

Calibração automática de um modelo hidrodinâmico bidimensional para o reservatório Jaburu I, no estado do Ceará

Antonia Letícia Paiva de Sousa¹, Daniel Antonio Camelo Cid², Gabriel Carvalho Mesquita³ &

Janine Brandão de Farias Mesquita⁴

Resumo: O presente estudo objetiva calibrar o modelo bidimensional CE-QUAL-W2 e validá-lo para avaliar a hidrodinâmica do reservatório Jaburu I, situado no semiárido brasileiro. A calibração foi realizada por meio do algoritmo de Otimização Multiobjetivo por Enxame de Partículas com Distância de Aglomeração (MOPSO-CD), incorporado em um *script* em R fornecido pela FUNCEME. Nessa etapa, utilizou-se a maior série de dados recentes (2023 a 2024) e para validar, os dados de 2025. A otimização com o MOPSO-CD ajustou um total de dez parâmetros hidrodinâmicos, sendo crucial para minimizar as incertezas entre os dados observados e simulados. A incorporação desse método alcançou as seguintes métricas estatísticas validadas: ($R^2 = 0,99$, PBIAS = -0,026 % e RMSE = 0,22 m; $R^2 = 0,61$, PBIAS = -0,63% e RSR = 0,7; e $R^2 = 0,45$, PBIAS = +0,69% e RMSE = 0,01 hm³, para o nível d'água, temperatura da água superficial e evaporação, respectivamente). Dessa forma, verifica-se a eficácia da calibração com o algoritmo MOPSO-CD e do modelo CE-QUAL-W2 em reproduzir o comportamento hidrodinâmico do reservatório Jaburu I. Este estudo ressalta a relevância da aplicação de modelos hidrodinâmicos para obter prognósticos ambientais e nortear o monitoramento estratégico de reservatórios, sobretudo em regiões semiáridas.

Abstract: The present study aims to calibrate the two-dimensional CE-QUAL-W2 model and validate it to evaluate the hydrodynamics of the Jaburu I reservoir, located in the Brazilian semi-arid region. The calibration was performed using the Multiobjective Particle Swarm Optimization with Crowding Distance (MOPSO-CD) algorithm, incorporated in an R script provided by FUNCEME. At this stage, the largest series of recent data (2023 to 2024) was used and to validate, the 2025 data. The optimization with MOPSO-CD adjusted a total of ten hydrodynamic parameters, being crucial to minimize the uncertainties between the observed and simulated data. The incorporation of this method achieved the following validated statistical metrics: ($R^2 = 0.99$, PBIAS = -0.026 % and RMSE = 0.22 m; $R^2 = 0.61$, PBIAS = -0.63% and RSR = 0.7; and $R^2 = 0.45$, PBIAS = +0.69% and RMSE = 0.01 hm³, for water level, surface water temperature and evaporation, respectively). Thus, the effectiveness of calibration with the MOPSO-CD algorithm and the CE-QUAL-W2 model in reproducing the hydrodynamic behavior of the Jaburu I reservoir is verified. This study highlights the relevance of applying hydrodynamic models to obtain environmental prognoses and guide the strategic monitoring of reservoirs, especially in semiarid regions.

Palavras-Chave: CE-QUAL-W2; Segurança hídrica; Padrões hidrodinâmicos.

Keywords: CE-QUAL-W2; Water security; Hydrodynamic patterns.

INTRODUÇÃO

Reservatórios situados em regiões áridas e semiáridas são peças-chave para a garantia dos usos múltiplos da água. Por outro lado, esses sistemas lênticos são vulneráveis às mudanças de suas características limnológicas, mediante a atuação de pressões externas como as componentes climáticas, flutuações na distribuição pluviométrica e elevadas taxas de evaporação (Mesquita *et al.*, 2020; Sousa *et al.*, 2024). Durante períodos de escassez hídrica, o tempo de residência hidráulica

1) Discente no Programa de Pós-graduação Profªgua, Universidade Federal do Ceará, campus de Crateús. E-mail: antonialeticiapaiva@alu.ufc.br;

2) Pesquisador da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), Fortaleza, Ceará. E-mail: daniel.cid@funceme.br;

3) Discente no Programa de Pós-graduação em Eng. Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará. E-mail: gabrielmesquita@alu.ufc.br

4) Professora Adjunta na Universidade Federal do Ceará. (janine@crateus.ufc.br).

apresenta-se nas escalas de meses e anos. Essa condição reduz a profundidade e a superfície da água, o que favorece o aumento de concentrações de nutrientes (Medeiros *et al.*, 2025). A redução da taxa de renovação da água, somada a maiores temperaturas e disponibilidade suficiente de luz, estimula a eutrofização (Le Moal *et al.*, 2019).

