



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

DANNILA BRAGA OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DA HIDRODINÂMICA DO AÇUDE OLHO D'ÁGUA, NO CEARÁ

CRATEÚS-CE

2026

DANNILA BRAGA OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DA HIDRODINÂMICA DO AÇUDE OLHO D'ÁGUA, NO CEARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal do Ceará - Campus de
Crateús, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Ambiental e
Sanitária.

Orientadora: Prof.^a Dra. Janine Brandão de
Farias Mesquita

CRATEÚS-CE

2026

DANNILA BRAGA OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DA HIDRODINÂMICA DO AÇUDE OLHO D'ÁGUA, NO CEARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal do Ceará - Campus de
Crateús, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Ambiental e
Sanitária.

Aprovado (a) em: 13/07/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita (Orientadora)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Alan Michel Barros Alexandre

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Daniel Antônio Camelo Cid

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)

Eng. Antonia Letícia Paiva de Sousa

Mestranda da Rede ProfÁgua

Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus amados pais.

A minha querida avó.

Aos meus queridos irmãos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, à Nossa Senhora da Imaculada Conceição e a São José que em todos os momentos da minha jornada acadêmica, nunca estive sozinha, me deram forças e coragem para não desistir.

Aos meus pais Maria Elizete e Antônio Maia, por sempre apoiarem todos os meus sonhos e por nunca deixarem me faltar nada.

À minha avó Maria José, por me inspirar e incentivar durante esse anos da minha graduação.

Aos meus irmãos Dieffson e Dielton, por todo apoio e paciência ao longo desses anos.

À toda a minha família por acreditarem na minha capacidade e não deixarem desanimar.

Às minhas amigas Iara, Nathália e Inaiara, por todo o incentivo, por todos os momentos que passamos juntas.

A todos meus amigos que a universidade me proporcionou conhecer, tornando a caminhada mais agradável.

À professora e orientadora Janine, pelo apoio e ensinamentos ao longo da minha jornada acadêmica e de iniciação científica.

Ao Dr. Daniel Cid e a Letícia pelos conhecimentos compartilhados.

Aos professores da UFC, por todos os ensinamentos e experiências proporcionadas ao longo desses anos. E a todos que direta ou indiretamente estiveram presentes durante toda a minha trajetória acadêmica.

Agradeço à Universidade Federal do Ceará pela concessão da bolsa de iniciação científica, e por me proporcionar um ensino público, gratuito e de excelente qualidade.

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.

À Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) pela concessão de dados de entrada do modelo CE-QUAL-W2.

RESUMO

A água é um recurso primordial para a qualidade de vida das pessoas e desempenham papel estratégico no desenvolvimento sustentável. Na região semiárida do nordeste do Brasil, em períodos de estiagem, os reservatórios visam garantir a segurança hídrica e mitigar os efeitos da seca, desse modo torna-se de extrema importância o seu monitoramento. Este estudo busca aplicar a modelagem hidrodinâmica no açude Olho D'Água, situado no município de Várzea Alegre, no Ceará, através do *software* CE-QUAL-W2, um modelo bidimensional (longitudinal-vertical). A metodologia aplicada neste estudo utilizou os dados de entrada e o aplicativo FLOWQUAL, ambos fornecidos pela FUNCEME. Em que o FLOWQUAL foi desenvolvido para trabalhar em linguagem R, e ajudou no processo de calibração e validação dos parâmetros no *software* CE-QUAL-W2. Utilizou-se também do banco de dados meteorológicos do INMET, como a temperatura do ar (°C), a temperatura do ponto de orvalho (°C), a cobertura de nuvens, a velocidade do vento (m/s) e a direção do vento (graus), além da batimetria do reservatório. As calibrações e validações foram realizadas com a série histórica de 2016 a 2021. A simulação 12 (tipo 1) apresentou os melhores resultados para as métricas RMSE, MAE, Bias e NSE com relação às variáveis temperatura e evaporação, mas com relação a variável cota, os valores obtidos foram relativamente altos o que indicou inconsistências no balanço hídrico, sendo necessário futuramente ser revisto e as simulações executadas novamente.

Palavras-chave: modelagem hidrodinâmica; CE-QUAL-W2; temperatura.

ABSTRACT

Water is a vital resource for people's quality of life and plays a strategic role in sustainable development. In the semiarid region of northeastern Brazil, reservoirs aim to ensure water security and mitigate the effects of drought during dry spells; consequently, monitoring them is of utmost importance. This study seeks to apply hydrodynamic modeling to the Olho D'Água reservoir, located in the municipality of Várzea Alegre, Ceará, using the CE-QUAL-W2 software a two-dimensional (longitudinal-vertical) model. The methodology employed input data and the FLOWQUAL application, both provided by FUNCEME; FLOWQUAL, developed to operate in the R language, assisted in the calibration and validation of parameters within the CE-QUAL-W2 software. Meteorological data from INMET including air temperature (°C), dew point temperature (°C), cloud cover, wind speed (m/s), and wind direction (degrees) were also utilized, alongside reservoir bathymetry. Calibration and validation were performed using a historical dataset spanning 2016 to 2021. Simulation 12 (Type 1) yielded the best results for RMSE, MAE, Bias, and NSE metrics regarding temperature and evaporation variables; however, the values obtained for the water level variable were relatively high, indicating inconsistencies in the water balance. This necessitates a future review and a re-run of the simulations.

