



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

LUDMYLLA BEATRICE MARTINS DO NASCIMENTO

**ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO DO AÇUDE QUIXERAMOBIM, CEARÁ,
UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO**

**CRATEÚS
2024**

LUDMYLLA BEATRICE MARTINS DO NASCIMENTO

**ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO DO AÇUDE QUIXERAMOBIM, CEARÁ,
UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO**

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título do grau de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Profa. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita.

CRATEÚS
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N196e Nascimento, Ludmylla Beatrice Martins do.
Estimativa da evaporação do açude Quixeramobim, Ceará, utilizando sensoriamento remoto / Ludmylla Beatrice Martins do Nascimento. – 2024.
56 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Crateús, 2024.
Orientação: Profa. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita.

1. Balanço de energia. 2. Landsat 8. 3. AquaSEBS. I. Título.

CDD 628

LUDMYLLA BEATRICE MARTINS DO NASCIMENTO

**ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO DO AÇUDE QUIXERAMOBIM, CEARÁ,
UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO**

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título do grau de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Tatiane Lima Batista
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.
À minha mãe Sheyla.
Ao meu pai Rogério (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a Deus, por ser meu guia nessa longa caminhada, por me dar força nos momentos em que duvidei da minha capacidade, por sempre iluminar minha mente e mostrar que tudo tem seu tempo.

Aos meus pais. Meu pai se foi antes de presenciar esse momento que tanto desejei viver junto a mim, porém agradeço por todos os ensinamentos e todo o esforço que colocou para que eu pudesse estar aqui hoje, foi com certeza uma das fontes da minha força de vontade que nunca me permitiram desistir. Minha mãe foi e sempre será minha melhor amiga e nesse momento não seria diferente, me guiou, me apoiou e me tranquilizou da melhor maneira e da forma que só uma mãe poderia. Serei eternamente grata, pois todos seus esforços me levaram a desejar orgulhá-los a todo momento e buscar sempre ser alguém melhor.

Aos meus avós paternos Francisco e Maria das Graças e maternos Luiz Carlos e Maria do Socorro, por todo apoio e orações que certeza me guiaram e me protegeram a todo momento. Sou muito rica por ter a presença e apoio de vocês em todo momento dessa jornada.

Ao meu namorado Samuel que foi meu melhor amigo, esteve comigo em toda a graduação e nunca me permitiu duvidar de mim mesma, foi um dos meus maiores admiradores e esteve ao meu lado apoiando, aconselhando, me dando conforto e sendo meu companheiro.

As minhas companheiras de casa, Vitória, Raquel e Thaynara, por tornarem essa vida distante da família mais leve e divertida, o Ap 613 ficará eternamente em minha memória e coração, obrigada pelos momentos felizes. A todos os amigos que fiz durante a graduação, em especial a minha “panela” desde o início, Alan, Ana Luiza, Daniele e Gerson, obrigado por toda parceria e por tornar mais fácil as noites de estudos e trabalhos.

A minha orientadora Janine Mesquita, que é uma grande inspiração para mim, com certeza foi muito gratificante tê-la me orientando, ensinando e acima de tudo, por acreditar no meu potencial e confiar que tudo daria certo, até mesmo quando duvidei.

A todo corpo docente da UFC – campus Crateús, em especial, a professora Luiza Gardênia por ter enxergado potencial em mim no início de tudo e ter me confiado oportunidades tão incríveis ao longo da graduação.

A Universidade Federal do Ceará por conceder a bolsa para desenvolvimento da pesquisa do meu trabalho de conclusão de curso.

"Pois a sabedoria vale muito mais que rubis, nada do que você deseja se compara a ela"

Provérbios 8:11.

RESUMO

Estudos sobre as perdas de água por evaporação são cada vez mais estratégicos na gestão dos recursos hídricos. Nesse sentido, o presente trabalho objetivou estimar a evaporação em um reservatório localizado no semiárido cearense, com o auxílio do sensoriamento remoto, o açude Quixeramobim. Para isso, foi necessária a utilização de imagens do satélite Landsat 8 (OLI) em conjunto com um método de estimativa da evaporação, fundamentado no balanço de energia: AquaSEBS. O modelo integra dados de satélite e dados hidrometeorológicos para estimar a taxa de calor latente e, assim, determinar a evaporação diária. Para os dados climáticos e hidrológicos, foram utilizadas duas estações climatológicas, Quixeramobim e Morada Nova, sendo o evaporímetro de Piché o método utilizado como evaporação de referência. O modelo estimou valores mínimos e máximos de 0,17 mm e 7,44 mm, respectivamente, apresentando alta variabilidade espacial no período analisado (2013-2022), com maiores lâminas evaporadas as margens do reservatório, bem como, na região central do açude. A temperatura superficial do espelho d'água apresentou valores elevados nas supracitadas áreas, com também maior albedo de superfície. O maior valor médio evaporado foi observado no ano de 2016, quando também ocorreu um aumento nos valores de fluxo de calor da água e radiação líquida. O desempenho do modelo foi moderado, conforme os dados estatísticos obtidos do comparativo entre o evaporímetro de Piche da estação climatológica de Morada Nova e o modelo AquaSEBS, com R^2 igual a 0,5 e RMSE de 1,06 mm/dia. Variáveis meteorológicas, como umidade relativa do ar, temperatura do ar e velocidade dos ventos, demonstraram contribuições nos processos de evaporação do reservatório. A umidade relativa média anual no ano de 2017 elevou para 63,87% e a evaporação chegou a sua média mínima nesse mesmo ano com 1,22 mm/dia, tornando a relação entre a umidade e a evaporação inversamente proporcional. Quanto a temperatura do ar, à medida que aumenta, a evaporação tende a aumentar também, sendo ambos em novembro de 2016 em seu máximo, com 28,9°C e 6,2 mm, respectivamente. Por fim, verifica-se que no mês de junho de 2018 conforme a velocidade dos ventos diminui, a evaporação segue a mesma linha, bem como, crescendo assim que os ventos se intensificam. Dessa forma, os resultados evidenciaram a relevância da combinação do balanço de energia com sensoriamento remoto para estimar a evaporação de reservatórios, sendo, portanto, uma alternativa viável para o monitoramento e gestão do balanço hídrico.

Palavras-chave: Balanço de energia; Landsat 8; *AquaSEBS*.

ABSTRACT

Studies on water loss through evaporation are becoming increasingly strategic in water resource management. With this in mind, the aim of this study was to estimate evaporation in a reservoir located in the semi-arid region of Ceará, using remote sensing - the Quixeramobim reservoir. This required the use of images from the Landsat 8 satellite (OLI) in conjunction with an evaporation estimation method based on the energy balance: AquaSEBS. The model integrates satellite data and hydrometeorological data to estimate the latent heat rate and thus determine daily evaporation. For the climatic and hydrological data, two climatological stations were used, Quixeramobim and Morada Nova, with the Piché evaporimeter being used as the reference evaporation method. The model estimated minimum and maximum values of 0.17 mm and 7.44 mm, respectively, showing high spatial variability over the period analyzed (2013-2022), with higher evaporation rates on the banks of the reservoir, as well as in the central region of the dam. The surface temperature of the water mirror showed high values in the aforementioned areas, with a higher surface albedo. The highest average evaporated value was observed in 2016, when there was also an increase in the values for water heat flow and net radiation. The model's performance was moderate, according to the statistical data obtained from the comparison between the Piche evaporimeter at the Morada Nova climatological station and the AquaSEBS model, with R^2 equal to 0.5 and RMSE of 1.06 mm/day. Meteorological variables such as relative humidity, air temperature and wind speed have been shown to contribute to the reservoir's evaporation processes. The average annual relative humidity in 2017 rose to 63.87% and evaporation reached its minimum average in the same year at 1.22 mm/day, making the relationship between humidity and evaporation inversely proportional. As for air temperature, as it rises, evaporation also tends to increase, with both peaking in November 2016 at 28.9°C and 6.2 mm, respectively. Finally, it can be seen that in June 2018, as the wind speed decreases, evaporation follows the same line, as well as increasing as the winds intensify. Thus, the results show the relevance of combining the energy balance with remote sensing to estimate reservoir evaporation, making it a viable alternative for monitoring and managing the water balance.

Keywords: Energy balance; Landsat 8; AquaSEBS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo hidrológico e seus processos	15
Figura 2 – Mapa de localização do Reservatório Quixeramobim	20
Figura 3 – Temperatura superficial média (°C) por sensoriamento remoto e temperatura média do ar (°C) medida pela estação climatológica de Quixeramobim, no reservatório Quixeramobim, Ceará (2013-2022)	34
Figura 4 – Variabilidade espacial da temperatura no reservatório Quixeramobim (2013-2022).	36
Figura 5 – Relação Evaporação (mm/dia) e fluxos de calor(W/m ²) (2013 – 2022)	37
Figura 6 – Relação Evaporação (mm/dia) e temperatura do ar (°C) (2013-2022)	39
Figura 7 – Relação Evaporação (mm/dia) e umidade relativa do ar (%) (2013-2022)	42
Figura 8 – Relação Evaporação (mm/dia) e temperatura do ar (°C) (2013-2022)	43
Figura 9 – Relação Evaporação (mm/dia) e velocidade dos ventos (m/s) (2013-2022)	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados meteorológicos	21
Tabela 2 – Dados das imagens de satélite Landsat 8	22
Tabela 3 – Dados de entrada do algoritmo <i>AquaSEBS</i>	23
Tabela 4 – Coeficientes dos pesos (w_n) para o cálculo do albedo planetário e irradiância solar espectral no topo da atmosfera ESUN ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$) por imagens Landsat 8	25
Tabela 5 – Emissividade de superfície, índice por diferença normalizada (NDVI) e albedo do reservatório Quixeramobim (2013-2022.)	35
Tabela 6 – Comparativo entre a evaporação do modelo de estimativa com os dados de evaporação da estação de Morada Nova, Ceará (2013-2022)	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
AquaSEBS	<i>Aqua Surface Energy Balance System</i>
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
METRIC	<i>Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration</i>
SEBS	<i>Surface Energy Balance System</i>
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
DNOCS	Departamento Nacional de Obras contra as Secas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	15
<i>1.1.1 Objetivo Geral</i>	15
<i>1.1.2 Objetivos Específicos</i>	15
1.2. Justificativa	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Evaporação e sua Influência no Ciclo Hidrológico	17
2.2 Perda de Água em Reservatórios no Semiárido Brasileiro	18
2.3 Métodos para Estimar a Evaporação em Reservatórios	19
2.4 Uso do Sensoriamento Remoto na Estimativa da Evaporação	20
3. METODOLOGIA	22
3.1 Caracterização da área de estudo	22
3.2 Aquisição de dados climáticos, hidrológicos e sensoriamento remoto	23
3.3 AquaSEBS (Aqua Surface Energy Balance System)	25
<i>3.3.1. Balanço de energia</i>	26
<i>3.3.1.1. Radiação líquida para o Landsat 8</i>	26
<i>3.3.1.2 Albedo da superfície</i>	26
<i>3.3.1.3. Radiação solar de onda curta incidente</i>	28
<i>3.3.1.4. Radiação solar de onda longa incidente</i>	29
<i>3.3.1.5. Temperatura e Emissividade de superfície</i>	30
<i>3.3.1.6. Fluxo de calor na água</i>	31
<i>3.3.1.7. Fluxo de calor sensível da água</i>	33
<i>3.3.1.8. Correção de estabilidade para transferência de calor momentânea</i>	35
<i>3.3.1.9. Evaporação diária</i>	36
3.4. Análise estatística	36

4. RESULTADOS	37
4.1 Uso do Sensoriamento Remoto para mensurar temperatura superficial	37
4.2 Evaporação do reservatório com o uso do modelo <i>AquaSEBS (Aqua Surface Energy Balance System)</i>	40
4.3 Análise estatística e desempenho do modelo	43
4.4 Influência das variáveis meteorológicas na evaporação	45
5. CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

O Semiárido brasileiro, localiza-se na porção central da região Nordeste do Brasil, abrange os estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e parte do norte do Estado de Minas Gerais (Região Sudeste) (SILVA *et al.*, 2010). Segundo Fonte *et al.* (2003), configura-se de um cenário crítico no que se refere à questão hídrica, necessitando de subsídios para implantação de uma gestão visando à racionalização do uso de suas águas com base nessa realidade.

Entre as iniciativas de planejamento, identificou-se a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre a oferta, às demandas e as condições de operação dos reservatórios, e com isso estabelecer um melhor conhecimento sobre o atual balanço hídrico da região e o aprimoramento necessário na operação dos açudes (ANA, 2017). Além disso, intensificam a importância de estudos para um melhor entendimento dos processos de perdas hídricas nestas estruturas, a exemplo da evaporação (ANDRADE; MARQUES, 2017).

Para o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos de um reservatório, é necessário ter valores representativos da evaporação líquida, sendo esta correspondente a superfície aquosa propriamente dita. A obtenção destes valores de evaporação permite avaliar a quantidade de água que se perde com a construção de um reservatório (KAN; DIAS, 1999). A determinação do volume disponível do reservatório, para os diversos usos, depende de um criterioso conhecimento das perdas por evaporação, informação de suma importância para políticas de manejo dos recursos hídricos, gestão, operação dos reservatórios e garantia ao atendimento das demandas de água (FONTES, 2005)

A estimativa da evaporação da água em açudes pode ser feita pela utilização de modelos fundamentados no balanço de energia, balanço de água, métodos aerodinâmicos e métodos combinados. Na literatura, existem diversos modelos matemáticos testados para estimar essas perdas (Penman, 1948; Thornthwaite, 1948; Kohler *et al.*, 1955; Blaney-Criddle, 1962; Priestley e Taylor, 1972; Linacre, 1977; Morton, 1983; Linacre 1993; Camargo *et al.*, 1999). Outros modelos também têm sido empregados, assim como o uso da modelagem hidrodinâmica (Mesquita *et al.*, 2020; Rocha *et al.*, 2023) e por sensoriamento remoto (Rodrigues *et al.*, 2021; Xia *et al.*, 2022; Rossi *et al.*, 2024).