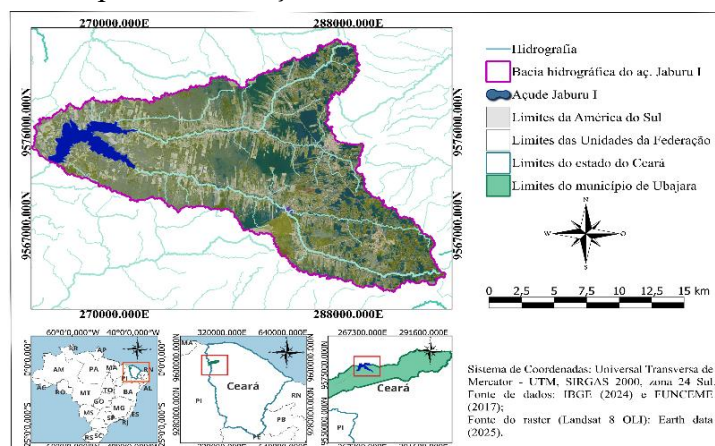
Diante dessa conjuntura, a aplicação de modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água é crucial para compreender o conjunto de fatores que governam a dinâmica dos aspectos limnológicos em sistemas lacustres. Tais fatores incluem: a taxa de renovação da água, padrões de estabilidade térmica e mistura, a distribuição de nutrientes e proliferação de algas. Dentre esses modelos, o CE-QUAL-W2 (Wells, 2025), possui aplicação em diversos estudos para a região semiárida do Nordeste brasileiro (Mesquita *et al.*, 2020; Rocha; Mesquita; Lima Neto, 2020; Rocha *et al.*, 2022; Lima Neto, 2023). Dessa forma, o presente estudo objetiva realizar a calibração automática e validar um modelo bidimensional hidrodinâmico para o reservatório Jaburu I, integrante da Região Hidrográfica da Serra da Ibiapaba, no estado do Ceará.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O reservatório Jaburu I ($3^{\circ}50'30.4''S$, $41^{\circ}05'58.0''W$), indicado na Figura 1, encontra-se situado no município de Ubajara, no estado do Ceará. Construído em 1983, abrange uma área superficial de 10,96 km² e uma bacia hidrográfica de contribuição de 316,55 km². A capacidade máxima de armazenamento equivale a 141 hm³, além disso, possui uma altura máxima de 46 metros e vazão regularizada de 1442,11 L/s (Ceará, 2025). Atualmente é a principal estrutura hídrica de usos múltiplos que integra a Região Hidrográfica da Serra da Ibiapaba (Ceará, 2021).

Figura 1 – Mapa de localização do reservatório Jaburu I, no estado do Ceará.



Fonte: Autores (2026).

Modelo bidimensional CE-QUAL-W2 e dados de entrada

O modelo hidrodinâmico e de qualidade da água CE-QUAL-W2 (*Corps of Engineers-Quality-Width Averaged 2D*), gerido atualmente pela Universidade Estadual de Portland, apresenta funcionamento na dimensão bidimensional com média lateral e possui como vantagem um baixo custo computacional (Bai *et al.*, 2022; Lima Neto, 2023; Wells, 2025). Além disso, possui equações governantes de Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) resolvidas com base na aproximação hidrostática e de *Boussinesq*. Para a sua operacionalização, requer um conjunto de dados de entrada: batimetria, dados meteorológicos, vazões de entrada e saída e temperatura da água de entrada (Wells, 2025). Para o presente estudo, esse conjunto de dados, incluindo o arquivo controle, W2_Con, foi concedido pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

Os dados meteorológicos, exceto da nebulosidade e temperatura no ponto de orvalho, foram obtidos por meio da estação agrometeorológica, São Benedito - Sítio Ingazeira (Código 35858), monitorada pela FUNCEME. A temperatura no ponto de orvalho foi estimada conforme a metodologia descrita por Shuttleworth (2012). Enquanto a nebulosidade, em uma escala que varia de 0 a 10, foi estimada por meio da equação de Wunderlich (1972).