Keywords: hydrodynamic modeling; CE-QUAL-W2; temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Localização Açude Olho D'Água.....	21
Figura 02 – Imagens do Açude Olho D'Água, Várzea Alegre-CE.....	22
Figura 03 – Fluxograma metodológico.....	23
Figura 04 – Arquivo de entrada com dados da simulação.....	24
Figura 05 – Discretização espacial vista de cima do açude Olho D'água no CE-QUAL-W2..	25
Figura 06 - Gráfico da simulação 12 (calibração) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.....	29
Figura 07 - Gráfico da simulação 30 (calibração) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.....	30
Figura 08 - Gráfico gerado da simulação 12 (validação) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.....	32
Figura 09 - Gráfico gerado da simulação 30 (validação) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.....	33
Figura 10 - Gráfico gerado da simulação 7 (calibração) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.....	36
Figura 11 - Gráfico gerado da simulação 15 (calibração) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.....	37
Figura 12 - Gráfico gerado da simulação 7 (validação) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.....	39
Figura 13 - Gráfico gerado da simulação 15 (validação) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Parâmetros de Otimização.....	27
Tabela 02 - Melhores resultados estatísticos da calibração tipo 1.....	28
Tabela 03 - Melhores resultados estatísticos da validação do tipo 1.....	31
Tabela 04 - Melhores resultados da calibração do tipo 2.....	34
Tabela 05 - Melhores resultados estatísticos da validação do tipo 2.....	38
Tabela 06 - Comparação entre a simulação tipo 1 e a tipo 2.....	41

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
TR	Tempo de Residência
USACE	United States Army Corps of Engineers

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. JUSTIFICATIVA.....	14
3. OBJETIVOS.....	15
3.1 Objetivo Geral.....	15
3.2 Objetivos Específicos.....	15
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
4.1 Estratificação Térmica e Tempo de Residência Hidráulica.....	16
4.2 Software de Modelagem Hidrodinâmica.....	17
4.2.1 Principais Equações do Software.....	19
5. METODOLOGIA.....	21
5.1 Caracterização do Reservatório em Estudo.....	21
5.2 O modelo CE-QUAL-W2.....	22
5.2.1 Obtenção de dados e Pré-processamento.....	22
5.2.2 Simulação e Pós-processamento dos dados.....	24
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
6.1 Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos no reservatório.....	28
6.1.1 Simulação Tipo 1.....	28
6.1.2 Simulação Tipo 2.....	34
7. CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS.....	43

1. INTRODUÇÃO

A água é um elemento natural crucial para a existência de vida, por estar intimamente ligada a vários processos que sustentam os diversos ecossistemas. Para a engenharia de recursos hídricos, é importante compreender e prever o comportamento de corpos aquáticos do ponto de vista físico, químico e biológico (FERREIRA, 2016). Para Von Sperling (1996), a qualidade da água depende de fenômenos naturais e da atuação do homem, ou seja, é determinada em função do uso e da ocupação do solo da bacia hidrográfica.

Os recursos hídricos têm grande importância para a qualidade de vida dos seres humanos e desempenham papel estratégico no desenvolvimento sustentável, associada à geração de empregos, à segurança alimentar e à saúde pública. Dentre as metas propostas pela Organização das Nações Unidas, o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável, ODS 6, trata da água potável e saneamento como forma de garantir a disponibilidade e manejo sustentável da água e acesso ao saneamento para todos.

Os corpos de água são destinados para diversos fins, segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, em seu Art.3º estabelece que as águas doces, salobras e salinas do Território Nacional são classificadas, segundo a qualidade requerida para os seus usos preponderantes, em treze classes de qualidade (BRASIL, 2005).

Os diversos usos da água, seja para o consumo humano, em processos industriais, na agricultura e na geração de energia podem afetar a integridade de corpos de água. Anteneh et al. (2018) declaram que as águas superficiais estão mais expostas e assim mais suscetíveis à poluição devido ao lançamento de águas residuais e também são mais vulneráveis à contaminação, resultando em uma perda geral de sua qualidade. Santi (2012) confirma ainda a importância de identificar a qualidade da água e verificar a sua vulnerabilidade quanto à atividade humana para o seu gerenciamento, uso e conservação.

A disponibilidade e a qualidade da água afetam diretamente a qualidade de vida, por isso, os reservatórios exercem enorme relevância. Molinas (2011) considera a região semiárida umas das mais populosas, diante disso, passou a ser palco de uma das maiores iniciativas para a construção de reservatórios, que nos períodos de estiagem, visam suprir água para consumo humano e para desenvolvimento de atividades econômicas.

No estado do Ceará, os reservatórios são influenciados pela sazonalidade com que as precipitações ocorrem, que são marcados por períodos intensos de seca, o que interfere diretamente nos parâmetros de qualidade da água dos corpos hídricos (SANTOS, 2025). O Brasil, em virtude de sua extensão territorial, é composto por uma diversidade de

ecossistemas aquáticos e influências de fenômenos que acentuam as diferenças climáticas de uma região para outra. Segundo Mesquita e Lima Neto (2021) ainda existem lacunas quanto aos estudos relacionados à hidrodinâmica e qualidade da água, principalmente em regiões semiáridas como no Nordeste brasileiro.

O monitoramento dos reservatórios por meio de modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água tem se tornado uma ferramenta essencial que, para Mesquita (2025) retrata as ações físicas que ocorrem nos reservatórios, rios, lagos e canais, de modo a ampliar a capacidade de gestão e fortalecer a tomada de decisões dos órgãos responsáveis pelo gerenciamento dos recursos hídricos principalmente diante dos desafios climáticos e sociais.

