



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

UGO LEONARDO RODRIGUES MACHADO

EFEITOS DE MACRÓFITAS FLUTUANTES NOS PROCESSOS EVAPORATIVOS
EM MESOCOSMOS

FORTALEZA
2023

UGO LEONARDO RODRIGUES MACHADO

EFEITOS DE MACRÓFITAS FLUTUANTES NOS PROCESSOS EVAPORATIVOS EM
MESOCOSMOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de Concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: José Carlos de Araújo.

FORTALEZA

2023

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)

M135c Machado, Ugo Leonardo Rodrigues.
Efeitos de macrófitas flutuantes nos processos evaporativos em mesocosmos / Ugo Leonardo Rodrigues Machado. – 2023.
79 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. José Carlos de Araújo .

1. evapotranspiração. 2. Eichhornia Crassipes. 3. mesocosmos. I. Título.

CDD 630

UGO LEONARDO RODRIGUES MACHADO

EFEITOS DE MACRÓFITAS FLUTUANTES NOS PROCESSOS EVAPORATIVOS EM
MESOCOSMOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciência Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de Concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em: 22/09/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos de Araújo (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Elaine Aparecida da Silva

Universidade Federal do Piauí (UFPI)

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão, primeiramente, a Deus, essa força primordial que permeia o tecido da existência, conduzindo-me resolutamente através das sombras mais obscuras. A trilha da educação foi pavimentada em meio a tempos desafiadores, durante os quais o fervor do conhecimento contrastou com as sombras do negacionismo: uma era em que a resiliência da educação ecoou em sua voz mais alta, lembrando-nos da importância de abraçar a luz da verdade.

Minha apreciação mais profunda estende-se ao alicerce que sustenta minha jornada, minha família. Em particular, reverencio minha mãe, cuja figura irradia humanidade exemplar e cujo auxílio generoso sempre foi inestimável. Dirijo meus agradecimentos ao orientador excepcional, José Carlos de Araújo. Sua influência sobre minha jornada transcende os limites da orientação acadêmica. Sua visão esclarecida e perspicácia acadêmica foram como os ventos que preenchem as velas de um viajante em busca de conhecimento. Alguém que me apresentou à rica obra de Jorge Amado, reacendendo minha paixão pela literatura.

Encontro-me agradecido aos membros do Grupo HIDROSED, uma assembleia de mentes brilhantes que se dedicam à exploração das complexidades da hidrologia e da hidrossedimentologia em diferentes partes do mundo. Minha participação nesse grupo foi um privilégio, trabalhar com evapotranspiração, qualidade da água e outras vertentes do conhecimento expandiu horizontes que se traduzem em enriquecimento pessoal.

Minha gratidão se estende à banca examinadora, mentes atentas que avaliarão esta dissertação. Ao Professor Carlos Alexandre Costa, que, mesmo sem muito contato direto, sempre me impressionou por sua honestidade, empatia e simplicidade. Sua presença na banca é de grande importância. À Professora Elaine Silva, da Universidade Federal do Piauí, pelas suas contribuições que enriqueceram a versão final deste trabalho. Sua disposição em ajudar é imensamente gratificante. À Professora Christine Coelho, suplente, por sua dedicação, prestatividade e organização dos eventos científicos do grupo, que foram enriquecedoras na minha jornada. Também, ao suplente Gláuber Rodrigues, com sua inteligência, sua gentileza, suas contribuições e seu apoio, que foram pilares cruciais para o sucesso deste estudo.

Manifesto meus agradecimentos à Universidade Federal do Ceará, ao Departamento de Engenharia Agrícola, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e a todos aqueles que, nos bastidores, possibilitaram minha estada ao longo destes dois anos. Espero, em algum ponto da jornada, retornar a esta casa que abraça a busca pelo conhecimento.

Finalmente, reverencio ao CNPq, cujo financiamento permitiu minha imersão nessa jornada de exploração intelectual. Em meio a desafios políticos, a Educação manteve-se resiliente, um testemunho da força interior que reside na busca do saber.

Retrato do Artista Quando Coisa

A maior riqueza
do homem é sua incompletude.
Nesse ponto
sou abastado.
Palavras que me aceitam
como sou — eu não aceito.
Não aguento ser apenas
um sujeito que abre
portas, que puxa
válvulas, que olha o
relógio, que compra pão
às 6 da tarde, que vai
lá fora, que aponta lápis,
que vê a uva etc. etc.
Perdoai. Mas eu
preciso ser Outros.
Eu penso
renovar o homem
usando borboletas.

(BARROS, Manoel de. **Manoel de Barros: Poesia Completa**. São Paulo: Leya, 2013)

RESUMO

A região semiárida do Brasil, marcada pela escassez de água, exige uso sustentável de seus recursos hídricos. Com baixa precipitação relativa e altas taxas de evaporação, os açudes desempenham papel vital para o abastecimento e a irrigação. A reduzida disponibilidade de água, devido ao déficit hídrico e à poluição no Ceará, é uma questão central: em muitos açudes a água encontra-se em estado eutrófico ou hipereutrófico, com a presença massiva de macrófitas. Avaliar o impacto ambiental de macrófitas em reservatórios de mesoescala é necessário para entender seu papel no balanço hídrico. A abordagem usada foi comparar a evapotranspiração em áreas com macrófitas e a evaporação em áreas não vegetadas: o estudo questiona se as macrófitas alteram o padrão evaporativo em reservatórios na escala de mesocosmos. A hipótese é que a macrófita flutuante *Eichhornia crassipes* aumenta as perdas evaporativas no reservatório. O objetivo é comparar, em tanques de mesocosmos, a evapotranspiração com essas macrófitas flutuantes e a evaporação sem elas. As medidas incluem, também, o índice de estado trófico da água, a evaporação do Tanque Classe A e a evaporação pelo método de Penman. O teste de similaridade confirmou a igualdade estatística entre os dois tanques de mesocosmos experimentais com 5% de significância, o que permitiu a admissão de apenas dois tratamentos: Tanque sem macrófita (TS) e Tanque com macrófita (TC). Realizado no *Campus* do Pici da UFC, em Fortaleza, no Ceará, de junho a dezembro de 2022, a água dos experimentos revelou estado hipereutrófico consistente nos dois tanques. A evaporação média no Tratamento TS foi de 6,78 mm.dia⁻¹, enquanto a evapotranspiração média de TC foi de 8,75 mm.dia⁻¹. A média das taxas de evaporação no Tanque Classe A foi de 7,51 mm.dia⁻¹ e, segundo a Equação de Penman, as perdas evaporativas foram de 7,50 mm.dia⁻¹. Considerando-se dois tanques de mesocosmos em ambiente tropical subúmido com água hipereutrofizada, conclui-se que a evapotranspiração em um reservatório com macrófitas (*Eichhornia crassipes*) supera a evaporação no mesmo reservatório, sem macrófitas, de 20% a 29%. Observa-se, também, que a evaporação no tanque de mesoescala (19,6 m²) com água hipereutrofizada é 10% inferior àquela em Tanque Classe A (1,14 m²) com água limpa, que é, por sua vez, semelhante àquela calculada pelo método de Penman. Com esta pesquisa, espera-se contribuir para a melhor compreensão do impacto das macrófitas na evaporação dos açudes no Semiárido do Brasil.

Palavras-chave: evapotranspiração; *Eichhornia Crassipes*; mesocosmos.

ABSTRACT

The semi-arid region of Brazil, characterized by water scarcity, demands sustainable water resource management. With low relative precipitation and high evaporation rates, reservoirs play a vital role in water supply and irrigation. The limited water availability, due to water deficit and pollution in Ceará, is a central issue: in many reservoirs, water is in eutrophic (or hyper-eutrophic) state, with the massive presence of macrophytes. Evaluating the environmental impact of macrophytes in mesoscale reservoirs is necessary to understand their role in the water balance. The approach used was to compare evapotranspiration in areas with macrophytes and evaporation in unvegetated areas. The scientific question is whether macrophytes alter the evaporative pattern in reservoirs on the mesocosm scale. The hypothesis is that the floating macrophyte *Eichhornia crassipes* increases evaporative losses in the reservoir. The objective is to compare evapotranspiration with floating macrophytes in mesocosm tanks and clear-water evaporation under the same condition. Measurements also include the water trophic state index, Class A pan evaporation, and Penman-equation evaporation assessment. The similarity test confirmed statistical equivalence between the two experimental mesocosm tanks with a 5% significance level, allowing for only two treatments: Tank without macrophytes (TS) and Tank with macrophytes (TC). Conducted at the UFC Pici Campus in Fortaleza, Ceará, from June to December 2022, the experiment water consistently exhibited a hyper-eutrophic state in both tanks. The average evaporation in Treatment TS was 6.78 mm.day^{-1} , while the average evapotranspiration in TC was 8.75 mm.day^{-1} . The average evaporation rates in the Class A pan were 7.51 mm.day^{-1} , and according to the Penman Equation, evaporative losses were 7.50 mm.day^{-1} . Considering two mesoscale tanks in a sub-humid tropical environment with hyper-eutrophic water, we conclude that evapotranspiration in a reservoir with macrophytes (*Eichhornia crassipes*) exceeds evaporation in the same reservoir without macrophytes by 20% to 29%. We also observe that evaporation in the mesoscale tank (19.6 m^2) with hyper-eutrophic water is 10% lower than that in the Class A pan (1.14 m^2) with oligotrophic water. Class A pan evaporation is similar to that calculated by the Penman method. With this research, we hope to contribute to a better understanding of the impact of macrophytes on reservoir evaporation in the Brazilian Semi-Arid region.

Keywords: Evapotranspiration; *Eichhornia crassipes*; mesocosms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação da energia interna da água com a temperatura	17
Figura 2 – Mapa de localização do sítio experimental à esquerda (ArcGIS-Earth, 2022), onde se identificam os dois tanques de mesocosmos (parte central inferior) e a Estação Meteorológica (parte central superior), com pluviômetro, Tanque Classe A e estação automática. À direita vê-se o estado do Ceará (figura superior) e sua posição no contexto do Brasil e da América do Sul (figura inferior).....	34
Figura 3 – Tanques de mesocosmos (imagens superiores) (A) tanque sem a presença de macrófitas; (B) tanque com a presença de macrófitas; e arranjo experimental (imagem inferior).	36
Figura 4 – Esquemática do balanço hídrico nos tanques de mesocosmos	40
Figura 5 – Índice de Estado Trófico simultâneo nos tanques de mesocosmos T1 e T2 ao longo do experimento (ano 2022).	47
Figura 6 – Evaporação simultânea nos Tanques T1 e T2 sem macrófitas (de 13/01/2023 a 17/02/2023)	49
Figura 7 – Evaporação nos tratamentos T1S e T2S e evapotranspiração nos tratamentos T1C e T2C (de 27/06/2022 a 22/12/2022).....	50
Figura 8 – Evaporação no Tratamento TS: tanque de mesocosmos sem macrófitas (de 27/06/2022 a 22/12/2022).....	52
Figura 9 – Evapotranspiração do Tratamento TC: tanque de mesocosmos com macrófitas (de 27/06/2022 a 22/12/2022).....	55
Figura 10 – Evaporação no Tanque Classe A (de 27/06/2022 a 22/12/2022).....	58
Figura 11 – Evaporação estimada pela Equação 8, de Penman (de 27/06/2022 a 22/12/2022).....	60
Figura 12 – Razões (K1 a K5) das medidas de processos evaporativos na área experimental (de 27/06/2022 a 22/12/2022).....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas de valores para o IET e os parâmetros relacionados (concentração de fósforo total, concentração de clorofila a e transparência da água) em cada categoria trófica.....	32
Tabela 2 – Índice de Estado Trófico e sua classificação nos Tanques de mesocosmos T1 e T2 ao longo do experimento.....	46
Tabela 3 – Parâmetros estatísticos das medidas simultâneas de evaporação nos Tanques T1 e T2 sem macrófitas (de 13/01/2023 a 17/02/2023).....	48
Tabela 4 – Parâmetros estatísticos das medidas de evaporação do Tratamento TS: tanque de mesocosmos sem macrófita (de 27/06/2022 a 22/12/2022).....	51
Tabela 5 – Parâmetros estatísticos das medidas de evapotranspiração do Tratamento TC: tanque de mesocosmos com macrófitas (de 27/06/2022 a 22/12/2022).....	53
Tabela 6 – Parâmetros estatísticos das medidas de evaporação no Tanque Classe A (de 27/06/2022 a 22/12/2022).....	56
Tabela 7 – Parâmetros estatísticos das medidas de evaporação (Ep) estimada pela Equação 8, de Penman (de 27/06/2022 a 22/12/2022).....	59
Tabela 8 – Parâmetros estatísticos de cinco razões (K1 a K5) das medidas de processos evaporativos (de 27/06/2022 a 22/12/2022).....	62

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Gradiente de pressão de vapor saturado em relação à temperatura
B	Coefficiente de transferência de vapor
C	Coefficiente de evaporação
Cl _a	Clorofila a
dH	Varição da altura de água no tanque
DS	Disco de Secchi
dt	Varição temporal
E	Taxa de evaporação
e	Pressão atual do vapor de água
e _a	Pressão de saturação do vapor de água
E _a	Taxa de evaporação método aerodinâmico
E _r	Taxa de evaporação balanço de energia
G	Fluxo de calor do solo
H _s	Fluxo de calor sensível
I	Irrigação
k	Constante de von Kármán
l _v	Calor latente de vaporização da água
P	Precipitação
P _a	Pressão atmosférica
PT	Fósforo total
q_{ent}	Vazão específica de entrada no tanque (mm.dia ⁻¹)
Re	Radiação emitida
R _i	Radiação incidente
R _n	Radiação líquida
T _s	Temperatura da superfície da água
u	Velocidade do vento
z ₀	Altura para a qual a velocidade do ar é zero
z ₂	Altura na qual a velocidade do vento u é medida
α	Albedo
γ	Parâmetro psicrométrico
ρ_a	Massa específica do ar
ρ_w	Massa específica da água

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Processos evaporativos	16
<i>2.1.1</i>	<i>Evaporação</i>	16
<i>2.1.2</i>	<i>Evapotranspiração</i>	23
<i>2.1.3</i>	<i>Medidas dos processos evaporativos</i>	25
2.2	Qualidade de água, eutrofização e macrófitas	29
3	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1	Área de estudo	34
3.2	Arranjo experimental	35
3.3	Índice de Estado Trófico	37
3.4	Medida dos processos evaporativos	39
<i>3.4.1</i>	<i>Medidas em tanques de mesocosmos</i>	39
<i>3.4.2</i>	<i>Medidas no Tanque Classe A</i>	42
<i>3.4.3</i>	<i>Estimativa da evaporação pelo método de Penman</i>	42
3.5	Análise estatística	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Índice de Estado Trófico	45
4.2	Teste de similaridade dos tanques de mesocosmos	48
<i>4.2.1</i>	<i>Teste simultâneo com os dois tanques sem macrófitas</i>	48
<i>4.2.2</i>	<i>Teste não-simultâneo com os dois tanques</i>	50
4.3	Análise comparativa dos processos evaporativos nos dois tratamentos	51
<i>4.3.1</i>	<i>Tratamento TS: tanque sem macrófita</i>	51
<i>4.3.2</i>	<i>Tratamento TC: tanque com macrófita</i>	53
<i>4.3.3</i>	<i>Tanque Classe A</i>	56
<i>4.3.4</i>	<i>Evaporação pelo método de Penman (Equação 8)</i>	58
<i>4.3.5</i>	<i>Análise comparativa</i>	62
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	67
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro é uma região caracterizada pela escassez de água e pela necessidade de utilização de recursos hídricos de forma consciente e sustentável (CAMPOS, 2015; GOMES *et al.*, 2021; BAHROUN, 2022; SILVA *et al.*, 2022). Nessa região, o abastecimento hídrico é fortemente alavancado por reservatórios superficiais gerados através de barragens (CAMPOS, 2010; MALVEIRA *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2016).

Com baixa precipitação anual e altas taxas de evaporação, essa região é o lar de muitos açudes que têm papel crucial no abastecimento de água para áreas urbanas e rurais, bem como no suporte aos perímetros irrigados, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de planejamento racional do uso dos recursos hídricos armazenados em curto, médio e longo prazos (ANA, 2017; COGERH, 2023). Estima-se que cerca de 90% da demanda hídrica provenha desse tipo de manancial, cujo desempenho é fortemente dependente das taxas evaporativas (GAISER *et al.*, 2003; MAMEDE *et al.*, 2012).

As águas doces globais estão enfrentando degradação qualitativa e quantitativa. Fatores como precipitação insuficiente, práticas de irrigação e perdas significativas por evapotranspiração contribuem para o déficit hídrico, assim sendo, a deterioração acentuada da qualidade da água é motivo de preocupação (WETZEL, 1975). Ao longo do tempo, o estado trófico dessas águas vem se elevando, de modo que pelo menos 75% dos açudes do Ceará encontram-se atualmente em estado eutrófico ou hipereutrófico (COELHO *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2018; COGERH, 2023).

Simultaneamente, a demanda por água vem se elevando e a oferta baseada em reservatórios superficiais (açudes) vem se retraindo, entre outras, por causa do assoreamento (DE ARAÚJO *et al.*, 2006; GIL *et al.*, 2020). Nesse cenário, a evolução dos processos evaporativos torna-se preocupante, pois estima-se que cerca de 30% a 50% da água afluente aos açudes seja transferida para a atmosfera (CAMPOS, 2010; RODRIGUES *et al.*, 2021a, 2021b).

Nesse contexto, torna-se crucial compreender as perdas de água por evaporação em superfícies livres de reservatórios em áreas semiáridas, visto que isso é fundamental para o gerenciamento dos recursos hídricos utilizados para diversas finalidades, incluindo abastecimento doméstico, atividades agrícolas e agroindustriais (ABBASI, 2012; BRITO *et al.*, 2019).

A estimativa da quantidade de água evaporada em locais específicos é de grande interesse para hidrólogos, agrônomos, especialistas em planejamento florestal e recursos

terrestres, uma vez que esses dados são essenciais para o estudo de problemas em várias áreas (VILELA *et al.*, 1975; CHOW *et al.*, 1988; GOMES *et al.*, 2021). Essa questão é especialmente relevante em regiões semiáridas, onde a maioria dos reservatórios é destinada ao consumo humano, animal e vegetal, o que torna a evaporação um grande desafio.

Como resultado das pressões antrópicas em mananciais do Ceará, verifica-se crescente presença de macrófitas em suas superfícies (ZHANG *et al.*, 2018). A avaliação do impacto ambiental dessas macrófitas em reservatórios de mesoescala é uma abordagem eficiente que fornece metodologias para investigar o papel dessas plantas em ambientes aquáticos e seus possíveis impactos ambientais (ROSA *et al.*, 2009). Essa abordagem permite uma análise mais abrangente dos efeitos das macrófitas na gestão dos recursos hídricos, na conservação de ecossistemas aquáticos e na compreensão dos efeitos das macrófitas nos processos de troca de água, energia e nutrientes entre a superfície da água e atmosfera (GUIMARÃES *et al.*, 2003).

A evaporação de água em mesocosmos é um tópico relevante no campo da ecologia aquática e hidrologia, especialmente no estudo das interações entre os processos naturais e as atividades humanas. Eles são amplamente utilizados para estudar a dinâmica ecológica e processos em ambientes controlados (JOBSON *et al.*, 1982).

Os efeitos das mudanças nos níveis de nutrientes e de água nas macrófitas em mesocosmos, sob diferentes condições de temperatura, mostraram que a interação entre nutrientes, mudanças no nível da água e na temperatura têm um efeito significativo no crescimento e sobrevivência dessas plantas aquáticas (ERSOY, 2002). Essas descobertas têm implicações importantes na gestão de recursos hídricos e conservação de ecossistemas aquáticos que são afetados por essas mudanças.

O crescimento excessivo de macrófitas, especialmente de espécies exóticas como o aguapé (*Eichhornia crassipes*), é uma preocupação significativa (REZANIA, 2015), visto que a capacidade que essa planta tem de invadir diferentes tipos de corpos hídricos em diversas regiões geográficas é uma das principais razões para essa preocupação. Embora sua natureza invasiva a torne um desafio ambiental, é importante não a generalizar como uma ameaça e, em vez disso, analisar a peculiaridade de cada situação em que ocorre (AYANDA *et al.*, 2020). Em ambientes aquáticos, ajudam na melhoria da qualidade da água, já que elas podem reduzir a turbidez, diminuir a quantidade de nutrientes e melhorar a oxigenação (HEGEL, 2016). Além disso, as macrófitas também influenciam a comunidade fitoplanctônica, geralmente promovendo um aumento na diversidade de espécies e uma diminuição na biomassa total (TAKAMURA *et al.*, 2003).

Uma abordagem comparativa frequente em pesquisas sobre demandas de evapotranspiração de comunidades vegetais consiste em analisar a relação entre a perda de água por evapotranspiração em superfícies ocupadas por certas plantas e a evaporação de superfícies equivalentes desprovidas de vegetação (ROSA *et al.*, 2009). A presença da macrófita aquática *Eichhornia crassipes* (aguapé) resulta em modificações no corpo hídrico, ocasionando desequilíbrios na população biológica (SANTANA *et al.*, 2021) e incrementando vertiginosamente a velocidade de perda hídrica por meio do mecanismo de evapotranspiração.

Nesse cenário, a indagação científica pertinente ao assunto é: as macrófitas modificam o padrão evaporativo em águas confinadas em reservatórios na escala de mesocosmos? Assim sendo, a hipótese proposta no escopo desta dissertação é que a ocorrência da macrófita *Eichhornia crassipes* em reservatórios de mesoescala aumenta a evaporação em comparação com reservatórios de superfície desprovida de vegetação aquática.

Frente ao problema, a presente pesquisa tem como objetivo geral avaliar comparativamente, em dois tanques de mesocosmos, a evapotranspiração com macrófitas flutuantes (*Eichhornia crassipes*) e a evaporação sem macrófitas.