Devido à limitação de dados em escala diária para a temperatura da água de entrada, utilizaram-se duas equações a partir do cálculo da média do desvio médio entre a temperatura da água observada (°C) a uma profundidade de 0,3 metros e a temperatura do ar (°C), conforme aplicado no estudo de Santos *et al.* (2025). A Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) disponibilizou os dados de campanhas trimestrais. Para o presente estudo, o período selecionado desse banco de dados compreende de 2022 a 2025. Conforme a divisão dessa série histórica em período chuvoso (janeiro a junho) e período seco (julho a dezembro), obtiveram-se as médias do desvio médio (0,20 e 0,11, respectivamente) e geraram-se duas equações para estimar a temperatura da água. Dessa forma, a Equação 1 foi utilizada para o período chuvoso e a Equação 2 para a estação seca.

$$T_{\text{água}} = (T_{\text{ar}} \cdot 0,20) + T_{\text{ar}} \quad (1)$$

$$T_{\text{água}} = (T_{\text{ar}} \cdot 0,11) + T_{\text{ar}} \quad (2)$$

Onde: $T_{\text{água}}$ = temperatura da água (°C); e T_{ar} = temperatura do ar (°C).

Calibração e validação do modelo hidrodinâmico

A calibração do modelo foi executada para o período de 2023 a 2024. Nesta etapa, utilizaram-se dados observados de referência (da temperatura da água e nível d'água), enquanto as taxas de

evaporação foram estimadas por meio do balanço hídrico. À *priori*, foram definidas as condições iniciais de contorno, tais como as datas em dias julianos (inicial e final), a cota inicial, a temperatura da água inicial e o segmento a ser avaliado – nesse caso, adotou-se o segmento 27, por encontrar-se mais próximo ao ponto de monitoramento do reservatório. Em sequência, realizou-se uma simulação prévia com os coeficientes *Default* do modelo bidimensional, assim como realizado por Cid e Lima (2024), de modo a identificar possíveis erros nos arquivos de controle.

A terceira etapa envolveu a calibração automática da hidrodinâmica avançada, baseada no *Multiobjective Particle Swarm Optimization with Crowding Distance* (MOPSO-CD) – Otimização Multiobjetivo por Enxame de Partículas com Distância de Aglomeração. Esse método encontra-se incorporado em um *script* automatizado em *R* fornecido pela FUNCEME. O MOPSO-CD (Raquel & Naval, 2005) adaptado neste estudo foi executado no programa RStudio e sua operacionalização contempla seis etapas principais: geração aleatória inicial de 40 partículas dentro dos limites inferiores e superiores de cada parâmetro a ser calibrado; cálculo simultâneo dos objetivos (variáveis de interesse da calibração), com o propósito de minimizar o RMSE para cada um destes; cálculo e classificação de aptidão multiobjetivo das partículas por meio da distância de aglomeração; detecção do melhor pessoal e melhor global; atualização das equações de posição e velocidade ao longo de 30 iterações com uma taxa de mutação de 0,50; e, por último, o conjunto de soluções otimizadas da Fronteira de Pareto.

Enquanto para a validação, selecionou-se o ano de 2025 e, assim, foram simulados o conjunto de coeficientes gerados da Fronteira de Pareto. Os dez parâmetros envolvidos na calibração, são definidos por Wells (2025) como: coeficientes (AFW, BFW e CFW) da função do vento – a qual governa o efeito do vento nos processos evaporativos e de troca de calor na superfície (Abdelal & Alshakhatreh, 2025); SHADE (sombreamento da radiação incidente); WSC (proteção contra o vento); os hidráulicos (viscosidade e difusividade turbulenta longitudinal, AX e DX, respectivamente) – governam especialmente a dispersão de constituintes, de momento e calor ao longo do eixo longitudinal do corpo d'água (Zhao *et al.*, 2021); coeficiente de extinção de luz (EXH2O); troca de calor com o fundo (CBHE); e a fração da radiação solar absorvida na camada superficial (BETA). Quanto aos demais parâmetros hidráulicos, utilizou-se o coeficiente de Chezy para o atrito de fundo, identificado por FRICC (Wells, 2025).