O modelo matemático bidimensional CE-QUAL-W2, vem sendo amplamente aceito e indicado para a modelagem de lagos e reservatórios, principalmente na região semiárida do Nordeste brasileiro, como demonstra Santos (2025). O CE-QUAL-W2 exige uma série de parâmetros, dentre eles os dados meteorológicos, de qualidade de água, levantamento topobatimétrico, fluxos afluentes e efluentes, para que em seguida possa ser realizado as etapas de pré-processamento, simulação e pós-processamento.

Este estudo tem como objetivo avaliar os padrões hidrodinâmicos no açude Olho D'Água no município de Várzea Alegre, no estado do Ceará, através do uso do *software* CE-QUAL-W2 em que permitirá realizar simulações dos processos hidrodinâmicos, de modo a auxiliar no monitoramento e na gestão dos recursos hídricos.

2. JUSTIFICATIVA

Com o intuito de garantir a segurança hídrica e mitigar os efeitos da seca, o estado do Ceará tem implantado uma infraestrutura hídrica, principalmente de reservatório de acumulação de água. Desse modo, o monitoramento desses reservatórios ainda representa um desafio, tendo em vista as condições climáticas da região, marcadas por intensos períodos de estiagem, que interferem diretamente na dinâmica dos reservatórios.

Este trabalho tem visa realizar a modelagem hidrodinâmica através do software CE-QUAL-W2, um modelo bidimensional que, de acordo com Shabani et al. (2021) a partir de um conjunto de parâmetros de um corpo d'água é capaz de fornecer uma estrutura geral para a simulação do balanço hídrico e os estados de qualidade da água, tornando-se uma ferramenta valiosa para o gerenciamento e tomada de decisão dos recursos hídricos, de modo a garantir a segurança hídrica e um desenvolvimento sustentável, principalmente na região semiárida do Nordeste do Brasil.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Avaliar os padrões hidrodinâmicos no açude Olho D'Água no município de Várzea Alegre, Ceará.

3.2 Objetivos Específicos

- Comparar diferentes metodologias de otimização do modelo CE-QUAL-W2, considerando diferentes variáveis;
- Avaliar o desempenho das simulações com a aplicação de uma função objetivo;
- Calibrar e validar o modelo hidrodinâmico no CE-QUAL-W2.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Estratificação Térmica e Tempo de Residência Hidráulica

A estratificação térmica pode ser entendida como um processo em que ocorre a formação de diferentes camadas de temperaturas em um corpo d'água, provocado pelo aquecimento proveniente da radiação solar e das propriedades características da água, como a sua densidade que varia com a temperatura (COLOMBO; MANNICH, 2017). Em Molinas (2011), aponta que quando um corpo de água apresenta estratificação térmica as camadas são divididas em três partes, sendo elas o epilímnio, que refere-se a camada superficial, o metalímnio refere-se a camada de transição rápida de temperatura e o hipolímnio é a camada mais profunda do corpo d'água.

Molinas (2011) considera que para a maioria dos médios e grandes reservatórios exista uma tendência de que suas massas de água não se misturem de forma completa na dimensão vertical ao longo do ano, e que desse modo a qualidade da água é profundamente afetada. Desse modo, é importante conhecer o regime térmico do corpo d'água, pois a temperatura influencia nos processos biogeoquímicos e características de transporte (COLOMBO; MANNICH, 2017).

A estratificação térmica pode afetar o ambiente aquático de modo a alterar as condições de vida das espécies, pois a quantidade de oxigênio dissolvido na água pode variar, como afirma em Santos (2025).

As forças externas, como a incidência de calor e a ação do vento, se correlacionam com outras características próprias do reservatório, como a morfometria do lago e o coeficiente de extinção da luz na coluna de água podem contribuir para a formação das camadas de térmicas (FORD, 1990; MESQUITA, 2025). A sazonalidade ao longo de um ano pode refletir significativamente essas mudanças, principalmente em regiões semiáridas do Nordeste brasileiro, local do reservatório em estudo, em períodos em que há pouca ocorrência de chuvas a baixa vazão efluente ajuda no processo de estratificação térmica.

Compreender a morfometria de lagos e reservatórios é fundamental para uma boa gestão dos recursos hídricos. Wetzel (2001) e Bohn (2011) afirmam que as variações na distribuição e na morfometria podem influenciar significativamente a produtividade e o estado eutrófico de um lago. E que a partir das características físicas como a área, o volume e a profundidade é possível entender a dinâmica do corpo d'água, como a exposição solar, a capacidade de receber nutrientes e consequentemente a instabilidade térmica que provoca

desestratificação do corpo d'água e induz a mistura das camadas de água e desse modo modifica a qualidade do ambiente aquático.

A transferência de calor, de acordo com Esteves (2011) dá-se a da atmosfera para o corpo d'água e que é transferido de modo gradual para as camadas de água inferiores, ocorrendo então a formação das camadas com diferentes temperaturas e, conseqüentemente, as diferentes densidades.

O tempo necessário para que haja a completa renovação da água de um lago ou reservatório é denominado o tempo de residência hidráulica ou retenção hidráulica (TR) (MESQUITA, LIMA NETO, 2021; CHAPRA, 2008). Ou seja, o tempo em que um volume de água permanece armazenada em lagos ou reservatórios, entender como ocorre a dinâmica de corpos d'água. Deus *et al.* (2013) explica que o baixo tempo de residência da água, impossibilita a ocorrência de reações químicas e biológicas que são necessárias para o processo de eutrofização. Desse modo, torna-se fundamental compreender o tempo de entrada e de saída de água em reservatório é crucial para o monitoramento e controle da qualidade da água, pois interfere diretamente na concentração de poluentes e na quantidade de oxigênio existente em lagos, reservatórios ou em sistemas naturais.