São objetivos específicos:

- a) avaliar o índice de estado trófico da água utilizada nos tanques experimentais;
- b) mensurar os processos evaporativos nos tanques com e sem macrófitas flutuantes, a evaporação do Tanque Classe A e por meio do método de Penman;
- c) comparar a evapotranspiração do tanque com macrófitas com outras medidas simultâneas de evaporação: tanque sem macrófitas, Tanque Classe A e Penman, interpretando seus resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processos evaporativos

2.1.1 Evaporação

A evaporação é o processo de mudança de estado da água líquida para o estado gasoso. As moléculas de água, tanto no líquido quanto no gás, estão em constante movimento, sendo que algumas têm energia suficiente para romper a superfície da água para a atmosfera, enquanto outras podem voltar para o líquido. Dessa forma, quando mais moléculas estão deixando o líquido do que retornando, ocorre a evaporação líquida (CHOW *et al.*, 1988; SEROA *et al.*, 2019; JATOBÁ *et al.*, 2020; GOMES *et al.*, 2021; BARBOSA, 2022).

A evaporação, portanto, requer um suprimento de energia, normalmente fornecido pela radiação solar recebida ou insolação, para fornecer o calor latente da vaporização (VILELA, 1975). Este processo é afetado por múltiplos fatores ambientais, tais como temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade do vento e incidência de radiação solar (ABTEW *et al.*, 2013). Essas variáveis desempenham um papel crucial na modulação da taxa de evaporação e na interação entre os componentes atmosféricos e terrestres, contribuindo para o equilíbrio e para a dinâmica dos processos hidrológicos (JOBSON *et al.*, 1982).

Em 1802, o físico inglês John Dalton (1766-1844), mantendo um grande interesse em hidrometeorologia durante toda a sua vida adulta, mostrou que a principal força motriz da evaporação é o déficit de pressão de vapor (OR, 2017; GOMES *et al.*, 2021). Entretanto, os dois principais fatores que influenciam a evaporação da superfície da água são o fornecimento de energia, principalmente por meio da radiação solar, e a capacidade de transportar o vapor para longe da superfície evaporativa, que depende da velocidade do vento e do gradiente de umidade específica no ar (CHOW *et al.*, 1988).

A taxa de evaporação apresenta uma correlação positiva com a temperatura, já que o incremento térmico facilita a disponibilidade de energia necessária para romper as ligações intermoleculares da água em estado líquido (SIERRA, 2020). Consequentemente, em temperaturas mais elevadas, a quantidade de energia requerida para promover a transição da fase líquida para a fase gasosa é atingida com maior facilidade, acelerando o processo de evaporação (JONES, 1992).

Além disso, a evaporação é mais rápida em condições de baixa umidade relativa e alta velocidade do vento, pois essas condições favorecem a difusão do vapor de água para a

atmosfera (JOBSON *et al.*, 1982). A radiação solar desempenha, igualmente, um papel crucial na evaporação, fornecendo energia para o processo (GÓMEZ *et al.*, 2018).

Em 1982, Brutsaert publicou o livro *Evaporation into the Atmosphere*, que examina as observações históricas da transformação da água em vapor, as primeiras percepções das comunidades antigas sobre o processo e as primeiras tentativas de medição da evaporação. A obra também aborda as contribuições importantes de cientistas na compreensão da evaporação, ou seja, como suas teorias e seus experimentos influenciaram a pesquisa sobre o assunto.

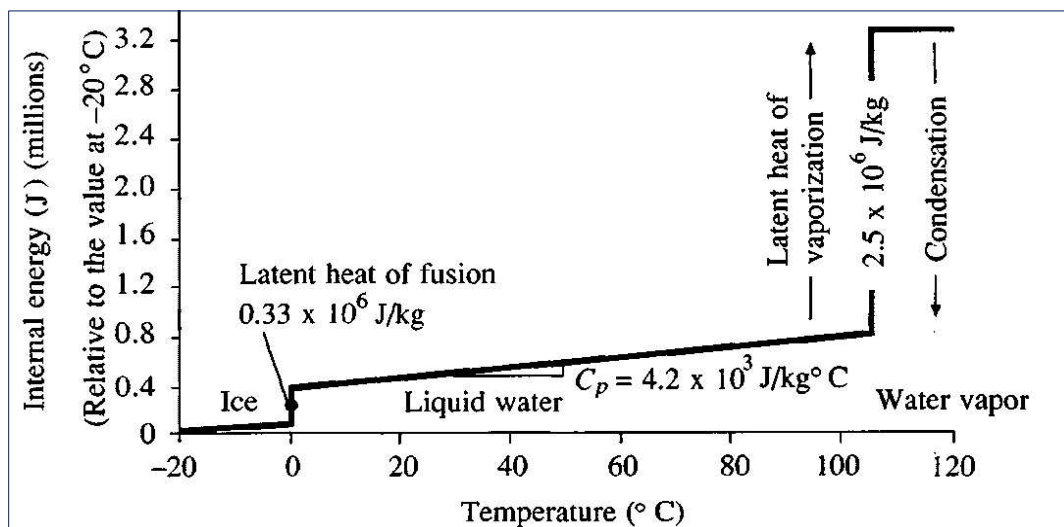
Como a evaporação é o processo de mudança de fase em que a água líquida se transforma em vapor, a taxa de evaporação de um tanque evaporimétrico pode ser descrita pela Equação 1:

$$E = \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

Em que E é a taxa de evaporação; dH é a variação da massa de água evaporada (mm); e dt é a variação do tempo em que ocorre a evaporação (dia).

A Figura 1 apresenta uma representação gráfica dos calores específicos e latentes da água. É possível observar que o calor latente é uma quantidade de energia que é absorvida ou liberada pela água quando ela passa por uma mudança de estado físico, seja de sólido para líquido, de líquido para gasoso ou vice-versa. Esses calores são fundamentais para entender o processo de evaporação da água e outros processos hidrológicos, como a condensação, precipitação e fusão.

Figura 1 – Variação da energia interna da água com a temperatura



Fonte: Chow *et al.* (1988, p. 41).

O calor sensível é uma parte da energia interna de uma substância que está diretamente relacionada à sua temperatura. Dessa forma, quando a temperatura de uma substância se altera, a energia interna também varia proporcionalmente.

Ao mudar de fase (estado sólido, líquido ou gasoso), uma substância absorve ou libera calor latente. Existem três tipos de calor latente de interesse: o calor latente de fusão, que ocorre quando o gelo derrete e se transforma em água; o calor latente de vaporização, envolvido na transformação da água líquida em vapor de água; e o calor latente de sublimação, referente à conversão direta do gelo em vapor de água. A Figura 1 ilustra a variação da energia interna da água em função das transferências de calor sensível e latente. As transferências de calor latente durante as mudanças de fase são representadas pelos saltos verticais na energia interna nos pontos de fusão e vaporização, enquanto as variações na energia interna decorrentes da transferência de calor sensível são indicadas pelas linhas inclinadas. A Equação 2 mostra como o calor latente de vaporização da água lv ($J \cdot kg^{-1}$) varia com a temperatura da superfície da água T_s ($^{\circ}C$).

$$lv = 2,501 \cdot 10^6 - 2370 \cdot T_s \quad (2)$$

O calor latente de vaporização representa a quantidade de energia necessária para converter 1 kg de água líquida em vapor de água à mesma temperatura. À medida que a temperatura da água aumenta, a quantidade de energia necessária para vaporizá-la diminui. Isso ocorre porque, em temperaturas mais altas, as moléculas de água têm mais energia cinética, e as ligações entre elas estão mais fracas, facilitando a vaporização. Esta energia representa um aspecto importante na compreensão do balanço energético e do ciclo da água em ecossistemas terrestres (ALLEN *et al.*, 1998).

O processo de vaporização exige um aporte de energia, pois é necessário fornecer calor para que as moléculas de água possam vencer as forças de atração entre elas e se transformar em vapor (SIERRA, 2020). A Equação 3 foi proposta por John Dalton em 1802 (ver, por exemplo, Vilela *et al.*, 1975) para estimar a evaporação em uma superfície livre de água.

$$E = C \cdot (ea - e) \quad (3)$$

Em que E é a taxa de evaporação ($mm \cdot dia^{-1}$); C é o coeficiente de evaporação em função de elementos meteorológicos, tais como a velocidade do vento, a temperatura do ar e a umidade

relativa do ar; ea é a pressão de saturação do vapor de água no ar (Pa); e e é a pressão real do vapor de água no ar (Pa).

A Equação 3, de Dalton, baseia-se no princípio de que a evaporação é proporcional à diferença entre a pressão de saturação do vapor de água (ea) e a pressão atual do vapor de água (e) no ar. Quando a pressão do vapor de água no ar é menor que a pressão de saturação, a evaporação ocorre (SIERRA, 2020). O coeficiente de evaporação (C) leva em consideração fatores meteorológicos que afetam a evaporação, como a velocidade do vento e a temperatura do ar. Embora a equação de Dalton seja simples e de fácil aplicação, ela tem limitações, posto que não considera alguns fatores importantes, como a radiação solar e a temperatura da água. Por isso, outras equações mais complexas e abrangentes foram desenvolvidas ao longo do tempo para estimar a evaporação com maior precisão.

O Método do Balanço de Energia é uma técnica amplamente empregada para calcular as taxas de evaporação considerando as trocas de energia dentro de um volume de controle (PINTO *et al.*, 1976; SIERRA, 2020; DORNELLES *et al.*, 2021). Baseia-se no princípio de conservação de energia, segundo o qual a energia que entra no volume de controle deve ser igual à energia que sai, além de qualquer mudança na energia armazenada no volume de controle. Ao aplicar o método do balanço de energia à evaporação, é preciso considerar as trocas de energia que comentaremos adiante (WARD *et al.*, 2015).

A radiação líquida é um componente importante no balanço de energia da superfície da terra e influencia processos como evaporação, convecção atmosférica e aquecimento do solo e da água (BORGES *et al.*, 2010). Conhecendo o albedo, a radiação incidente e a radiação emitida, é possível calcular a radiação líquida e entender melhor como esses processos interagem no ambiente. A radiação líquida (Rn) é a entrada líquida de radiação na superfície a qualquer instante e pode ser calculada a partir da Equação 4.

$$Rn = Ri \cdot (1 - \alpha) - Re \quad (4)$$

Na Equação 4, Rn é a radiação líquida ($W.m^{-2}$); Ri é a radiação incidente ($W.m^{-2}$); α é o albedo (adimensional, varia de 0 a 1); e Re é a radiação emitida ($W.m^{-2}$). A radiação líquida (Rn) é a diferença entre a energia radiante absorvida e a energia emitida pela superfície. O albedo (α) corresponde à proporção da radiação incidente que é refletida de volta para a atmosfera, variando de acordo com o comprimento de onda da radiação e seu ângulo de incidência, apesar de ser comum adotar um valor único típico para a superfície (CHOW *et al.*, 1988). Superfícies escuras, como corpos d'água profundos, têm albedos baixos e absorvem a

maior parte da radiação solar incidente, em contraste, superfícies claras, como a neve fresca, têm albedos altos e refletem a maior parte da radiação solar. A radiação emitida (Re) é outro componente importante na equação e está relacionada à temperatura da superfície, por isso, quanto maior a temperatura, maior a quantidade de energia radiante emitida (SIERRA, 2020).

A radiação líquida tem impacto significativo em muitos processos ambientais, como evaporação, aquecimento do solo e da água, convecção atmosférica e balanço energético da Terra (LOZANO-RIVAS, 2018). Ao estudar a radiação líquida e como ela interage com diferentes superfícies, os pesquisadores podem desenvolver uma compreensão mais profunda dos processos climáticos e meteorológicos, além de melhorar a gestão dos recursos hídricos (DORNELLES *et al.*, 2021). Ademais, a radiação líquida também é relevante para cálculos de processos evaporativos, uma vez que a quantidade de energia que é absorvida e emitida pela superfície terrestre influencia o balanço energético global (PINTO *et al.*, 1976).

A Equação 5 simplificada, apresentada para estimar a taxa de evaporação (Er) com base na radiação líquida (Rn), no calor latente de vaporização (lv) e na massa específica da água (ρ_w), faz algumas suposições técnicas.

$$Er = \frac{Rn}{lv \cdot \rho_w} \quad (5)$$

A Equação 5 assume que toda a radiação líquida (Rn) é usada exclusivamente para a evaporação da água. Em outras palavras, considera que o balanço de energia se resume à relação entre a radiação líquida e a energia consumida no processo de evaporação.

Quando o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor do solo são desprezíveis, a equação do balanço de energia para evaporação pode ser simplificada. Nesse caso, a taxa de evaporação (Er) pode ser calculada como a taxa na qual toda a radiação líquida incidente é absorvida pela evaporação. No entanto, é importante notar que essa simplificação pode não ser aplicável em todas as situações, pois o fluxo de calor sensível (Hs) e o fluxo de calor do solo (G) geralmente desempenham papéis consideráveis no balanço de energia. Essa condição só seria válida em casos muito específicos, no quais Hs e G são, de fato, iguais a zero ou negligíveis em comparação com a radiação líquida.

O método aerodinâmico leva em conta dois fatores principais que influenciam a taxa de evaporação em uma superfície de água aberta (DORNELLES *et al.*, 2021). O primeiro é o fornecimento de energia térmica, enquanto o segundo é a eficiência do transporte de vapor d'água para longe da superfície. A taxa de transporte é determinada pelo gradiente de umidade no ar adjacente à superfície e pela velocidade do vento que incide sobre a superfície (LOZANO-

RIVAS, 2018). Esses dois processos – transporte de massa (evaporação) e transporte de momento (velocidade do vento) – podem ser analisados por meio da combinação das equações de transporte de massa e momento no ar (PINTO *et al.*, 1976).

A Equação 6 utiliza o método aerodinâmico para estimar a taxa de evaporação (Ea) de uma superfície de água aberta.

$$Ea = B \cdot (ea - e) \quad (6)$$

Em que Ea significa a taxa de evaporação; ea simboliza a pressão de vapor de saturação; e representa a pressão de vapor de água; e B é o coeficiente de transferência de vapor, esse coeficiente leva em consideração a velocidade do vento e a resistência aerodinâmica, que são fatores importantes para o transporte de vapor. Em geral, quanto maior a velocidade do vento e menor a resistência aerodinâmica, maior será o coeficiente B e, conseqüentemente, maior será a taxa de evaporação.

É importante mencionar que o método aerodinâmico é uma aproximação e, por isso, pode não ser tão preciso ao calcular o coeficiente B , que apresenta termos de múltiplas variáveis meteorológicas e parâmetros. A Equação 7 calcula esse coeficiente mensurando a velocidade do vento (u), a massa específica do ar (ρa) e outros parâmetros que descrevem a interação entre a atmosfera e a superfície da água (CHOW *et al.*, 1988).

$$B = \frac{0,622 \cdot k^2 \cdot \rho a \cdot u^2}{p \cdot \rho \cdot \left[\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) \right]^2} \quad (7)$$

Na Equação 7, k é a constante de Prandtl-von Kármán, que é aproximadamente igual a 0,41; ρa é a massa específica do ar; u é a velocidade do vento a uma altura específica acima da superfície ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); p é a pressão do ar (Pa); ρ é a massa específica da água; z_2 é a altura que a velocidade do vento u é medida (m); z_0 é a altura para a qual a velocidade do ar é zero, representando a resistência oferecida pela superfície ao fluxo do ar (m).

A evaporação pode ser estimada através do método aerodinâmico quando a disponibilidade de energia não é um fator limitante e pelo método de balanço energético quando o transporte de vapor não é restritivo (LOZANO-RIVAS, 2018). Contudo, frequentemente, ambos os fatores impõem limitações, o que requer uma combinação dos dois métodos. No método de balanço energético, a quantificação do fluxo de calor sensível é um desafio. No entanto, uma vez que o calor é transferido por convecção pelo ar acima da superfície da água e o vapor de água é transportado de forma semelhante pela convecção, é possível considerar que

o fluxo de calor do vapor e o fluxo de calor sensível são proporcionais (DORNELLES *et al.*, 2021). A constante de proporcionalidade é conhecida como razão de Bowen, conforme proposto por Bowen em 1926.

A equação de Penman (Equação 8) é amplamente utilizada na hidrologia e meteorologia para estimar a evaporação de superfícies de água livremente expostas, como lagos, rios e reservatórios. Ela foi desenvolvida por Howard Penman em 1948 e combina os efeitos da energia disponível – principalmente a radiação solar – e do transporte de vapor (convecção) para estimar a taxa de evaporação ou evapotranspiração.

$$E = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \cdot Er + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) \cdot Ea \quad (8)$$

Nessa equação, E representa a taxa de evaporação combinada; Δ é o gradiente de pressão de vapor saturado em relação à temperatura; γ é o parâmetro psicrométrico, que relaciona a variação de pressão de vapor d'água com a variação de temperatura; Er simboliza a taxa de evaporação calculada pelo método de balanço de radiação solar; e Ea corresponde à taxa de evaporação calculada pelo método aerodinâmico.

A Equação 8, de Penman, utiliza dois parâmetros importantes: o gradiente de pressão de vapor saturado em relação à temperatura (Δ) e o parâmetro psicrométrico (γ). O gradiente de pressão de vapor descreve a taxa de mudança da pressão de vapor saturado em relação à temperatura. A constante psicrométrica, por sua vez, é uma propriedade do ar que relaciona a variação da pressão do vapor de água com a variação da temperatura do ar.

Além disso, a Equação 8 divide a evaporação em duas partes. A primeira, $(\Delta / (\Delta + \gamma)) Er$, representa a fração da evaporação que é impulsionada pela energia radiante. Essa fração é ponderada pelo gradiente de pressão de vapor saturado em relação à soma do gradiente de pressão de vapor saturado e do parâmetro psicrométrico. A segunda parte, $(\gamma / (\Delta + \gamma)) Ea$, representa a fração da evaporação que é impulsionada pela umidade do ar. Essa fração é ponderada pela constante psicrométrica em relação à soma do gradiente de pressão de vapor saturado e da constante psicrométrica (CHOW *et al.*, 1988).

A componente de energia considera a quantidade de energia disponível para evaporar a água, geralmente derivada da radiação solar. Já a componente aerodinâmica leva em conta a convecção, ou seja, a transferência de vapor de água da superfície para o ar circundante.

O método combinado de cálculo da evaporação com base em dados meteorológicos é mais preciso quando as informações necessárias estão disponíveis e as premissas são respeitadas. As principais premissas envolvem um fluxo de energia em estado estacionário e

variações pouco expressivas no armazenamento de calor no corpo de água ao longo do tempo (DORNELLES *et al.*, 2021).

2.1.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração é um processo fundamental no ciclo hidrológico, que envolve a perda combinada de água de superfícies através do processo de evaporação e da transpiração das plantas. É um componente importante na gestão dos recursos hídricos e na agricultura irrigada, pois está diretamente relacionada ao consumo de água pelas plantas e à disponibilidade de água no solo (LIMA *et al.*, 2009; JESUS *et al.*, 2014; CARVALHO *et al.*, 2020; PAOLINELLI *et al.*, 2022). O entendimento da evapotranspiração é crucial para a gestão adequada dos recursos hídricos, especialmente no contexto da agricultura e da irrigação (FERNANDES *et al.*, 2003; NOVAC, 2014; JÚNIOR *et al.*, 2018). Além disso, a evapotranspiração é igualmente importante para estudos hidrológicos, climatológicos e meteorológicos (ARAÚJO *et al.*, 2017; WARREN, 2013).

Existem várias técnicas e métodos para estimar a evapotranspiração, que variam desde abordagens diretas, como a utilização de lisímetros e tanques de evaporação, até abordagens indiretas, como o uso de modelos matemáticos e sensoriamento remoto (FERREIRA *et al.*, 2019; MARTINS *et al.*, 2019). Os cálculos da taxa de evapotranspiração são realizados utilizando os mesmos métodos descritos para a evaporação de água aberta, porém com ajustes para considerar as condições da vegetação e do solo (BAVEL, 1966; MONTEITH, 1980).

O uso de técnicas de sensoriamento remoto, como imagens de satélite e vants, tem se mostrado cada vez mais eficaz na estimativa da evapotranspiração em grandes áreas, permitindo uma avaliação mais precisa e em tempo real (PAOLINELLI *et al.*, 2022). Para aferir a evapotranspiração de referência (ET_o), que é a evapotranspiração de uma cultura padrão, como a grama, em condições ideais, são utilizados alguns métodos, como o método de Penman-Monteith FAO 56, o método de Radiação, o método de Hargreaves-Samani, entre outros (DOORENBOS *et al.*, 1977; SILVA, 2016; SILVA, 2016). A partir da combinação com equações de resistência aerodinâmica e resistência da superfície, o método da FAO Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração de referência é dado pela Equação 9.

$$ET_o = \frac{(0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T+273} \cdot u_2 \cdot (ea - e))}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (9)$$

Em que ET_o é a evapotranspiração de referência (mm.dia^{-1}); Rn é a radiação líquida na superfície da cultura ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); G é o fluxo de calor do solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); T é a temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$); u_2 é a velocidade média do vento a 2 m de altura (m.s^{-1}); ea representa a pressão de vapor de saturação (kPa); e, por fim, e simboliza a pressão real de vapor (kPa).

É importante ressaltar que a estimativa da evapotranspiração é um desafio, visto que envolve a consideração de diversos fatores e a utilização de diferentes métodos. Além disso, a disponibilidade de dados climáticos pode ser limitada em algumas regiões, o que pode dificultar a estimativa precisa e consistente da evapotranspiração (SILVA, 2016; GOMES FILHO *et al.*, 2017; MARCUZZO *et al.*, 2008; RIBEIRO NETO *et al.*, 2008), a qual, por sua vez, é essencial para o planejamento e manejo da irrigação, garantindo o uso eficiente da água e evitando desperdícios (NOVAC, 2014; SOUZA *et al.*, 2022).

Para melhorar a estimativa da evapotranspiração e desenvolver modelos mais precisos, numerosos estudos têm sido realizados, os quais envolvem a comparação de diferentes métodos de estimativa, a análise de tendências climáticas e o uso de técnicas estatísticas avançadas, como regressões múltiplas e análise de componentes principais (SILVA *et al.*, 2022). A evapotranspiração pode ser influenciada por diferentes fatores, como a radiação solar, a temperatura do ar, a umidade relativa, a velocidade do vento e a disponibilidade de água no solo, e, conseqüentemente, pode ser afetada por mudanças climáticas que alteram esses fatores.

