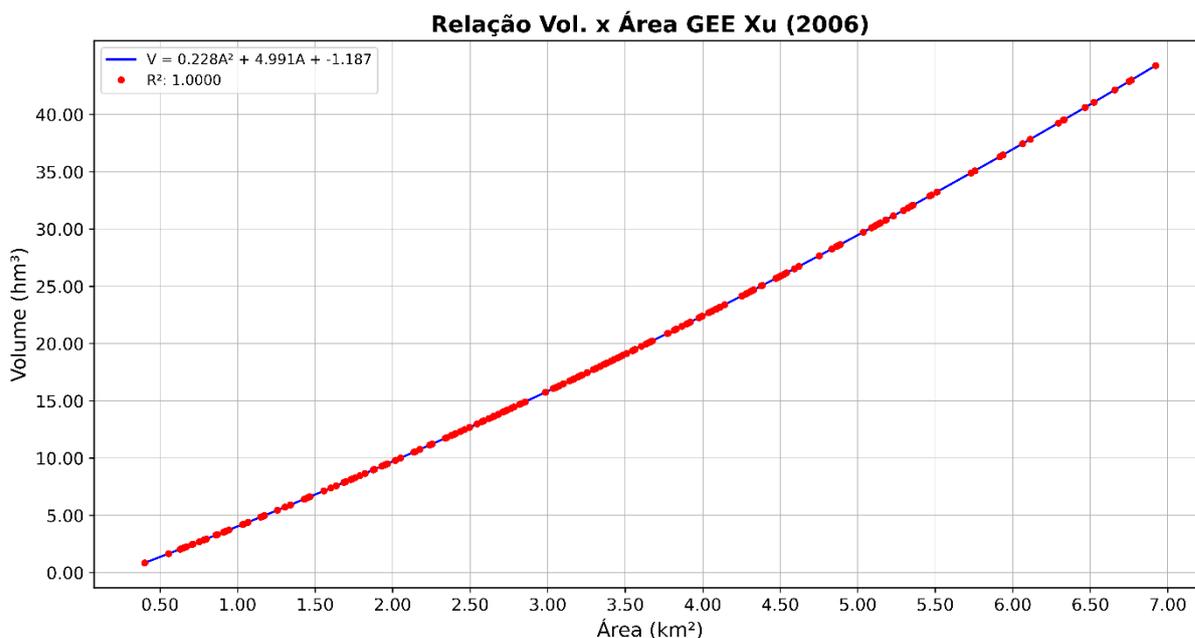
Fonte: elaborado pelo autor.

A partir da curva CAV foi possível fazer os cálculos dos volumes das áreas superficiais de água observadas pelos satélites. Vale notar que a curva do reservatório que foi utilizada, mostra-se como de muito boa qualidade, uma vez que apresenta um R^2 igual a 0,99.

É importante ressaltar que devido os processos de assoreamento do açude com o tempo, a batimetria do reservatório foi modificada e pode não corresponder com grande precisão aos volumes propostos pela curva CAV inicial do reservatório. Ademais, os equipamentos topográficos utilizados na época, não permitiam levantamentos de precisão quando comparados com os equipamentos atuais.