Diante disso, as informações globais sobre reservatórios podem trazer benefícios tanto para a gestão local de água quanto para melhorias na compreensão do ciclo hidrológico. Estas informações incluem a área de água, elevação e armazenamento; taxa de evaporação e volume, entre outras características (LI *et al.*, 2021).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do presente estudo é realizar a estimativa da evaporação em um reservatório do semiárido, o açude Quixeramobim, por meio de sensoriamento remoto e um modelo hidrológico.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Utilizar imagens dos satélites Landsat 8 para mensurar a temperatura do reservatório;
- Estimar a evaporação do reservatório utilizando o modelo *AquaSEBS* a partir do uso de imagens dos satélites Landsat 8;
- Avaliar o desempenho do modelo de estimativa da evaporação na estação seca do semiárido brasileiro;
- Analisar a influência das variáveis meteorológicas na evaporação.

1.2. Justificativa

O conhecimento das fontes de perdas hídricas por evaporação em superfície livre de água nos reservatórios nas regiões semiáridas é de suma importância no gerenciamento dos recursos hídricos para os diferentes usos, seja na produção agropecuária, agroindustrial, abastecimento doméstico, etc (MEDEIROS, 2019).

Os reservatórios são utilizados para armazenar grandes volumes de água e distribuí-la para a população de forma racional. Regiões de climas quentes e com chuvas irregulares, como as regiões semiáridas, necessitam de atenção, quanto ao manejo do uso da água e o conhecimento de suas perdas por evaporação (MESQUITA et al., 2020), pois são de grande importância para a sustentabilidade da região. Conforme Oliveira (2009), estudos que envolvam medidas e/ou estimativas precisas da evaporação representam uma alternativa muito importante para planejamento mais adequado do uso da água armazenada em reservatórios.

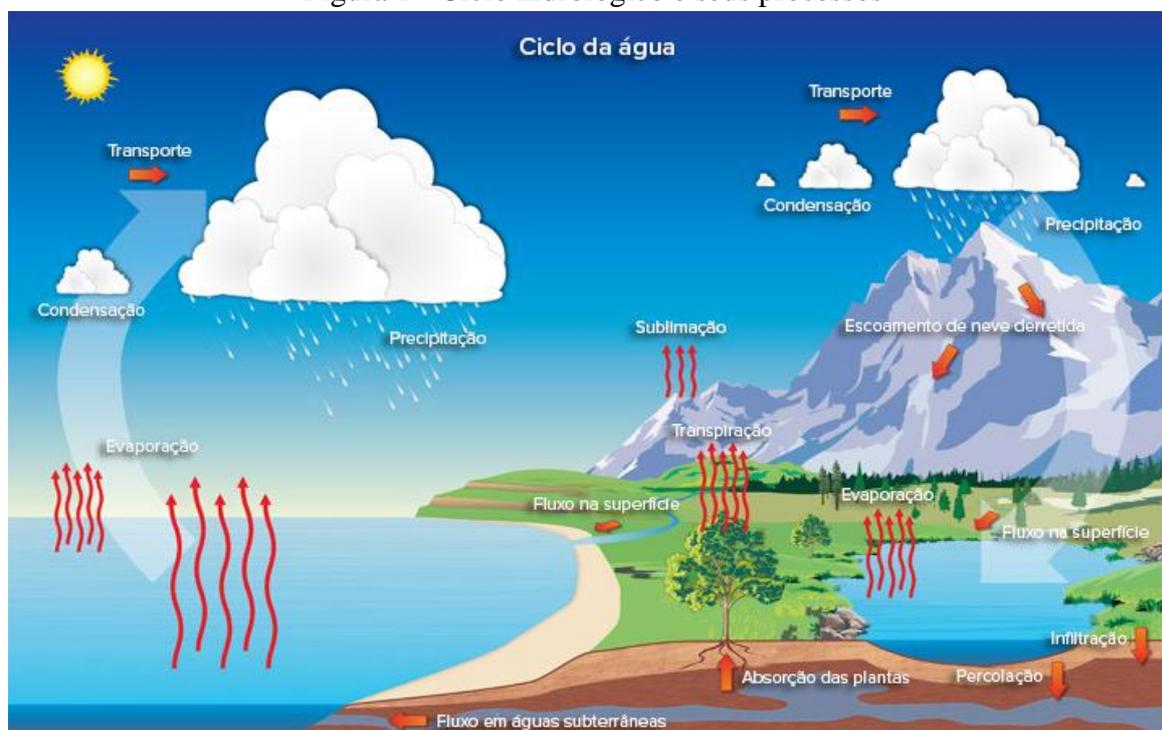
O estado do Ceará, estando inserido em uma região semiárida, conseqüentemente tem um grau de evaporação alto nos vastos espelhos de água dos seus reservatórios. Segundo dados da FUNCEME (2013) existem cerca de 28.195 reservatórios com espelho d'água no Ceará, fazendo com que tais estudos na área sejam um diferencial no desenvolvimento dos recursos hídricos, não só do estado, como também da região. Dessa forma, estimar a evaporação dos reservatórios faz parte do processo de otimização do uso dos recursos hídricos. Ademais, o uso do sensoriamento remoto (SR) pode aumentar a disponibilidade dessas informações e, portanto, é considerada uma ferramenta vital para a avaliação de dados hidrológicos (RODRIGUES *et al.*, 2021). Tais informações são necessárias para políticas de manejo, gestão, operação dos reservatórios e garantia ao atendimento das demandas de água.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Evaporação e sua Influência no Ciclo Hidrológico

A água está sempre mudando de estado, entre líquido, vapor e sólido. Esses processos ocorrem de maneira rápida e consistente ao longo de milhões de anos. Os oceanos, lagos, rios e plantas são regiões onde podem ser iniciados os processos do ciclo hidrológico (Figura 1). Estas regiões quando aquecidas pelo sol podem iniciar o ciclo da água através da evaporação e transpiração. Outra fonte de vapor d'água vem das geleiras por meio da sublimação. As correntes de ar levam o vapor d'água para cima na atmosfera, onde temperaturas mais baixas fazem com que este vapor seja condensado em nuvens (GLEICK, 1995; USGS, 2022).

Figura 1 - Ciclo hidrológico e seus processos



Fonte: NOAA, 2012

A radiação solar é a energia mais importante para o ciclo, pois o origina e o mantém. O conhecimento sobre esta variável acerca da sua variabilidade, tem aplicabilidade em diversas áreas científicas, como engenharia, arquitetura, meteorologia, agricultura, hidrologia e, ainda, como indicador da variabilidade climática (LOHMANN et al., 2006). Esta por sua vez, é responsável por nutrir as moléculas de água com energia cinética suficiente para superar a tensão superficial e desprendê-las da superfície do líquido. A passagem das moléculas de água, da vizinhança da superfície de água para a atmosfera, é controlada pela diferença de

tensão de vapor (pressão exercida pelo vapor em determinado volume) entre a camada da superfície de água e a atmosfera. Adicionalmente, o vento pode deslocar a camada adjacente de ar saturado, favorecendo a evaporação da linha de água (TALAIA & COELHO, 2019).

A evaporação constitui uma das partes essenciais do ciclo hidrológico, uma vez que redistribui a água e a energia entre a superfície da terra e a atmosfera. Quando ocorre nos oceanos é a primeira forma de movimento da água na atmosfera. A grande área dos oceanos (acima de 70% da superfície da Terra é coberta pelos oceanos) provê a oportunidade da evaporação de grande escala ocorrer. Em uma escala global, a quantidade de água evaporada é aproximadamente a mesma da água que retorna para a Terra como precipitação. (USGS,2019).

A evaporação também é um importante mecanismo de regulação da temperatura da superfície da Terra, pois ela consome energia solar para a transformação da água líquida em vapor. À medida que esse processo vai ocorrendo, o ar fica mais úmido e a quantidade de vapor que é transferido para a atmosfera vai diminuindo. A evaporação pode até mesmo cessar caso o ar fique saturado e não haja a circulação das massas de ar. Sendo assim, observa-se que a evaporação depende de variáveis meteorológicas como a radiação solar, temperatura, umidade do ar e intensidade do vento (ALLEN, 2006). Dessa forma, o estudo da evaporação é fundamental para compreender a disponibilidade de água em um reservatório.

2.2 Perda de Água em Reservatórios no Semiárido Brasileiro

A água é o insumo básico da sobrevivência de todas as espécies e indicador do desenvolvimento de uma região, sendo necessária atenção especial no seu manejo visando sua conservação em qualidade e quantidade. Isso é alcançado por meio da gestão dos recursos hídricos, que se refere aos procedimentos relativos à tentativa de equacionar e resolver as questões da água e otimizar o seu uso (ANEEL, 2001).

Embora a disponibilidade de água no Brasil seja abundante, está distribuída de forma irregular, que apesar da grande oferta de água presente em seu território, também se insere nesse cenário de conflitos pela utilização dos corpos hídricos. Pois também possui irregularidades na concentração e disponibilidade de água. A distribuição das reservas hídricas do Brasil se dá da seguinte forma: região Norte 68%, Nordeste 3%, Sudeste 6%, Sul 7%, e Centro-oeste 16% (ANA, 2009).

Especificamente no Semiárido do Nordeste Brasileiro, a problemática que envolve a questão da água está diretamente interligada ao desenvolvimento histórico de um sistema

composto por milhares de pequenos e médios açudes, aproximadamente um reservatório a cada 6 km² de área (MAMEDE *et al.*, 2012).

A questão da água no Semiárido deve ser tratada de forma ainda mais criteriosa. As condições naturais predominantes como, por exemplo, regime pluviométrico com elevada variabilidade temporal (interanual) e espacial das chuvas, tornam o sistema vulnerável à escassez hídrica. Em função disso, destaca-se a perda de água por evaporação, um processo natural e inevitável em reservatórios, especialmente em regiões mais quentes, chegando a reduzir a quantidade armazenada nos reservatórios. (LIMA NETO *et al.*, 2011; MAMEDE *et al.*, 2012; MALVEIRA *et al.*, 2012; de ARAÚJO e MEDEIROS, 2013; de ARAÚJO e BRONSTERT, 2016).

Diante desses dados percebe-se a relevância de estudos para minimizar as perdas nos corpos d'água. Dentre esses, destaca-se o entendimento da evaporação, uma variável crítica dentro do balanço hídrico (MESQUITA *et al.*, 2020). No estado do Ceará, região inserida no semiárido, Rodrigues *et al.* (2021) estimaram que o volume total evaporado diariamente em todos os reservatórios do estado é de cerca de 2,4 milhões de m³/dia, o que é suficiente para abastecer 12 milhões de pessoas (assumindo um consumo diário per capita de 200l).

A evaporação nos reservatórios significa perdas hídricas e o conhecimento destas perdas é necessário para a caracterização do potencial hídrico disponível de determinada região. No Nordeste, devido ao alto índice de radiação solar, temperatura elevada e baixa umidade, os índices relativos à evaporação de superfícies livres ocorrem de maneira mais acentuada quando comparados com outras regiões (VIEIRA, 2015).

A região Nordeste do Brasil necessita de investigação criteriosa para que os açudes cumpram a função para a qual foram projetados, pois uma parcela considerável desses açudes foi construída sem planejamento adequado, em que ainda hoje não se tem dados específicos sobre a morfologia desses reservatórios (SILVA *et al.*, 2011).

2.3 Métodos para Estimar a Evaporação em Reservatórios

A estimativa da evaporação da água em açudes e barragens pode ser feita pela utilização de modelos fundamentados no balanço de energia, métodos aerodinâmicos e métodos combinados (LEITÃO *et al.*, 2007). Ainda conforme o autor, é comum a utilização de formulações empíricas ou semi-empíricas, não só para determinar os diferentes coeficientes para os modelos teóricos como, também, para obtenção indireta de determinados termos (parametrização) dos modelos evaporimétricos para lagos.

A determinação pelo método do balanço de energia na superfície terrestre envolve duas partes: a primeira consiste em quantificar a energia líquida (R_n) dos fluxos das radiações de onda curta e de onda longa recebida e emitida pela superfície. Enquanto a segunda estima os fluxos de calor no solo, sensível e latente de utilização da radiação líquida disponível na superfície terrestre (Liu, 2007). Nesse sentido, a Razão de Bowen (1926) é amplamente utilizada para alocar a relação de perda de calor por condução de evaporação.

O método aerodinâmico baseia-se na correlação entre a velocidade do vento, vapor de água e calor. Descreve a aerodinâmica do fluxo próximo a uma superfície, de modo que processos de transferência turbulentos, que controlam o transporte de água (vapor) e calor, podem ser entendidos (SVERDRUP, 1946). Dessarte Thornthwaite (1948) elaborou um método empírico para calcular a estimativa de evapotranspiração, relacionando a temperatura média mensal e a evapotranspiração potencial para um mês de 30 dias com 12 horas de insolação. O conjunto de equações formulado foi baseado em balanços hídricos de bacias hidrográficas e medidas de evapotranspiração de lisímetros, utilizando apenas a temperatura do ar como variável independente.