Isso se comprova por meio de pesquisas que têm mostrado que as mudanças climáticas podem levar, por exemplo, a alterações na demanda de água das plantas, afetando a evapotranspiração (GOMES FILHO *et al.*, 2017; CAVALCANTE JUNIOR *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2018). O desmatamento também pode repercutir consideravelmente na evapotranspiração, já que, quando ele ocorre, há um aumento do escoamento superficial e uma diminuição da evapotranspiração e da infiltração de água no solo (NÓBREGA, 2014). Além disso, o aumento da evapotranspiração das culturas – quando resultante de temperaturas mais altas – poderá levar a condições mais frequentes de déficit hídrico, requerendo irrigação onde antes as culturas não necessitavam (PAOLINELLI *et al.*, 2022).

Investigações atuais sobre evapotranspiração abordam diferentes aspectos da evapotranspiração, como modelagem hidrológica, sensoriamento remoto, manejo da irrigação e variações em diferentes culturas. Além disso, o uso dessas tecnologias tem sido explorado para estimar a evapotranspiração em larga escala (FRANCO *et al.*, 2019).

Lins *et al.* (2021) realizaram uma análise da dinâmica temporal da evapotranspiração real em uma bacia hidrográfica do semiárido utilizando modelagem

hidrológica e sensoriamento remoto. Já Silva *et al.* (2021) discutiram o uso do sensoriamento remoto orbital para modelagem da evapotranspiração, enfatizando síntese teórica e aplicações em computação em nuvem. Ferreira *et al.* (2019) analisaram a variabilidade do poder evaporativo do ar em uma cultura de açaí, demonstrando a importância do entendimento das condições atmosféricas para o uso racional de técnicas de irrigação. Por fim, Almeida *et al.* (2019) investigaram o efeito da tensão crítica de irrigação e da cobertura do solo no cultivo do rabanete, utilizando a evapotranspiração como base para o manejo da irrigação.

A evapotranspiração também está relacionada à gestão dos recursos hídricos e à agricultura irrigada. Por isso, pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de avaliar a eficiência do uso da água na irrigação de diferentes culturas, utilizando a evapotranspiração como base para o manejo da irrigação (ALMEIDA *et al.*, 2019). Ademais, o uso de técnicas como a sonda de TDR (*Time Domain Reflectometry*) tem se mostrado relevante para a estimativa da umidade do solo e para a avaliação da relação solo-água-plantat-atmosfera (SOUZA *et al.*, 2016).

2.1.3 Medidas dos processos evaporativos

Em regiões áridas e semiáridas, onde a precipitação não atende às necessidades hídricas das culturas, é importante considerar a adição efetiva de água pela irrigação (LEÃO *et al.*, 2013). Aliás, nesses climas mais secos, a mudança na umidade do solo entre as estações de crescimento geralmente é pequena, então a precipitação e a irrigação são as principais entradas de água. Um problema nessas áreas é que os suprimentos de água estão diminuindo rapidamente, ilustrando a importância de maximizar a eficiência do uso da água (CAMPOS, 2015; SILVA *et al.*, 2022).

A medição dos processos evaporativos é fundamental para entender as interações entre a vegetação, o solo e a água. Essas medições podem ser realizadas por meio de técnicas diversas, como a utilização de lisímetros, que são recipientes que medem a quantidade de água evaporada do solo, ou através de estações meteorológicas que medem a evaporação a partir de dados de temperatura, umidade e radiação solar, velocidade do vento dentre outras variáveis (ZHANG *et al.*, 2001; DALMAGO *et al.*, 2010).

O modelo padrão de estimativa da evapotranspiração, o modelo de Penman-Monteith (Equação 9), utiliza o saldo de radiação como variável de entrada, mas nem sempre essas medidas estão disponíveis nas estações meteorológicas. Por isso, a literatura busca

constantemente ajustes e alternativas para medição dos processos evaporativos (SARNIGHAUSEN *et al.*, 2021).

O método do balanço hídrico é uma abordagem amplamente utilizada para estimar a evaporação e analisar o ciclo hidrológico em uma determinada região ou em determinado corpo d'água (RODRIGUES *et al.*, 2022). Esse método é baseado no princípio da conservação da massa, sustentando que a quantidade total de água em um sistema deve permanecer constante ao longo do tempo, considerando as entradas e saídas de água (MACHADO *et al.*, 2015). O balanço hídrico em um tanque controlado pode ser expresso pela Equação 10.

$$E = P + I + \left(\frac{dh}{dt}\right) \quad (10)$$

Em que E simboliza a evaporação (mm.dia^{-1}), que representa a perda de água para a atmosfera; P é a precipitação direta (chuva ou neve) que cai na área (mm); e I corresponde à inserção de água (termo *fonte-sumidouro*, dado em milímetros). A equação considera a precipitação e a inserção como entradas de água, enquanto a evaporação é uma saída. O termo dh/dt reflete a mudança no nível de água ao longo do tempo e pode ser positiva ou negativa, dependendo das entradas e saídas de água. Essa equação é útil para analisar o balanço hídrico em sistemas como reservatórios e tanques, nos quais a precipitação, irrigação e evaporação desempenham papéis importantes na gestão dos recursos hídricos. A quantificação do balanço hídrico em um reservatório pode ser executada de maneira distinta para períodos pluviais e de estiagem, sobretudo em áreas sujeitas a sazonalidade acentuada, como aquelas com clima semiárido (MACHADO *et al.*, 2015).

O método do balanço hídrico pode ser aplicado em diferentes escalas temporais e espaciais, dependendo dos dados disponíveis e dos objetivos da pesquisa. É importante considerar que a precisão das estimativas de evaporação e de outros componentes do balanço hídrico depende da qualidade e representatividade dos dados de entrada (ALENCAR *et al.*, 2015; DORNELLES *et al.*, 2021). O balanço hídrico também pode ser afetado por mudanças climáticas, uso do solo e atividades humanas, e, portanto, deve ser atualizado e monitorado periodicamente.

Tais análises possibilitam uma apreciação mais acurada do comportamento de reservatórios nestas circunstâncias diferenciadas. Ademais, essa metodologia auxilia na identificação de problemáticas específicas, tais como a escassez hídrica durante os períodos de estiagem e eventuais cheias no decorrer das estações pluviais (DE ARAÚJO *et al.*, 2006).

Existem vários tipos de tanques evaporimétricos. Dentre estes, o mais comum e usado em pesquisas é o Tanque Classe A (ALLEN *et al.*, 1998), um instrumento evaporimétrico amplamente utilizado na caracterização, medição e estimativa da taxa de evaporação em estudos hidrológicos e meteorológicos. Estabelecido por volta da década de 1930, o Tanque Classe A é padrão da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e tem sido empregado em diversos países ao redor do mundo (PEREIRA *et al.*, 2015).

O Tanque Classe A é um recipiente cilíndrico, geralmente feito de metal galvanizado, com cerca de 121,9 cm de diâmetro e 25,4 cm de profundidade. O tanque é instalado acima de uma estrutura de madeira e preenchido com água até uma altura específica, geralmente 15 cm. A evaporação da água é medida pela variação do nível da água no tanque ao longo do tempo (WMO, 2000).

A taxa de evaporação é medida com base na variação do nível de água no tanque durante um período, geralmente de 24 horas (PEREIRA *et al.*, 1997). Além disso, as contribuições de precipitação direta no tanque devem ser levadas em consideração para obter uma medida precisa da evaporação. A medição pode ser realizada manualmente com uma régua ou por meio de instrumentos automáticos, como flutuadores ou sensores de nível.

Para calcular a taxa de evaporação em uma área específica, os dados coletados do Tanque Classe A são combinados com dados meteorológicos, como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar. Essas informações são usadas para ajustar a taxa de evaporação medida no tanque para as condições reais da área de estudo. Além disso, diversos métodos empíricos e semiempíricos foram desenvolvidos para estimar a evaporação com base nos dados do Tanque Classe A e nas variáveis meteorológicas.

Ao longo dos anos, pesquisadores e profissionais têm buscado aprimorar a precisão e a eficiência do Tanque Classe A. Estudos recentes analisam a influência de fatores como a localização do tanque, a altura de instalação e a influência do vento na taxa de evaporação medida. Além disso, o uso de sensores e tecnologias avançadas de monitoramento, como telemetria e sistemas de aquisição de dados, tem sido incorporado ao Tanque Classe A para melhorar a coleta e análise de dados.

Este aparelho tem sido um instrumento fundamental na medição e estimativa da taxa de evaporação em estudos hidrológicos e meteorológicos. A evolução dos métodos e das tecnologias empregadas na utilização do Tanque Classe A contribuiu para aprimorar a compreensão da evaporação e suas implicações no gerenciamento dos recursos hídricos e no planejamento agrícola.

Os mesocosmos experimentais são sistemas em menor escala que recriam ambientes naturais, permitindo estudos controlados de processos biológicos, químicos e físicos. Odum (1984) introduz a origem do termo “mesocosmo” e suas aplicações na pesquisa ecológica. Um mesocosmo representa um ambiente experimental de tamanho intermédio entre microcosmos (laboratório) e macrocosmos (ecossistemas naturais).

Os mesocosmos são empregados para investigar processos ecológicos e hidrológicos sob condições mais próximas dos naturais, proporcionando maior controle experimental. Loreau *et al.* (2001) destacam a importância dos mesocosmos na pesquisa sobre biodiversidade e funcionamento do ecossistema. Esses sistemas são úteis para entender como diferentes fatores afetam os ecossistemas, especialmente em combinação com tanques evaporimétricos permitindo análise de fatores que influenciam a evaporação. Além disso, experimentos em mesocosmos com plantas aquáticas permite investigar as interações entre os componentes bióticos (organismos vivos) e abióticos (elementos não vivos) nos ecossistemas, como a qualidade da água. A evaporação em mesocosmos constitui um tópico fundamental na investigação científica, pois contribui para a compreensão dos processos ecológicos e hidrológicos em escalas reduzidas (SCHINDLER *et al.*, 1998). A evaporação em mesocosmos com a presença de plantas aquáticas é um tópico importante, pois essas plantas desempenham um papel fundamental em processos hidrológicos e ecológicos. Alguns estudos relevantes sobre esse tema são apresentados a seguir.

Dacey *et al.* (1979) analisam a influência de plantas aquáticas, como as ninféias, na taxa de evaporação em mesocosmos. Eles observam que, à medida que as folhas emergem na primavera, gases como o metano são liberados na atmosfera. Durante o verão, o metano continua a ser absorvido pelas raízes e rizomas, movendo-se rapidamente pelos pecíolos e saindo pelas folhas emergentes para a atmosfera. Este estudo ajuda a entender as interações entre as plantas aquáticas e a atmosfera, bem como a estimar a quantidade de metano emitida por essas plantas em diferentes épocas do ano.

Brix (1994) aborda o papel das plantas aquáticas (macrófitas) na função e desempenho de sistemas de tratamento de água, como zonas úmidas construídas. A evaporação e a transpiração dessas plantas são fatores-chave que afetam a remoção de nutrientes e poluentes. Engelhardt *et al.* (2001) investigam o efeito da riqueza de espécies de plantas aquáticas em mesocosmos de zonas úmidas na função e nos serviços ecossistêmicos. Eles incluem a evapotranspiração, que é a combinação da evaporação da água da superfície e da transpiração das plantas, como um dos processos em estudo. Madsen *et al.* (2001) exploram a interação entre

a dinâmica do sedimento, o movimento da água e as plantas aquáticas submersas, destacando a importância das macrófitas na regulação do balanço hídrico em mesocosmos.

Capps *et al.* (2014) examinam a função das poças temporárias na desnitrificação e no processamento de matéria orgânica em paisagens florestais. As plantas aquáticas são um componente importante desses sistemas, e a evaporação desempenha um papel significativo na dinâmica hídrica e nos processos biogeoquímicos. Esses estudos oferecem contribuições sobre a evaporação em mesocosmos colonizados por plantas aquáticas e a influência dessas plantas no ecossistema.

2.2 Qualidade de água, eutrofização e macrófitas

Reservatórios artificiais são corpos de água criados pelo homem, geralmente através da construção de barragens e diques, com o objetivo de armazenar água para abastecimento, irrigação, geração de energia, controle de cheias e lazer, entre outras finalidades. Esses reservatórios desempenham um papel crucial no abastecimento de água para uso doméstico, agrícola e industrial, além de gerar energia elétrica e auxiliar no controle de enchentes (BISWAS, 2018). Um dos principais problemas encontrados em reservatórios artificiais é a eutrofização, que ocorre quando há um excesso de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, na água (CARPENTER *et al.*, 2011).

A contaminação por poluentes químicos, como metais pesados, pesticidas e compostos orgânicos persistentes, também é uma questão relevante (SCHWARZENBACH *et al.*, 2010). Esses contaminantes podem ser provenientes de diversas fontes, como a agricultura, a indústria e os esgotos urbanos, e afetam negativamente a qualidade da água em reservatórios artificiais.

O aquecimento global e as mudanças climáticas também exercem impacto sobre a qualidade da água em reservatórios (DELPLA *et al.*, 2009; GLEICK, 2018). Variações na temperatura e nos padrões de precipitação podem alterar a estratificação térmica, a circulação de água e a disponibilidade de oxigênio nos reservatórios. Esses fatores, por sua vez, podem afetar a qualidade da água e a saúde dos organismos aquáticos (MOSS *et al.*, 2011).

O monitoramento e a gestão da qualidade da água nos reservatórios artificiais são essenciais para garantir a preservação desse recurso e a saúde das populações humanas e dos ecossistemas (BARTRAM *et al.*, 2012). Nesse sentido, a Organização Mundial da Saúde (2017) mostra que a qualidade da água em reservatórios artificiais é, de fato, um assunto de grande importância, pois afeta diretamente a saúde pública, o meio ambiente e a economia. Para

garantir a qualidade da água em reservatórios artificiais, é essencial monitorar e gerenciar os aspectos a seguir.

- a) **Planejamento e gestão integrada:** a gestão da qualidade da água em reservatórios deve ser integrada com a gestão de recursos hídricos em bacia hidrográfica, levando em consideração todos os usos da água, os impactos ambientais e as interações entre os diferentes componentes do sistema.
- b) **Nutrientes e eutrofização:** o excesso de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, provenientes de fertilizantes agrícolas, esgotos e outras fontes, pode causar a eutrofização das águas, levando à proliferação de macrófitas e ao esgotamento do oxigênio. Isso afeta a qualidade da água e a vida aquática. Para prevenir a eutrofização, é necessário implementar práticas de manejo adequadas nas áreas que cercam os reservatórios.
- c) **Poluição e contaminação:** a água nos reservatórios pode ser contaminada por diversas fontes, como escoamento de áreas urbanas e agrícolas, despejo de efluentes industriais e domésticos, e sedimentação de partículas. É crucial controlar e minimizar essas fontes de poluição, garantindo que as águas sejam tratadas adequadamente antes de serem liberadas no reservatório.
- d) **Tratamento de água:** a água armazenada nos reservatórios deve ser tratada antes de ser utilizada para abastecimento humano ou outras atividades. O tratamento pode incluir processos como a coagulação, a floculação, a sedimentação, a filtração e a desinfecção, dependendo da qualidade da água bruta e dos padrões de qualidade exigidos para o uso pretendido.
- e) **Monitoramento e vigilância:** a qualidade da água nos reservatórios deve ser monitorada regularmente por meio de análises físicas, químicas e biológicas. Isso permite a identificação precoce de problemas e a implementação de medidas corretivas.

O índice de estado trófico (IET) é uma medida utilizada para avaliar o nível de nutrientes e a produtividade biológica em corpos d'água, como lagos, reservatórios e rios (CARLSON, 1977). O IET é uma ferramenta útil para monitorar a qualidade da água e identificar problemas, como a eutrofização. A eutrofização ocorre quando o excesso de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, leva ao crescimento excessivo de algas e plantas

aquáticas, resultando na degradação da qualidade da água e na redução do oxigênio dissolvido (VON SPERLING, 1994).

O IET pode ser calculado com base em vários parâmetros, incluindo a concentração de clorofila-a, a transparência da água (medida pelo disco de *Secchi*) e a concentração de nutrientes, como fósforo total e nitrogênio total (CARLSON *et al.*, 1996; LAMPARELLI, 2004). Dependendo dos valores obtidos, os corpos d'água são classificados em diferentes categorias tróficas, como ultraoligotrófica, oligotrófica, mesotrófica, eutrófica, supereutrófica e hipereutrófica (OECD, 1982).

As categorias tróficas são definidas basicamente da seguinte forma: ultraoligotróficos e oligotróficos são ambientes com baixa concentração de nutrientes e produtividade biológica limitada. A água geralmente é clara, e a concentração de oxigênio dissolvido é alta. Mesotróficos são ambientes com concentrações moderadas de nutrientes e produtividade biológica intermediária. A água pode apresentar alguma turvação e níveis moderados de oxigênio dissolvido. Eutrófico são ambientes com alta concentração de nutrientes e produtividade biológica elevada. A água tende a ser turva, e o crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas pode levar à depleção de oxigênio dissolvido e impactos negativos no ecossistema aquático. Supereutrófico e hipereutrófico são ambientes com concentrações extremamente altas de nutrientes e produtividade biológica excepcionalmente alta. A água é geralmente muito turva, e a depleção de oxigênio dissolvido pode causar a mortandade de peixes e outros organismos aquáticos (WETZEL, 2001; CETESB, 2022).

O IET é uma ferramenta importante para o monitoramento e gerenciamento da qualidade da água e pode ajudar na identificação de áreas críticas que necessitam de ações de restauração ou conservação (CARPENTER *et al.*, 1998). No estudo de Lamparelli (2004), a equação para calcular o Índice de Estado Trófico (IET) adaptado para reservatórios brasileiros é baseada em três parâmetros: concentração de fósforo total (PT, em $\mu\text{g/L}$), concentração de clorofila a (Chl-a, em $\mu\text{g/L}$) e transparência da água medida pelo disco de Secchi (SD, em metros).

As faixas de valores para o Índice de Estado Trófico (IET) proposto por Carlson (1977) são baseadas na concentração de fósforo total, clorofila a e transparência da água (medida pelo disco de *Secchi*). Essas faixas de valores são utilizadas para classificar os corpos d'água em diferentes estados tróficos (Tabela 1).

Tabela 1 – Faixas de valores para o IET e os parâmetros relacionados (concentração de fósforo total, concentração de clorofila a e transparência da água) em cada categoria trófica

Categoria trófica	Índice de Estado Trófico (IET)	Fósforo Total (µg/L)	Clorofila a (µg/L)	Transparência da água (Secchi, m)
Ultraoligotrófico	IET < 47	< 8	< 1,17	≥ 2,4
Oligotrófico	47 ≤ IET < 52	8 – 19	1,17 – 3,24	2,4 – 1,7
Mesotrófico	52 ≤ IET < 59	19 – 52	3,24 – 11,03	1,7 – 1,1
Eutrófico	59 ≤ IET < 63	52 – 120	11,03 – 30,55	1,1 – 0,8
Supereutrófico	63 ≤ IET < 67	120 – 233	30,55 – 69,05	0,8 – 0,6
Hipereutrófico	IET ≥ 67	> 233	> 69,05	< 0,6

Fonte: Carlson (1977).

Essas informações são úteis para avaliar a qualidade da água em reservatórios brasileiros e identificar possíveis problemas, como a eutrofização em reservatórios brasileiros. No entanto, é importante notar que estas faixas e valores podem variar dependendo das condições específicas dos corpos d'água e da região em estudo.

As plantas aquáticas são uma importante categoria de plantas que vivem em ambientes com alta umidade ou completamente submersas na água. Estas plantas desempenham um papel crucial na manutenção do equilíbrio ecológico dos ambientes aquáticos, pois ajudam a controlar a qualidade da água e a proliferação de algas indesejadas (CARPENTER *et al.*, 1998). Elas desempenham várias funções ecológicas, como a síntese de compostos orgânicos, liberação de oxigênio, absorção e acumulação de elementos químicos, filtração de água e desintoxicação de poluentes, entre outras (LESIV *et al.*, 2020). A qualidade da água desses recursos deve ser mantida, preservando o equilíbrio de suas características físicas, químicas e biológicas.

No entanto, os sistemas de água doce de superfície, como rios, córregos, lagos e lagoas, foram fortemente impactados por distúrbios antropogênicos e naturais, que afetaram negativamente a estrutura e a função de ecossistemas inteiros (KARMAKAR *et al.*, 2020).

Várias abordagens têm sido utilizadas para conservar, restaurar ou melhorar os corpos d'água, mas avaliar sua eficácia é demorado e caro. Portanto, identificar espécies ou agrupamentos que possam fornecer um substituto para a biodiversidade de água doce é de grande valor para o gerenciamento e planejamento da conservação (LAW *et al.*, 2019; ALAHUHTA *et al.*, 2021).

Akasaka (2010) analisou 55 lagoas na região oeste do Japão para investigar a relação entre o uso do solo e a diversidade de macrófitas aquáticas e a qualidade da água. Foi

identificado que as extensões espaciais relevantes para explicar a riqueza de macrófitas flutuantes, submersas e emergentes foram diferentes. As macrófitas submersas foram as mais afetadas pela qualidade da água, enquanto a urbanização e o aumento do tamanho das lagoas foram os principais fatores que reduziram a diversidade de macrófitas aquáticas.

Macrófitas flutuantes podem reduzir significativamente as taxas de evaporação em reservatórios tropicais, devido a fatores como sombreamento da superfície da água, redução da velocidade do vento e aumento da umidade local, este estudo fornece informações valiosas sobre a interação entre macrófitas flutuantes e evaporação em reservatórios tropicais. (RODRIGUES *et al.*, 2023).

A *Eichhornia crassipes* é uma planta aquática, flutuante, anual ou perene, nativa da América tropical. O caule flutuante é rastejante e forma estolões. O pecíolo pode ser ocasionalmente inflado. As flores têm pétalas lilases com margem lisa e uma mancha amarela na pétala superior (AZEVEDO NETTO, 1988). Serve de alimento para roedores e habitat para pequenos invertebrados aquáticos e peixes. Em suas densas raízes forma local propício para a desova de algumas espécies de peixes (GANGULY *et al.*, 2012). É empregada na depuração de corpos de água poluídos, bem como na produção de biogás. Possui valor ornamental e também é usada para confecção de esteiras, cordas, cadeiras, cortinas e outras obras trançadas (GONÇALVES JÚNIOR *et al.*, 2009).