Outro aspecto importante quanto ao tempo de residência hidráulica é a variabilidade hidrológica, que refere-se a flutuações naturais das condições de uma bacia hidrográfica ou reservatório ao longo do tempo e do espaço, como a precipitação e a vazão afluente e efluente. Para Mesquita e Lima Neto (2022), a variabilidade hidrológica é crucial para o padrão geral de circulação da água, e que interfere diretamente no tempo de residência hidráulica, sendo fator determinante no gerenciamento correto dos recursos hídricos.

4.2 Software de Modelagem Hidrodinâmica

Compreender os processos hidrodinâmicos é essencial para elaborar planos e medidas que consigam prever e mitigar as alterações em ecossistemas aquáticos, pois fatores como a topografia, a temperatura, o vento e o fluxo de água podem modificar a distribuição de nutrientes e ocasionar mudanças na qualidade da água.

O *software* utilizado neste estudo é o CE-QUAL-W2, disponibilizado gratuitamente pelo United States Army Corps of Engineers (USACE), trata-se de um modelo hidrodinâmico bidimensional e de qualidade da água que simula processos físicos e biogeoquímicos em lagos, rios, estuários e reservatórios. Este modelo assume homogeneidade lateral em velocidades, temperatura e constituintes da qualidade da água (SHABANI *et al.*, 2021). De

acordo com Wells *et al.*, (2017), é mais indicado para corpos d'água relativamente longos e estreitos que apresentam gradientes de qualidade da água longitudinais e verticais. Além de ser conhecido por sua eficiência computacional em comparação com sistemas tridimensionais. Conforme Benício (2024) tem a capacidade de abranger vários parâmetros de qualidade da água, com inúmeras variáveis que interagem entre diferentes compartimentos, como o ar, a água e os sedimentos.

Molinas (2011) destaca que os modelos bidimensionais representam a alternativa mais simples e efetiva para a simulação do comportamento da grande maioria dos médios e grandes reservatórios da região Nordeste do Brasil.

O modelo hidrodinâmico CE-QUAL-W2 tem sido utilizado para simular o tempo de residência hidráulico e os componentes da água, como o oxigênio dissolvido, fósforo total, sólidos dissolvidos e em suspensão, além de perfis verticais e horizontais de temperaturas da água (Zhang, 2015). Para Shabani *et al.* (2021), a temperatura está intimamente relacionada à mistura da água e aos processos físico-químicos e biológicos de lagos e reservatórios.

A partir da modelagem hidrodinâmica é possível representar o comportamento da água em um lago, reservatório ou represa, por meio de equações matemáticas e simulações computacionais que modelam os fenômenos físicos como a estratificação térmica, e a mistura vertical e horizontal, e são utilizadas os princípios de conservação de massa, quantidade energia e movimento, a partir disso, simula os processos de hidrodinâmicos e de qualidade da água, levando em consideração a dinâmica da água (MESQUITA e LIMA NETO, 2022; CID *et al.*, 2024).

A simulação de processos hidrodinâmicos no software CE-QUAL-W2 necessita da entrada de dados hidrológicos, meteorológicos e de qualidade da água. Para a eficiência da simulação, os dados obtidos devem apresentar boa qualidade e confiabilidade MESQUITA *et al.* (2020) e MESQUITA E LIMA NETO (20022). Cid (2024) afirma que a má qualidade dos dados e a falta de informações precisas podem gerar incertezas na modelagem hidrodinâmica que podem impactar de forma negativa nos resultados das simulações, prejudicando um gerenciamento adequado dos recursos hídricos. Desse modo, a calibração é essencial para o sucesso na execução do modelo, para que as previsões estabelecidas não discorde significativamente dos dados observados e comprometam a confiabilidade da modelagem hidrodinâmica.

4.2.1 Principais Equações do Software

As equações de acordo com Wells *et al.* (2017) são escritas na forma conservativa, em que são utilizadas as aproximações de Boussinesq e hidrostática. As equações que governam o modelo bidimensional, equações de continuidade e de quantidade de movimento em x e z sofreram simplificações (WELLS *et al.*, 2017; ROCHA, MESQUITA, LIMA NETO, 2020; SANTOS, 2025) como mostra as equações 1, 2 e 3 respectivamente:

- Continuidade

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB \quad (1)$$

- x-Momentum

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \overline{u} \frac{\partial u}{\partial x} + \overline{v} \frac{\partial u}{\partial z} + \overline{w} \frac{\partial u}{\partial z} = g \sin \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

- z-Momentum

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \overline{u} \frac{\partial w}{\partial x} + \overline{v} \frac{\partial w}{\partial z} + \overline{w} \frac{\partial w}{\partial z} = g \cos \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Em que:

U = velocidade média na direção longitudinal (x)

W = velocidade média na direção vertical (z)

B = largura do volume de controle;

q = vazão de entrada no volume de controle (m³/s)

p = pressão média

g = constante gravitacional

ρ = massa específica da água

μ = viscosidade dinâmica

τ_{xx} = tensão de cisalhamento relativa à turbulência atuando na direção x na face x do volume controle

τ_{xz} = tensão de cisalhamento relativa à turbulência atuando na direção x na face z do volume controle