Penman (1948) apresentou um modelo que considera a combinação da evaporação da água livre devido à radiação solar como fonte de energia e de uma componente aerodinâmica. O método foi o primeiro indireto que combinou os efeitos do balanço de energia com o poder evaporante do ar e é denominado, por essa razão, de método combinado.

Linacre (1977) através de simplificações no método de Penman (1948) desenvolveu uma fórmula empírica para estimar a evaporação de lagos. Essa equação apenas exige a entrada de dados relacionados à temperatura média do ar e coordenada geográfica do local. Entretanto, Linacre (1977) acreditava que a calibração da equação traria muito da generalidade da fórmula básica de Penman (1948). Assim, Linacre (1993) formulou um método que se baseou novamente em simplificações da equação de Penman (1948), na qual incluiu dados de precipitação e velocidade do vento, que foi testada e apresentou resultados satisfatórios (BEZERRA, 2021).

2.4 Uso do Sensoriamento Remoto na Estimativa da Evaporação

Os modelos de sensoriamento remoto mais utilizados para estimativa de evapotranspiração são, Balanço Energético de Superfície para Terra (SEBAL) (BASTIAANSEN et al., 1998), Mapeamento de Evapotranspiração em Alta Resolução e com

Calibração Internalizada (METRIC) (ALLEN et al., 2005) e Sistema de Balanço de Energia de Superfície (SEBS) (SU, 2002).

O modelo SEBS foi desenvolvido por Su (2002) para estimar evapotranspiração diária, mensal e anual em ambientes áridos e semiáridos. Chinyepe (2010) modificou o SEBS para mensurar a evaporação do lago Mutirikwi em Zimbábue. Este autor utilizou imagens MODIS/Terra e validou os resultados com medições de evaporação de Tanque Classe A mais próximo ao reservatório de estudo. Chinyepe (2010) concluiu que os valores estimados pelo SEBS foram ligeiramente superiores às medições de evaporação do tanque, porém aceitáveis. Além disso, o modelo SEBS modificado vem mostrando ser um método confiável para estimar evaporação em grande escala (LOSGEDARAGH et al., 2018).

SEBS também foi modificado por Abdelrady *et al.* (2016), que o denominaram de AquaSEBS, pois os autores o alteraram para realizar o sistema de balanço de energia em superfícies aquáticas, ou seja, para estimar evaporação de águas doces e salgadas. Os coeficientes de determinação (R^2) da evaporação estimada na validação do AquaSEBS de água doce e salina foram de 0,98 e 0,88, respectivamente. Esses resultados mostram adequação do modelo para estimativa de evaporação da região de estudo, reservatórios Ijsselmeer (Holanda), Tana (Ethiopia).

Para Rodrigues (2020), a utilização das informações de sensoriamento remoto por satélite vem com o objetivo, através de modelos de fluxo de calor (SEBS, SEBAL e METRIC), de mensurar a lâmina evaporada no momento em que a cena é capturada pelo satélite em órbita. Com referência a resultados diários, mensais ou até mesmo anuais, extrapolações da evaporação momentânea devem ser executadas, a fim de estimar as lâminas de evaporação de acordo com a orientação temporal desejada.

3. METODOLOGIA

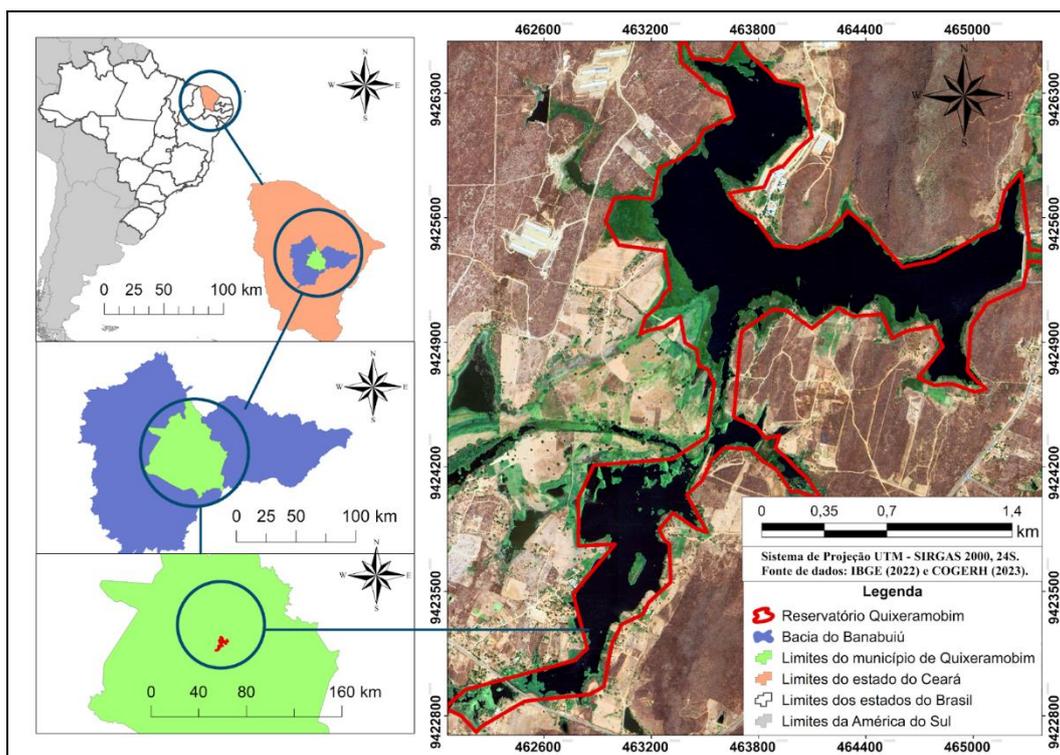
3.1 Caracterização da área de estudo

No estudo em questão, o reservatório analisado foi o Quixeramobim (Figura 2), em decorrência da disponibilidade de informações do respectivo reservatório. Este, por sua vez, integra a região climática do tipo "Bshw", classificação climática de Köppen. Este clima pode ser definido como Tropical Quente Semiárido, com temperaturas médias entre 26°C e 28°C, apresentando regime de chuva irregular e deficiência hídrica de baixa (IPECE, 2007).

O açude Quixeramobim, localizado em sua totalidade no município de Quixeramobim a aproximadamente 190 km de Fortaleza, no sertão Central do Ceará, é uma barragem do tipo Gravidade (concreto). Foi construído em 1960, tendo como órgão executor o DNOCS. Ele barra o rio Quixeramobim, de mesmo nome, tem capacidade para 54 hm³, com uma área de 8.300 km² e vazão regularizada é de 1,700 m³/s (COGERH, 2011).

Com relação ao espelho d'água do açude, Barbosa *et al.* (2021) em uma análise espaço-temporal dos espelhos d'água de reservatórios do Ceará, mostraram a variação da lâmina d'água do reservatório de Quixeramobim entre os anos de 2012 a 2017, sendo 2012 o maior período com 1,33km² de área. No entanto, no decorrer dos anos houve uma enorme redução, chegando a 0,02km² de área no ano de 2017.

Figura 2 - Mapa de localização do Reservatório Quixeramobim.



Fonte: Autora, 2023

3.2 Aquisição de dados climáticos, hidrológicos e sensoriamento remoto

Para estimativa da evaporação por sensoriamento remoto, ou seja, o balanço de energia, 3 etapas são primordiais:

1. Aquisição de dados climáticos e hidrológicos;
2. Escolha das cenas dos satélites do Landsat 8;
3. Aplicação do modelo.

Na estimativa da evaporação são necessários dados climáticos e hidrológicos do reservatório. Para isso foram obtidos dados meteorológicos em forma de séries históricas, a nível diário, que compreenderam o período entre 2013 e 2022. A aquisição dos dados foi através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) nas estações automáticas e convencionais de Quixeramobim (CE) e Morada Nova (CE). A escolha de duas estações se deu pela quantidade de falhas na mais próxima (Quixeramobim) nos dados de temperatura e umidade relativa do ar. Além disso, fez-se necessária a utilização de outra estação para correções, sendo a de Morada Nova a mais adequada por encontrar-se na bacia do Banabuiú e apresentar melhor correlação com os dados do local de estudo.

Os dados utilizados foram médias mensais de temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento, conforme exibidos na Tabela 1

Tabela 1: Média dos dados meteorológicos da estação de Quixeramobim, no município de Quixeramobim, Ceará.

Data	Temperatura média (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do vento (média) m/s
19/09/2013	28,30	65,26	4,67
22/09/2014	28,40	65,34	4,45
24/08/2015	28,71	65,93	5,17
14/11/2016	29,37	68,21	4,36
30/09/2017	28,25	81,12	4,19
13/06/2018	25,68	69,59	2,69
20/09/2019	28,31	59,01	3,83
05/08/2020	27,70	58,53	3,57
23/07/2021	28,00	63,87	3,31
20/09/2022	27,94	53,21	4,19

Fonte: Autora, 2024.

A captura das cenas para a modelagem da evaporação ocorreu entre os anos de 2013 a 2022, durante a estação seca. Foram utilizadas cenas do satélite Landsat 8 (OLI) adquiridas através do portal *United States Geological Survey* (USGS). Para a escolha das imagens, o critério de seleção utilizado foi a visibilidade, ou seja, menor cobertura de nuvens sobre o espelho d'água. Para processamento das cenas, foi aplicado o *software* de geoprocessamento Qgis 3.28, com o auxílio da ferramenta calculadora raster. Na Tabela 2 estão dispostos os dados de satélite supracitados.

Tabela 2: Dados das imagens de satélite Landsat 8, utilizadas neste trabalho.

Data da imagem	Hora de captura	Dia Juliano (DJ)	Nuvens (%)	Sun Elevation LORA	Sun Azimuth LORA
19/09/2013	12:48:53.339014	262,00	0.11	63,40	75,3421
22/09/2014	12:47:02.561574	265,00	0.26	63,48	77,7760
24/08/2015	12:46:43.489887	236,00	1.70	57,08	59,1669
14/11/2016	12:47:16.8577	319,00	0.97	63,59	120,6491
30/09/2017	12:47:10.678644	273,00	0.34	64,76	84,7364
13/06/2018	12:45:49.102069	164,00	0.11	50,11	42,3321
20/09/2019	12:47:15.169501	263,00	0.75	63,11	75,9973
05/08/2020	12:46:30.598458	218,00	0.35	54,41	52,9351
23/07/2021	12:46:55.953001	204,00	0.10	51,32	47,5107
20/09/2022	12:47:16	263,00	0.00	63,14	76,2296

Fonte: Autora, 2024.

Por fim, a estimativa da evaporação no reservatório Quixeramobim foi realizada a partir do método proposto por Abdelrady *et al.* (2016), *AquaSEBS*.

3.3 *AquaSEBS (Aqua Surface Energy Balance System)*

A evaporação diária foi obtida através de um modelo baseado no balanço de energia, o *AquaSEBS* (ABDEL RADY *et al.*, 2016), método adaptado do modelo *Surface Energy Balance System* SEBS desenvolvido por Su (2002). Abdelrady *et al.* (2016) integrou dados de satélite e dados hidrometeorológicos para estimar a taxa de calor latente e, assim, estimar a evaporação diária, conforme Equação 01.

$$\lambda E_{wet} = R_n - G_0 - H_{wet} \quad (1)$$

λE_{wet} representa o fluxo de calor latente sobre a água (W/m^2), R_n é o fluxo de radiação líquida na superfície (W/m^2), G_0 o fluxo de calor da água (W/m^2) e H_{wet} o fluxo de calor sensível da água (W/m^2). Para aplicar a equação, são necessários os seguintes dados:

Tabela 3: Dados de entrada do algoritmo *AquaSEBS*.

Dados de sensoriamento remoto	Dados Meteorológicos	Dados de Radiação Descendentes
Emissividade da superfície	Temperatura do ar	Ondas longas
Albedo da superfície	Umidade Relativa	Ondas curtas
Temperatura da superfície da água	Velocidade do Vento	

Fonte: Adaptado de ABDELRAKY *et al.* (2016).

3.3.1. Balanço de energia

3.3.1.1. Radiação líquida para o Landsat 8

A radiação líquida (R_n) através dos sensores do landsat 8, pode ser obtida por meio da Equação 2 e para chegar nela, é necessário encontrar os valores de cada parâmetro, descritos nas equações 2 a 19.

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + \varepsilon R_{L\downarrow} - \varepsilon_a \sigma T_s^4 \quad (2)$$

Em que,

α = Albedo;

$R_{s\downarrow}$ = Radiação solar de ondas curtas recebida, em W/m^2 ;

$R_{L\downarrow}$ = Radiação de onda longa recebida, em W/m^2 ;

ε = Emissividade da superfície;

ε_a = Emissividade atmosférica;

3.3.1.2 Albedo da superfície

Para o albedo de superfície, é o poder de reflexão que uma superfície pode ter e para determina-la, utilizou-se a Equação 3.

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \quad (3)$$

Em que,

α_{toa} = Albedo planetário ou albedo no topo da atmosfera ponderado;

α_p = Radiação solar refletida pela atmosfera, seu valor varia de 0,025 a 0,04. Recomenda-se o uso de 0,03 (BASTIAANSSEN, 2000);

τ_{sw} = Transmissividade atmosférica.