O aguapé, como todas as plantas, existe dentro dos limites de tolerância relacionados a diversos fatores ambientais, incluindo temperatura, luz e nutrientes (ODUM, 1988). Muitas pesquisas sobre plantas aquáticas abordam suas propriedades e requisitos nutricionais. No entanto, a definição de macrófitas já enfatiza a relação interdependente entre essas plantas e a água.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na estação meteorológica do Centro de Ciências Agrárias, no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Fortaleza, capital do Ceará, conforme mostrado na Figura 2. Fortaleza possui clima tropical úmido e seco (Aw/As) segundo a classificação de Köppen, com temperaturas médias anuais de 27°C, variando entre 24°C e 31°C. O clima é dividido em duas estações: chuvosa, de janeiro a maio, com maior precipitação em março e abril, podendo ultrapassar 200 mm mensais; e seca, de julho a dezembro, com menos chuvas e mais sol (INMET, 2019).

Figura 2 – Mapa de localização do sítio experimental à esquerda (ArcGIS-Earth, 2022), onde se identificam os dois tanques de mesocosmos (parte central inferior) e a Estação Meteorológica (parte central superior), com pluviômetro, Tanque Classe A e estação automática. À direita vê-se o estado do Ceará (figura superior) e sua posição no contexto do Brasil e da América do Sul (figura inferior).



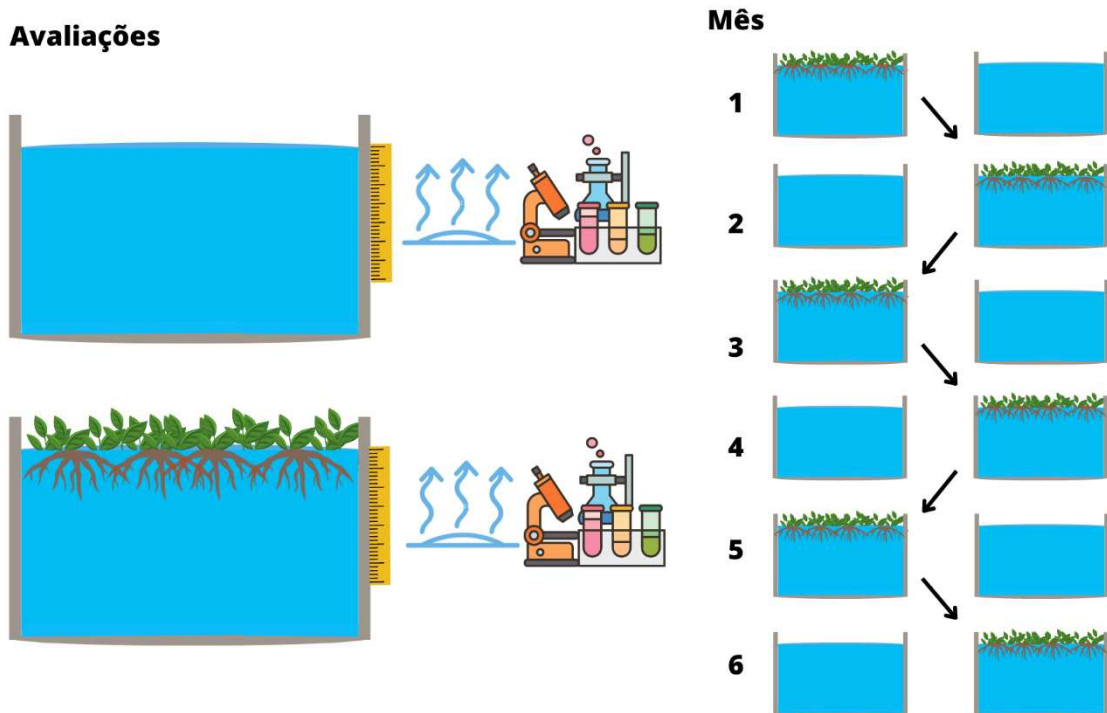
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 Arranjo experimental

Para a consecução do experimento, foram usados dois tanques em mesoescala (5 m de diâmetro e 2,50 m de profundidade; distantes um do outro de 3 m), situados a menos de 20 m da Estação Meteorológica do Pici (Figuras 2 e 3), em funcionamento desde 1961, na qual são medidas a evaporação do Tanque Classe A e a pluviometria, entre outras variáveis (FEITOSA et al., 2021). A água dos tanques foi extraída do Açude Santo Anastácio, que se encontra em elevado estágio de eutrofização (MESQUITA et al., 2020) e se situa a cerca de 1 km dos tanques experimentais. As macrófitas usadas nos experimentos são *Eichhornia crassipes*, também extraídas do Açude Santo Anastácio. O uso dessa macrófita se justifica porque, segundo Rezania (2015), trata-se de espécie exótica que demonstra elevada capacidade de invadir os corpos hídricos em diversas regiões geográficas, sendo bastante comum no Ceará.

Os experimentos se estenderam por duas etapas. Na primeira, entre 27/06/2022 e 22/12/2022, cada tanque de mesoescala tinha um uso: nos meses ímpares (1º, 3º e 5º), o tanque T1 tinha água coberta por macrófitas, enquanto o tanque T2 tinha água sem macrófitas; e nos meses pares (2º, 4º e 6º) o tanque T1 tinha água sem macrófita e o tanque T2 tinha sua água coberta por macrófitas (Figura 3). O intento desse arranjo foi a geração de quatro tratamentos, cada um com três meses de repetição, caso houvesse alguma diferença estatística significativa entre T1 e T2. Na segunda etapa (de 13/01/2023 a 17/02/2023), ambos os tanques encontravam-se sem macrófitas, de modo a se avaliar se havia alguma diferença estatística entre os dois tanques que pudessem induzir a erro na estimativa das perdas evaporativas (por exemplo, eventuais fissuras em um dos tanques, sombreamento ou bloqueamento de ventos, entre outros fatores).

Figura 3- Tanques de mesocosmos (imagens superiores) (A) tanque sem a presença de macrófitas; (B) tanque com a presença de macrófitas; e arranjo experimental (imagem inferior).



O experimento foi conduzido com o objetivo de explorar e analisar de maneira detalhada as condições climáticas por meio de diversos equipamentos da estação meteorológica. O pluviômetro, um dos equipamentos fundamentais da estação, foi estrategicamente instalado para coletar dados precisos sobre a precipitação. Seu funcionamento se baseia na medição quantitativa da água da chuva, permitindo uma avaliação confiável da quantidade de chuva que atinge o solo durante um determinado período.

Além disso, para capturar as variações da temperatura atmosférica, o experimento empregou termômetros distintos: um para medir a temperatura do ar com bulbo seco e outro para medir a temperatura do bulbo úmido. Enquanto o primeiro oferece uma compreensão direta da temperatura ambiente, o último, envolto em um pano úmido, oferece informações sobre a umidade relativa do ar, um fator crítico nas interações climáticas.

A exposição solar direta foi investigada com a ajuda do heliógrafo, um instrumento mecânico óptico que traça o movimento aparente do sol ao longo do dia. As leituras obtidas permitem calcular a duração e a intensidade da radiação solar direta.

A velocidade dos ventos foi avaliada por meio do anemômetro, seus registros proporcionaram informações valiosos sobre os padrões de circulação atmosférica, revelando as forças que moldam o ambiente climático. Nossa abordagem experimental usou o Tanque Classe A, um equipamento que oferece uma estimativa direta da evaporação em uma superfície aberta. Detalhes mais abrangentes sobre os instrumentos utilizados, bem como os processos de observação e interpretação dos dados, podem ser acessados nas publicações a seguir (WMO, 1994; WMO, 1996; FEITOSA *et al.*, 2021).

3.3 Índice de Estado Trófico

O Índice de Estado Trófico (IET) foi utilizado como métrica na classificação do estado trófico de corpos hídricos em mesocosmos, baseando-se na análise das concentrações de nutrientes, na produtividade biológica e na turbidez. A determinação do IET envolveu a mensuração da transparência da água, das concentrações de clorofila-a e do nutriente fósforo total. Neste estudo, adotou-se uma abordagem sistemática e detalhada para calcular o IET em mesocosmos, seguindo as seguintes etapas:

- a) coleta de amostras de água e análise laboratorial;
- b) cumprimento das exigências da legislação ambiental vigente (Resolução CONAMA nº 357/2005); e
- c) aplicação de modelos matemáticos para determinação do Índice de Estado Trófico (IET) utilizando o método de Carlson (1977) Equações 11, 12 e 13.

$$\text{IET(PT)} = 10 \cdot \left[6 - \left(\frac{\ln 48}{\ln 2} \right) \right] \quad (11)$$

$$\text{IET(Cla)} = 10 \cdot \left[6 - \left(\frac{2,04 - 0,68 \ln \text{Cla}}{\ln 2} \right) \right] \quad (12)$$

$$\text{IET(DS)} = 10 \cdot \left[6 - \left(\frac{\ln \text{DS}}{\ln 2} \right) \right] \quad (13)$$

Em que *IET* é o Índice de Estado Trófico (adimensional); \ln é o logaritmo neperiano; *PT* é a concentração de fósforo total (mg.L^{-1}); *Cla* é o teor de clorofila-a total (mg.m^{-3}); *SD* é a profundidade do disco de Secchi (m).

A respeito do monitoramento e integração dos dados e informações obtidos, durante um período de seis meses, as amostras de água foram coletadas antes e após a remoção das macrófitas nos reservatórios. Mensalmente, um conjunto de oito amostras era obtido, composto por quatro análises de clorofila-a e quatro análises de fósforo total. A transparência da água, medida pelo disco de Secchi, foi determinada seguindo procedimentos padrão para avaliação da qualidade hídrica. Ao final de cada mês, a transparência era avaliada em cada quadrante dos tanques, e a partir disso, era calculada uma média das medições.

A coleta de amostras de água para análise de qualidade seguiu as normas e diretrizes estabelecidas pelos órgãos reguladores e ambientais, garantindo a precisão, confiabilidade e comparabilidade dos resultados das análises. No Brasil, a principal norma que orienta a coleta de amostras de água para análise de qualidade é a ABNT NBR 9898:2008 – “Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos hídricos receptores”. O Índice de Estado Trófico (IET) foi calculado pelas Equações 11, 12 e 13 relacionados ao fósforo total IET(PT), clorofila a IET(Cla) e transparência da água IET(DS), respectivamente.

O Índice de Estado Trófico (IET) foi utilizado na classificação do estado trófico de corpos hídricos em mesocosmos, com base na análise das concentrações de nutrientes e na produtividade biológica e transparência da água. O teste envolveu a coleta e análise de amostras de água, cumprimento das exigências da legislação ambiental vigente, aplicação de modelos matemáticos para o cálculo do IET.

Ao avaliar a qualidade da água nos mesocosmos e investigar possíveis relações com a evaporação de água em reservatórios eutrofizados, este estudo pode contribuir para um melhor entendimento dos processos envolvidos na eutrofização e auxiliar na elaboração de estratégias de gerenciamento e preservação da qualidade da água em reservatórios.

3.4 Medida dos processos evaporativos

3.4.1 Medidas em tanques de mesocosmos

Este experimento visou investigar o impacto das macrófitas na evaporação, utilizando dois tanques evaporimétricos semelhantes, ambos com diâmetro de 5,00 m e profundidade de 2,50 m (Figura 3). Os tanques foram montados a céu aberto e posicionados a uma distância de 3 m entre si, contextualizado nas mesmas condições ambientais (Figura 2).

Para minimizar erros sistemáticos, foi realizada a alternância da presença de macrófitas entre os tanques e a substituição da água a cada mês. A evaporação foi medida diariamente e as variáveis meteorológicas foram coletadas por uma estação meteorológica a 30 metros dos tanques.

No primeiro mês, apenas o Tanque 1 foi preenchido com macrófitas, enquanto o Tanque 2 permaneceu sem plantas. A partir do segundo mês, as macrófitas foram transferidas do Tanque T1 para o Tanque T2, sendo essa rotação repetida a cada mês durante os seis meses do experimento.

As macrófitas foram retiradas dos tanques no sétimo mês para avaliar a evaporação nos reservatórios na ausência delas. Essa informação é útil para entender melhor a interação entre as macrófitas e o ecossistema do tanque, bem como para tomar decisões sobre a manutenção ou o manejo desses ambientes. Ao comparar os padrões de evaporação dos dois tanques nessa condição controlada, foi possível determinar se os fatores relacionados às macrófitas eram um componente significativo das diferenças observadas nos níveis de evaporação entre os tanques.

A estação meteorológica coletou dados de variáveis climáticas, relevantes para a análise da evaporação, como temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar. Esses dados foram importantes para contextualizar os resultados e entender como as macrófitas podem interagir com os fatores climáticos para afetar a perda de água.

A evaporação nos Tanques T1 e T2 foi medida diariamente às 09:00 da manhã, utilizando uma régua capaz de medir a altura da coluna de água dentro do poço tranquilizante dos mesocosmos (Figura 3). Essa coleta de dados permitiu uma análise temporal detalhada da evaporação e sua relação com a presença de macrófitas.

Para avaliar com maior precisão o efeito das macrófitas na evaporação, foram comparadas as medições nos Tanques T1 e T2 com as do Tanque Classe A, que serviu como padrão de referência para a evaporação em condições controladas. Essa comparação permitiu quantificar o impacto das macrófitas na taxa de evaporação e identificar desvios ou imprecisões

nas medições dos Tanques T1 e T2. Os valores de evaporação (ou evapotranspiração, conforme o caso) foram calculados pelo método do balanço hídrico (Equação 10).

Figura 4 – Esquemática do balanço hídrico nos tanques de mesocosmos



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Equação 14 relaciona a taxa de variação do volume (V) de água no tempo ($\Delta V/\Delta t$) com as entradas, como chuva e aporte hídrico por unidade de tempo ($H = P + I$), a evaporação por unidade de tempo (E) e a área de exposição do tanque (A).

$$\Delta V/\Delta t = (H - E).A \quad (14)$$

Esta taxa descreve como o volume de água no tanque muda em relação ao tempo. Ela depende das entradas de água e da evaporação que ocorrem no tanque. Se a entrada for maior que a evaporação, o volume de água no tanque aumentará, caso contrário, diminuirá. A variação da altura do nível de água representa a mudança na altura do nível de água no tanque. Multiplicar a área do tanque pela variação da altura do nível de água nos dá a variação do volume de água. Então, pode-se reescrever a Equação 14 pela Equação 15.

$$\Delta V/\Delta t = A.(\Delta y/\Delta t) \quad (15)$$

Acoplando-se as Equações 14 e 15, chega-se à Equação 16, segundo a qual a variação temporal da altura ($\Delta y/\Delta t$) é dada pela diferença entre as taxas temporais de entrada (q_{ent}) e de evaporação (E).

$$\Delta y/\Delta t = q_{ent} - E \quad (16)$$

Se a entrada de água for maior que a taxa de evaporação, a altura do nível de água aumentará no intervalo de tempo Δt ; caso contrário, diminuirá. Pode-se, portanto, expressar a taxa temporal de evaporação em termos das taxas de entrada e da variação da lâmina de água acumulada no tanque, Equação 17 (semelhante à Equação 10).

$$E = q_{ent} - \Delta y/\Delta t \quad (17)$$

Considerando-se que as medidas são feitas de cima para baixo, enquanto a lâmina de água é medida de baixo para cima, $\Delta y/\Delta t = -\Delta z/\Delta t$ e, portanto, a taxa evaporativa pode ser calculada pela Equação 18.

$$E = q_{ent} + \Delta z/\Delta t \quad (18)$$

Além dos instrumentos, é possível empregar modelos parametrizados, que podem ser classificados como físicos ou empíricos. Esses modelos geralmente se fundamentam no balanço de energia, no método aerodinâmico proposto por Penman (1948) ou em variações desses métodos. Modelos alternativos baseiam-se no balanço hídrico dos reservatórios, como aqueles descritos por Chow *et al.* (1988), Equação 8.

A medição da evaporação, apesar de sua importância, frequentemente enfrenta desafios devido a fatores externos, como a ocorrência de chuvas, que podem introduzir incertezas nos cálculos. Para superar essa questão, decidiu-se calcular como valor unitário a evaporação média ao longo de três dias. Essa abordagem, que contempla uma janela de tempo mais ampla (3 dias) permitiu reduzir a influência de fatores externos e obter estimativas mais confiáveis da evaporação média propiciando uma representação mais precisa da evaporação.

3.4.2 Medidas no Tanque Classe A

A medição da evaporação em um Tanque Classe A foi realizada conforme os passos a seguir.

- a) **preparação do Tanque:** o Tanque Classe A é instalado em uma área aberta, longe de obstáculos que possam interferir na medição, como árvores ou edifícios;
- b) **aferição do Tanque:** antes de iniciar as medições, é feita a aferição do Tanque Classe A. Isso envolve o preenchimento do tanque com uma quantidade conhecida de água e a medição precisa do nível de água inicial. Essa aferição é necessária para garantir a precisão das medições subsequentes;
- c) **medição da evaporação:** a medição da evaporação é realizada pela observação do nível de água no Tanque Classe A ao longo do tempo (Equação 18) através de um micrômetro. A evaporação é determinada pela diferença entre o nível de água inicial e o nível de água final, para obter uma estimativa precisa da evaporação; e
- d) **medidas meteorológicas auxiliares:** durante as medições, são medidas meteorológicas variáveis auxiliares, como temperatura, umidade do ar, velocidade do vento e radiação solar. Esses fatores influenciam a taxa de evaporação e podem auxiliar na interpretação dos resultados obtidos com as medições do Tanque Classe A.

É primordial destacar que a quantificação da evaporação por meio de um Tanque Classe A constitui meramente uma estimativa da taxa real de evaporação em uma região específica. A velocidade de evaporação está sujeita a variações de acordo com as particularidades locais e as propriedades do entorno (SOUSA *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2017).

3.4.3 Estimativa da evaporação pelo método de Penman

Para estimar a evaporação de referência, optou-se por uma abordagem integrada que envolveu a união dos métodos de balanço de energia e aerodinâmico, o modelo combinado de Penman (Equação 8). A intenção por trás dessa estratégia foi obter uma compreensão mais abrangente e precisa dos processos envolvidos na evaporação, considerando múltiplos fatores que influenciam esse fenômeno crucial.

A primeira etapa desse processo foi calcular a taxa de evaporação (E_r) pelo método de balanço de energia, conforme a Equação 5. Essa equação permitiu explorar a relação entre a radiação líquida, o calor latente de vaporização da água e a densidade da água, aspectos fundamentais para estimar a quantidade de água evaporada em uma determinada superfície.

Em seguida, procede-se à estimativa da taxa de evaporação através do método aerodinâmico (E_a), como descrito na Equação 6. Essa etapa considera a influência da velocidade do vento e da resistência aerodinâmica na taxa de evaporação, levando em conta o coeficiente de transferência de vapor (B) obtido a partir da Equação 7. O cálculo desse coeficiente envolve a constante de von Kármán, a pressão do ar e a massa específica do ar, entre outras.

A coleta de dados desempenhou um papel fundamental nesse processo, e, para isso, recorreu-se à estação meteorológica convencional da Universidade Federal do Ceará (UFC), localizada no sítio experimental usado nessa pesquisa. Na estação, foram monitoradas variáveis meteorológicas através de instrumentos como o piranômetro de Epply, anemômetro, heliógrafo de Campbell e barômetro de mercúrio de cuba fixa.

3.5 Análise estatística

Para analisar os dados obtidos na pesquisa com dois mesocosmos (um com macrófitas e outro sem), foram aplicados testes estatísticos apropriados para comparar as taxas de evaporação entre os experimentos. Com os dados que forem normalmente distribuídos e apresentarem variâncias semelhantes, o teste t de Student foi utilizado. Caso contrário, o teste não paramétrico, como o teste U de Mann-Whitney.

O teste de Shapiro-Wilk é uma técnica estatística essencial para avaliar se uma amostra de dados segue uma distribuição normal, para sua aplicação nesse trabalho foi utilizado o software estatístico Minitab. Além disso, o teste gera um valor-p, que é a probabilidade associada ao valor calculado no teste. A estatística de teste, representada como W , é o componente central do teste de Shapiro-Wilk (Equações 19) e depende do coeficiente b , (Equação 20).

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (19)$$

$$b^2 = \sum_{i=1}^{n/2} a_{i,n} (X_{(n-i+1)} - X_{(i)}) \quad (20)$$

Em que X_i representa as medidas de ordem da amostra; X é a média da amostra; $a_{i,n}$ são as constantes que derivam das médias, variâncias e covariâncias das estatísticas de ordem de uma amostra aleatória; e n é o tamanho da amostra.

O teste U de Mann-Whitney é um dos testes não paramétricos que têm como objetivo verificar a igualdade das medianas de duas populações independentes; ademais, com dados contínuos, esse teste foi uma alternativa ao teste t de Student, já que os dados, segundo o teste de Shapiro-Wilk, apresentaram anormalidade. O teste de Mann-Whitney utiliza um método de aproximação normal para determinar o valor de p do teste. O comportamento dos dados de variáveis qualitativas e quantitativas foram representados graficamente.

O gráfico de linhas foi utilizado para variáveis qualitativas nominais e ordinais, mas também pode ser usado para variáveis quantitativas discretas, pois permite investigar a presença de tendência de dados

O diagrama de caixa (*boxplot*) é uma representação gráfica que fornece um resumo visual da distribuição de uma variável, exibindo a mediana, os quartis e possíveis *outliers*. Ele foi usado para comparar visualmente as taxas de evaporação entre os dois mesocosmos, ajudando a identificar tendências e diferenças. Antes de realizar essas análises estatísticas, serão verificados todos os pressupostos dos testes, como a normalidade e homogeneidade das variâncias, e certificar-se de que os dados coletados são apropriados para as análises escolhidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Índice de Estado Trófico

A avaliação da qualidade da água em tanques ou reservatórios em mesoescala é de extrema importância, pois esses reservatórios podem simular a realidade de outras escalas, como rios, açudes e até mesmo bacias. A importância dessa avaliação está relacionada aos processos e às taxas que ocorrem nesses corpos d'água e que podem afetar diretamente corpos hídricos.

Dentro desse contexto, um dos aspectos de grande relevância no âmbito limnológico centrou-se no açude Santo Anastácio, que desempenha um papel crucial ao fornecer as macrófitas e a água empregadas nos tanques utilizados neste estudo. Dentre os pioneiros a investigar os atributos limnológicos desse açude, Oliveira (1975) se destaca. Suas análises deixaram claro que a qualidade da água no açude Santo Anastácio poderia ser classificada como hipereutrófica, uma constatação que persiste na atualidade, conforme reportado por (LIMA NETO *et al.*, 2019; MESQUITA *et al.*, 2021; ROCHA *et al.*, 2022;).