τ_{zx} = tensão de cisalhamento relativa à turbulência atuando na direção z na face x do volume controle

τ_{zz} = tensão de cisalhamento relativa à turbulência atuando na direção z na face z do volume controle

De acordo com Rocha, Mesquita e Lima Neto (2020) Mesquita et al. (2020) e as simulações da transferência de calor ao longo das coordenadas x e z podem ser realizadas a partir das equação bidimensional de convecção e difusão turbulenta, descrita na equação 4 abaixo:

$$Hn = H_s + H_a + H_e + H_c - (H_{sr} + H_{ar} + H_{br}) \quad (4)$$

Em que:

H_n = taxa líquida de troca de calor na superfície da água (Wm^{-2})

H_s = radiação incidente de ondas longas (Wm^{-2})

H_a = radiação incidente de ondas curtas (Wm^{-2})

H_{sr} = radiação de ondas curtas refletida (Wm^{-2})

H_{ar} = radiação de ondas longas refletida (Wm^{-2})

H_{br} = radiação de volta da superfície da água (Wm^{-2})

H_e = calor perdido na evaporação (Wm^{-2})

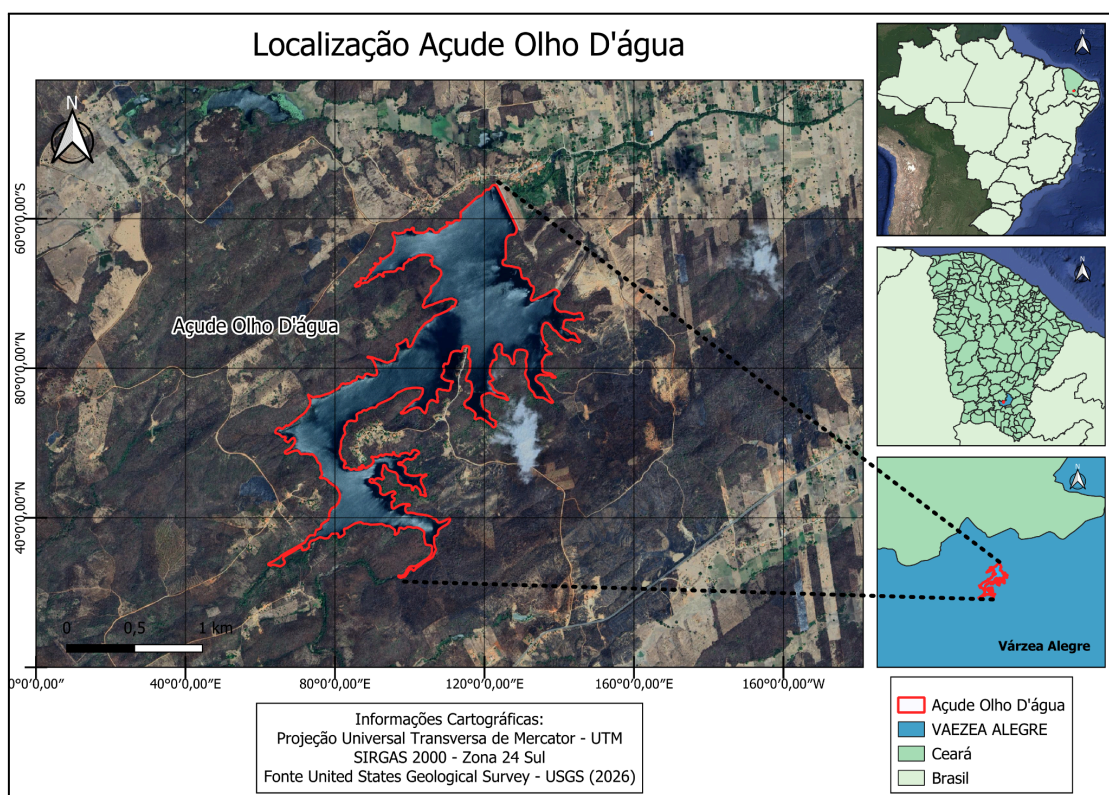
H_c = condução de calor (Wm^{-2})

5. METODOLOGIA

5.1 Caracterização do Reservatório em Estudo

De acordo com a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos - COGERH, o açude Olho D'Água está inserido na bacia hidrográfica do Salgado e possui área drenada de 71,8 km², localizando-se na comunidade São Vicente, zona rural do município de Várzea Alegre, Ceará, como mostra a Figura 01.

Figura 01 – Localização Açude Olho D'Água



Fonte: Autora, 2026.

O açude Olho D'Água foi construído em 1998, pelo 3º Batalhão de Engenharia do Exército, com recursos do Governo Federal e do Governo do Estado do Ceará, sendo uma obra hidráulica essencial para o desenvolvimento socioeconômico da região, seu uso predominante para o abastecimento humano, usos para dessedentação animal, recreação de contato primário e o desenvolvimento de projetos de piscicultura.