O albedo planetário (α_{toa}) pode ser determinado através da Equação 4

$$\alpha_{toa} = \sum(w_{\lambda} \cdot \rho_{\lambda}) \quad (4)$$

Em que,

w_{λ} = Coeficiente de ponderação para cada banda.

ρ_{λ} = reflectância planetária de cada banda.

É importante ressaltar que é necessário, antes do cálculo do albedo, alguns tratamentos das bandas. Assim, foram feitas as correções atmosféricas e a conversão do Número Digital (ND), níveis de cinza em refletância para as bandas 2 a 7 (Equação 5) (Missions, 2016; Rodrigues, 2021).

$$\rho_{\lambda i} = \frac{H_{\rho} DN + A_{\rho}}{\cos \theta_{SE} d_r} \quad (5)$$

Em que,

$\rho_{\lambda i}$ = Refletância monocromática para cada banda;

DN = Valor pixel a pixel de cada uma das bandas;

H_{ρ} = Redimensionamento multiplicativo de cada banda (0.00002);

θ_{SE} = Ângulo azimutal;

Lobo, o albedo planetário será expresso conforme a Equação 6.

$$\alpha_{toa} = w_2 \rho_{\lambda 2} + w_3 \rho_{\lambda 3} + w_4 \rho_{\lambda 4} + w_5 \rho_{\lambda 5} + w_6 \rho_{\lambda 6} + w_7 \rho_{\lambda 7} \quad (6)$$

Em que,

α_{toa} = Albedo no topo da atmosfera;

w_n = Pesos para as bandas 2 a 7;

$\rho_{\lambda i}$ = Refletâncias espectrais.

O coeficiente de ponderação de cada banda ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$) é determinado de acordo com a Equação 7.

$$w_{\lambda} = \frac{ESUN_{\lambda}}{\sum ESUN_{\lambda}} \quad (7)$$

Levando-se em conta, o satélite Landsat 8, os valores de irradiância solar espectral no topo da atmosfera (ESUN) e o coeficiente dos pesos (w_n), pode ser obtido pela Tabela 4.

Tabela 4: Coeficientes dos pesos (w_n) para o cálculo do albedo planetário e irradiância solar espectral no topo da atmosfera ESUN ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$) por imagens Landsat 8.

Bandas	Coeficiente dos pesos (w_n)	Irradiância solar espectral no topo da atmosfera ESUN ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$)
Banda 2	0,3	2011,3
Banda 3	0,277	1853
Banda 4	0,233	1562,8
Banda 5	0,143	956,4
Banda 6	0,036	237,8
Banda 7	0,012	80,2

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2023) e Silva *et al.* (2016)

A transmissividade atmosférica pode ser encontrada por meio da Equação 8.

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} z \quad (8)$$

Em que,

z = altitude da área de interesse (pode ser utilizada a altitude da estação meteorológica da área de estudo).

3.3.1.3. Radiação solar de onda curta incidente

A radiação de onda curta incidente pela superfície ($R_{s\downarrow}$) é calculada considerando céu claro e representa o fluxo de radiação solar que atinge superfície da terra, sendo calculada pela Equação 9.

$$R_{s\downarrow} = S \cos(Z) dr \tau_{sw} \quad (9)$$

Em que,

S = constante solar (1367 W/m^2);

Z = ângulo zenital solar;

τ_{sw} = transmissividade atmosférica;

dr = inverso do quadrado da distância relativa Terra – Sol.

O ângulo zenital solar pode ser encontrado através da Equação 10.

$$Z = 90 - \text{Ângulo de elevação solar} \quad (10)$$

O ângulo de elevação solar pode ser encontrado nos arquivos de metadados das cenas.

O inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol (dr) é determinado por meio da Equação 11, podendo variar de 0,97 a 1,03 (ALLEN et al., 2002), sendo adimensionais.

$$dr = 1 + 0,33 * \cos\left(DOY \frac{2*\pi}{365,25}\right) \quad (11)$$

Em que, DOY representa o dia juliano da captura da imagem de satélite.

3.3.1.4. Radiação solar de onda longa incidente

A radiação de onda longa ($R_{L\downarrow}$) representa o fluxo de radiação térmica proveniente da atmosfera e foi calculado pela Equação 12.

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \sigma T^4 \quad (12)$$

Em que,

ε_a = emissividade atmosférica;

σ = constante de Stefan – Boltzman ($5,67.10^{-8}$);

T = temperatura do ar, em °C.

A emissividade atmosférica (ε_a) pode ser determinada pela Equação 13.

$$\varepsilon_a = 0,85(-\ln\tau_{sw})^{0,09} \quad (13)$$

Em que,

τ_{sw} = transmissividade atmosférica.

3.3.1.5. Temperatura e Emissividade de superfície

O cálculo da temperatura superficial dos reservatórios, para o landsat 8, pode ser feito através do modelo proposto por Avdan & Jovanovska (2016).

$$T_{s8} = \frac{BT}{\{1 + [(0,00115BT/1,4388)\ln\varepsilon]\}} \quad (14)$$

onde, BT é a temperatura de brilho, ε é a emissividade.

Para encontrar a temperatura de brilho (BT) é necessário a aplicação da equação 15

$$BT = \frac{K_2}{\ln [(K_1/L) + 1]} - 273,15 \quad (15)$$

Em que,

K1 e K2 = Parâmetros de conversão térmica encontrados no arquivo metadados das cenas utilizadas.

L = Radiância espectral no topo da atmosfera

A radiância espectral no topo da atmosfera (L) pode ser determinada pela equação 16

$$L = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (16)$$

Em que,

L = Radiância espectral no topo da atmosfera,

M_L = Representa o fator multiplicativo específico da banda (metadados das cenas)

Q_{cal} = Banda termal Landsat 8 (Banda 10)

A_L = Fator aditivo específico da banda (metadados das cenas).

Para o cálculo da emissividade, Sobrino *et al* (2004) desenvolveram uma equação, usando o valor médio para a emissividade de solos incluídos na biblioteca espectral ASTER (*advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer*), que é um radiômetro espacial avançado de emissão e reflexão térmica desenvolvido pela NASA. Logo, a expressão final é dada por:

$$\varepsilon = 0.004 \times PV + 0.986 \quad (17)$$

Em que,

PV = Proporção de vegetação

Para o cálculo do Proporção da Vegetação (PV), utilizou-se a Equação 18:

$$PV = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2 \quad (18)$$

Em que,

NDVI = Índice de vegetação encontrado,

NDVI_{mín} = Variação mínima do índice de vegetação

NDVI_{máx} = Variação máxima do índice de vegetação.

Para o cálculo do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) aplicou-se a Equação 19:

$$NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4} \quad (19)$$

Em que,

B5 = Banda 5 do Landsat 8

B4 = Banda 4 do Landsat 8.

Na sequência, serão utilizadas uma série de equações para estimar a temperatura de equilíbrio, o coeficiente de troca térmica, bem como, derivar o fluxo de calor na água.

3.3.1.6. Fluxo de calor na água

Para calcular o fluxo de calor na água utilizou-se a Equação 20.

$$G_0 = \beta(T_e - T_0) \quad (20)$$

Em que,

β = Coeficiente de transferência de calor;

T_e = Temperatura de equilíbrio, em °C;

T_0 = Temperatura da superfície da água, em °C;

O coeficiente de transferência de calor (β) pode ser calculado pela Equação 21.

$$\beta = 4,5 + 0,05 T_0 + (\eta + 0,47)S(W) \quad (21)$$

Em que

T_0 = Temperatura da superfície da água, em °C;

$S(W)$ = função do vento, em m/s;

O η é considerado a inclinação de uma aproximação linear para a relação pressão-temperatura do vapor de água, o qual foi calculado através da Equação 22.

$$\eta = 0,35 + 0,015 T_0 + 0,0012 (T_n)^2 \quad (22)$$

Em que,

T_0 = Temperatura da superfície da água, em °C;

T_n = valor médio temporal da temperatura de equilíbrio.

O valor médio temporal da temperatura de equilíbrio (T_n) foi calculado pela Equação

23

$$T_n = 0,5 \times (T_0 - T_d) \quad (23)$$

Em que,

T_d = a temperatura do ponto de orvalho (°C)

Para o cálculo da função do vento $S(W)$, foi utilizada a Equação 24.

$$S(W) = 3,3 u \quad (24)$$

Em que,

u = Velocidade do vento da região, em m/s.

A temperatura de equilíbrio T_e foi encontrada a partir da Equação 25.

$$T_e = T_d + \frac{R_{\downarrow}}{\beta} \quad (25)$$

Em que,

T_d = Temperatura do ponto de orvalho, em °C;

R_{\downarrow} = Radiação solar de ondas curtas descendente, em W/m²;

β = Coeficiente de transferência de calor.

A temperatura do ponto de orvalho (T_d), Equação 26, pode ser determinada por:

$$T_d = \frac{237,3}{\frac{17,27}{\ln\left(\frac{e_a}{4,596}\right)} - 1} \quad (26)$$

Em que,

e_a = Pressão de vapor do ar, em mmHg;

O cálculo da pressão de vapor do ar foi realizado a partir da Equação 27.

$$e_a = \frac{R_h e_s}{100} \quad (27)$$

Em que,

R_h = Umidade relativa, em (%);

e_s = Pressão de saturação de vapor, em mmHg..

Logo, a pressão de saturação de vapor foi calculada pela Equação 28

$$e_s = 0,6108 \times 2,7183^{\left(\frac{17,27 T_{air}}{237,3 + T_{air}}\right)} \quad (28)$$

Em que,

T_{air} = Temperatura do ar, em °C.

3.3.1.7. Fluxo de calor sensível da água

O fluxo de calor sensível expressa à troca de calor entre a atmosfera e a superfície através de moléculas de ar. Assim, para estimativa do H_{wet} , será aplicada a Equação 29 de acordo com Su (2002).

$$H_{wet} = \frac{\left[(R_n - G_0) - \left(\frac{\rho_a C_p (e_s - e_a)}{r_{ew} \gamma} \right) \right]}{\left(1 + \frac{\Delta}{\gamma} \right)} \quad (29)$$

Em que,

C_p = Capacidade de calor específico do ar (1004 J/Kg°C);

e_s = Pressão de saturação do ar;

e_a = Pressão de vapor do ar;

ρ_a = Massa específica do ar (1,184 Kg/m³) (SHELQUIST, 2009);

γ = Parâmetro psicométrico (0,49 mmHg/°C ou $\gamma = 0,65$ hpa/°C)

r_{ew} = Resistência externa;

Δ = Taxa de variação da pressão de vapor de saturação com a temperatura, em hPa/°C.

Penman (1948) propôs uma equação para o cálculo da taxa de variação da pressão de vapor de saturação com a temperatura (Δ), expressa na Equação 30.

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(237,3 + T_{air})^2} \quad (30)$$

Em que,

T_{air} = Temperatura do ar, em °C.

A resistência externa r_{ew} foi determinada pela Equação 31.

$$r_{ew} = \frac{1}{ku_*} \left[\ln \left(\frac{z-d_0}{z_{0h}} \right) - \Psi_h \left(\frac{z-d_0}{L_w} \right) + \Psi_h \left(\frac{z_{0h}}{L_w} \right) \right] \quad (31)$$

Em que,

k = Constante de Von Kàrman (0,41);

u_* = Velocidade de fricção, em m/s;

z = Altura de referência acima da água (2 m);

d_0 = Altura do deslocamento plano nulo, em metros (0 m) (BRUTSAERT, 2013);

z_{0h} = Altura da rugosidade escalar para transferência de calor, em metros;

Ψ_h = Função de correção de estabilidade para transferência de calor momentânea;

L_w = Comprimento de Obukhov para água, em metros.

A velocidade de fricção (u_*), calculada em condições de atmosfera neutra, pode ser determinada pela Equação 32.

$$u_* = \frac{ku_2}{\ln \left(\frac{z_2}{z_{0m}} \right)} \quad (32)$$

Em que,

u_2 = Velocidade do vento, em m/s;

z_2 = Altura tomada a 2,0 acima do solo;

z_{0m} = Altura de rugosidade para transferência de calor ou coeficiente de rugosidade de cada pixel (0,0002) (BRUTSAERT, 1982).

A altura da rugosidade escalar para transferência de calor (z_{0h}) pode ser estimada através da Equação 33.

$$z_{0h} = \frac{KB^{-1}}{z_{0m}} \quad (33)$$

Em que,

KB^{-1} = Coeficiente adimensional de transferência de calor;

De acordo com Abdelrady *et al.* (2016) se a região de estudo não tenha o valor do coeficiente adimensional de transferência de calor, pode ser utilizado um valor de 0,0001 m para a altura de rugosidade da água.

O comprimento de obukhov (L_w) pode ser determinado pela equação proposta por Monin e Obukhov (1954) conforme a Equação 34.

$$L_w = - \frac{\rho_a u_*^3}{\frac{kg}{\lambda} 0,61 (R_n - G)} \quad (34)$$

Em que,

g = Aceleração da gravidade (9.81 m/s²);

ρ_a = Massa específica do ar (1,184 Kg/m³) (SHELQUIST, 2009);

R_n = Radiação líquida, em W/m²;

λ = Calor latente de evaporação.