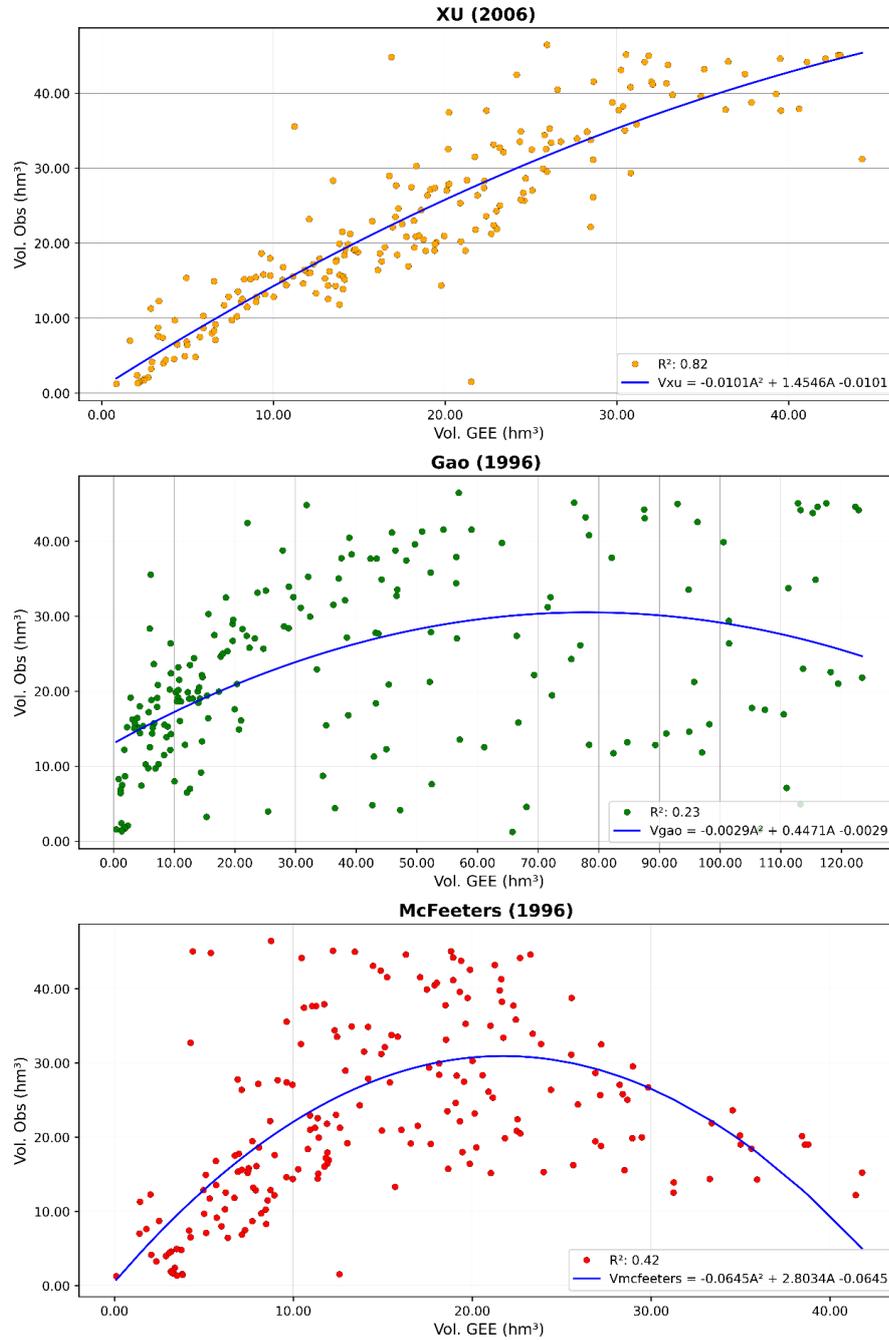
Com a aplicação da metodologia proposta foi possível encontrar 204 imagens para determinação das áreas e em seguida os volumes. A **Figura 12** abaixo ilustra uma relação de área e volume calculado a partir de imagens de satélites para o índice de Xu.

Figura 12 - Relação Área x Volume a partir do índice de Xu (2006)



A **Figura 13** apresenta as correlações entre os volumes obtidos com o uso da curva CAV, utilizando as imagens de satélite e os volumes calculados por meio da leitura da cota de nível do reservatório.

Figura 13 - Coeficiente – coeficiente de determinação para os volumes calculados pela curva CAV e dos dados obtidos para os índices de a) Xu, b) Gao e c) McFeeters.