O desempenho do modelo e o erro entre os dados simulados e observados, na calibração e validação, foram obtidos por meio de um conjunto de métricas (Erro Médio Absoluto – MAE; Viés percentual – PBIAS; Raiz do Erro Quadrático Médio – RMSE, Eficiência de *Nash-Sutcliffe* – NSE;

Coefficiente de determinação – R^2 e a Razão entre o RMSE e o desvio padrão dos dados observados – NSR – utilizado para validar a simulação em relação a temperatura da água (Golmohammadi *et al.*, 2014; Nhu *et al.*, 2020). Tais métricas foram calculadas com o auxílio de um *script* em *R* fornecido pela FUNCEME e por meio das bibliotecas *NumPy* e *Pandas* em *python*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A execução do algoritmo MOPSO-CD gerou um total de 1200 simulações com coeficientes ajustados ao erro (RMSE) e 62 simulações otimizadas. Dentre estas, selecionaram-se 28 que apresentaram melhor convergência entre as variáveis temperatura, nível e evaporação, sobretudo as que conseguiram reproduzir essas variáveis o mais próximo dos dados observacionais. Desse modo, a calibração almeja obter coeficientes que possam reproduzir resultados ideais em relação aos dados observados do local de estudo e, assim, obter o ajuste refinado do modelo (Varshabi & Moeini, 2024).

Conforme a análise estatística, adotou-se os valores para cada parâmetro, listados na Tabela 1. Dentre os critérios de escolha, levou-se em consideração a simulação com desempenho progressivo das métricas estatísticas na validação e, em especial, observou-se a tendência da temperatura da água – tendo em vista sua relevância nas demais variáveis de estado do modelo CE-QUAL-W2.

Tabela 1 – Valores adotados dos coeficientes hidrodinâmicos a partir da calibração automática.

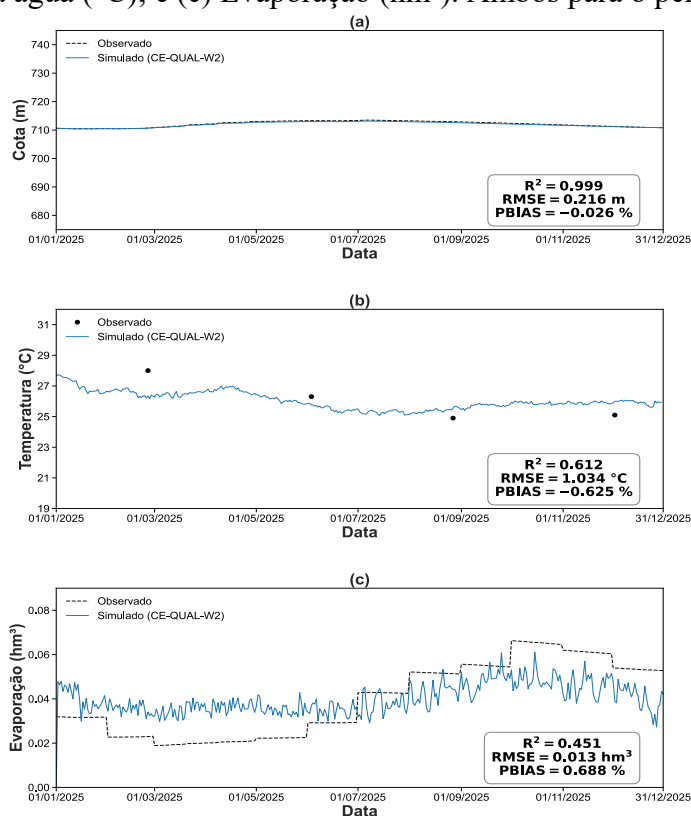
Parâmetros:	AFW	BFW	CFW	WSC	SHADE	AX	DX	CBHE	EXH2O	BETA
Valores:	6.47	4.14	0.74	0.79	0.82	0.17	0.38	0.04	0.2576	0.33

Fonte: autores (2026).