Para determinar o calor latente de evaporação (λ) a Equação 35 pode ser utilizada

$$\lambda = (2,501 - 0,00237 T_{air})10^6 \quad (35)$$

3.3.1.8. Correção de estabilidade para transferência de calor momentânea

Segundo Bastiaanssen *et al.* (1998) e Allen *et al.* (2002), para determinar este parâmetro faz-se necessário avaliar as condições abaixo (Equações 36, 37 e 38):

I. Se $L_w < 0$, atmosfera instável;

$$\Psi_h = (1 - 16 \frac{z}{L_w}) \quad (36)$$

II. Se $L_w > 0$, atmosfera estável;

$$\Psi_h = -5 \left(\frac{z}{L_w}\right) \quad (37)$$

III. Se $L_w = 0$, atmosfera neutra;

$$\Psi_h = 0 \quad (38)$$

3.3.1.9. Evaporação diária

Por fim, utilizou-se a Equação 1 para determinar o fluxo de calor latente sobre superfícies líquidas, para então determinar a fração de evaporação (EF), Equação 39 (ABDELRADY *et al.*, 2016).

$$EF = \frac{\lambda E}{(R_n - G_0)} \quad (39)$$

Em que,

R_n = Radiação líquida, em W/m^2 ;

G_0 = Fluxo de calor da água, em W/m^2 ;

λE = Fluxo de calor latente sobre a água, em W/m^2 ;

Por conseguinte, foi calculado a quantidade de calor latente absorvido pelo corpo hídrico ($\lambda E_{diária}$), utilizando a Equação 40:

$$\lambda E_{diária} = 86400 \times 10^3 \times EF (R_n - G_0) \quad (40)$$

E assim, a evaporação diária (E) foi encontrada através da Equação 41:

$$E = \frac{\lambda E_{diária}}{(\lambda \times \rho_w)} \quad (41)$$

Em que,

ρ_w = massa específica da água, em kg/m^3 (1000)

λ = fluxo de calor latente sobre a água ($2.47 \times 10^6 J/kg$) (Jia *et al.*, 2009).

3.4. Análise estatística

Foram utilizados dois parâmetros para análise do desempenho do modelo: A Raiz do Erro médio quadrado (RMSE) e o coeficiente de determinação (R^2). O RMSE foi obtido com o uso do *software* estatístico *Jamovi* versão 2.5.5 e o R^2 por meio do *excel*.

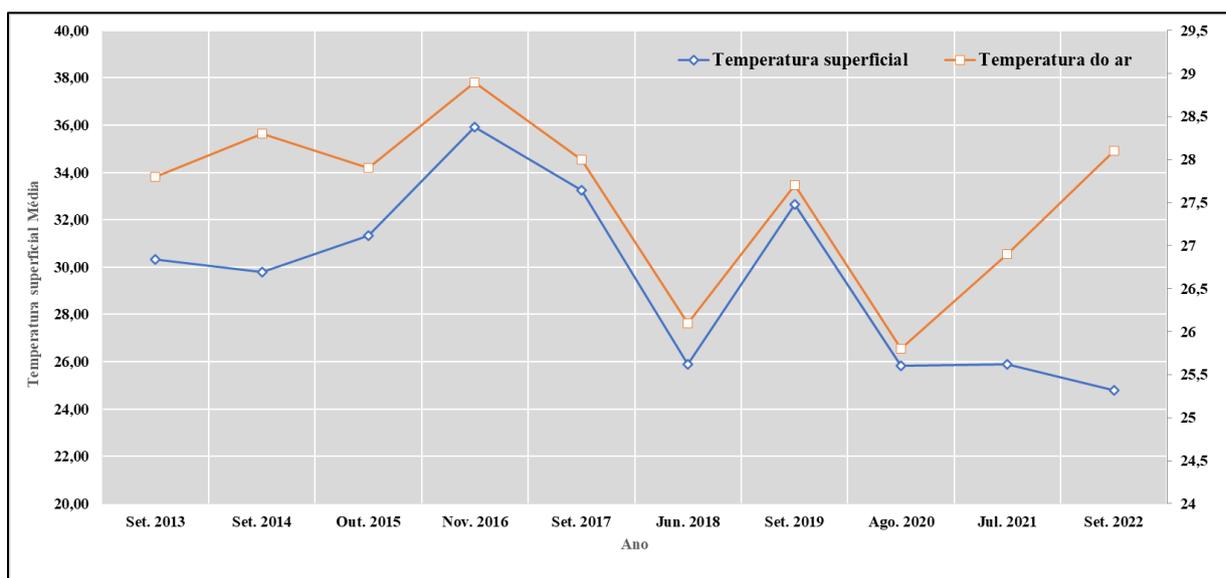
4. RESULTADOS

4.1 Uso do Sensoriamento Remoto para mensurar temperatura superficial

Conforme a figura 3, o reservatório registrou a maior temperatura em novembro de 2016, com 35,93°C, período que registra uma menor precipitação. A menor temperatura foi em setembro de 2022, com 24,79°C, mês que marca o início da estação seca, tendo a estação chuvosa ligeira influência. Ambos acima e abaixo da média anual, respectivamente.

Observa-se ainda que, a temperatura medida pela estação climatológica de Quixeramobim, apresenta semelhança com a temperatura medida por sensoriamento remoto, o qual mostrou temperaturas elevadas no mesmo período (novembro de 2016) com 28,9°C na temperatura de estação e conforme mencionado acima, 35,93°C. Comprovando que uma temperatura do ar elevada, auxilia no processo de aquecimento do espelho d'água.

Figura 3: Temperatura superficial média (°C) por sensoriamento remoto e temperatura média do ar (°C) medida pela estação climatológica de Quixeramobim, no reservatório Quixeramobim, Ceará (2013-2022).



Fonte: Autora (2024).

Na Tabela 4, os valores da emissividade do espelho de água variaram de 0,986 a 0,99 para a maioria das imagens do período analisado. A emissividade da água depende do valor do NDVI. Desse modo, valores menores que zero são adequados para este parâmetro quando se

trata da presença de água. Assim, a emissividade assume valor de 0,991, próximo de 1 (AVDAN; JOVANOVSKA, 2016), corroborando com os valores obtidos neste trabalho.

A feição vegetação apresenta valores altos de NDVI quando no estado úmido e valores menores quando a região apresenta os efeitos de estresse hídrico, decorrente do período de estiagem (RIBEIRO, *et al.*, 2007). Dessa forma, os valores de NDVI variaram de -0,327 a 0,637. Ainda conforme Ribeiro *et al.* (2007), as áreas cobertas por água apresentam valores positivos próximos de zero para as áreas que continuam cobertas e valores negativos para as áreas que secaram e apresentam solo exposto.

O albedo superficial, marcou valores negativos e até valores maiores que zero e menor que 1 %, tendo em vista que se trata do albedo em superfícies hídricas. Neste caso, esse parâmetro possui a tendência de assumir valores menores. Segundo Meinander *et al.*, 2008 e Câmara *et al.*, 2021, o albedo seja alto ou baixo, exerce alterações significativas no balanço energético e radiativo da superfície da terra.

Ainda conforme a Tabela 4, constata-se que o açude Quixeramobim atingiu valores máximo do albedo de 12,9% a 39%. O maior valor médio foi encontrado no ano de 2015, com um percentual de 23,3%. Enquanto o menor valor (9,2%) foi encontrado em 2018. Segundo Câmara *et al.* (2021), conforme a presença da umidade, o albedo diminui, tendo em vista que o albedo em solo seco é maior do que o da água, em que este é significativamente menor, como já mencionado. Dessa forma, a presença de valores máximos até 39% no reservatório deve-se à presença do solo exposto em áreas onde o volume de água estava em estado muito crítico (0% a 10%) da sua capacidade, conforme a Resolução CONERH N° 3, de 25 de julho de 2020.

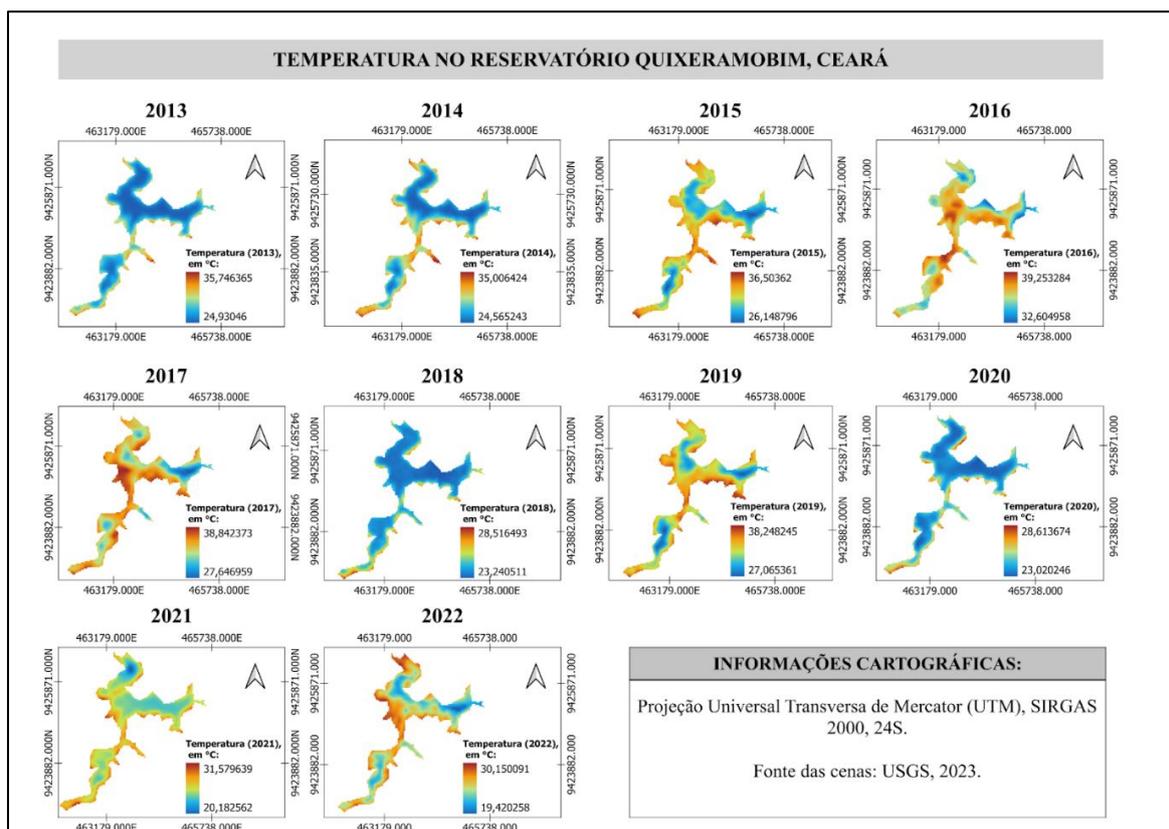
Tabela 5: Emissividade de superfície, índice por diferença normalizada (NDVI) e albedo de superfície do reservatório Quixeramobim (2013-2022).

Data das cenas	Emissividade superficial		NDVI		Albedo da superfície hídrica		
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Média
19/09/2013	0,986	0,989	-0,194	0,608	0,029	0,129	0,079
22/09/2014	0,986	0,99	-0,170	0,568	-0,031	0,233	0,101
27/10/2015	0,986	0,989	-0,327	0,637	0,182	0,284	0,233
14/11/2016	0,986	0,99	-0,195	0,586	0,072	0,357	0,215
30/09/2017	0,986	0,99	-0,151	0,599	-0,033	0,273	0,120
13/06/2018	0,986	0,99	-0,262	0,608	-0,036	0,221	0,092
20/09/2019	0,986	0,989	-0,281	0,598	-0,024	0,299	0,137
05/08/2020	0,986	0,989	-0,296	0,605	-0,038	0,309	0,135
23/07/2021	0,986	0,989	-0,209	0,577	-0,035	0,391	0,178
20/09/2022	0,986	0,99	-0,222	0,611	-0,023	0,327	0,152

Fonte: Autora (2024).

A Figura 4 exibe a variabilidade espacial da temperatura no reservatório Quixeramobim. Conforme a mesma, verifica-se que a temperatura do espelho de água apresenta maiores valores nas áreas com maior albedo da superfície. Ou seja, nas bordas do reservatório e na área central, onde há menor profundidade da água ou nos períodos de menores precipitações registradas na estação seca. Além disso, com exceção dos anos 2018, 2020, 2021, e 2022, os demais períodos analisados resultaram em temperaturas acima de 28 °C, ultrapassando a média do município de Quixeramobim.

Figura 4: Variabilidade espacial da temperatura no reservatório Quixeramobim (2013-2022).



Fonte: Autora (2024).

4.2 Evaporação do reservatório com o uso do modelo *AquaSEBS* (*Aqua Surface Energy Balance System*)

Nos sistemas naturais, o sol emite radiação de ondas curtas, que é parcialmente refletida na atmosfera ou na superfície. Além disso, uma parte da radiação é limitada de volta para a atmosfera como a radiação de ondas longas. Essa divisão da radiação depende do albedo, da emissividade, temperatura da superfície e temperaturas do ar. Parte da radiação recebida que é absorvida fornece energia para a mudança de fase da água líquida em vapor, sendo transmitida de volta à atmosfera por radiação de ondas longas, ou eleva a temperatura e aumenta o fluxo de calor no solo (HECK *et al.*, 2020).