O Índice de Estado Trófico desempenha um papel fundamental na avaliação da saúde dos corpos d'água. Os resultados apresentados na Tabela 2 classificam esses índices nos tanques de mesocosmos T1 e T2 ao longo do período de experimento.

Os resultados delineiam um padrão consistente que permeou todo o experimento, com ambos os tanques, T1 e T2, mantendo uma classificação contínua hipereutrófica em todas as datas de medição. Esse padrão nos indica uma clara deterioração nas águas dos tanques, sinalizando a existência de uma sobrecarga de nutrientes que pode desencadear um crescimento excessivo de organismos aquáticos. Essa sobrecarga de nutrientes pode levar à diminuição do oxigênio dissolvido na água, causando a morte de peixes e outros organismos aquáticos (WIEGAND *et al.*, 2020; LIMA *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2021). Além disso, altos níveis tróficos podem reduzir as taxas na evaporação em corpos hídricos, como medido em reservatórios tropicais hipereutrofizados com abundância de algas (MESQUITA *et al.*, 2021; ROCHA *et al.*, 2022).

Tabela 2 – Índice de Estado Trófico e sua classificação nos Tanques de mesocosmos T1 e T2 ao longo do experimento

Data	Tanque T1	Estado	Tanque T2	Estado
25/07/2022	81	Hipereutrófico	79	Hipereutrófico
25/08/2022	80	Hipereutrófico	77	Hipereutrófico
22/09/2022	79	Hipereutrófico	70	Hipereutrófico
26/10/2022	78	Hipereutrófico	79	Hipereutrófico
24/11/2022	73	Hipereutrófico	76	Hipereutrófico
22/12/2022	75	Hipereutrófico	72	Hipereutrófico

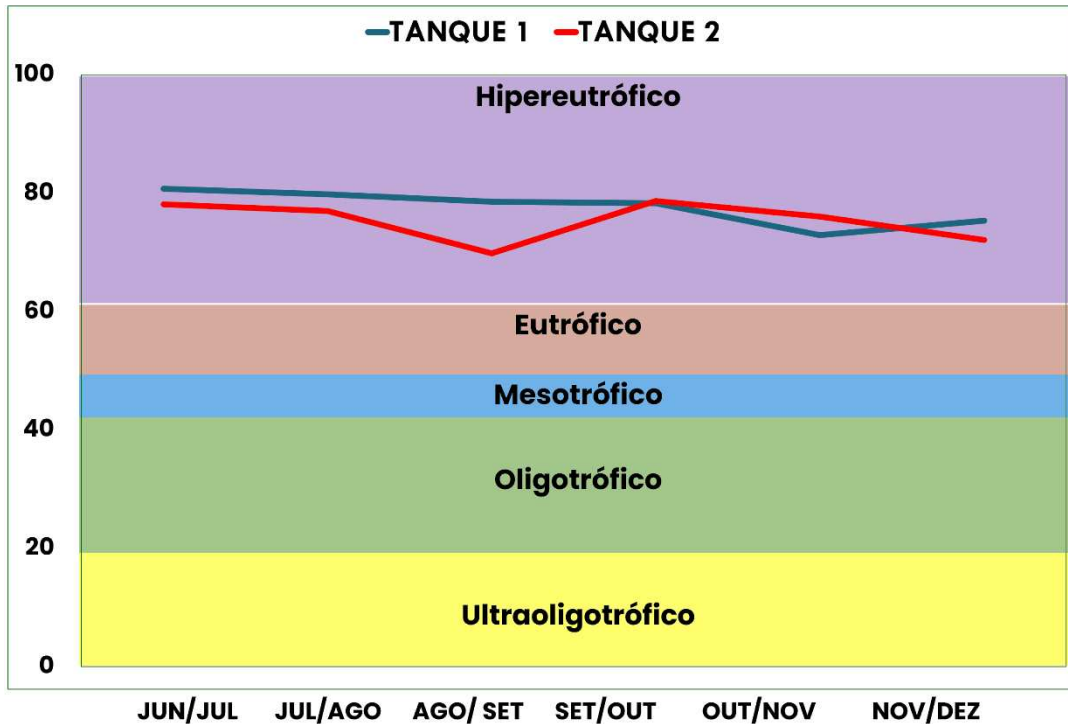
Fonte: Elaborada pelo autor.

É interessante observar os valores do Índice de Estado Trófico dos dois tanques experimentais ao longo do tempo na Tabela 2. A água, advinda do Açude Santo Anastácio, localizado a cerca de 1 km do local do experimento, mostra o estado trófico do reservatório (MESQUITA *et al.*, 2020). Apesar de não observarmos tendência clara de aumento ou diminuição do IET ao longo do experimento, tais variações são observadas em reservatórios em escala real (WIEGAND *et al.*, 2020), o que pode ser atribuído a vários fatores, como a eutrofização, a contaminação por nutrientes e a falta de planejamento na gestão hídrica (LIMA *et al.*, 2020; ABBASI, 2012; FERNANDES *et al.*, 2023). Estudos têm mostrado que o fósforo total é frequentemente identificado como o nutriente limitante para o crescimento fitoplanctônico em reservatórios do semiárido (WIEGAND *et al.*, 2020). Além disso, a presença de cianobactérias em reservatórios de lagos semiáridos tropicais pode ser mais pronunciada devido às altas temperaturas (FREIRE *et al.*, 2022).

Outro fator que afeta a qualidade da água em reservatórios do semiárido é a contaminação por nutrientes e sedimentos provenientes do uso do solo para agropecuária. Estudos têm mostrado que a predominância do uso do solo para agropecuária pode contribuir para a degradação da qualidade da água, principalmente em relação a parâmetros associados a sólidos e nutrientes (COSTA *et al.*, 2022; MARTINS *et al.*, 2022).

Portanto, a análise dos dados da Tabela 2 destaca a importância do monitoramento contínuo da qualidade da água e do estado de eutrofização em corpos d'água. Os resultados mostram um estado trófico hipereutrófico consistente nos tanques T1 e T2 ao longo do experimento, refletindo um alto nível de nutrientes e um potencial crescimento excessivo de organismos aquáticos. A Figura 4 representa o Índice de Estado Trófico nos tanques de mesocosmos T1 e T2 fornece uma representação visual das variações temporais nos níveis de eutrofização ao longo do período do experimento.

Figura 5– Índice de Estado Trófico simultâneo nos tanques de mesocosmos T1 e T2 ao longo do experimento (ano 2022).



Fonte: Elaborada pelo autor.

O eixo das abscissas, que representa as datas das medições, é crucial para entender as mudanças ao longo do tempo. O padrão geral das linhas das séries temporais de ambos os tanques mostra que as flutuações nos valores do Índice de Estado Trófico não seguem uma tendência linear clara. Isso indica que as condições de eutrofização nos tanques não estão seguindo uma direção previsível de aumento ou diminuição contínua.

Uma observação detalhada das linhas de cada tanque revela algumas tendências interessantes. O Tanque T1 começa com um índice mais alto de aproximadamente 81 em julho, mas logo apresenta diminuições nos meses seguintes, atingindo um mínimo de cerca de 73 em novembro, antes de se recuperar para cerca de 75 em dezembro. Essa variação pode ser explicada por uma série de fatores, incluindo mudanças sazonais nas condições ambientais e possíveis intervenções de manejo.

O Tanque T2, por outro lado, inicia com um índice próximo de 79 e exibe variações semelhantes ao longo das medições subsequentes. As flutuações nesse tanque também podem ser atribuídas a fatores climáticos, disponibilidade de nutrientes e possíveis atividades humanas que podem afetar o balanço trófico. É importante ressaltar que a qualidade da água em reservatórios artificiais no semiárido é um tema complexo e multidisciplinar, que envolve aspectos biológicos, químicos, ambientais e sociais. Portanto, é fundamental a realização de

estudos e pesquisas que abordem essa temática de forma integrada, considerando os diferentes aspectos envolvidos (MENDES *et al.*, 2022; CARDOSO *et al.*, 2021).

A consistência nessa classificação trófica levanta questões sobre os fatores subjacentes que mantiveram os tanques em um estado trófico elevado. A presença de poluentes, como agrotóxicos e efluentes industriais, pode comprometer a qualidade da água em reservatórios (SILVA *et al.*, 2021). A contaminação por esgoto também é um problema relevante, pois pode levar à proliferação de micro-organismos patogênicos e comprometer a potabilidade da água (QUEIROZ *et al.*, 2019).

A interpretação completa do gráfico exige uma análise mais aprofundada dos fatores que podem estar contribuindo para as flutuações e tendências observadas. Possíveis influências incluem a entrada de nutrientes provenientes do meio ambiente circundante, práticas de manejo implementadas nos tanques, como a adição de nutrientes ou a manipulação da população de organismos, e a influência de condições climáticas sazonais, como temperaturas variáveis e padrões de luz solar.

4.2 Teste de similaridade dos tanques de mesocosmos

4.2.1 Teste simultâneo com os dois tanques sem macrófitas

Nesta seção, foram realizados testes para avaliar a similaridade entre os tanques de mesocosmos. Inicialmente, os tanques T1 e T2 foram analisados sem a presença de macrófitas. As medidas de evaporação foram registradas durante o período de 13/01/2023 a 17/02/2023. A avaliação da similaridade entre os tanques de mesocosmos utilizados nesse estudo objetiva avaliar a consistência e a validade dos resultados obtidos nos diferentes tratamentos.

Tabela 3 – Parâmetros estatísticos das medidas simultâneas de evaporação nos Tanques T1 e T2 sem macrófitas (de 13/01/2023 a 17/02/2023)

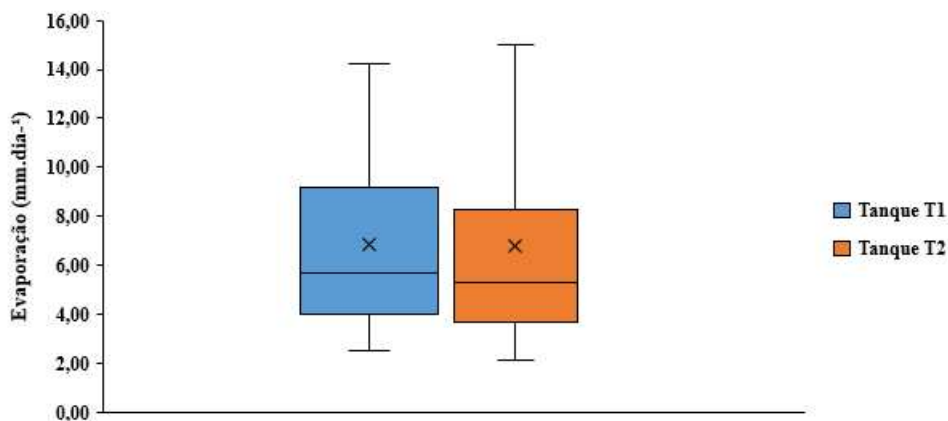
Parâmetros	Tanque T1	Tanque T2
<i>N</i>	30	30
Média (mm.dia ⁻¹)	6,84	6,76
Mediana (mm.dia ⁻¹)	5,70	5,30
Desvio padrão (mm.dia ⁻¹)	3,58	4,02
Mínimo (mm.dia ⁻¹)	2,50	2,10
Máximo (mm.dia ⁻¹)	14,20	15,00
Valor-p	0,69	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 3, são apresentados os resultados estatísticos das medidas simultâneas de evaporação para cada tanque. As estatísticas incluem o tamanho da amostra (n), a média das taxas de evaporação, a mediana, o desvio padrão, os valores mínimo e máximo observados, bem como o valor-p (p -value). Observando as médias de evaporação, notamos que o Tanque T1 registrou uma média de 6,84 mm/dia, enquanto o Tanque T2 teve uma média de 6,76 mm/dia. Essa pequena diferença nas médias mostra uma coerência notável nas taxas de evaporação entre os dois tanques. As medianas, que representam os valores centrais dos conjuntos de dados, apresentaram-se em 5,70 mm/dia para o Tanque T1 e 5,30 mm/dia para o Tanque T2.

A Figura 5 ilustra graficamente as medidas simultâneas de evaporação nos Tanques T1 e T2, durante o período de 13 de janeiro a 17 de fevereiro de 2023, sem a presença de macrófitas. Ao observar a figura, fica evidente que as representações visuais para ambos os tanques são praticamente idênticas. Os elementos centrais das caixas estão posicionados muito próximos, o que mostra uma notável semelhança nas medições de evaporação entre os Tanques T1 e T2. Essa proximidade é reforçada pelo fato de que as medianas, e os valores médios da distribuição, também são visualmente próximas. A amplitude das linhas verticais que se estendem a partir das caixas é semelhante nos dois tanques, indicando que a variação nos dados de evaporação é comparável entre eles.

Figura 6 – Evaporação simultânea nos Tanques T1 e T2 sem macrófitas (de 13/01/2023 a 17/02/2023)



Fonte: Elaborada pelo autor.

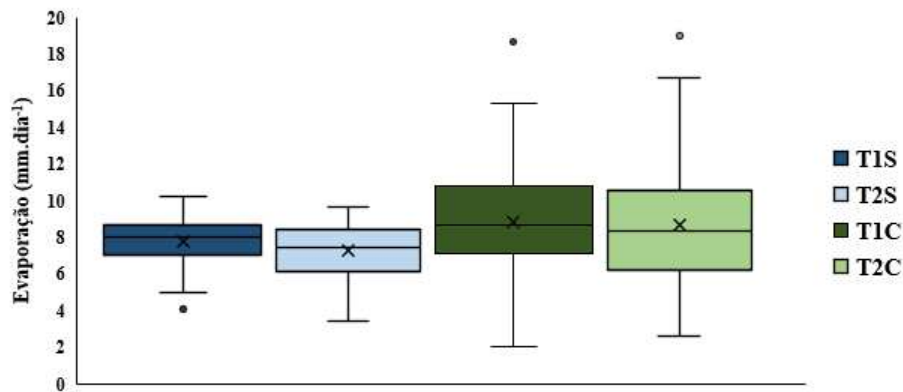
Através dos resultados apresentados na Tabela 3 e ilustrados na Figura 5, foi possível determinar que as taxas de evaporação nos dois tanques são estatisticamente similares. O valor-p (p -value) calculado foi de 0,69, superior ao nível de significância escolhido (0,05), o que nos levou a aceitar a hipótese nula de que os tanques são equivalentes em termos de

evaporação. Como resultado, os tratamentos T1C e T2C foram combinados em um único tratamento chamado TC, assim como T1S e T2S foram tratados como um único tratamento, denominado TS.

4.2.2 Teste não-simultâneo com os dois tanques

No decorrer do experimento, houve alternância na presença de macrófitas entre os tanques. Para validar os resultados da Seção 4.2.1, foi realizada outra análise de similaridade entre os tratamentos T1S e T2S, bem como entre T1C e T2C. A Figura 6 apresenta a evaporação nos tratamentos T1S, T2S, T1C e T2C durante o período de 27/06/2022 a 22/12/2022. Esta análise é essencial para confirmar se os tanques T1 e T2 são estatisticamente equivalentes sob as mesmas condições. Como confirmado anteriormente, os quatro tratamentos (T1S, T1C, T2S e T2C) podem ser considerados como apenas dois (TS e TC), simplificando a interpretação dos resultados.

Figura 7 – Evaporação nos tratamentos T1S e T2S e evapotranspiração nos tratamentos T1C e T2C (de 27/06/2022 a 22/12/2022)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Essa metodologia reforça ainda mais a robustez dos resultados ao considerar condições não simultâneas. A comparação entre os tratamentos T1S e T2S, e T1C e T2C, em um período de tempo prolongado, afirma que as conclusões anteriores sobre similaridade permanecem consistentes. Essa verificação é de extrema importância para garantir a confiabilidade dos resultados do estudo e fornece uma base sólida para as conclusões finais. Em suma, a avaliação da similaridade entre os tanques é fundamental para assegurar a validade dos resultados obtidos nos diferentes tratamentos. A análise estatística auxilia na simplificação dos grupos de tratamento, tornando a interpretação dos dados mais clara e concisa.

4.3 Análise comparativa dos processos evaporativos nos dois tratamentos

4.3.1 Tratamento TS: tanque sem macrófita

A análise comparativa dos processos evaporativos em diferentes tratamentos é fundamental para compreender as interações complexas entre os componentes de um ecossistema aquático. Neste contexto, examinou-se os parâmetros estatísticos da evaporação no Tratamento TS, que envolve um tanque de mesocosmos sem macrófitas. A Tabela 4 fornece uma visão abrangente das características das taxas de evaporação ao longo do período do experimento.

Tabela 4 – Parâmetros estatísticos das medidas de evaporação do Tratamento TS: tanque de mesocosmos sem macrófita (de 27/06/2022 a 22/12/2022)

Parâmetro	Evaporação
<i>n</i> (tamanho da amostra)	167
Média (mm.dia ⁻¹)	6,78
Mediana (mm.dia ⁻¹)	6,33
Desvio padrão (mm.dia ⁻¹)	3,24
Mínimo (mm.dia ⁻¹)	0,60
Máximo (mm.dia ⁻¹)	16,67

Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram realizadas 167 observações de evaporação ao longo de um período contínuo, abrangendo de 27 de junho de 2022 a 22 de dezembro de 2022. Esse extenso conjunto de dados permite uma análise detalhada das flutuações nas taxas de evaporação durante diferentes condições sazonais.

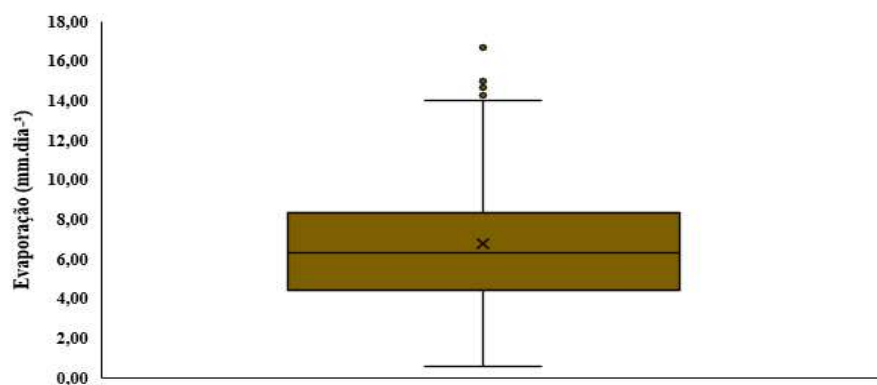
A média de evaporação registrada no Tratamento TS é de aproximadamente 6,78 mm.dia⁻¹. A mediana, que representa o valor central quando os dados são ordenados, é ligeiramente menor, em torno de 6,33 mm.dia⁻¹. O desvio padrão, que mede a dispersão dos dados em relação à média, é de aproximadamente 3,24 mm.dia⁻¹. Isso indica que as taxas de evaporação podem variar consideravelmente em relação à média, com uma dispersão moderada dos valores. A amplitude da dispersão sugere que fatores sazonais ou outros processos ambientais podem influenciar as variações nas taxas de evaporação.

A taxa mínima de evaporação registrada é de 0,60 mm.dia⁻¹, enquanto a taxa máxima é substancialmente maior, atingindo 16,67 mm.dia⁻¹. Essa ampla faixa entre os valores

mínimo e máximo indica uma variação significativa nas taxas de evaporação ao longo do período de observação. Tal variação pode ser atribuída a mudanças nas condições climáticas, incluindo temperaturas, umidade e radiação solar.

Essa análise fornece uma base sólida para compreender os processos evaporativos no Tratamento TS e suas implicações em um ecossistema aquático sem a presença de macrófitas. A comparação desses resultados com outros tratamentos ajuda a identificar as influências das macrófitas na evaporação e a compreender a dinâmica complexa desses ecossistemas.

Figura 8 – Evaporação no Tratamento TS: tanque de mesocosmos sem macrófitas (de 27/06/2022 a 22/12/2022)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 7 exibe uma representação visual dos dados de evaporação, apresentando medidas-chave de tendência central e dispersão. Nota-se que a mediana da evaporação no tanque sem macrófitas foi estimada em 6,33 mm.dia⁻¹. Essa medida central indica que metade das observações de evaporação estão abaixo desse valor.

Ao considerar a dispersão dos dados, observa-se que a maior parte das medições de evaporação está concentrada em um intervalo aproximado de 4,73 a 7,93 mm.dia⁻¹, conforme indicado pelo intervalo interquartil. Isso demonstra uma variação moderada nas taxas de evaporação dentro desse intervalo, indicando uma relativa consistência nas observações coletadas.

No entanto, também são identificados valores atípicos (*outliers*) no conjunto de dados, tais como 16,67 mm.dia⁻¹. A presença de *outliers* pode indicar eventos excepcionais ou fatores ambientais incomuns que resultaram em taxas de evaporação significativamente mais altas em determinados momentos.

Esses resultados apontam para uma dinâmica complexa nos processos evaporativos do tanque sem macrófitas. A variação nas taxas de evaporação pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo condições ambientais, variações térmicas e interações entre a água

e a atmosfera. A presença de *outliers* ressalta a importância de considerar não apenas os padrões centrais, mas também as circunstâncias excepcionais que podem afetar as taxas de evaporação

4.3.2 Tratamento TC: tanque com macrófita

A análise estatística da evapotranspiração no Tratamento TC, um tanque de mesocosmos com macrófitas, aponta padrões de perda de água e a interação entre as plantas e o ambiente aquático. Os resultados apresentados na Tabela 5 abrangem o período de 27 de junho a 22 de dezembro de 2022 e revelam informações importantes sobre a dinâmica hidrológica desse sistema.

Tabela 5 – Parâmetros estatísticos das medidas de evapotranspiração do Tratamento TC: tanque de mesocosmos com macrófitas (de 27/06/2022 a 22/12/2022)

Parâmetro	Evapotranspiração
<i>n</i> (tamanho da amostra)	167
Média (mm.dia ⁻¹)	8,75
Mediana (mm.dia ⁻¹)	8,42
Desvio padrão (mm.dia ⁻¹)	3,35
Mínimo (mm.dia ⁻¹)	2,03
Máximo (mm.dia ⁻¹)	19,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

A média de evapotranspiração calculada em 8,75 mm.dia⁻¹ reflete uma taxa substancial de perda de água, indicando que as macrófitas nesse ambiente contribuíram significativamente para os processos evaporativos. Essa média, no entanto, deve ser interpretada considerando as variações naturais inerentes a sistemas aquáticos e a influência de fatores climáticos e sazonais.