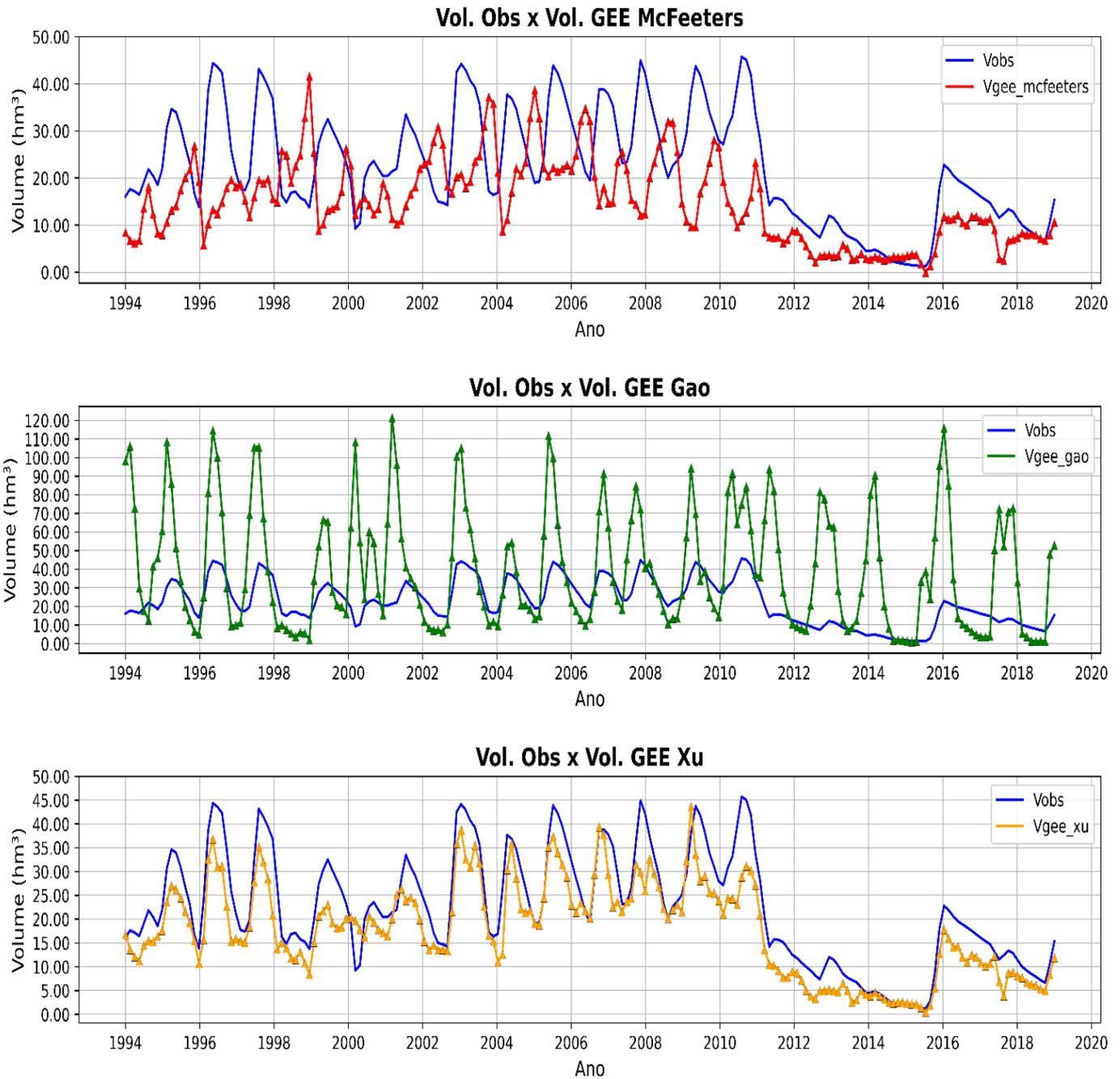
Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados na **Figura 12b e 12c**, referentes aos valores de volumes, sendo aplicados os índices espectrais de McFeeters (1996) e Gao (1996), mostraram um baixo desempenho com R^2 igual a 0,42 e 0,23, respectivamente, indicando uma correlação muito fraca entre as variáveis envolvidas.