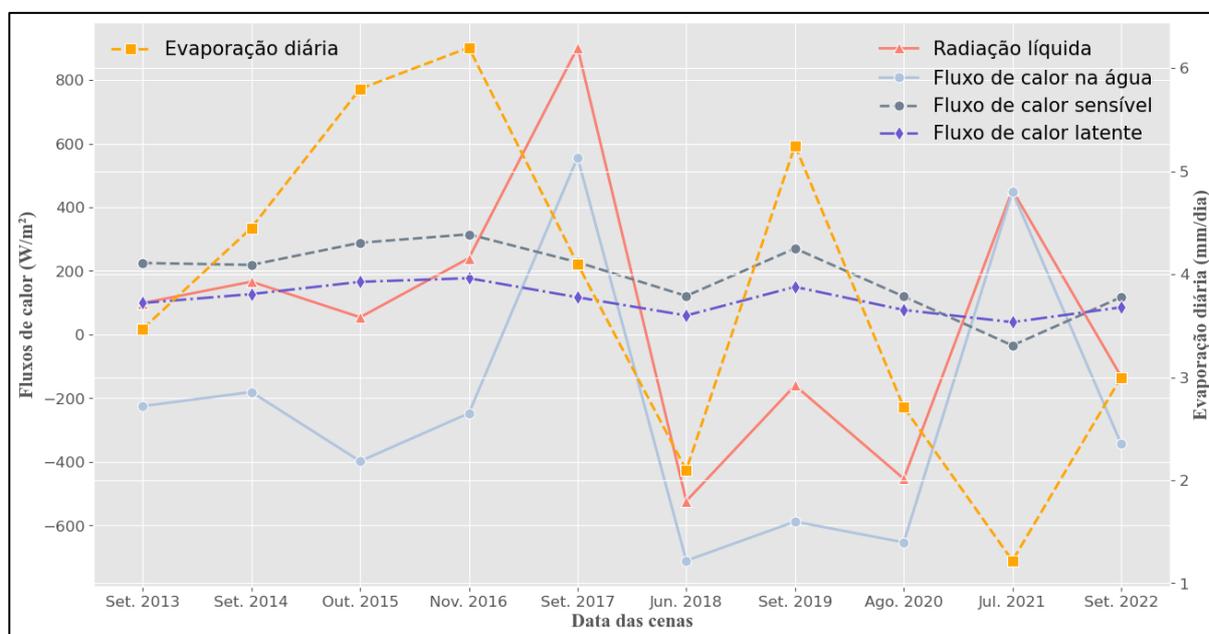
Os fluxos de calor, investigados no modelo *AquaSEBS*, estão representados na figura 5. Conforme a mesma, verifica-se que o fluxo de calor latente se manteve constante, com baixa variação dos valores encontrados ao longo do período analisado. Isso ocorre devido a essa variável representar o equilíbrio entre a radiação líquida e os fluxos de calor sensível na água.

A evaporação teve o segundo maior saldo (5,80 mm/dia) em 2015, enquanto a radiação líquida foi menor, com um valor de 54,45 W/m². Já o fluxo de calor sensível foi consideravelmente inferior a zero na mesma data. O maior valor médio evaporado foi encontrado no ano de 2016, onde é possível observar, na Figura 3, um crescimento dos valores do fluxo de calor da água e radiação líquida.

Por outro lado, o maior saldo evaporado não foi encontrado no período (julho de 2021) onde resultou em maiores valores de radiação líquida e fluxo de calor na água, indicando um possível fator de atenuação do efeito da evaporação, o que pode ser explicado por se tratar do mês de julho, período que ainda tem leve influência do inverno, portanto sendo influenciado pelas variáveis meteorológicas como velocidade dos ventos, temperatura, precipitação e umidade relativa do ar

Ainda em relação ao ano de 2021, a imagem utilizada compreendeu o mês de julho que apresenta volumes precipitados, embora em menor quantidade, com média mensal de 23,5 mm, conforme dados da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME (2021). Nesta data identificou-se que mesmo com valores elevados das duas variáveis já mencionadas, a evaporação média diária teve menor valor do estudo. Isto possivelmente pode ser explicado pelas variáveis meteorológicas, por sua variabilidade influenciar diretamente no processo de evaporação (Mesquita et al., 2020).

Figura 5: Relação Evaporação (mm/dia) e fluxos de calor(W/m²) (2013 – 2022)



Fonte: Autora (2024).

Na Figura 6 é apresentado a variação da evaporação diária no espelho d'água obtida a partir do modelo *AquaSEBS*. Conforme a mesma, verifica-se que, semelhante às temperaturas elevadas, os maiores valores evaporados no açude Quixeramobim, foram encontradas nas bordas e na parte central do reservatório. Isso ocorre pelo maior contato da água com o solo, nas bordas, e devido a menores profundidades da água em determinadas áreas do reservatório (Rodrigues *et al.*, 2019).

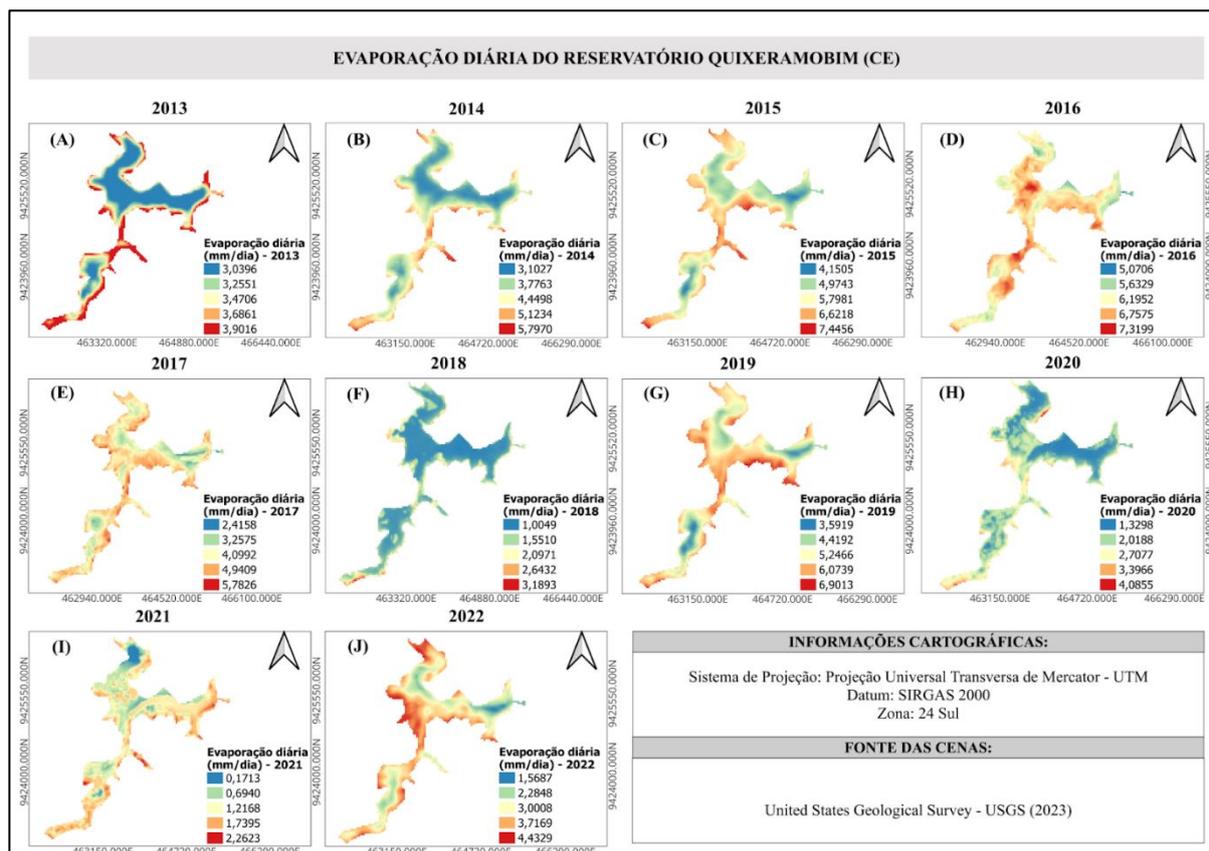
Além disso, é possível observar que houve alta variabilidade da evaporação para o período de 2013 a 2022. Os dois maiores valores evaporados encontrados de 2015 e 2016, variaram de 4,15 mm a 7,44mm, e de 5,07 mm a 7,32 mm, respectivamente. Enquanto as cenas de 2018 e 2020, apresentaram valores evaporados inferiores a 3 mm em grande parte do espelho d'água, com exceção para as bordas do mesmo. Em geral, a evaporação encontrada para o reservatório Quixeramobim apresentou valores mínimos e máximos de 0,17 mm e 7,44 mm, respectivamente.

Rodrigues (2020) em seu estudo sobre a evaporação no semiárido do nordeste brasileiro obteve uma média de 4,5 mm/dia e 4,6 mm/dia no ano de 2017 para os reservatórios estudados, o que corrobora com o encontrado para o açude Quixeramobim no mesmo ano com 4,1 mm/dia. No entanto, no ano de 2018 ambos os estudos trabalharam com o mesmo mês (junho) e em Rodrigues (2020) a média variou de 4,8 mm/dia a 5mm/dia, enquanto que no reservatório Quixeramobim, a média chegou a 2,1 mm/dia. Isso se deve ao fato de que a evaporação depende de outras variáveis, o que nos leva a uma análise do volume de água no reservatório.

Segundo dados da FUNCEME, o ano de 2018 foi o maior volume do reservatório, que chegou a 7.150.000m³, o que coincide com o espelho d'água do açude na Figura 7, que foi o maior no período analisado. Ou seja, em áreas com menor exposição do solo, a evaporação também diminui. Observando o ano de 2016, em que a evaporação foi a mais elevada, o reservatório secou, chegando a um volume mínimo (FUNCEME, 2016) estando em conformidade com o espelho d'água, que mostrou intensa variação da evaporação principalmente das áreas centrais, devido à alta exposição do solo.

Ressalta-se que, a evaporação da superfície da água, além de depender da radiação solar, também é influenciada por outras variáveis que foram utilizadas no modelo *AquaSEBS*, como a umidade relativa do ar, temperatura e velocidade do vento.

Figura 6: Variação espacial da evaporação diária no reservatório Quixeramobim, Ceará (2013-2022).



Fonte: Autora (2024).

4.3 Análise estatística e desempenho do modelo

O método do AquaSEBS de estimar a evaporação é um dos mais complexos, em comparação com outros modelos existentes. Tal fato torna o modelo, também, mais preciso, conforme exposto em Rodrigues *et al.* (2021). A Tabela 4 apresenta dados estatísticos da evaporação do reservatório Quixeramobim, a partir do comparativo com dados de referência do Evaporímetro de Piché da Estação Morada Nova, obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O maior valor médio evaporado foi observado no ano de 2016, quando também ocorreu um aumento nos valores de fluxo de calor da água e radiação líquida. Já os maiores saldos de evaporação registrados pelo modelo AquaSEBS foram nos anos de 2015 (5,8mm/dia) e 2016 (6,2 mm/dia), enquanto o evaporímetro de Piché marcou seus maiores valores em 2014 (9,8 mm) e 2015 (9,6 mm).

Conforme a Tabela 4, verifica-se que o modelo *AquaSEBS* forneceu desempenho moderado da estimativa da evaporação, com R^2 igual a 0,5 e erro RMSE de 1,06

mm/dia. Abdelrady *et al.* (2016) aplicaram o modelo em um reservatório no clima tropical da África, no qual o modelo estimou RMSE de 1,50 mm/dia. Rodrigues (2021) obteve RMSE de 1,25 mm/dia em um dos reservatórios, estando próximos ao encontrado no presente estudo.

O coeficiente de correlação encontrado corrobora com os resultados obtidos por Rodrigues *et al.* (2021), que em seu estudo verificou-se valores de R^2 igual ou superior a 0,5 para a evaporação dos reservatórios investigados.

Portanto, é importante salientar que, para uma melhor análise dos dados obtidos no presente trabalho com a evaporação de referência, seria necessário a utilização de evaporímetros de Piché e tanques Classe A instalados próximo ao reservatório Quixeramobim. Dessa forma, seria possível atestar com maior precisão a acurácia do método escolhido para estimar a evaporação. Nos estudos realizados por Abdelrady *et al.* (2016) os dados utilizados foram obtidos mais próximos aos reservatórios, até mesmo *in loco* e Rodrigues (2020) utilizou tanque classe A, o que resultou numa melhor precisão dos resultados.

Tabela 6: Comparativo entre a evaporação do modelo de estimativa com os dados de evaporação da estação de Morada Nova, Ceará (2013-2022).

Data da imagem	Evaporação diária (mm/dia)	Evap. Piché (mm/dia) Estação Morada Nova	R	R^2	RMSE
19/09/2013	3,47	7,3	0,7	0,5	1,06
22/09/2014	4,45	9,8			
27/10/2015	5,80	9,6			
14/11/2016	6,20	8,6			
30/09/2017	4,10	8,9			
13/06/2018	2,10	6,9			
20/09/2019	5,25	sem dado			
05/08/2020	2,71	8,5			
23/07/2021	1,22	sem dado			
20/09/2022	3,00	sem dado			

Fonte: Autora (2024).

4.4 Influência das variáveis meteorológicas na evaporação

Analisando a representação dos dados nas figuras 8, 9, 10, foi possível extrair discussões e considerações acerca dos valores de evaporação medidos sobre o reservatório Quixeramobim em relação a influência de variáveis meteorológicas sobre a evaporação. Considerou-se, portanto, as variantes climáticas como umidade relativa do ar, temperatura do ar e velocidade dos ventos, extraídas da estação de Morada Nova.