A mediana, que é 8,42 mm.dia⁻¹, destaca o valor central dos dados. Esse valor mediano, relativamente próximo da média, mostra que o conjunto de dados segue uma distribuição aproximadamente simétrica, indicando consistências nas perdas de água ao longo do período estudado.

Em relação ao estudo de Sentelhas *et al.* (2006), que investigou a relação entre a evapotranspiração do aguapé e a evaporação em águas abertas, influenciada por diversos parâmetros, é interessante notar que os resultados obtidos neste estudo apresentaram uma evapotranspiração média da *Eichhornia crassipes* como 12,8 mm.dia⁻¹ durante períodos secos

e $11,2 \text{ mm.dia}^{-1}$ durante períodos úmidos. Embora diversos valores individuais em nosso próprio conjunto de dados estivessem dentro da mesma faixa que os valores reportados por Sentelhas, a média resultante destaca a variabilidade inerente à dinâmica ambiental e à resposta das macrófitas, ressaltando a necessidade de considerar múltiplos fatores para interpretar as taxas de evapotranspiração.

O desvio padrão, cujo valor é $3,35 \text{ mm.dia}^{-1}$, indica uma medida da dispersão dos dados em relação à média. Nesse Tratamento, esse valor moderado mostra que, embora haja oscilações nas taxas de evapotranspiração, elas não são excessivamente divergentes da média, indicando uma relativa estabilidade no processo.

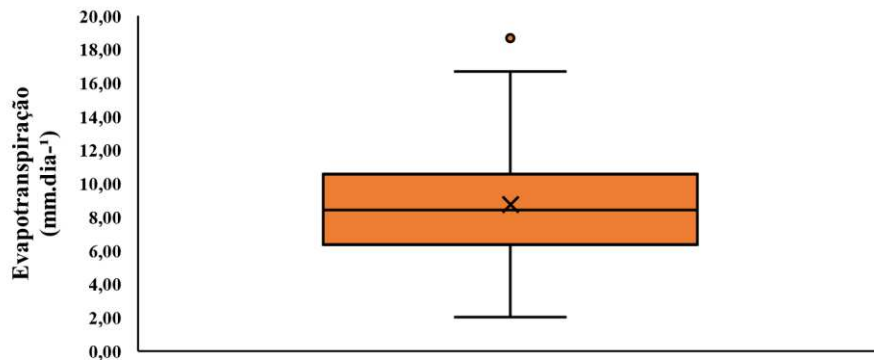
Os valores mínimos $2,03 \text{ mm.dia}^{-1}$ e máximo $19,00 \text{ mm.dia}^{-1}$ evidenciam a amplitude da variação das taxas de evapotranspiração. Esse intervalo amplo reflete a sensibilidade desse sistema às condições ambientais, como temperatura, umidade e radiação solar. O valor mínimo pode estar associado a períodos de menor atividade metabólica das macrófitas ou a condições ambientais menos favoráveis, enquanto o valor máximo pode decorrer de condições climáticas propícias à evapotranspiração intensa.

Esses resultados exteriorizam que o Tratamento TC, com macrófitas em um tanque de mesocosmos, é caracterizado por uma taxa média considerável de evapotranspiração.

A Figura 8 é a representação gráfica que permite uma compreensão mais intuitiva e detalhada da distribuição dos dados. Ao observar o *boxplot*, é possível notar que a mediana (linha dentro da caixa) está posicionada perto do valor da média de evapotranspiração, que foi calculada como $8,75 \text{ mm.dia}^{-1}$. Esse alinhamento sugere uma distribuição simétrica dos dados, com uma tendência central concentrada ao redor desse valor.

Como destacado por Rao (1988) em seu estudo sobre as taxas de evapotranspiração de *Eichhornia crassipes* e outras culturas em um clima tropical úmido, as taxas de evapotranspiração observadas variaram de 3,8 a $10,5 \text{ mm.dia}^{-1}$ para *Eichhornia crassipes*. Em comparação, nossos próprios resultados indicam uma média de evapotranspiração aproximada. Essa comparação ressalta a influência das macrófitas nos processos evaporativos e a relevância para entender as variações contextuais para uma interpretação precisa das taxas de evapotranspiração.

Figura 9 – Evapotranspiração do Tratamento TC: tanque de mesocosmos com macrófitas (de 27/06/2022 a 22/12/2022)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A caixa no *boxplot* representa o intervalo interquartil (IQR), que abrange a maioria dos dados e se estende aproximadamente de 6,5 mm.dia⁻¹ a 10,5 mm.dia⁻¹. Isso revela que a metade central dos valores de evapotranspiração está contida dentro dessa faixa. A caixa ilustra a variabilidade dos dados em torno da mediana, demonstrando que as taxas de evapotranspiração durante o período de observação foram relativamente consistentes.

Os limites da caixa que estão aproximadamente entre 3 mm.dia⁻¹ e 16,5 mm.dia⁻¹, representam o alcance dos dados que ainda não são considerados *outliers*. Qualquer valor além desses limites é considerado um *outlier*, ou seja, uma observação que difere significativamente dos demais valores. Os dois pontos individuais que estão fora dos limites indicam situações em que ocorreram eventos extremos de perda de água ou até mesmo erros de medidas.

O estudo conduzido por Simon-Gaspar *et al.* (2022) teve como objetivo central analisar os efeitos do sedimento litorâneo e das macrófitas na evaporação de um lago. Ao contrário de propor uma nova metodologia para estimar a evaporação do tanque, a pesquisa concentrou-se na investigação das influências de componentes naturais sobre o processo de evaporação.

Comparando essas descobertas com os resultados do nosso próprio estudo, observamos que, apesar de contextos diferentes, ambas as pesquisas convergem para a importância das macrófitas na evapotranspiração. No entanto, a variabilidade natural entre locais e condições pode resultar em divergências nos valores absolutos. Essa comparação ressalta a necessidade de considerar as características específicas de cada cenário para uma interpretação completa dos resultados.

4.3.3 Tanque Classe A

O Tanque Classe A, representando um ambiente de referência sem a presença de macrófitas, foi um componente essencial desta investigação para avaliar a evaporação em condições naturais.

Os dados coletados ao longo do período de observação, entre 27 de junho de 2022 e 22 de dezembro de 2022, foram sujeitos a uma análise detalhada, proporcionando a compreensão sobre o comportamento da evaporação.

A Tabela 6 apresenta uma síntese dos parâmetros estatísticos derivados das medidas de evaporação obtidas no Tanque Classe A. As 167 medições realizadas permitiram uma análise precisa das oscilações nas taxas de evaporação em um ambiente desprovido de macrófitas.

A média das taxas de evaporação, calculada em $7,51 \text{ mm.dia}^{-1}$, representa uma medida de referência para as taxas típicas de evaporação nesse cenário. A mediana, posicionada em $7,82 \text{ mm.dia}^{-1}$, emerge como uma medida robusta de tendência central, refletindo a concentração das observações em torno desse valor.

Na busca pela validação de um modelo de quantificação da evaporação em ambientes de reservatórios superficiais no semiárido, a análise comparativa das estimativas de evaporação nos reservatórios com as medições obtidas no Tanque Classe A da Universidade Federal do Ceará (UFC) revela uma notável consonância. Os seus resultados de evaporação de $6,32 \text{ mm.dia}^{-1}$ se alinham de maneira significativa com a média obtida no presente estudo (PRAXEDES, 2021).

Tabela 6 – Parâmetros estatísticos das medidas de evaporação no Tanque Classe A (de 27/06/2022 a 22/12/2022)

Parâmetro	Evaporação
<i>n</i> (tamanho da amostra)	167
Média (mm.dia^{-1})	7,51
Mediana (mm.dia^{-1})	7,82
Desvio padrão (mm.dia^{-1})	1,39
Mínimo (mm.dia^{-1})	3,43
Máximo (mm.dia^{-1})	10,20

Fonte: Elaborada pelo autor.

A variabilidade das taxas de evaporação no Tanque Classe A é encapsulada pelo desvio padrão, estimado em $1,39 \text{ mm.dia}^{-1}$. Essa dispersão moderada, quando considerada em relação à média e à mediana, mostra uma relativa estabilidade nas taxas de evaporação dentro

desse ambiente, possivelmente influenciada por condições climáticas. A análise das taxas mínimas e máximas de evaporação, $3,43 \text{ mm.dia}^{-1}$ e $10,20 \text{ mm.dia}^{-1}$, respectivamente, mostram a amplitude da variabilidade natural no Tanque Classe A.

No contexto desta pesquisa sobre os efeitos das macrófitas flutuantes nos processos evaporativos, a análise do Tanque Classe A como um ambiente de referência ganha relevância, visto que permite avaliar a evaporação em condições naturais.

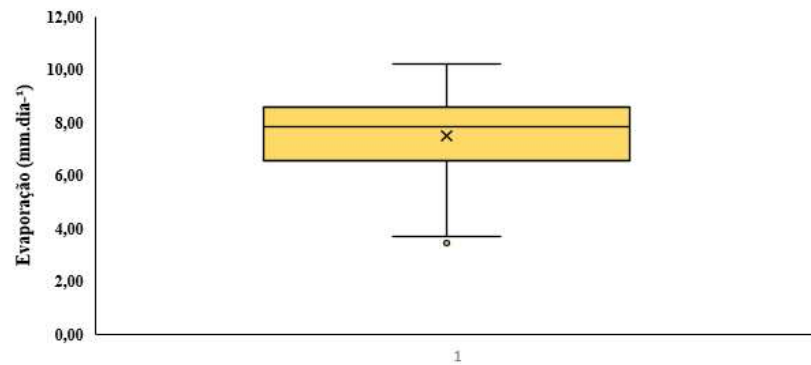
A Tabela 6 resume de forma concisa os parâmetros estatísticos derivados das medidas de evaporação no Tanque Classe A. Esses resultados constituem uma base essencial para comparações e contextualização das taxas de evaporação, fundamentais para a compreensão dos efeitos nos processos evaporativos e um processo importante a ser considerado no gerenciamento dos recursos hídricos uma vez que pode ser utilizado para estimar a evaporação de corpos d'água, como lagos, rios e reservatórios (PEIXOTO *et al.*, 2014; BORGES *et al.*, 2017; CAVALCANTE JUNIOR *et al.*, 2018).

A Figura 9 mostra análise dos quartis revela que a mediana das taxas de evaporação no Etca, representada pela linha central do retângulo, está situada em aproximadamente $7,82 \text{ mm.dia}^{-1}$. Isso indica que metade das observações está abaixo desse valor e a outra metade está acima. Os quartis também definem a amplitude interquartil (IQR), que se estende desde cerca de $6,37 \text{ mm.dia}^{-1}$ até $8,80 \text{ mm.dia}^{-1}$, apontando para a faixa onde a maioria das medições está concentrada.

Salientamos a congruência dos resultados do nosso estudo com as conclusões de Pinto (2009), nas quais relatou médias de evaporação de $7,40 \text{ mm.dia}^{-1}$, para ambientes terrestres, e $7,03 \text{ mm.dia}^{-1}$, para tanques Classe A em ambientes aquáticos no mesmo local de estudo. Estes valores estão alinhados com a média de evaporação de $7,51 \text{ mm.dia}^{-1}$, que observamos neste estudo, e a média de $6,3 \text{ mm.dia}^{-1}$ oriundo de um experimento anterior.

Os resultados obtidos no estudo que usou diferentes métodos para obter a taxa de evaporação assemelham-se de maneira expressiva aos valores observados corroborando fortemente os resultados deste estudo. As medições da evaporação anual pelo Tanque Classe A (TCA), que alcançaram $2402,61 \text{ mm}$ com uma média diária de $6,74 \text{ mm}$, assemelham-se de forma expressiva aos valores observados convergindo fortemente com os resultados deste estudo (BEZERRA, 2021).

Figura 10 – Evaporação no Tanque Classe A (de 27/06/2022 a 22/12/2022)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que a extensão dos limites abarca a gama completa das taxas de evaporação, desde $3,43 \text{ mm.dia}^{-1}$ até $10,20 \text{ mm.dia}^{-1}$. Isso indica a presença de observações atípicas nos extremos, que podem ser influenciadas por condições climáticas excepcionais ou flutuações temporárias.

É importante ressaltar que o método do Tanque Classe A possui algumas limitações e considerações importantes; por exemplo: a evaporação medida pelo Tanque Classe A pode não representar com precisão a evaporação em locais específicos, devido a diferenças nas condições climáticas e nas características do ambiente. Além disso, a precisão das estimativas obtidas por meio desse método pode ser afetada por fatores como a presença de vento, a formação de condensação no tanque e a ocorrência de chuvas (JOBSON, 1982; BRAGA *et al.*, 2000; FERNANDES *et al.*, 2004).

4.3.4 Evaporação pelo método de Penman (Equação 8)

A análise dos resultados obtidos pelo método de Penman (Equação 8) para estimar a evaporação proporciona significativo conhecimento sobre os padrões de evaporação no local de estudo. A Tabela 7 demonstra uma média de $7,50 \text{ mm.dia}^{-1}$, a mediana de $7,90 \text{ mm.dia}^{-1}$ estando próxima à média, reforça a centralidade dos valores observados, indicando que metade das medições ficou acima desse patamar. O desvio padrão de $1,39 \text{ mm.dia}^{-1}$ aponta para uma dispersão relativamente baixa em relação à média, mostrando uma relativa homogeneidade nas observações.

Tabela 7 – Parâmetros estatísticos das medidas de evaporação (E_p) estimada pela Equação 8, de Penman (de 27/06/2022 a 22/12/2022)

Parâmetro	E_p
N	167
Média (mm.dia^{-1})	7,50
Mediana (mm.dia^{-1})	7,90
Desvio padrão (mm.dia^{-1})	1,39
Mínimo (mm.dia^{-1})	3,12
Máximo (mm.dia^{-1})	9,82

Fonte: Elaborada pelo autor.

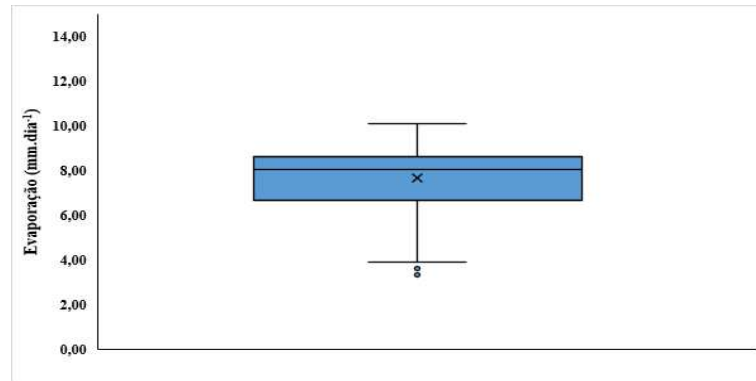
A variação entre o mínimo de $3,12 \text{ mm.dia}^{-1}$ e o máximo de $9,82 \text{ mm.dia}^{-1}$ demonstra uma gama considerável de valores, evidenciando a influência de fatores climáticos e ambientais na evaporação diária. Essa amplitude pode estar associada a variações na temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e em outros fatores que afetam o processo de evaporação.

Comparando esses resultados com outros estudos, é possível observar semelhanças entre eles. Por exemplo, uma análise das estimativas de evaporação interanual em mm para o Açude Santo Anastácio, Ceará, Brasil, ao longo dos anos de 2007 a 2019, comparadas com os registros fornecidos por Linacre (1977), Linacre (1993), Kohler *et al.* (1955), Penman (1948) e Thornthwaite (1948). As estimativas de evaporação por meio do método de Penman totalizaram $2825,33 \text{ mm}$ anuais, com uma média diária de $7,73 \text{ mm.dia}^{-1}$. Essa correspondência entre os resultados do presente estudo e os valores relatados reforça a robustez e confiabilidade das medições realizadas, bem como a eficácia dos métodos empregados para avaliar as taxas de evaporação na área de estudo (BEZERRA, 2021).

No entanto, Feitosa *et al.* (2021), no seu estudo, tiveram como objetivo estimar a evaporação no reservatório tropical de Gavião, através da aplicação de diversos métodos, incluindo o método de Penman. Para tal, foram utilizadas três estações localizadas em diferentes pontos, sendo que a do Pici é a mesma estação empregada para estimar a evaporação no presente estudo. Os resultados obtidos a partir dessa estação apresentaram uma média de evaporação de $11,8 \text{ mm.dia}^{-1}$, em contraste com a média de $7,50 \text{ mm.dia}^{-1}$. É importante notar que, ao empregar o método de Penman com base nos dados da estação mais distante (localizada a 19 km , no *Campus* do Pici), a evaporação média foi superestimada em impressionantes 71% . Esse valor discrepante destoa significativamente dos outros resultados obtidos. Essa discrepância ressalta a importância de selecionar cuidadosamente as estações meteorológicas e os métodos de estimativa, garantindo que eles se alinhem adequadamente com as características da área de

estudo. Além disso, é um aspecto que reforça a relevância de utilizar fontes de dados próximas e representativas para obter estimativas mais confiáveis e relevantes das taxas de evaporação em um contexto específico.

Figura 11 – Evaporação estimada pela Equação 8, de Penman (de 27/06/2022 a 22/12/2022)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise de conjuntos de dados complexos muitas vezes requer ferramentas visuais eficazes para extrair conhecimentos significativos. Nesse contexto, o uso do diagrama de caixas (*boxplot*) oferece uma maneira robusta de compreender a distribuição e dispersão dos dados de evaporação em seu estudo. Através dessa representação gráfica, é possível analisar várias características importantes das medições.

A Figura 10 apresenta uma série de elementos que ajudam a interpretar as informações contidas no conjunto de dados. Em primeiro lugar, a linha central da caixa, representando a mediana, é um indicador da tendência central dos valores de evaporação. Nesse caso, a mediana é aproximadamente 8, mostrando que metade das medições está abaixo desse valor e a outra metade está acima.

A caixa propriamente dita no *boxplot* abrange o intervalo interquartil (IQR), que, por sua vez, engloba o segundo e terceiro quartis dos dados. Isso indica que a maioria das medições – cerca de 75% – está contida dentro dessa faixa.

Entretanto, a presença dos chamados *outliers* localizados fora dos limites superiores e inferiores da caixa, representam valores extremos que se destacam do restante das medições. No conjunto, o *boxplot* apresenta dois *outliers* abaixo do limite superior, indicando que algumas medições de evaporação foram excepcionalmente baixas. Isso pode ser resultado de condições climáticas extremas, erros de medição ou outros fatores atípicos.

Os resultados obtidos no estudo de evaporação anual no reservatório de Sobradinho para o período de 1980 a 2012 apresentam estimativas notáveis. Através do método de Penman,

a evaporação anual foi calculada em 2108.00 mm, enquanto o método do Tanque Classe A registrou uma evaporação anual de 2690 mm. Esses valores indicam uma aproximação significativa nas estimativas de evaporação do presente estudo. Esses resultados, apesar de divergentes, enfatizam a importância de considerar uma variedade de métodos ao estimar a evaporação em reservatórios. A seleção do método apropriado dependerá das metas do estudo e da disponibilidade de dados. Além disso, essas estimativas podem contribuir para uma melhor compreensão dos processos hidrológicos em reservatórios e servir de base para a gestão sustentável dos recursos hídricos na região (VIEIRA *et al.*, 2016).

Leão *et al.* (2013) teve como objetivo a avaliação combinada de diversos métodos para estimar a evaporação no reservatório de Banabuiú. A análise das estimativas de evaporação, abrangendo o período de 1º de julho a 31 de dezembro de 2005, revelou resultados interessantes. A estimativa obtida pelo método de Penman, com uma média aproximada de $7,60 \text{ mm.dia}^{-1}$, demonstra uma notável concordância com seus resultados do presente estudo. Além disso, a similaridade nos períodos de estudo, ambos de julho a dezembro, embora em anos diferentes, acrescenta uma dimensão temporal relevante à comparação entre os métodos. Isso reforça a consistência e a validade das estimativas obtidas em seu estudo, corroborando a relevância dos resultados obtidos.

De acordo com o estudo conduzido por Rodrigues *et al.* (2023), foi realizada uma análise da medição direta da evaporação em um reservatório tropical no nordeste do Brasil. Quatro abordagens distintas foram empregadas, incluindo o renomado método de Penman e um inovador sensor acústico. O principal objetivo desse estudo era avaliar a viabilidade e precisão dessas diferentes abordagens na estimativa da evaporação em um ambiente aquático complexo. Os pesquisadores instalaram sensores em tanques flutuantes e utilizaram equações baseadas em variáveis coletadas. Uma etapa crucial do estudo foi a comparação da estimativa de evaporação obtida pelo método de Penman com as medições simultâneas dos sensores ao longo de um período específico. Os resultados apontaram para uma evaporação média de $6,83 \text{ mm.dia}^{-1}$ pelo método de Penman no Reservatório de Gavião. Com isso, o estudo ressalta a relevância de explorar diferentes métodos de medição para compreender a evaporação em ambientes aquáticos e também evidencia a promissora capacidade dos sensores acústicos para medições precisas em reservatórios tropicais.

4.3.5 Análise comparativa

A Tabela 8 e a Figura 11 apresentam uma análise comparativa dos parâmetros estatísticos das razões K1 a K5, obtidos a partir das medidas de processos evaporativos realizadas no período de 27/06/2022 a 22/12/2022. As razões K1 a K5 representam diferentes aspectos das variações nos processos evaporativos, considerando as diferentes condições e tratamentos aplicados.

O parâmetro K1 destaca o efeito singular da macrófita, uma vez que ambos os tanques compartilham a mesma água e escala, conforme validado pelo teste de similaridade. A média de 1,29 revela que a evapotranspiração do tanque com macrófita (E_C) foi aproximadamente 29% maior do que a evaporação do tanque sem macrófita (E_S). E a mediana, de 1,3 um aumento de 30% nas perdas evaporativas em relação à ausência dessas plantas. Conforme destacado por Simon-Gaspar *et al.* (2022), a macrófita contribui para um aumento nas perdas evaporativas em comparação com condições nas quais a macrófita está ausente. Essa descoberta enfatiza a importância de considerar a influência da vegetação aquática em modelos hidrológicos e práticas de manejo da água.