Figura 02 – Imagens do Açude Olho D'Água, Várzea Alegre-CE



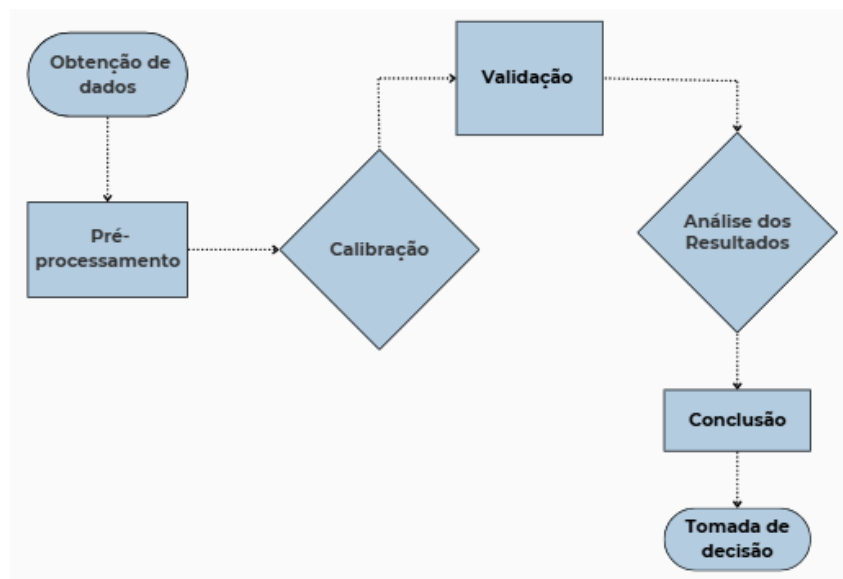
Fonte: Portal Hidrológico, 2026.

De acordo com o Inventário Ambiental (2008), este reservatório é barrado pelo o riacho Machado e é composto por uma barragem de terra zoneada. Está inserido na microrregião serrana de Caririaçu e possui área de espelho d'água de 456 hectares e capacidade de armazenamento de 21 milhões de m³. A COGERH deu início ao monitoramento quantitativo e qualitativo das suas águas em abril de 1999.

5.2 O modelo CE-QUAL-W2

5.2.1 Obtenção de dados e Pré-processamento

A Figura 03 mostra o fluxograma das etapas desenvolvidas neste trabalho.

Figura 03 – Fluxograma metodológico.

Fonte: Autora, 2026.

A parametrização do modelo CE-QUAL-W2, para o reservatório em estudo, foi realizada com apoio da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), que forneceu a base computacional e os dados meteorológicos que foram utilizados no *software* CE-QUAL-W2.

Dentre os dados meteorológicos necessários estão incluídos a cobertura de nuvens, a temperatura do ar (°C), a temperatura do ponto de orvalho (°C), a velocidade do vento (m/s), a direção do vento (graus) e nebulosidade. A coleta destes dados será através do banco de dados meteorológicos do INMET, a estação climática mais próxima do reservatório Olho D'Água para a coleta dos dados foi a de Iguatu-CE, sendo selecionada tanto a estação automática (A319) tanto a convencional (82686).

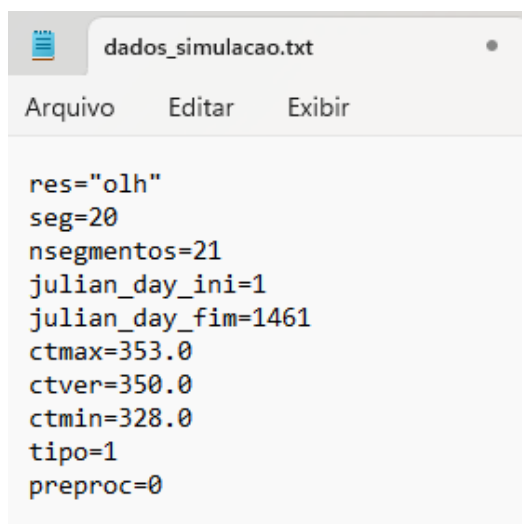
Os outros dados que foram necessários, estão a batimetria do reservatório disponibilizada pela FUNCEME, que realizou a construção desse arquivo de entrada conforme os dados batimétricos fornecidos pela COGERH e o Modelo Digital de Terreno, disponibilizado pela NASA através *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução espacial de 30 metros, do eixos do reservatório e determinação da geometria das seções (MESQUITA, 2025). Desta forma, com todos os dados disponíveis, seguiu-se para a fase de pré-processamento, calibração e validação da modelagem hidrodinâmica.

5.2.2 Simulação e Pós-processamento dos dados

A série temporal aplicada neste estudo foi de 01 de janeiro de 2016 a 31 de dezembro de 2021, em dias julianos, corresponde do dia 1 ao dia 2192. As etapas da modelagem hidrodinâmica foram a calibração e a validação. Para a realização da calibração, utilizou-se um intervalo de tempo correspondente aos anos de 2016 a 2019 (dia juliano 1 ao dia juliano 1461), na validação utilizou-se um intervalo de tempo correspondente aos anos de 2020 a 2021, que em dias julianos equivale a 731 dias.

A Figura 04, mostra o arquivo de entrada do FLOWQUAL com os dados da simulação, o segmento 20 corresponde ao ponto do reservatório em que os dados foram medidos. No que se refere a *ctmax*, a *ctver* e a *ctmin*, estes correspondem a cota máxima, a cota do vertedouro e a cota mínima respectivamente.