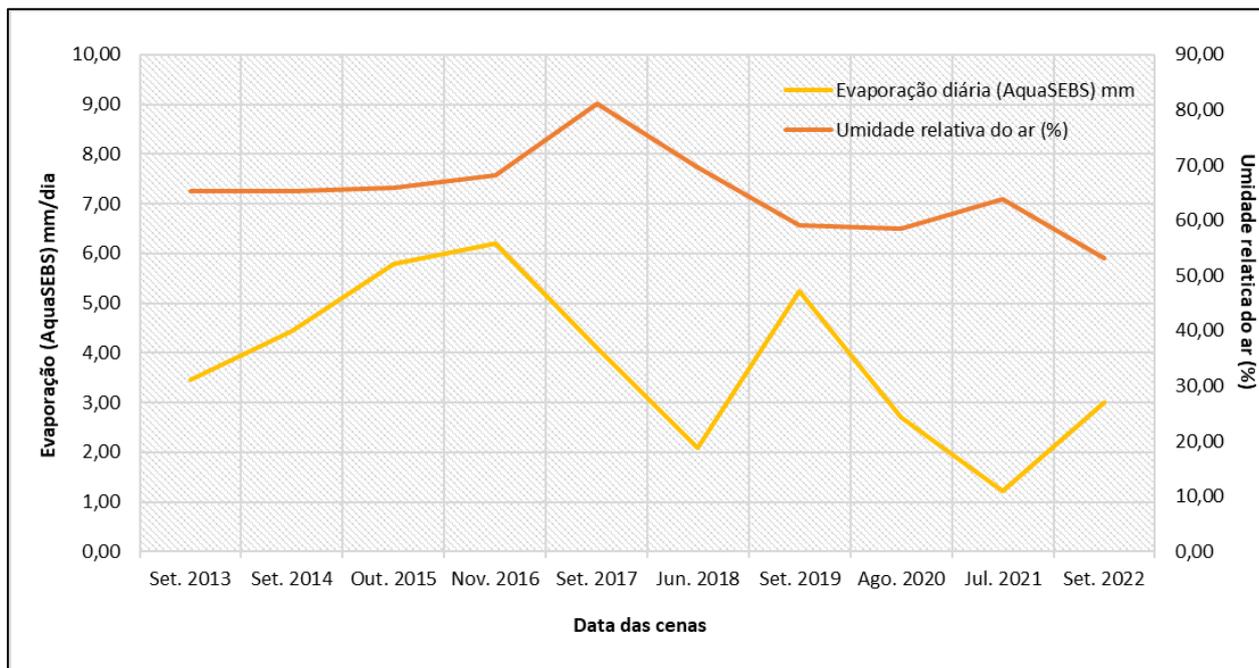
De acordo com a COGERH (2011) a umidade relativa média anual do reservatório é de 65%. Além disso, conforme o inventário ambiental do açude Quixeramobim, de setembro a novembro é o período que comumente a umidade relativa está baixa, o que explica o menor de valor de umidade da série histórica ser em setembro de 2022.

Observando a figura 8, a relação da evaporação com a umidade relativa do ar é baixa, estando inversamente proporcionais. Podemos ver que no ano de julho de 2021 foi o período em que ficou mais claro essa relação, pois enquanto a umidade relativa subiu para 63,87 %, a evaporação chegou a sua média mínima com 1,22mm/dia. A umidade do ar refere-se à quantidade de vapor d'água no ar e precisa ser inferior à umidade da superfície do mar em evaporação para que a evaporação ocorra (YU, 2007).

Dantas (2017), em seu estudo no açude Castanhão, no Ceará, obteve baixa correlação entre a evaporação e a umidade com um $R^2 = 0,0216$, enquanto no presente estudo obteve-se um $R^2 = 0,0249$ afirmando que as variáveis estão minimamente correlacionadas. Com o aumento da temperatura do ar, torna-se ainda maior a quantidade de vapor d'água presente no mesmo volume de ar, ou seja, aumentando a temperatura do ar, aumenta a tensão de saturação de vapor à superfície e diminui a umidade relativa do ar, como efeito indireto (VAREJÃO, 2006).

No processo de evaporação, as moléculas escapam do líquido dependendo da sua tensão de vapor, enquanto que no processo de umidade as moléculas retornam ao líquido dependendo da tensão de vapor do ambiente. Logo, quanto maior o déficit de umidade, maior será o número de moléculas liberadas e, conseqüentemente, a intensidade de evaporação será elevada.

Figura 7: Relação evaporação (mm/dia) e umidade relativa do ar (%) (2013-2022).

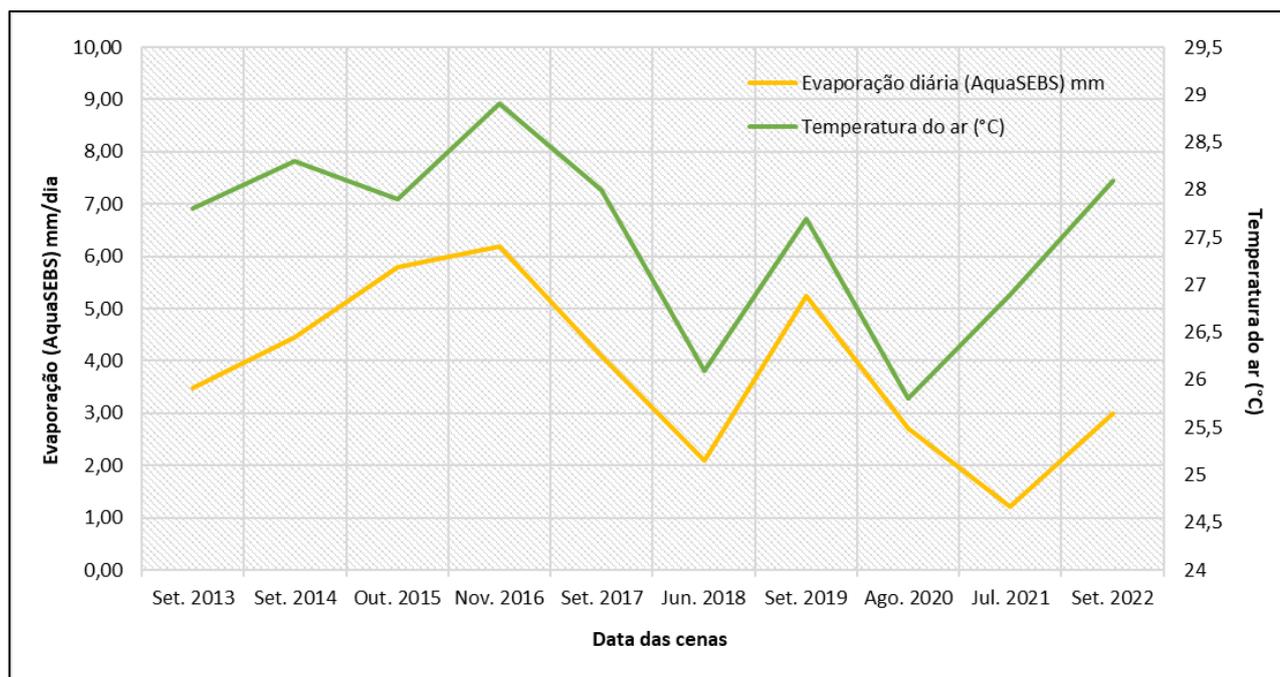


Fonte: Autora (2024).

Quanto a temperatura do ar, ao observar a figura 8, podemos ver que há uma boa relação entre as duas variáveis. Ou seja, à medida que o valor de temperatura média aumenta, a evaporação também tende a aumentar. Fica ainda mais visível ao verificar os valores de temperatura máxima e a evaporação máxima, sendo ambos em novembro de 2016 com 28,9°C e 6,2 mm, respectivamente. Embora os valores mínimos não tenham sido no mesmo ano, ao qual, a temperatura média mínima foi de 25,8 °C em agosto de 2020 e a evaporação mínima foi 1,22mm em julho de 2021, ficaram bem relacionadas graficamente, seguindo o mesmo padrão. Assim como afirmado por Ward (2004), quanto maior for a temperatura do ar, maior é a sua tensão de vapor de saturação e mais vapor de água pode conter. A correlação entre as duas variáveis foi mediana com $R^2 = 0,5134$, estando bem próximo do encontrado por Dantas (2017) no açude Castanhão, que obteve $R^2 = 0,5393$.

Além disso, o valor de temperatura do ar também está diretamente associado à entrada de energia solar. Devido à variação da intensidade da radiação solar recebida na superfície, a mesma produz também uma alteração na temperatura da superfície, modificando a energia cinética das moléculas (RODRIGUES, 2009).

Figura 8: Relação Evaporação (mm/dia) e temperatura do ar (°C) (2013-2022).



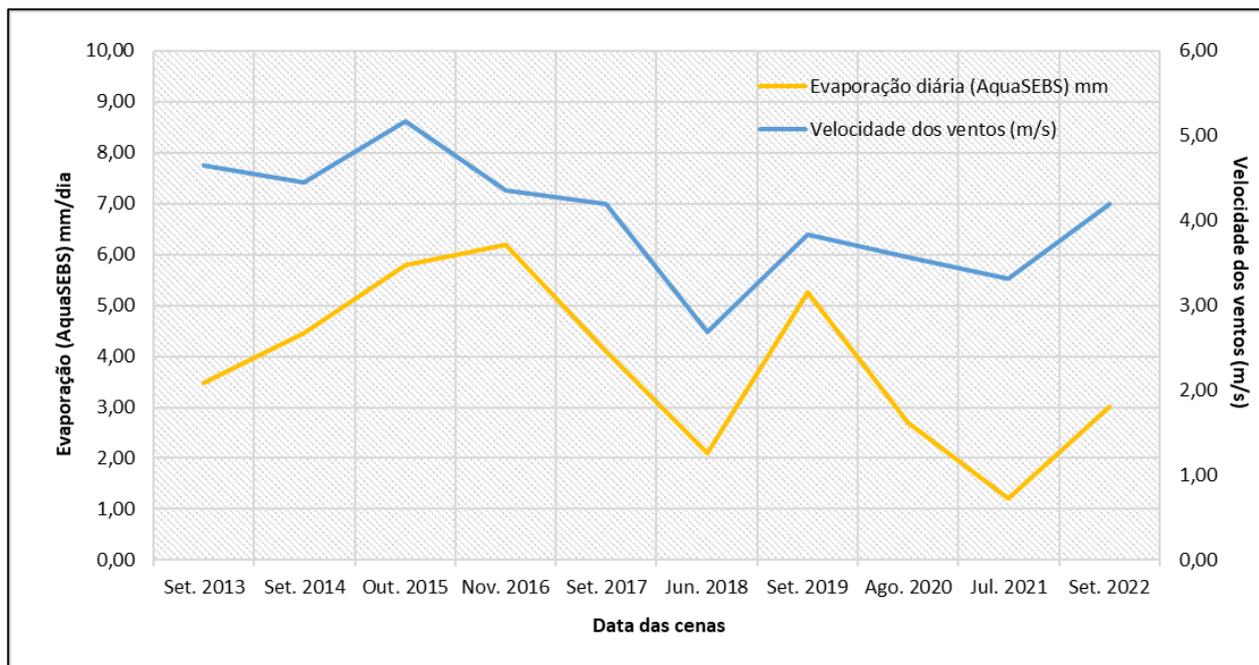
Fonte: Autora (2024).

Realizando uma análise sobre a influência da velocidade dos ventos na evaporação, estudos prévios mostraram que as taxas crescentes ou decrescentes de demanda evaporativa são influenciadas principalmente por tendências no componente aerodinâmico, como os efeitos da velocidade do vento (MCVICAR, 2012).

O gráfico 4, expressa a relação entre a velocidade dos ventos e a evaporação. Observa-se que há uma boa relação entre as variáveis, provando que esta contribui nos processos de evaporação, conforme esperado. Além disso, no período seco a velocidade do vento tende a aumentar sendo de julho a novembro o período de maior intensidade (COGERH, 2011). Verifica-se que no mês de junho de 2018 conforme a velocidade dos ventos diminui, a evaporação segue a mesma linha, bem como, crescendo assim que os ventos se intensificam.

Segundo Yu (2007) o movimento turbulento do ar relacionado à velocidade do vento e à rugosidade da superfície facilita a evaporação, porque afasta o vapor de água da superfície aquática. Isto é, os ventos influenciam diretamente uma vez que remove o ar úmido que esta em contato direto com a superfície da água. A correlação entre as duas variáveis resultou em um $R^2 = 0,5017$, estando na média assim como a temperatura do ar.

Figura 9: Relação Evaporação (mm/dia) e velocidade dos ventos (m/s) (2013-2022).



Fonte: Autora (2024).

5. CONCLUSÃO

Com base na análise realizada no Reservatório Quixeramobim no período que compreendeu os anos de 2013 a 2022, foi possível concluir que a temperatura superficial do reservatório possui uma variabilidade que depende de fatores como o albedo de superfície. No período seco, as bordas e áreas centrais do reservatório ficam mais expostas, à medida que o açude reduz sua capacidade, aumentando o albedo superficial e, conseqüentemente, a temperatura de superfície.