Tabela 8 – Parâmetros estatísticos de cinco razões (K1 a K5) das medidas de processos evaporativos (de 27/06/2022 a 22/12/2022)

Parâmetro	K ₁ = (E_C/E_S)	K ₂ = (E_S/E_{TCA})	K ₃ = (E_C/E_{TCA})	K ₄ = (E_S/E_P)	K ₅ = (E_C/E_P)
N	167	167	167	167	167
Média	1,29	0,94	1,20	0,94	1,21
Mediana	1,20	0,83	1,15	0,88	1,09
Desvio padrão	0,54	0,49	0,48	0,50	0,52
Mínimo	0,13	0,08	0,27	0,12	0,29
Máximo	3,50	2,74	2,90	2,93	2,98

E_C = evapotranspiração do tanque com macrófita (Tratamento TC); E_S = evaporação do tanque sem macrófita (Tratamento TS); E_{TCA} = evaporação do Tanque Classe A; E_P = evaporação estimada pelo método de Penman (Equação 8).

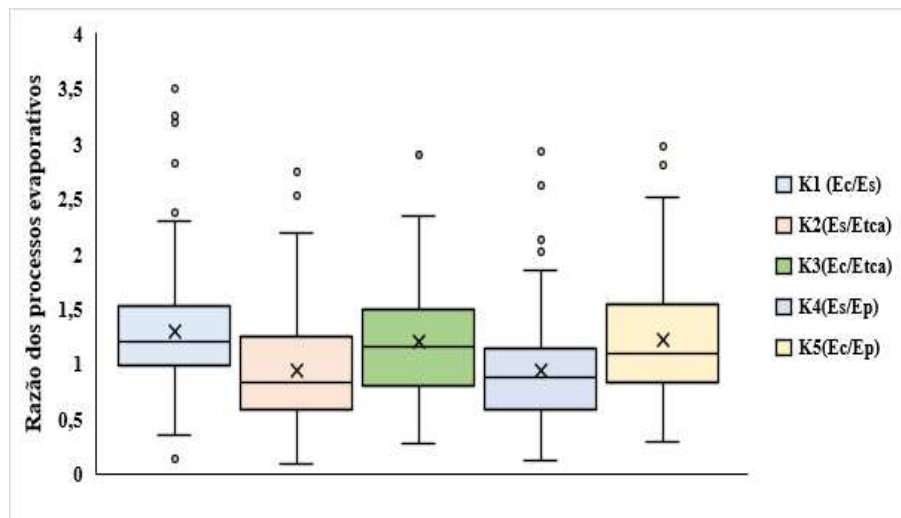
Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao examinar a razão K₁, é interessante considerar os possíveis mecanismos subjacentes a esse aumento. A macrófita, com suas folhas flutuantes e raízes submersas, pode criar uma barreira física que retém a umidade nas proximidades do tanque, potencialmente reduzindo a evaporação direta da água. O estudo de Brezny (2017) oferece uma visão mais ampla dos efeitos da vegetação aquática nos processos evaporativos, em que se concentrou a utilização de plantas aquáticas emergentes e flutuantes. Seus resultados permitem destacar a

complexidade e variabilidade desses efeitos, demonstrando como diferentes tipos de vegetação aquática podem ter impactos distintos nas taxas evaporativas.

A média do fator K_2 de 0,94 enfatiza que a evaporação do tanque sem macrófita (E_s) representou, em média, cerca de 94% da evaporação observada no Tanque Classe A (E_{TCA}). Esse parâmetro analisa exclusivamente o efeito da escala. O valor de 0,9 se mostra adequado, considerando que o coeficiente do Tanque Classe A para um açude nessa região é aproximadamente 0,7. Como o experimento é realizado em uma mesoescala, um resultado entre 0,7 e 1 é esperado, e aqui observamos 0,9. Isso mostra que a influência das macrófitas flutuantes teve um efeito nivelador nas taxas de evaporação, resultando em valores mais próximos das condições naturais representadas pelo Tanque Classe A. Corroborando nossos estudos, Volpe *et al.* (2016) realizou uma comparação entre um tanque de 20 m² com o Tanque Classe A, na qual encontraram fator K de em média 0,8 e concluíram que, independentemente do mês, a evaporação no Tanque Classe A é superior ao outro tanque.

Figura 12 – Razões (K1 a K5) das medidas de processos evaporativos na área experimental (de 27/06/2022 a 22/12/2022)



E_C = evapotranspiração do tanque com macrófita (Tratamento TC); E_S = evaporação do tanque sem macrófita (Tratamento TS); E_{TCA} = evaporação do Tanque Classe A; E_P = evaporação estimada pelo método de Penman (Equação 8).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com os resultados, reflete-se sobre como as características da água e a geometria do tanque podem influenciar essas medições, visto que, nesse experimento, a proximidade da média do fator K_2 com 1, sugerindo concordância razoável, indica que, apesar das complexas interações na presença da macrófita, o método do Tanque Classe A continua sendo um indicador útil para estimar a evaporação em diferentes escalas.

Com relação ao fator K_3 , com uma média de 1,20, é notável que a evapotranspiração do tanque com macrófita (E_c) superou a evaporação do Tanque Classe A (E_{tca}) em cerca de 20%, em média. Este resultado reforça o efeito das macrófitas *Eichhornia crassipes* para o aumento das taxas de evapotranspiração, enfatizando a sua influência fundamental no processo evaporativo. Essa análise envolve a comparação entre um tanque com macrófita e um Tanque Classe A, nos quais água, escala e cobertura diferem. Essa análise é complexa devido a múltiplos fatores, porém, o resultado de 1,20 é congruente. Isso se deve ao efeito conjunto dos três fatores: escala, água e cobertura. Ao utilizar o tanque com macrófita para estimar a evaporação do Tanque Classe A, multiplica-se o valor por 1,20, fornecendo uma estimativa razoável.

No K_4 , a evaporação do tanque sem macrófita é comparada à evaporação estimada pela equação de Penman, sem a influência da macrófita. Aqui, encontramos semelhança entre K_4 e K_2 , visto que ambos comparam com valores de referência. A proximidade dos valores mostra que os resultados estão coerentes. A média de 0,94 destaca que a evaporação do tanque sem macrófita (E_s) foi, em média, aproximadamente 94% da evaporação estimada pelo método de Penman (E_p). Indicando que a presença das macrófitas resultou em taxas de evaporação do tanque que se aproximaram das estimativas obtidas através do método de Penman. Na estimativa de evaporação pelo método de Penman, podemos questionar até que ponto a estimativa de Penman pode se adaptar a diferentes contextos e cenários. A semelhança entre essas razões indica que o método de Penman, desenvolvido como uma abordagem padrão para estimar a evaporação, ainda é uma ferramenta confiável para cenários em que a presença da macrófita é negligenciada.

A razão K_5 se assemelha à K_3 , ambas apresentando valores próximos. Entretanto, a diferença reside na referência utilizada: enquanto K_3 considera o tanque Classe A, K_5 considera a estimativa de Penman. A relação média de 1,21 enfatiza que a evapotranspiração do tanque com macrófita (E_c) foi cerca de 21% maior do que a evaporação estimada pelo método de Penman (E_p). Ao considerar a razão K_5 , que envolve todos os fatores - macrófita, escala e estimativa de Penman, é notável como a presença da macrófita aumenta consistentemente a evapotranspiração. Isso reforça a importância de abordar a dinâmica das plantas aquáticas em estudos hidrológicos, uma vez que essa influência pode ser significativa em ambientes naturais.

Portanto, a análise aprofundada das razões K_1 a K_5 nos proporciona uma visão detalhada das interações entre a macrófita e diversos fatores nos processos evaporativos. Essa análise nos incentiva a explorar ainda mais as nuances dessas interações complexas, bem como

a considerar implicações práticas para a gestão de recursos hídricos e a conservação de ecossistemas aquáticos.

Compreendendo a importância das investigações sobre coeficientes de transferência de massa para macrófitas, observamos uma série de estudos que exploram especificamente a macrófita *Eichhornia crassipes* e sua influência nas taxas de evapotranspiração. Essa abordagem permite uma visão mais precisa dos efeitos dessa planta aquática nos processos evaporativos, considerando diferentes contextos e regiões geográficas.

Um estudo conduzido por DeBusk *et al.* (1983) na Flórida adotou tanques de cultivo como metodologia, revelando uma evapotranspiração média de 7,5 mm.dia⁻¹ e um coeficiente “k” de 1,7. Isso sugere que a presença da *Eichhornia crassipes* resulta em um aumento substancial de 70% nas perdas evaporativas em relação à evaporação de água não influenciada pela planta.

Os resultados de Lallana *et al.* (1987) na Argentina também se enquadraram nessa linha de pesquisa. Seu estudo, também utilizando tanques de cultivo, mostrou uma evapotranspiração média de 8,4 mm.dia⁻¹ e um coeficiente “k” de 1,2. A interpretação desses dados indica um aumento de aproximadamente 20% nas taxas de evapotranspiração quando a macrófita está presente. Snyder *et al.* (1987) complementaram esses achados ao realizar um estudo similar no Alabama. Com uma evapotranspiração média de 7,1 mm.dia⁻¹ e um coeficiente “k” de 1,5, os resultados apontam para um aumento significativo de 50% nas perdas evaporativas, reforçando a influência da *Eichhornia crassipes* nesse processo.

A relevância dessas observações se expande para um contexto internacional. Rao (1988) investigou a relação entre evapotranspiração e evaporação da água aberta na Índia, revelando uma média de 1,30 para a *Eichhornia crassipes*. Isso indica um impacto consistente na evapotranspiração, com a planta levando a um aumento moderado nas perdas evaporativas.

No cenário brasileiro, os estudos continuam a enriquecer nossa compreensão. em São Paulo, Castro (2008) direcionou seu foco em caixas d’água. Sua pesquisa demonstrou um aumento significativo de até 4,5 vezes nas taxas de evapotranspiração quando a macrófita estava presente, em comparação com caixas sem a planta.

Rosa *et al.* (2009), também em São Paulo, abraçaram a diversidade de macrófitas e investigaram uma gama de espécies. Sua análise identificou coeficientes K variando de 1,7 a 4,7 aproximadamente, demonstrando que diferentes tipos de macrófitas podem ter impactos variados nas taxas de evapotranspiração.

Enquanto os estudos de Castro (2008) e Rosa *et al.* (2009) podem ter superestimado os efeitos das macrófitas em relação aos nossos resultados, essa discrepância ressalta a

necessidade de considerar as nuances experimentais e contextuais ao interpretar as implicações da macrófita na evapotranspiração. É importante considerar a possibilidade de várias fontes de variação que podem ter contribuído para essas discrepâncias. Diferenças nas condições experimentais, nas escalas dos reservatórios, nas características das macrófitas estudadas e nas metodologias podem ter influenciado os resultados observados. Além disso, o próprio ambiente e as condições climáticas da região podem desempenhar um papel importante na magnitude das taxas de evapotranspiração.

Esses estudos, coletivamente, ressaltam a complexidade e a variabilidade dos efeitos das macrófitas nas perdas evaporativas. A consideração das múltiplas influências, incluindo fatores geográficos, metodologias experimentais e diversidade de espécies, contribui para uma visão holística dos processos evaporativos em sistemas aquáticos. Portanto, é crucial continuar a explorar e integrar os resultados dessas pesquisas para uma compreensão mais completa dos impactos das macrófitas nesses processos vitais.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, foi possível avaliar o impacto das macrófitas aquáticas flutuantes (*Eichhornia crassipes*) nas perdas evaporativas de reservatórios de mesoescala. Em relação aos objetivos específicos, conclui-se que:

- [1] o estado trófico da água em ambos os tanques de mesocosmos se apresentou hipereutrófico ao longo de todo o experimento;
- [2] o teste de similaridade comprovou que os Tanques T1 e T2 são estatisticamente iguais em relação às perdas evaporativas (com 5% de significância), de modo que é aceitável admitir que haja apenas dois tratamentos: TC – Tanque com macrófita e TS – Tanque sem macrófita;
- [3] no período do experimento (27/06/2022 a 22/12/2022), a evapotranspiração média do tratamento TC (tanques com macrófitas flutuantes) foi de 8,75 mm.dia⁻¹;
- [4] no período do experimento (27/06/2022 a 22/12/2022), a evaporação média do tratamento TS (tanques sem macrófitas flutuantes) foi de 6,78 mm.dia⁻¹;
- [5] no período do experimento (27/06/2022 a 22/12/2022), a evaporação média do Tanque Classe A foi de 7,51 mm.dia⁻¹; e
- [6] no período do experimento (27/06/2022 a 22/12/2022), a evaporação média calculada por meio da equação de Penman (1948), foi de 7,50 mm.dia⁻¹.

O objetivo geral – que consiste na avaliação comparativa da evapotranspiração com macrófitas flutuantes e a evaporação sem macrófitas em mesoescala – foi obtido com êxito, permitindo concluir que:

- [1] A presença das macrófitas flutuantes (*Eichhornia crassipes*) aumenta as perdas evaporativas na mesoescala (mediana de 20% e média de 29%) nas condições experimentais;
- [2] a evaporação no tanque sem macrófitas (19,6 m²) é de aproximadamente 90% daquela observada no Tanque Classe A (1,1 m²), indicando, em parte, efeito de escala e, em parte, efeito da qualidade da água (hipereutrófica no tanque de mesoescala e oligotrófica no Tanque Classe A); e
- [3] a evapotranspiração do tanque com macrófitas é 20% superior à evaporação do Tanque Classe A, indicando efeito simultâneo de escala, de estado trófico da água e da cobertura pelas macrófitas flutuantes.

Os resultados desta pesquisa abrem possibilidades para futuras investigações relacionadas ao tema. Uma possibilidade seria expandir o estudo para diferentes ecossistemas aquáticos, considerando variações climáticas, tipos de corpos d'água e composições de macrófitas. Outro aspecto importante é avaliar a influência das características específicas das macrófitas, como biomassa e distribuição no tanque, na taxa de evaporação. Experimentos adicionais com diferentes espécies de macrófitas ou misturas de várias espécies poderiam proporcionar uma abordagem mais abrangente. Tais pesquisas adicionais aprofundariam nossa compreensão sobre a importância das macrófitas no ciclo hidrológico dos reservatórios e suas implicações para o manejo e para a conservação de ecossistemas aquáticos.

Outra abordagem necessária é verificar o efeito de escala, de modo que seria relevante realizar experimentos semelhantes na escala de reservatórios. A partir desses resultados, seria possível avaliar mais precisamente o impacto da presença de macrófitas em grandes bacias, como, por exemplo, a do Rio Jaguaribe.

Por fim, uma das principais implicações práticas desses resultados é a necessidade de uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos. Compreender como as macrófitas afetam a evaporação da água permite uma alocação mais precisa dos recursos para abastecimento humano, agricultura e outros usos. Os resultados da presente dissertação podem auxiliar os/as tomadores/as de decisão no âmbito da gestão das águas demonstrando que a eutrofização dos reservatórios diminui a disponibilidade hídrica não somente por causa da depleção de sua qualidade. A eutrofização, ao gerar ambiente propício à presença abundante de macrófitas, reduz a disponibilidade, também, incrementando as transferências de água para a atmosfera, o que agrava o quadro de escassez hídrica. Esses aspectos combinados devem ser suficientes para chamar a atenção da sociedade quanto à urgência de medidas que reduzam a poluição hídrica.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, T. **Water quality indices**. Londres, England: Elsevier Science, 2012.
- ABTEW, W.; MELESSE, A. **Evaporation and evapotranspiration: measurements and estimations**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.
- AKASAKA, M.; TAKAMURA, N.; MITSUHASHI, H.; KADONO, Y. Effects of land use on aquatic macrophyte diversity and water quality of ponds. **Freshwater Biology**, [s.l.], v. 55, n. 4, p. 909-922, abr. 2010.
- ALAHUHTA, J.; LINDHOLM, M.; BAASTRUP-SPOHR, L.; GARCÍA-GIRÓN, J.; TOIVANEN, M.; HEINO, J.; MURPHY, K. Macroecology of macrophytes in the freshwater realm: patterns, mechanisms and implications. **Aquatic Botany**, [s.l.], v. 168, p. 103-325, jan. 2021.
- ALENCAR, L. P. D. E.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 1, p. 39-50, 2015.
- ALLEN, R. G. *et al.* **Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: Irrigation and Drainage - FAO N. 56, 1998. This pdf version of FAO-56 has a February 2006 errata sheet at the end of the document followed by the corrected Examples 35 and 38.
- ALMEIDA, A. C. S. *et al.* Efeito da tensão crítica de irrigação e cobertura do solo sobre o cultivo de rabanete. **Agrarian**, v. 12, n. 45, p. 308-317, 2019.
- ANDA, A. *et al.* Effect of submerged, freshwater aquatic macrophytes and littoral sediments on pan evaporation in the Lake Balaton region, Hungary. **Journal of Hydrology**, v. 542, p. 615-626, 2016.
- ARAÚJO, E. M. *et al.* Análise da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Tauá, no Ceará. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 4, p. 403-411, 2017.
- AYANDA, O. I.; AJAYI, T.; ASUWAJU, F. P. *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms: uses, challenges, threats, and prospects. **The Scientific World Journal**, v. 2020, p. 1-12, 2020.
- BAHROUN, S. **Hidrologia Geral**. [s.l.]: Edições Nosso Conhecimento, 2022.
- BARBOSA JÚNIOR, A. R. **Elementos de hidrologia aplicada**. São Paulo: Blucher, 2022.
- BARKO, J. W.; HARDIN, D. G.; MATTHEWS, M. S. Growth and morphology of submersed freshwater macrophytes in relation to light and temperature. **Canadian Journal of Botany / Journal Canadien de Botanique**, v. 60, n. 6, p. 877-887, 1982.
- BARTHOLIC, J. F.; RUNKLES, J. R.; STENMARK, E. B. Effects of a monolayer on reservoir temperature and evaporation. **Water Resources Research**, v. 3, p. 173-179, 1967.

- BARTRAM, J. *et al.* Global monitoring of water supply and sanitation: history, methods and future challenges. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 11, n. 8, p. 8137-8165, 2014.
- BEZERRA SILVA, J. *et al.* Ecologia política da água e hidrobiopolítica no semiárido nordestino: a hierarquia do acesso entre as cisternas de placas e os caminhões-pipas. **Caderno CRH**, v. 35, p. e022040, 2022.
- BEZERRA, I. M. **Avaliação de métodos para estimativa da evaporação em um reservatório no estado do Ceará**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2021.
- BISWAS, A. K. Integrated water resources management: Is it working? **International Journal of Water Resources Development**, v. 24, n. 1, p. 5-22, 2008.
- BORGES, T. K. S. *et al.* Determinação da evaporação pelo método do balanço de massa em reservatórios artificiais para irrigação. *In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING*, 4., 2017, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: INOVAGRI; ESALQ-USP; ABID; UFRB; INCT-EI; INCTSal; INSTITUTO FUTURE, 2017.
- BORGES, V. P. *et al.* Mapeamento e quantificação de parâmetros biofísicos e radiação líquida em área de algodoeiro irrigado. **Ciência e Agrotecnologia**, [s.l.], v. 34, n. 2, p. 485-493, abr. 2010. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-70542010000200030>. Acesso em: 10 fev. 2023.
- BRAGA, M. B.; KLAR, A. E. Evaporação e evapotranspiração de referência em campo e estufa orientadas nos sentidos norte/sul e leste/oeste. **Irriga**, v. 5, n. 3, p. 188-193, 2000.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 357**, de 15 de junho de 2005.
- BREZNY, O.; MEHTA, I.; SHARMA, R. K. Studies on evapotranspiration of some aquatic weeds. **Weed Science**, v. 21, n. 3, p. 197-204, 1973.
- BRITO, H. C.; BRITO, Y. M. A.; RUFINO, I. A. A. O índice de segurança hídrica do Brasil e o semiárido brasileiro: desafios e riscos futuros. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, n. 1, p. 1-15, 2022.
- BRITO, V. C. *et al.* Perdas hídricas e desempenho dos reservatórios receptores do PISF na bacia do Rio Paraíba. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 5, p. 114-127, 2019.
- BRIX, H. Functions of macrophytes in constructed wetlands. **Water Science and Technology**, [s.l.], v. 29, n. 4, p. 71-78, fev. 1994.
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history, and applications**. Boston: Reidel Publishing Co, 1982.
- CALDER, I. R. **Evaporation in the uplands**. Chichester, England: John Wiley & Sons, 1990.

- CAMPOS, J. N. B. Modeling the yield-evaporation-spill in the reservoir storage process: the regulation triangle diagram. **Water Resources Management**, v. 24, n. 13, p. 3487-3511, 2010.
- CAMPOS, J. N. B. Paradigms and public policies on drought in northeast Brazil: a historical perspective. **Environmental Management**, v. 55, n. 5, p. 1052-1063, 2015.
- CAPPS, K. A. *et al.* Biogeochemical hotspots in forested landscapes: The role of vernal pools in denitrification and organic matter processing. **Ecosystems**, New York, v. 17, n. 8, p. 1455-1468, 2014.
- CARDOSO-SILVA, S. *et al.* Aplicações da Diretiva Quadro da Água da União Europeia na avaliação do estado químico do reservatório Paiva Castro (Mairiporã, SP): uma experiência brasileira. *In: Recurso Água: Tecnologias e pesquisas para o uso e a conservação de ecossistemas aquáticos.* [s.l.]: Editora Cubo, 2021. p. 560-605.
- CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes1: Trophic state index. **Limnology and Oceanography**, v. 22, n. 2, p. 361-369, 1977.
- CARPENTER, S. R. *et al.* Early warnings of regime shifts: a whole-ecosystem experiment. **Science**, New York, v. 332, n. 6033, p. 1079-1082, 2011.
- CARPENTER, S. R. *et al.* Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. **Ecological applications: a publication of the Ecological Society of America**, v. 8, n. 3, p. 559-568, 1998.
- CARVALHO, M. W. *et al.* Caracterização da precipitação e sua relação com a evapotranspiração de referência em municípios do Piauí. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 24, p. e14, 2020.
- CASPERS, H. OECD: Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development, 1982. (Publié en français sous le titre «Eutrophication des Eaux. Méthodes de Surveillance, d'Evaluation et de Lutte»). **Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie**, v. 69, n. 2, p. 200-200, 1984.
- CASTRO, R. M. **Estudo comparativo das perdas d'água em mesocosmos colonizados ou não por Aguapé (*Eichhornia crassipes*) (Mart.) Solms-Laubach.** 2008. 77 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, Botucatu, 2008.
- CAVALCANTE JUNIOR, E. G. *et al.* Necessidade hídrica da cultura do milho influenciada pelas mudanças climáticas no semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 2, p. 251, 2018.
- CETESB:SANEAMENTO AMBIENTAL, C.-. C. D. T. E. **Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo 2008/CETESB.** São Paulo: Série Relatórios-Secretaria de Estado do Meio Ambiente. [s.l: s.n.].