Por outro lado, os volumes calculados a partir da área de água em que foi aplicado o índice MNDWI, apresentaram bons resultados, atingindo o coeficiente de determinação R^2 de 0,82, considerado como ínfima forte (0,81 a 0,99) de acordo com os parâmetros de classificação estatística de Lopes (2016). Esse comportamento demonstrou uma boa confiabilidade para o procedimento de determinação de volumes, a partir de imagens com a utilização desta análise espectral para este reservatório.

A **Figura 14** é uma representação da série histórica dos V_{obs} , comparados com os resultados dos volumes utilizando os três índices aplicados, sendo os volumes da série histórica da CAV calculados a partir da leitura da cota disponibilizado pelo portal eletrônico da AESA. Na Figura 13 também ficou evidenciado que cada marcação na curva do V_{gee} corresponde a um dado de imagem coletado.

Figura 14 - Série histórica dos volumes obtidos pelo GEE.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 14 mostrou ainda que a curva baseada no índice de Xu (2006) se comportou de maneira bastante similar à curva dos dados históricos de volume da AESA, apontando uma boa representação dos valores de volume considerados como reais, e obtidos desta agência.

Ficou evidente que a curva que utilizou os valores do índice de Xu (2006) foi a que proporcionou os volumes mais próximo dos valores observados do reservatório, obedecendo o

comportamento dos dados de volume observados; em seguida, a curva de McFeeters foi a que teve resultado apenas mediano, em vista de ter apresentado um comportamento discordante da curva dos volumes reais, subestimando bastante os valores dos volumes, apontando notórias defasagens relativas ao comportamento cíclico dos volumes reais.

O índice que resultou no pior desempenho foi o de Gao (1996), que apesar de ter superestimado os resultados em todos os máximos dos volumes e subestimado os volumes mínimos, ainda assim foi observado um comportamento aparentemente similar ao dos dados dos volumes observados, uma vez que parece acompanhar as tendências de crescimento e diminuição dos volumes do reservatório.

Na Tabela 4 está apresentado o resumo estatístico dos resultados obtidos para cada um dos índices, entre os dados calculados estão a correlação de Pearson, o coeficiente de determinação (R^2), a eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), também as médias, máximos e mínimos.

Tabela 4 – Resumo estatístico dos resultados.

Índice	Pearson	R^2	NSE	Max (hm ³)	Min (hm ³)	Média (hm ³)	Desv. Pad.
XU	0,899	0,808	0,537	44,279	0,849	18,039	10,271
McFeeters	0,339	0,115	-1,440	41,793	0,101	15,179	9,266
GAO	0,392	0,153	-0,084	123,408	0,447	40,125	36,197
Observado	1,000	1,000	1,000	46,449	1,251	22,671	11,995

Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados estatísticos confirmaram o melhor desempenho do MNDWI, apresentando uma boa correlação, reafirmando o coeficiente de determinação como muito forte, o NSE acima de 0,5. Em comparação dos resultados de Xu com os dados observados, dá para ver uma proximidade nas máximas, médias e mínimas, sendo que na média dos resultados estão a 4 milhões de metros cúbicos de diferença.

O trabalho teve um resultado semelhante ao encontrado por Condeça *et al.* (2022) no que diz respeito ao índice com melhor performance ter sido o MNDWI; outro ponto em semelhança foi o fator do índice de Gao ter se comprovado extrapolar bastante o volume. De fato, o índice de Xu (2006) ter se saído melhor pode ser explicado pelo fato dele captar com maior fidelidade a faixa espectral da água bem como a suavização dos pixels correspondentes a solo exposto e construções.

Deve ser observado que, para maiores áreas inundadas, os erros de leitura podem ser menores, o que explica o melhor desempenho das análises de Condeça et al. (2022) com reservatórios de maiores porte.