O resultado da validação para as três variáveis encontra-se ilustrado na Figura 2. A reprodução do balanço hídrico, com o declínio do nível d'água pelas retiradas e aumento pela entrada de água em períodos chuvosos via escoamento superficial foram simulados para o período de 2023 a 2024, com erro (RMSE = 0,27 m), viés percentual (PBIAS = - 0,03%) e excelente eficiência (NSE = 0,97). Considerando o ano de 2025, verifica-se a redução do erro para o nível d'água (RMSE = 0,22 m e PBIAS = -0,026%). Dessa forma, o nível da água foi reproduzido com desempenho classificado como “muito bom”, segundo os critérios de intervalo de Moriasi *et al.* (2015). Enquanto a temperatura da água para a maior série de dados, apresentou menores erros (RMSE = 0,53 e MAE = 0,39) e viés PBIAS = -1,34%, indicando desempenho satisfatório do balanço térmico. Por outro lado, a alta variabilidade dos dados da temperatura da água em 2025, com desvio padrão de 1,424, gerou o aumento do erro (RMSE = 1,03 °C). Contudo, com o RSR = 0,7, indica “desempenho satisfatório”, conforme a classificação de Moriasi *et al.* (2007).

Enquanto a evaporação, resultou em desempenho razoável e menores erros em ambas as etapas, com valores de: $R^2 = 0,50$ e RMSE de $0,01 \text{ hm}^3$; e $R^2 = 0,45$ e RMSE = $0,01 \text{ hm}^3$, respectivamente. Em geral, observaram-se diferenças relativamente baixas de uma etapa para outra. Abdelal e Alshakhatreh (2025) discutem que a influência de forças externas (variáveis meteorológicas) na estimativa da evaporação faz com que a estimativa desta possua maior sensibilidade às incertezas das medições dessas forças, principalmente de dados como a velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar.

Figura 2 – Validação do modelo hidrodinâmico para o açude Jaburu I, CE: (a) Nível (m); (b) Temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$); e (c) Evaporação (hm^3). Ambos para o período de 2025.



Fonte: Autores (2026).

CONCLUSÃO

O presente estudo realizou a calibração automática e a validação do modelo hidrodinâmico para o reservatório Jaburu I, considerando três variáveis: nível da água, temperatura da água e evaporação. A calibração com o algoritmo MOPSO-CD, executada para o período de 2023 a 2024, resultou um conjunto de valores para os parâmetros hidrodinâmicos do modelo CE-QUAL-W2. Os resultados da calibração e validação, indicaram um desempenho consistente para as três variáveis da hidrodinâmica, com destaque, a ótima reprodução do balanço hídrico, com excelentes métricas

validadas (NSE = 0,97 e, RMSE = 0,22 m). A temperatura da água na superfície apresentou menores erros (MAE e RMSE) durante a calibração, e foi validada com RSR = 0,7. Enquanto, a evaporação obteve desempenho razoável com $R^2 = 0,45$, porém com viés percentual PBIAS < 0,8%. Portanto, o presente estudo atestou a eficácia do algoritmo de otimização – MOPSO-CD no processo de calibração e a aplicação do modelo CE-QUAL-W2, permitindo reproduzir no espaço e no tempo os fatores que regem a hidrodinâmica de ecossistemas lacustres e, assim, fornecendo uma base de dados para o monitoramento estratégico dos recursos hídricos, especialmente em regiões semiáridas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), através do Convênio CAPES/UNESP No. 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua pelo apoio técnico científico aportado até o momento. O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Brasil, Edital Chamada CNPq/MCTI/FNDCT N° 44/2024 - UNIVERSAL, processo nº404286/2025-9, agradeço também pela bolsa concedida (processo nº [375158/2025-1]) à primeira autora. À Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) pela concessão de dados de entrada do modelo CE-QUAL-W2 e à Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) pela disponibilidade de dados de qualidade da água.