CHATTREE, M.; SENGUPTA, S. Heat transfer and evaporation from heated water bodies. **Journal of Heat Transfer**, v. 107, n. 4, p. 779-787, 1985.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988.

COELHO, C. *et al.* In situ and satellite observation of CDOM and chlorophyll-a dynamics in small water surface reservoirs in the Brazilian semiarid region. **Water**, v. 9, n. 12, p. 913, 2017.

COSTA, P. *et al.* Dinâmica espaçotemporal da qualidade das águas superficiais de dois grandes reservatórios de usinas hidrelétricas brasileiras. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 5, p. 893-907, 2022.

DACEY, J. W. H.; KLUG, M. J. Methane efflux from lake sediments through water lilies. **Science**, v. 4386, p. 1253-1255, 1979.

DALMAGO, G. A. *et al.* Evaporação da água na superfície do solo em sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 8, p. 780-790, 2010.

DE ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Journal des Sciences Hydrologiques / Hydrological Sciences Journal**, v. 51, n. 1, p. 157-170, 2006.

DELPLA, I. *et al.* Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. **Environment International**, v. 35, n. 8, p. 1225-1233, 2009.

DORNELLES, F. *et al.* **Hidrologia para engenharias e ciências ambientais**. 3. ed. Porto Alegre: Abrh, 2021.

DUNEA, D. *et al.* Effects of riparian vegetation on evapotranspiration processes and water quality of small plain streams. **International Journal of Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 21, n. 4, p. 629-640, 2021.

ENGELHARDT, K. A.; RITCHIE, M. E. Effects of macrophyte species richness on wetland ecosystem functioning and services. **Nature**, v. 411, n. 6838, p. 687-689, 2001.

ERSOY, Z. *et al.* Impact of nutrients and water level changes on submerged macrophytes along a temperature gradient: a pan-European mesocosm experiment. **Global Change Biology**, v. 26, n. 12, p. 6831-6851, 2020.

FARIAS, D. M. *et al.* Índice de estado trófico do rio Tocantins na margem direita à jusante da usina hidrelétrica de Tucuruí/PA / Tocantins river trophic state index on the right margin downstream of the Tucuruí hydroelectric plant/PA. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 5, p. 35161-35169, 2022.

FEITOSA, G. P.; DE ARAÚJO, J. C.; BARROS, M. U. G. Diferentes métodos de medição da evaporação em um reservatório tropical: o caso do reservatório de Gavião no Estado do Ceará. **Revista Caatinga**, v. 34, p. 410-421, 2021.

FERNANDES, C.; CORÁ, J. E.; ARAÚJO, J. A. C. Utilização do tanque Classe A para a estimativa da evapotranspiração de referência dentro de casa de vegetação. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 1, p. 46-50, 2004.

FERNANDES, C.; FELIPE, J. L. A. Demanda, oferta e a gestão hídrica da barragem de Pau dos Ferros/RN. **Revista ACTA Geográfica**, v. 16, n. 42, p. 101-119, 2023.

FERNANDES, E. J.; TURCO, J. E. P. Evapotranspiração de referência para manejo da irrigação em cultura de soja. **Irriga**, v. 8, n. 2, p. 132-141, 2003.

FERREIRA, B. G. *et al.* Análise da variabilidade do poder evaporante do ar em um cultivo de açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.), Castanhal-PA. **Revista Sustinere**, v. 7, n. 2, 2019.

GOMES FILHO, G. R. R. *et al.* Estimativa da evapotranspiração de referência do Estado de Sergipe. **Scientia Plena**, v. 13, n. 10, 2017.

FRANCO, B. M. *et al.* Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração potencial e de referência. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, v. 4, n. 2, p. 180, 2019.

FREIRE, L. L.; SOUZA FILHO, F. A. Inter-relações entre preditores de eutrofização em reservatórios do semiárido brasileiro: como mensurar? Uma aplicação de aprendizado de máquina por árvores de decisão. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 6, p. 1155-1165, 2022.

FRITZ, C.; SCHNEIDER, T.; GEIST, J. Seasonal variation in spectral response of submerged aquatic macrophytes: A case study at Lake Starnberg (Germany). **Water**, v. 9, n. 7, p. 527, 2017.

GAISER, T. *et al.* **Global change and regional impacts: Water availability and vulnerability of ecosystems and society in the semiarid Northeast of Brazil.** [s.l.]: Springer Science & Business Media, 2003.

GANGULY, A.; CHATTERJEE, P. K.; DEY, A. Studies on ethanol production from water hyacinth: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 966-972, 2012.

GIL, M. M. L. *et al.* Increase in water-scarcity risk in a Brazilian dry-region reservoir. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 4, p. 1025-1036, 2020.

GLEICK, P. H. Water, drought, climate change, and conflict in Syria. **Weather, Climate, and Society**, v. 6, n. 3, p. 331-340, 2014.

GOMES DE OLIVEIRA, G.; IANO, Y. **Hidráulica e hidrologia aplicada.** [s.l.]: Novas Edições Acadêmicas, 2021.

GÓMEZ, J. M. R. *et al.* A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s.l.], v. 40, n. 3, p. 1-12, mar. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0342>. Acesso em: 10 fev. 2023.

GONÇALVES, A. C., Jr; SELZLEIN, C.; NACKE, H. Uso de biomassa seca de aguapé (*Eichornia crassipes*) visando a remoção de metais pesados de soluções contaminadas. **Acta Scientiarum - Technology**, n. 1, p. 103-108, 2009.

GOODRIDGE, J. R. Evaporation from Water Surfaces in California. **California Department of Water Resources Bulletin**, p. 73-79, 1979.

GUIDE to Hydrological Practices. 5. ed. Geneva: **World Meteorological Organization**, 1994.

GUIDE to Meteorological Instruments and Methods of Observation. **World Meteorological Organization**, Geneva, n. 8, 1996.

GUIMARÃES, G. L. *et al.* Metodologia para avaliação de impacto ambiental de macrófitas em mesocosmos. **Planta Daninha**, v. 21, n. especial, p. 37-42, 2003.

HEGEL, C. G. Z.; MELO, E. F. R. Q. Macrófitas Aquáticas como Bioindicadoras da Qualidade da Água dos Arroios da RPPN Maragato. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 9, n. 3, p. 673, 2016.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil (2019)**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/inicio.php>. Acesso em: 24 jan. 2023.

JATOBÁ, L.; SILVA, A. F. **Tópicos especiais de climatologia**. Pará: Editora Itacaiúnas, 2020.

JESUS, E. D. S.; MATTOS, A.; JESUS, N. V. G. Análise da evapotranspiração sobre o Seridó nordestino em cenários de aquecimento. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 3, 2014.

JOBSON, H. E. Evaporation into the atmosphere: theory, history, and applications. **Eos**, v. 63, n. 51, p. 1223, 1982.

JONES, F. E. **Evaporation of water**: with emphasis on applications and measurements. Florida: CRC Press; Taylor & Francis Group, 1992.

KARMAKAR, S.; MUSTHAFI, O. M. Lakes and reservoirs: Pollution. In: **Managing Water Resources and Hydrological Systems**. CRC Press, 2020. p. 65-80.

KIM, J. Y.; NISHIHIRO, J. Responses of lake macrophyte species and functional traits to climate and land use changes. **The Science of the total environment**, v. 736, n. 139628, p. 139628, 2020.

LABRADA, R.; FORNASARI, L. **Management of problematic aquatic weeds in Africa**: FAO efforts and achievements during the period 1991-2001. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1991. v. 28

LALLANA, V. H.; SABATTINI, R. A.; LALLANA, M. D. C. Evapotranspiration from *Eichornia crassipes*, *Pistia stratiotes*, *Salvinia herzogii* and *Azolla caroliniana* during summer in Argentina. **Journal of Aquatic Plant Management**, v. 25, n. 1, p. 48-50, 1987.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento.** 2004. Tese (Doutorado em Ecologia: Ecossistemas Terrestres e Aquáticos) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

LAMPARELLI, M. C. **Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento.** [São Paulo]: Universidade de São Paulo; Agência USP de Gestão da Informação Acadêmica (AGUIA), 2015.

LAW, A. The effectiveness of aquatic plants as surrogates for wider biodiversity in standing fresh waters. **Biological Conservation**, v. 237, p. 128-136, 2019.

LEÃO, R. A. O. *et al.* Estimation of evaporation in the Banabuiú dam, in the state of Ceará, Brazil, by different combined methods, derived from the Penman equation. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 1, p. 129-144, 2013.

LESIV, M. S. *et al.* Aquatic macrophytes: ecological features and functions. **Biologicni studii**, v. 14, n. 2, p. 79-94, 2020.

LIMA NETO, I. E. *et al.* Assessment of phosphorus loading dynamics in a tropical reservoir with high seasonal water level changes. **The Science of the Total Environment**, v. 815, n. 152875, p. 152875, 2022.

LIMA, E. *et al.* Estudo da evapotranspiração real diária utilizando imagem de satélite na bacia do rio Paracatu. *In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL*, 2., 2009, Taubaté. **Anais...** Taubaté: UNITAU; Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi), 2009.

LIMA, G. R. R. *et al.* O que comunicam os índices de qualidade de água e de estado trófico em um reservatório do semiárido brasileiro? **Geociências**, v. 39, n. 1, p. 181-190, 2020.

LINS, F. A. C. *et al.* Análise da dinâmica temporal da evapotranspiração real em uma bacia hidrográfica do semiárido através de modelagem hidrológica e sensoriamento remoto. **Irriga**, v. 26, n. 3, p. 543-564, 2021.

LOREAU, M. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. **Science**, v. 294, p. 804-808, 2001.

LOZANO-RIVAS, A. **Clima, hidrología y meteorología: para ciencias ambientales e ingeniería.** Bogotá: Universidad Piloto de Colombia, 2018.

LUCIVÂNIO; SILVA, A. **Tópicos especiais de climatologia.** Pará: Editora Itacaiúnas, 2020. v. 131.

MACHADO, C. *et al.* Fluxos de água no consórcio milho-pastagem na microbacia hidrográfica do Rio Mundaú, Pernambuco. **RBRH**, v. 20, n. 3, p. 731-740, 2015.

MADSEN, J. D. *et al.* He interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. **Hydrobiologia**, [s.l.], v. 444, n. 1-3, p. 71-84, 2001.

- MAHMOOD, Q. *et al.* Anatomical studies on water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) under the influence of textile wastewater. **Journal of Zhejiang University Science B.**, v. 6, n. 10, p. 991-998, 2005.
- MALVEIRA, V. T. C.; DE ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A. Hydrological impact of a high-density reservoir network in semiarid northeastern Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 1, p. 109-117, 2012.
- 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**, v. 109, n. 19, p. 7191-7195, 2012.
- MARCUZZO, F. F. N.; ARANTES, E. J.; WENDLAND, E. Avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial e direta para a região de São Carlos-SP. **Irriga**, v. 13, n. 3, p. 323-338, 2008.
- MARTINS, C. M. R. *et al.* Evapotranspiração de canaviais em diferentes fases fenológicas por sensoriamento remoto no vale do submédio do São Francisco. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 9, n. 3, p. 156, 2019.
- MARTINS, N. N. *et al.* Modelos matemáticos de tratamento de qualidade da água. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, p. e3011828097, 2022.
- MENDES, F. C.; BARBOSA, V. Dinâmica do fitoplâncton em reservatórios do semiárido e as implicações para a qualidade da água. *In: Entre investigações, descobertas, desafios e esperança: ensinar e pesquisar ciências em um Brasil pós-pandemia.* [s.l.]: Editora Realize, 2022.
- MESQUITA, J. B. F. *et al.* The influence of hydroclimatic conditions and water quality on evaporation rates of a tropical lake. **Journal of Hydrology**, v. 590, n. 125456, p. 125456, 2020.
- MONTEITH, J. L. Evaporação e meio ambiente. **Simpósios da Sociedade de Biologia Experimental**, v. 19, p. 205-234, 1965.
- MOSS, B. Allied attack: climate change and eutrophication. **Inland Waters: Journal of the International Society of Limnology**, v. 1, n. 2, p. 101-105, 2011.
- RIBEIRO NETO, A. *et al.* Simulação na Bacia Amazônica com dados limitados: Rio Madeira. **RBRH**, v. 13, n. 3, p. 47-58, 2008.
- AZEVEDO NETTO, J. M. Novos conceitos sobre a eutrofização. **Revista DAE**, v. 48, 1988.
- NÓBREGA, R. S. Impactos do desmatamento e de mudanças climáticas nos recursos hídricos na Amazônia ocidental utilizando o modelo SLURP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. especial, p. 111-120, 2014.
- NOVAK, V. **Evapotranspiration in the Soil-Plant-Atmosphere System.** 2012. ed. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2014.
- ODUM, E. P. The Mesocosm. **Bioscience**, v. 34, n. 9, p. 558-562, 1984.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Interamericana, 1985.

OLIVEIRA, G. M. *et al.* Estimativa da evapotranspiração de referência para ambiente protegido. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 21-30, 2017.

OLIVEIRA, P. A. *et al.* Redução de evaporação de água: estudo de caso no reservatório de São Gonçalo/PB. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 5, p. 204-217, 2019.

OLIVEIRA, P. H. S.; BARRETO, D.; BARRETO, D. Mapeamento das principais causas de contaminação de água potável em sistemas prediais hidrossanitários / Mapping of main causes of potable water contamination in predial hydrosanitary systems. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 10, p. 96813-96827, 2021.

OR, D. **On Dalton and evaporation research: a passage in the footsteps of scientific discovery** (John Dalton Medal Lecture). [s.l.]: John Dalton Medal Lecture, 2017.

PAOLINELLI, A.; DURVAL, D.; MANTOVANI, E. **Agricultura irrigada no Brasil: ciência e tecnologia**. Piracicaba: ESALQ; Viçosa: ABID, 2022.

PATEL, S. Threats, management and envisaged utilizations of aquatic weed *Eichhornia crassipes*: an overview. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 11, n. 3, p. 249-259, 2012.

PEIXOTO, T. D. C. *et al.* Coeficiente do Tanque Classe “A” para a região de Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 2, p. 515, 2016.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997.

PEREIRA, L. S. *et al.* Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4-20, 2015.

PINTO, F. A. **Medição da evaporação em tanques classe A instalados em ambientes aquático e terrestre**. 2009. 59 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

PINTO, N. L. S. *et al.* **Hidrologia Básica: ciclo hidrológico**. São Paulo: Editora Blucher, 1976.

PRAXEDES, C. F. **Estimativa da evaporação e eutrofização em reservatórios artificiais do semiárido: uma abordagem com modelagem em sensoriamento remoto**. 2021. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021

RAO, A. S. Evapotranspiration rates of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, *Salvinia molesta* d.s. Mitchell and *Nymphaea lotus* (L.) Willd. Linn. in a humid tropical climate. **Aquatic Botany**, v. 30, n. 3, p. 215-222, 1988.

REZANIA, S. *et al.* Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 163, p. 125-133, 2015.

ROCHA, S. M. G. *et al.* Seasonal and interannual variability of residence time and total phosphorus in a small hypereutrophic lake in the Brazilian northeast. **Water S. A.**, v. 48, n. 3 July, 2022.

RODRIGUES, E. R. *et al.* Balanço hídrico em sub-bacias hidrográficas com diferentes percentuais de cobertura vegetal. *In: Meio Ambiente e Sustentabilidade: conceitos e aplicações.* [s.l.]: Editora IME, 2022.

RODRIGUES, G. P. *et al.* Direct measurement of open-water evaporation: a newly developed sensor applied to a Brazilian tropical reservoir. **Journal des Sciences Hydrologiques / Hydrological Sciences Journal**, v. 68, n. 3, p. 379-394, 2023.

RODRIGUES, I. S. *et al.* **Effects of floating macrophytes on evaporation rates in tropical reservoirs.** 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-2521923/v1>. Acesso em: 20 ago. 2023.

RODRIGUES, I. S. *et al.* Evaporation in Brazilian dryland reservoirs: Spatial variability and impact of riparian vegetation. **The Science of the Total Environment**, v. 797, n. 149059, p. 149059, 2021a.

RODRIGUES, I. S. *et al.* Trends of evaporation in Brazilian tropical reservoirs using remote sensing. **Journal of Hydrology**, v. 598, n. 126473, p. 126473, 2021b.

ROSA, C. S. *et al.* Avaliação comparativa das perdas de água por evapotranspiração em mesocosmos colonizados por diferentes macrófitas aquáticas. **Planta Daninha**, v. 27, n. 3, p. 441-445, 2009.

SARNIGHAUSEN, V. C. R. *et al.* Estimativa da evapotranspiração de referência para Botucatu-SP por meio de modelos de regressão. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, 2021.

SCHINDLER, D. W. Whole-ecosystem experiments: replication versus realism: the need for ecosystem-scale experiments. **Ecosystems**, New York, v. 1, n. 4, p. 323-334, 1998.

SCHWARZENBACH, R. P. *et al.* Global water pollution and human health. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 35, n. 1, p. 109-136, 2010.

SENTELHAS, P. C.; DAYOUB, M.; ANGELOCCI, L. R. The ratio of water hyacinth evapotranspiration to open-water evaporation as influenced by wather conditions, leafg area and aerodynamic effects. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, n. 3, p. 336-346, 2006.

SEROA, A. **Riscos urbanos decorrentes do aquecimento global.** São Paulo: Autografia, 2019.

SIERRA, Antonio Jesús Zapata. **Hidrología Agrícola.** Almeria: Edual, 2020.

SILVA, C. O. F.; MAGNONI, P. H. J.; MANZIONE, R. L. Sensoriamento remoto orbital para modelagem da evapotranspiração: síntese teórica e aplicações em computação na nuvem. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 15, n. 3, p. 425-468, 2021.

SILVA, D. C. V. R. *et al.* Qualidade das águas de três reservatórios para abastecimento público na região metropolitana de São Paulo (RMSP). *In: Recurso Água: Tecnologias e pesquisas para o uso e a conservação de ecossistemas aquáticos.* [s.l.]: Editora Cubo, 2021. p. 465-498.

SILVA, E. B. Estimativa da evapotranspiração por diferentes métodos para a cidade de Quixeramobim, Ceará. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 5, p. 935-942, 2016.

SILVA, M. B. P. *et al.* Estimativa da evapotranspiração de referência do Planalto Paulista por meio de regressões múltiplas com dados ausentes estimados via análise de componentes principais. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, p. e43211831120, 2022.

SILVA, M. G. Estimativa da Evapotranspiração de Referência Padrão (Penman-Monteith FAO 56): uma abordagem com dados meteorológicos limitados. **Nativa**, v. 4, n. 4, p. 253-260, 2016b.

SILVA, M. R. G. *et al.* Estimativa da demanda hídrica da cultura do milho safrinha. Ciência, tecnologia e desenvolvimento rural: compartilhando conhecimentos inovadores e experiências. **Anais... Instituto Internacional Despertando Vocações**, 2018.

SIMON-GÁSPÁR, B.; SOÓS, G.; ANDA, A. Pan evaporation is increased by submerged macrophytes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 26, n. 18, p. 4741-4756, 2022.

SNYDER, R. L.; BOYD, C. E. Evapotranspiration of *Eichhornia crassipes* (Mart) solms and *Typha latifolia* L. **Aquatic Botany**, v. 27, p. 217-227, 1987.

SOUSA, I. F. *et al.* Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do estado de Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental / Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, v. 14, n. 6, p. 633-644, 2010.

SOUZA, C. F. *et al.* Sonda de TDR para a estimativa de umidade em bagaço de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 1, p. 24-35, 2016.

SOUZA, V. A. S. *et al.* Dinâmica da conversão de floresta e tendências climáticas na bacia do Rio Madeira. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 4, p. 2007-2034, 2022.

TAKAMURA, N. *et al.* Effects of aquatic macrophytes on water quality and phytoplankton communities in shallow lakes: effects of macrophytes on water quality. **Ecological Research**, v. 18, n. 4, p. 381-395, 2003.

VAN BAVEL, C. H. Potential evaporation: the combination concept and its experimental verification. **Water Resources Research**, n. 2, p. 455-467, 1966.

VAN DER, W.; KAMERLING, R. Evapotranspiration of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). **Journal of Hydrology**, n. 3-4, v. 22, p. 201-212, 1974.

- VIEIRA, N. P. A. *et al.* Estimativa da evaporação nos reservatórios de Sobradinho e Três Marias usando diferentes modelos. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 3, p. 433-448, 2016.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. v. 245.
- VON SPERLING. Avaliação do estado trófico de lagoas e reservatórios tropicais. **Revista Bio**, n. 2, p. 68-76, 1994.
- WARD, A. D. *et al.* **Environmental Hydrology**. 3. ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015.
- WARREN, M. S. Desagregação espacial de estimativas de evapotranspiração real obtidas a partir do sensor MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p. 153-162, 2013.
- WETZEL, R. G. **Limnology: Lake and River Ecosystem**. 3. ed. [s.l.; s.n.], 2001.
- WHO. **Guidelines for drinking-water quality**. 4th ed. Geneva: World Health Organization, 2017.
- WMO. **Guide to Hydrological Practices**. 4th ed. Geneva: World Meteorological Organization, 1994. Publicação WMO nº 168.
- WMO. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. 6th ed. Geneva, World Meteorological Organization, 1996. Publicação WMO nº 8.
- ZHANG, L.; DAWES, W. R.; WALKER, G. R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. **Water Resources Research**, v. 37, n. 3, p. 701-708, 2001.
- ZHANG, S. *et al.* Bathymetric survey of water reservoirs in north-eastern Brazil based on TanDEM-X satellite data. **The Science of the Total Environment**, v. 571, p. 575-593, 2016.
- ZHANG, S. *et al.* Effective water surface mapping in macrophyte-covered reservoirs in NE Brazil based on TerraSAR-X time series. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation: ITC journal**, v. 69, p. 41-55, 2018.
- ZHANG, Y. *et al.* Global loss of aquatic vegetation in lakes. **Earth-Science Reviews**, v. 173, p. 259-265, 2017.