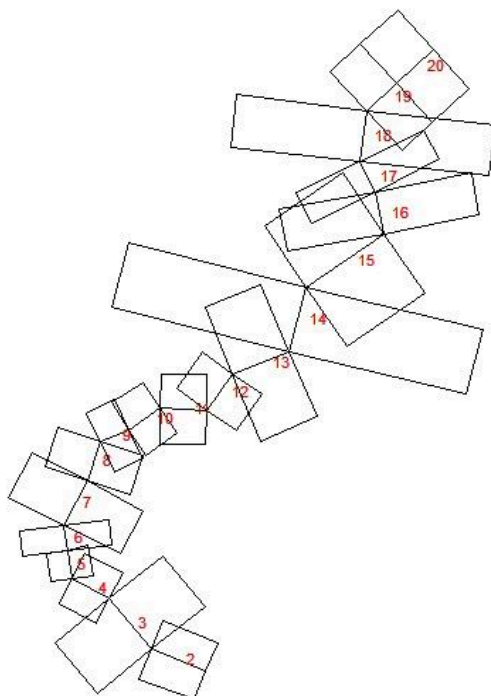
Figura 04 – Arquivo de entrada com dados da simulação.



Fonte: Autora, 2026.

A configuração do reservatório Olho D'Água consiste em 21 segmentos, sendo 19 ativos e 2 virtuais, distribuídos em um único ramo/braço e possui 28 camadas verticais (*layers*) com 26 ativas e 2 virtuais, apresentando a espessura vertical de um metro para todas as camadas e um comprimento horizontal médio igual a aproximadamente 179,31 metros. A Figura 05 mostra a discretização espacial vista de cima do açude Olho D'água no CE-QUAL-W2 com as 19 camadas ativas.

Figura 05 – Discretização espacial vista de cima do açude Olho D'água no CE-QUAL-W2



Fonte: Elaborada pela autora no CE-QUAL-W2 com dados da FUNCEME (2026).

As etapas de simulação e de pós-processamento dos dados são diretamente dependentes do sucesso obtido durante a etapa anterior. O pré-processamento, no qual foi gerado um arquivo controle, permitindo a execução da modelagem do açude em estudo (Molinas, 2011).

A calibração e o ajuste dos dados foi fundamental para adequar o modelo à realidade e avaliar sua sensibilidade. Diante disso, após a realização da simulação o programa forneceu o arquivo de saída e então deu-se início ao processo de calibração do modelo, em que os resultados simulados são comparados aos dados reais observados, caso não sejam coerentes, redefine-se as condições de contorno do pré-processamento até que a aproximação dos dados gerados com os observados seja a melhor possível.

Para realização da calibração, executou-se o script fornecido pela FUNCEME, por meio do *software* RStudio, que utiliza a linguagem de programação R, que em seguida aciona o aplicativo FLOWQUAL, que foi desenvolvido para facilitar a integração entre os modelos SWAT e CE-QUAL-W2, dando início às simulações. A simulação do tipo 1, corresponde aos parâmetros hidrodinâmicos básicos responsáveis pela circulação e estrutura térmica do reservatório afw, bfw, cfw, wsc e shade. Os parâmetros afw, bfw, cfw, referem-se aos

coeficientes da função do vento A, B e C respectivamente, wsc refere-se ao coeficiente de proteção contra o vento e shade refere-se ao sombreamento.

A simulação do tipo 2, além dos parâmetros anteriores é incluído os parâmetros associados à dispersão, troca vertical e processos hidrodinâmicos avançados ax, dx, cbhe, exh₂o e beta. O parâmetro ax trata-se da viscosidade turbulenta longitudinal, dx a difusividade turbulenta longitudinal, cbhe ao coeficiente de troca térmica de fundo, o exh₂o coeficiente de extinção para água pura, por fim o beta que refere-se a radiação solar absorvida na camada superficial, como confirma em Bashi-Azghadi *et al.* (2026). Esses parâmetros são adicionados por meio de planilhas em formato de arquivo csv no acoplamento Swat-CE-QUAL-W2, que neste estudo foram fornecidos pela FUNCEME.

Na calibração, foram realizadas 600 simulações para os tipos 1 e 2, considerando as variáveis, a cota, a temperatura de superfície e a evaporação, sendo a temperatura a variável de maior interesse. Ao fim das simulações, o programa gerou arquivos com as métricas RMSE, MAE, Bias e NSE.

O parâmetro utilizado nas estimativas foi o erro quadrático médio (RMSE), que refere-se à diferença entre os valores simulados e os observados no modelo e serve como critério para avaliar a sua eficiência, como mostra a equação 5, sendo dessa forma uma métrica fundamental para avaliar o desempenho do modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum |Simulado_i - Observado_i|^2}{n}} \quad (5)$$

O Erro Médio Absoluto (MAE) mede a magnitude média do erro no conjunto de previsões, independentemente da direção (Cole e Wells 2013; Hassani, S. Z *et al.*, 2025), e representa um dos melhores critérios mais confiáveis para avaliar o erro, pois permite quantificar diretamente o desvio médio das simulações em relação às observações, de acordo com a equação 6.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Simulado_i - Observado_i| \quad (6)$$

O Bias corresponde ao viés, indica se o modelo pode estar superestimando ou subestimando a variável, determinado pela equação 7.

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (Simulado_i - Observado_i)}{n} \quad (7)$$

O Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) permite comparar a variação dos dados simulados com os dados observados, como descreve a equação 8, sendo o valor 1 indicativo de um ajuste ideal.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad (8)$$

Em que:

O_i = valor observado;

S_i = valor simulado;

$\bar{O}$ = média do valor observado;

Os parâmetros característicos na etapa de otimização foram o tamanho da população, a máxima de interações e a mutação mostrados na Tabela 01.

Tabela 01 - Parâmetros de Otimização

Parâmetros de Otimização	
Tamanho da população	30
Máxima de iterações	20
Mutação	0,7

Fonte: Elaborada pela autora com dados do Acoplamento SWAT-CE-QUAL-W2, 2026.