Quanto a evaporação do reservatório, observou-se que o modelo AquaSEBS faz o uso de uma gama de variáveis para a mais precisa resposta, que influenciam diretamente em seu resultado final. Entender a relação entre a radiação líquida e os fluxos de calor foi fundamental na compreensão do comportamento da evaporação. Ao passo que os fluxos de calor e a radiação líquida se elevam, a evaporação segue a mesma linha, assim como em sua redução. No entanto, em seu menor saldo (julho de 2021), as variantes não seguiram o mesmo fluxo, fato esse que decorre da influência das variáveis meteorológicas.

O reservatório apresentou alta variabilidade de seu espelho d'água, conforme análise espacial, demonstrando valores elevados nos anos de 2015 e 2016 (5,8mm/dia e 6,2mm/dia, respectivamente), coincidindo com outros estudos em regiões semiáridas. Além disso, ficou evidente que conforme o nível de água do reservatório variava, a evaporação na superfície seguia da mesma forma, devido a variação da profundidade e o contato da água com o solo, seguindo a tendência da temperatura superficial da água.

Os dados estatísticos obtidos a partir do comparativo do modelo com o evaporímetro de Piché de Morada Nova mostrou moderada correlação com R^2 igual a 0,5 e erro RMSE de 1,06 mm/dia. Demonstrando proximidade com os valores encontrados na literatura. Ressalta-se que a estação climatológica não era a mais próxima. Mas, foi escolhida devido a maior disponibilidade de dados em relação a estação de Quixeramobim.

A evaporação também é influenciada por variáveis meteorológicas. A umidade relativa do ar mostrou-se inversamente proporcional, explicada pelo fato de que a umidade precisa reduzir para que a evaporação ocorra. A temperatura do ar foi a variável que melhor relacionou-se com a evaporação, devido a sua associação com a entrada de energia solar na superfície, o que intensifica os processos de evaporação. A velocidade dos ventos também demonstrou boa relação, pois o mesmo afasta a umidade da superfície da água, bem como promove uma turbulência na superfície da água, intensificando o processo de evaporação.

Por fim, em decorrência da elevada quantidade de variáveis hidrometeorológicas para o desenvolvimento do modelo, a análise teria melhor acurácia com dados de uma estação mais próxima, bem como, de um tanque classe A ou de medição direta no reservatório.

REFERÊNCIAS

- ABDELRAKY, Ahmed et al. **Surface energy balance of fresh and saline waters: AquaSEBS**. Remote sensing, [s.l.] v. 8, n. 7, p. 583, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos: Informe 2009**. Brasília: ANA, 2009. Disponível em: <http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-deconteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informe-conjuntura-2009.pdf>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2a ed. Arnaldo Augusto Setti; Jorge Enoch Furquim Werneck Lima; Adriana Goretti de Miranda Chaves; Isabella de Castro Pereira. Brasília, 2001. 328 p;
- ALLEN, R. G. et al. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land)** — Advanced Training and Users Manual—Idaho Implementation (Version 1.0). The Idaho Department of Water Resources: Boise, ID, USA, 2002.
- ALLEN, R. G. **Crop Evapotranspiration**. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 56, 2006.
- ANDRADE, C. M.; MARQUES, L. de S. **Semiárido brasileiro: alguns desafios**. Diversitas Journal, Santana do Ipanema/AL. vol.2, n. 2, p. 279-283, mai./ago. 2017.
- AVDAN, Ugur; JOVANOVSKA, Gordana. **Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data**. Journal of Sensors, [s.l.] v. 2016, 2016.
- BARBOSA, A.H.S. et al. **Revista Brasileira de Geografia Física** 14, 04, 2220- 2241, 2021.
- BASTIAANSEN, Wim GM et al. **A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL)**. 1. Formulation. Journal of hydrology, [s.l.] v. 212, p. 198-212, 1998.
- BASTIAANSEN, Wim GM. **SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey**. Journal of hydrology, [s.l.] v. 229, n. 1-2, p. 87-100, 2000.
- BLANEY, H. F., & CRIDDLE, W. D. (1962). **Determining consumptive use and irrigation water requirements** (No. 1275). US Department of Agriculture.
- BRUTSAERT, Wilfried. **Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2013. BOWEN, Ira Sprague. **The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface**. Physical review, [s.l.] v. 27, n. 6, p. 779, 1926.

CAMARGO, Â. PD, Marin, FR, Sentelhas, PC, & Picini, AG (1999). **Ajuste da engenharia de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplificação térmica diária.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, 7 (2), p. 251-257.

CÂMARA, DOS SANTOS, et al.; **ABRHidro - ANAIS - ALBEDO E ÍNDICE ESPECTRAL DE ÁGUA NO RESERVATÓRIO POÇO DA CRUZ - PE E SEU ENTORNO UTILIZANDO IMAGENS ORBITAIS.** Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=13680>>. Acesso em: 6 jun. 2024.

CHINYEPE, Andrew. **Satellite remote sensing of surface water evaporation over Lake Mutirikwi, Zimbabwe.** 2010. Tese de Doutorado. University of Zimbabwe.

COGERH. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário Ambiental do Açude Quixeramobim.** Volume único. Fortaleza, Ceará. Dezembro, 2011.

CONERH. Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Ceará. **Resolução nº3 de 25 de junho de 2020.** Secretaria dos Recursos Hídricos. Ceará. 2020a.

DANTAS, S. P. (2017). **Açudagem no nordeste brasileiro e no Ceará: estimativa de evaporação do açude Castanhão em um ano seco.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

DE ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A. **A method to assess hydrological drought in semi-arid environments and its application to the Jaguaribe River basin, Brazil.** Water International, v. 41, p. 213-230, 2016

DE ARAÚJO, J. C.; MEDEIROS, P. H. A. **Impact of dense reservoir networks on water resources in semiarid environments.** Australian Journal of Water Resources, v. 17, p. 87-100, 2013.

FONTES, A.S. **Estudo da evaporação em reservatórios situados em região semiárida: uso de bacia experimental.** 2005. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/9987>. Acesso em: 02 de jul. de 2023.

FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2013. Disponível em: <<http://www.funceme.br/?p=1412>>. Acesso em: 02 julho. 2023.

FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2016. Disponível em: <<http://www.funceme.br/?p=1412>>. Acesso em: 01 juNHO. 2023.

GLEICK, Peter H.; HOWE, Charles W. **Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources.** Climatic Change, [s.l.] v. 31, n. 1, p. 119-122, 1995.

HECK, K.; et al. **Influence of Radiation on Evaporation Rates: A Numerical Analysis.** *Water Resour. Res.* 2020.

IPECE, Instituto de Pesquisa e Estatística Econômica do Ceará -. **Ceará em números 2011.** Disponível em: http://www2.ipece.ce.gov.br/publicacoes/ceara_em_numeros/2011/infra/index.htm. Acesso em: 03 jul. 2023.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERAÇÃO PARA AGRICULTURA. **Projeto Áridas.** Disponível em: <http://www.iica.org.br/2001/projaridas/> Acesso em 10 maio de 2023

KAN, A.; DIAS, N. L. **Evaporação, evapotranspiração e evaporação líquida no reservatório de Foz do Areia.** Akemi Kan e Nelson L. Dias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos.* 1999. p. 29-38, v. 4, n. 3. Disponível em: Acesso em: 02 de julho de 2023.

L. Jia et al., “**Regional estimation of daily to annual regional evapotranspiration with MODIS data in the Yellow River Delta wetland,**” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 13, no. 10, pp. 1775–1787, Oct. 2009.

LIMA NETO, I. E., et al. **Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin.** *Hydrol. Sci. J.*, v. 56, p. 319– 333, 2011.

LINACRE, Edward T. **Data-sparse estimation of lake evaporation, using a simplified Penman equation.** *Agricultural and Forest Meteorology*, [s.l.] v. 64, n. 3-4, p. 237-256, 1993.

LINACRE, Edward T. **A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone.** *Agricultural meteorology*, [s.l.] v. 18, n. 6, p. 409-424, 1977.

LOHMANN, S. et al. **Long-term variability of solar direct and global radiation derived from ISCCP data and comparison with reanalysis data.** *Solar Energy*, v.80, n.11, p.1390-1401, 2006.

MALVEIRA, V. T. C.; et al., **A. Hydrological impact of a highdensity reservoir network in the semiarid north-eastern Brazil.** *J. of Hydrol. Engineering*, v. 17, n. 1, p. 109–117, 2012.

MALARET, Erick. **Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper data quality analysis.** *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, [s.l.] v. 51, p. 1407-1416, 1985.8

MAMEDE, G. L. et al. **Overspill avalanching in a dense reservoir network.** *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Washington, v.109, n.19, p.7191- 7195, 2012.

MCVICAR, T.R. et al. **Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near surface wind speeds: Implications for evaporation.** J. Hydrol. 416–417, 182–205 (2012)

MEDEIROS, A.D.L.M. **Avaliação de métodos de estimativa de evaporação no reservatório armando Ribeiro Gonçalves em Itajá/RN.** 2019. 45f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, Centro de Engenharias e Ciências Ambientais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/3520>. Acesso em: 19 mai. 2020.

MESQUITA, Janine Brandão et al. (2020). **The influence of hydroclimatic conditions and water quality on evaporation rates of a tropical lake.** Journal of Hydrology, v. 590, p. 125456.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Agenda 21 brasileira – Bases para discussão.** Brasília, 2000. 196 p;

MISSIONS, USGS Landsat. Using the USGS Landsat8 Product. US Department of the Interior-US Geological Survey–NASA, 2016.

MORTON, Fred I. (1983). **Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology.** Journal of hydrology, v. 66, n. 1-4, p. 1-76.

OLIVEIRA, G. X. S. **Relações entre medidas de evaporação de superfícies de água livre por evaporímetros e estimativas por métodos meteorológicos em duas regiões do Estado de São Paulo.** Piracicaba: ESALQ/USP, 2009. 108p.

PENMAN, Howard Latimer. **Natural evaporation from open water, bare soil and grass.** Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, [s.l.] v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948.

PRIESTLEY, Charles Henry Brian; TAYLOR, Robert Joseph.(1972). **On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters.** Monthly weather review, v. 100, n. 2, p. 81-92.

RIBEIRO, M. G.; TANAJURA, E. L. X.; CENTENO, J. A. S. **Monitoramento de período de seca utilizando subtração de imagem NDVI: Estudo de caso do Reservatório do Irai – PR.**In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007. Florianópolis. Resumo Expandido... Santa Catarina: 2007, p. 1055–1062.

RODRIGUES, Italo Sampaio. **Evaporação em reservatórios do Nordeste brasileiro: avaliação da distribuição espacial e influência da mata ripária por sensoriamento remoto.** 2020. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/53463>. Acesso em: 21 mai. 2023

RODRIGUES, I. S. et al. **Evaporation in Brazilian dryland reservoirs: Spatial variability and impact of riparian vegetation.** *Sci. Total Environ.* 797, 149059 (2021).

ROSSI, Júlia Brusso et al., (2024). **How much evaporation occurs in Brazilian reservoirs? A multi-model perspective.** *Journal of South American Earth Sciences*, p. 104899.

SHELQUIST, Richard. *Equations-air density and density altitude. Equations-Air Density and Density Altitude*, 2009.

SILVA, P. C. G. Da, et al. **Caracterização Do Semiárido Brasileiro: Fatores Naturais E Humanos.** In: Sá, Iêdo Bezerra, Silva, Pedro Carlos Gama. *Semiárido Brasileiro: Pesquisa, Desenvolvimento E Inovação.* Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. DE ARAÚJO, J. C.;

SOBRINO JA, JIMÉNEZ-Muñoz JC, PAOLINI L (2004) **Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5.** *Remote Sens Environ* 90(4):434–440

SUASSUNA, J. **A pequena e média açudagem no semiárido nordestino: uso da água na produção de alimentos.** Fundação Joaquim Nabuco. Recife, 1993

SU, Zhongbo. **The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes.** *Hydrology and earth system sciences*, [s.l.] v. 6, n. 1, p. 85-99, 2002.

TALAIA, M. e COELHO, A. **A evaporação da água numa perspectiva de ciclo hidrológico.** *Boletín de Ciencias*, Ano 19, Nº. 61, pp. 143, 2006.

THORNTHWAITE, C.W. **An approach toward a rational classification of climate.** *Geography Review*, v. 38, p. 55-94, 1948.

USGS - United States Geological Survey. *Water Cycle*, 2022 Disponível em: <https://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>. Acesso em: 19 de mai. de 2023.

USGS - United States Geological Survey. *The Water Cycle, Portuguese*, 2019 Disponível em: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/o-ciclo-dagua-water-cycle-portuguese>. Acesso em: 19 de mai. de 2023.

VAREJÃO SILVA, M.A. **Meteorologia e Climatologia.** INMET: Brasília, 2006. 515p. (versão digital)

VIEIRA, Nayara Paula Andrade. **Estimativa da evaporação nos reservatórios de Três Marias – MG e Sobradinho – BA.** 2015. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2015. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/7335>. Acesso em: 10 de mai. de 2023.

WARD, A.D.; TRIMBLE, S.W. **Environmental Hydrology.** 2 nd Ed. USA: Lewis Publishers, 2004. 475 p

XIA, Qian-Qian et al.(2022). **Identifying reservoirs and estimating evaporation losses in a large arid inland basin in Northwestern China**. *Remote Sensing*, v. 14, n. 5, p. 110

YU, L., 2007. **Global variations in oceanic evaporation (1958–2005): the role of the changing wind speed**. *J. Clim.* 20 (21), 5376–5390.