REFERÊNCIAS

- ABDELAL, Q.; ALSHAKHATREH, R. (2025). “*Simulating Floating Solar Photovoltaic Impact on Evaporation Reduction and Water Quality: Applications in Semi-Arid Environments.*” **Water Conservation Science and Engineering**, v. 10, n. 3, p. 1-16.
- BAI, J. et al. (2022). “*Assessment and a review of research on surface water quality modeling.*” **Ecological Modelling**, v. 466, p. 109888.
- CID, D.A.C.; LIMA, L.C.T.M. (2024). “*Calibração do modelo hidrodinâmico CE-QUAL-W2 para o Reservatório Edson Queiroz.*” XVII SRHNE - Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. João Pessoa, Paraíba. **Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Anais**, p.10.
- CEARÁ, S.R.H. (2021). “*Diagnóstico da Região Hidrográfica da Serra da Ibiapaba.*” **Fortaleza: SRH-COGERH**. Disponível em: <<https://www.cogerh.com.br/plano-de-recursos-hidricos-da-regiao-da-serra-da-ibiapaba/>> Acesso em: 22 nov. 2025.
- CEARÁ, (2025). Portal Hidrológico do Ceará: “*Nível diário: ficha técnica do açude Jaburu I.*” Disponível em: < http://www.hidro.ce.gov.br/quantidade_nivel_diario > Acesso: 16 de Agosto de 2025.
- GOLMOHAMMADI, G. et al. (2014). “*Evaluating three hydrological distributed watershed models: MIKE-SHE, APEX, SWAT.*” **Hydrology**, v. 1, n. 1, p. 20-39.

- LIMA NETO, I.E. (2023). “Modelagem da qualidade da água em um reservatório tropical utilizando CE-QUAL-W2: abordando a escassez de dados, a poluição urbana e a sazonalidade hidroclimática.” **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 28, p. e8.
- LE MOAL, M. et al. (2019). “Eutrophication: a new wine in an old bottle?.” **Science of the total environment**, v. 651, p. 1-11.
- MESQUITA, J.B.F. et al. (2020). “The influence of hydroclimatic conditions and water quality on evaporation rates of a tropical lake.” **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125456.
- MEDEIROS, C.R. et al. (2025). “How does the storage volume of semi-arid reservoirs change water quality and modulate the diversity of benthic macroinvertebrates?.” **Science of The Total Environment**, v. 958, p. 177881.
- MORIASI, D.N. et al. (2007). “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.” **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900.
- MORIASI, D.N. et al. (2015). “Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria.” **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 6, p. 1763-1785.
- NHU, V. et al. (2020). “Daily water level prediction of Zrebar Lake (Iran): a comparison between M5P, random forest, random tree and reduced error pruning trees algorithms.” **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 8, p. 479.
- ROCHA, S.M.G.; MESQUITA, J.B.F.; LIMA NETO, I.E. (2020). “Modelagem hidrodinâmica e avaliação do decaimento do fósforo em um lago urbano hipereutrófico.” **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desarrollo y práctica**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 530-545.
- ROCHA, S.M.G. et al. (2022). “Two-Dimensional Modelling of the Mixing Patterns in a Tropical Semiarid Reservoir.” **Sustainability**, v. 14, n. 23, p. 16051.
- RAQUEL, C.R.; NAVAL JR, PROSPERO C. (2005). “An effective use of crowding distance in multiobjective particle swarm optimization.” In **Proceedings of the 7th annual conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO '05)**. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 257–264.
- SHUTTLEWORTH, W. J. (2012). “Terrestrial hydrometeorology (1st ed.).” **John Wiley & Sons**, P.472.
- SOUSA, A.L.P. et al. (2024). “Avaliação de diferentes modelos de evaporação em um reservatório da costa semiárida, em Fortaleza, Ceará.” **Labor e Engenho**, Campinas, SP, v. 18, n. 00, p. e024018.
- SANTOS, S.B.F. et al. (2025). “Dinâmica térmica e do oxigênio dissolvido do açude Edson Queiroz, Santa Quitéria-CE.” In: XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória (ES). **Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Anais**, p.10.
- VARSHABI, N.; MOEINI, R. (2024). “Determining Thermal Stratification of Zayandeh Roud Dam Reservoirs Using Two-Dimensional CE-QUAL-W2 Model.” **Journal of Hydraulic Structures**, v. 10, n. 2, p. 62-71.
- WUNDERLICH, W. (1972). “Heat and Mass Transfer between a Water Surface and the Atmosphere.” **Report N°14, Tennessee Valley Authority, Office of Natural Resources and Economic Development, Division of Air and Water Resources**, Water Systems Development Branch.
- WELLS, S.A. (2025). “CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Later-ally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 4.5 User Manual Part 2: Hydrodynamic and Water Quality Model Theory.” **Department of Civil and Environmental Engineering**, Portland State University p.275.
- ZHAO, L. et al. (2021). “Thermal mixing of Lake Erhai (Southwest China) induced by bottom heat transfer: Evidence based on observations and CE-QUAL-W2 model simulations.” **Journal of Hydrology**, v. 603, p. 126973.