6.0 CONCLUSÃO

A gestão de recursos hídricos no semiárido brasileiro tem os reservatórios fluviais como importantes mananciais para o atendimento às demandas para abastecimento de água, dessedentação de animais, irrigação, entre outros. O conhecimento dos volumes de água atuais acumulados nos açudes permite o planejamento dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas, haja vista os graves fenômenos relativos às secas periódicas que ocorrem nessa região do Brasil.

Este trabalho representou uma investigação sobre o cálculo de volumes de reservatórios fluviais a partir de imagens capturadas por sensores instalados em satélites.

Foram utilizadas as imagens do satélite Landsat 4, 5 e 8 no período de 1984 a 2022. No entanto, os dados registrados no órgão fiscalizador são do período de 1994 a 2019.

Foi realizada uma adaptação ao código de Condeça et. al. (2022) e feita a aplicação utilizando-se os índices MNDWI de Xu (2006), NDWI de McFeeters (1996) e NDWI de Gao (1996).

Os melhores resultados foram os referentes ao uso do índice de Xu (2006) em todas as análises feitas, tanto pela aplicação da regressão aplicada para os dados a partir do GEE e os dados observados, como para os dados de volume históricos encontrados.

A metodologia apresentada parece ser confiável para aplicação no reservatório São Gonçalo, uma vez que os valores para o índice foram muito bons.

Há também a questão das séries temporais existentes, uma vez que a agência fiscalizadora foi criada no início dos anos 2000. Houve dificuldade de se obter uma série de dados de imagens de satélite tratadas compatíveis com os dados disponibilizados.

Em trabalhos futuros, se recomenda uma avaliação de novos dados de satélites, se possível investigar a partir de satélites mais modernos, ou até mesmo com o uso de tecnologia de radar para mapeamento, a fim de melhorar a resolução espacial do reservatório.

Recomenda-se também a aplicação para reservatórios fluviais maiores, acima de 100 hm³, uma vez que há indicações de que os dados de áreas apresentam erros menores.

7.0 REFERENCIAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento – ANA. Centro de Memória da ANA, criado pela Portaria ANA nº 388, de 13 de janeiro de 2022. Site da ANA memorial. 2022. Disponível em: <https://memoria.ana.gov.br/>. Acesso em 15 de abril de 2022.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Histórico. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/historico>. Acessado em: 15 de abril de 2023.

AMPEQ Medição de nível. Portifólio. Disponível em: < <http://ampeq.ch/pt/portfolio.html> >. Acesso em: 15 maio 2019

Agência Nacional de Energia Elétrica. Histórico. Gov.br, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/historico> . Acesso em: 20 de abril de 2023

BRASIL. Lei Federal nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. Brasília. 1997.

BRASIL. [Constituição Federal de (1988)]. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidente da República. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em 20 de abril de 2023.

BRASIL. Lei Federal nº 9984/2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União. 2000.

CABRAL DA SILVA, T. Barragens. Apostila do curso de Barragens. 2022. João Pessoa. 168p.

Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Resolução 143, 10 de julho de 2012. Diário Oficial da União em 04 de setembro de 2012, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF.

CONDEÇA, J.; NASCIMENTO, J.; BARREIRAS, N. Monitoring the storage volume of water reservoirs using Google Earth Engine. Water Resources Research, Vol. 58, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021WR030026>

Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). História. Gov.br, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/dnocs/pt-br/acesso-a-informacao/institucional/historia>. Acesso em: 20 de abril de 2023

Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). Construído pelo DNOCS, açude São Gonçalo faz das terras paraibanas uma das mais promissoras da região. Gov.br, 30 de junho de 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/dnocs/pt-br/assuntos/noticias/construido-pelo-dnocs-acude-sao-goncalo-faz-das-terras-paraibanas-uma-das-mais-promissoras-da-regiao>. Acesso em: 20 de abril de 2023

Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). DNOCS entrega obra de recuperação e modernização da Barragem de São Gonçalo, na Paraíba. Gov.br, 26 de dezembro de 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/dnocs/pt-br/assuntos/noticias/dnocs-entrega-obra-de-recuperacao-e-modernizacao-da-barragem-de-sao-goncalo-na-paraiba>. Acesso em: 20 de abril de 2023

FOGA, S., SCARAMUZZA, P.L., GUO, S., ZHU, Z., DILLEY, R.D., BECKMANN, T., SCHMIDT, G.L., DWYER, J.L., HUGHES, M.J., LAUE, B. (2017). Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products. Remote Sensing of Environment, 194, 379-390. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.026>.

GAO, Bo-Cai. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote sensing of environment, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996.

Gorelick, N., et al., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, Remote Sensing of Environment (2016): <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031> (2016-2017): <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

GEE. (2023). Google Earth Engine API guide. Retrieved from <https://developers.google.com/earth-engine> . Acesso em: 20 de abril de 2023.

GEE (2023). Google Earth Engine Landsat dataset. Disponível em: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets>. Acesso em: 02 de maio de 2023.

HANSEN, C. Google Earth Engine as a platform for making remote sensing of water resources a reality for monitoring Inland waters. 2015. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3688.1047>

KUHNEN, B. S. Método e Técnica para obtenção da Curva Cota X Área X Volume (CAV). Dissertação de mestrado em Engenharia de Transportes de Gestão Territorial, Universidade Federal de Santa Catarina. 2020. 131 p.

LEMOS, F. C. Monitoramento remoto e automático de nível no reservatório Argemiro de Figueiredo (ACAUÃ). Orientador: Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Curso Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Paraíba. 2019. 72 p. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/24724>. Acesso em: 18 de março de 2023.

LEMOS, Filipe Carvalho *et al.* USO DO GOOGLE EARTH ENGINE PARA ANÁLISE DA ANOMALIA DA PRECIPITAÇÃO ANUAL DO BRASIL EM 2020 A PARTIR DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, n. XXIV. 2021. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=13068>. Acesso em: 20 de abril de 2023.

LI, H., LUO, Z., XU, Y., ZHU, S., CHEN, X., GENG, X., et al. A remote sensing-based area dataset for approximately 40 years that reveals the hydrological asynchrony of Lake Chad based on Google Earth Engine. *Journal of Hydrology*, V. 603, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126934>

LOPES, L. F. D. Métodos Quantitativos. 1ª edição. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

MATOS, A. J. S. Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional “CAV-NH”. 137 p. Tese Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MCFEETERS, Stuart K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

PAULA, S. C. Precipitação estimada por satélite para uso em modelo concentrado chuva-vazão aplicado em diferentes escalas de bacias. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 168. 2015.

PEREIRA, M. V. A estrutura urbanística em torno do açude velho em Campina Grande. Orientador: Prof. Msc. Agnaldo Barbosa dos Santos. Artigo em para conclusão de curso – Licenciatura em Geografia. 2014. 38 p. Disponível em: <https://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/handle/123456789/9502>. Acesso em: 19 de abril de 2023.

PARAÍBA. Decreto Estadual nº25.764/2005. Criação de câmaras técnicas no Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Diário Oficial do Estado, 31 de março de 2005.

SARMENTO, F. J. Dimensionamento Hidrológico de reservatórios sob incertezas: Avaliação estocástica e reflexos financeiros. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XVII, 2007, São Paulo. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=9673&Name=dimensionamento_hidrologico_de_reservatorios_sob_incertezas_avaliacao_estocastica_e_reflexos_financeiros. Acessado em: 16 de abril de 2023

Secretaria de Planejamento do Estado da Paraíba. Cadastro de Açudes do Estado da Paraíba. Convênio SEPLAN/PB – SCIENTEC. 1997. João Pessoa, PB.

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

ZANOTTA, D. C.; FERREIRA, M. P.; ZORTEA, M. Processamento de imagens de satélite. 1ª edição. São Paulo. 2019. 320p.