Os parâmetros de otimização na Tabela 01 realizaram uma quantidade de iterações de aproximadamente 600, que ao serem finalizadas foram gerados arquivos com parâmetros otimizados de afw, bfw, cfw, wsc e shade, ax, dx cbhe, exh2o e beta. Com esse conjunto de parâmetros, realizou-se a validação no acoplamento Swat-CE-QUAL-W2 com os dois anos finais da série histórica de 2020 a 2021.

No pós-processamento, etapa final do processo de modelagem, os resultados serão analisados por meio da geração de gráficos e tabelas de modo a auxiliar na compreensão, e verificar se as hipóteses formuladas antes do início do processo de modelagem podem ser confirmadas ou refutadas. Em seguida pode-se extrair as devidas conclusões e subsidiar as tomadas de decisão quanto ao gerenciamento do açude estudado.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos no reservatório

Após a modelagem hidrodinâmica para o açude Olho D'Água pode-se obter os seguintes resultados:

6.1.1 Simulação Tipo 1

Após realizar a etapa de calibração foram geradas 38 simulações, dentre essas foram escolhidas as melhores, os critérios para seleção foi a simulação que obteve os valores para RMSE, MAE e Bias mais próximos de 0 e NSE mais próximos de 1.

A simulação 12 foi superior, apresentando resultados satisfatórios tanto para as métricas na temperatura como para as métricas na evaporação, mas com relação às métricas na cota, a resposta obtida não foi estatisticamente boa, como mostra a Tabela 02.

Tabela 02 - Melhores resultados estatísticos da calibração tipo 1.

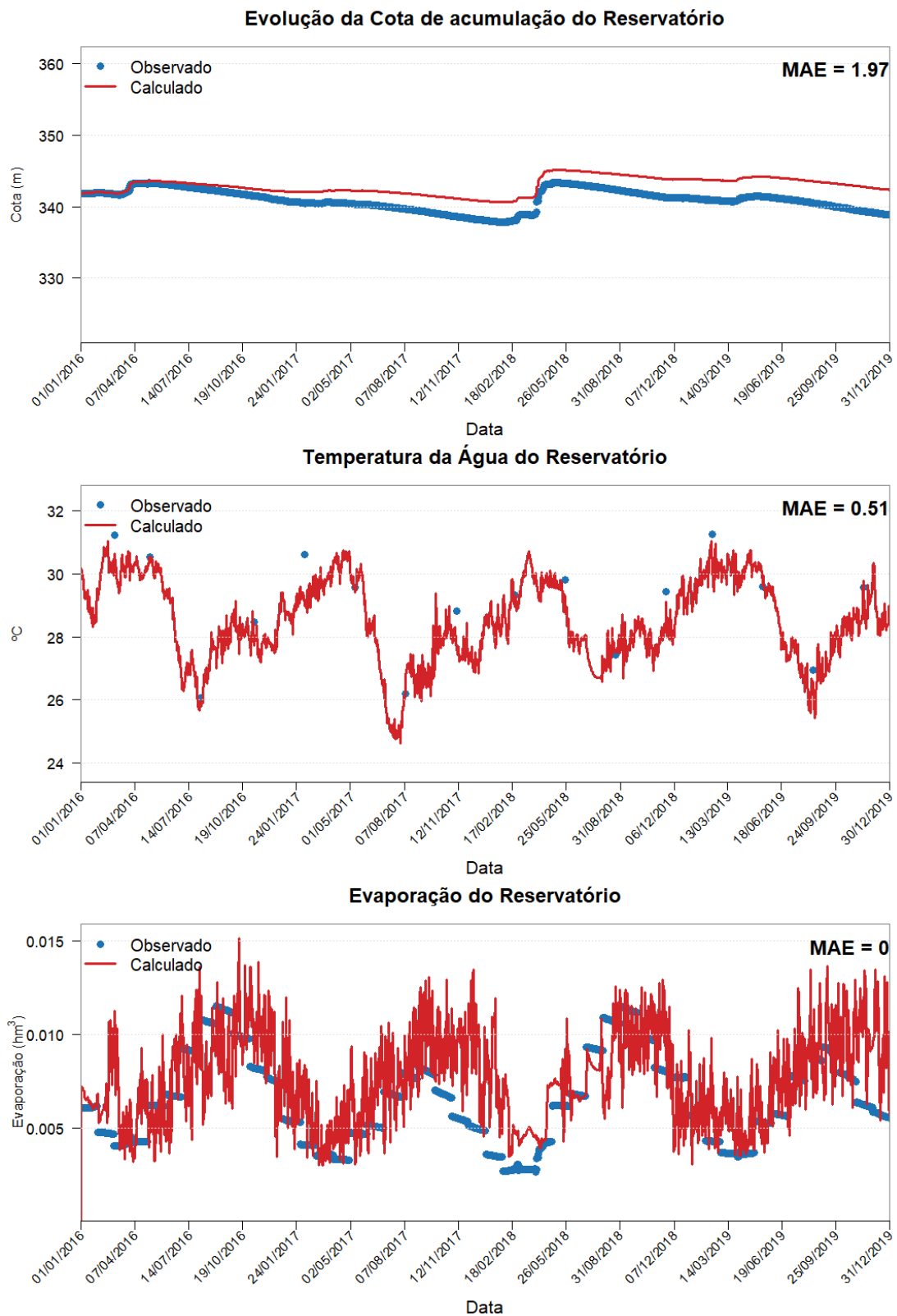
Simulação	Variável	RMSE	MAE	Bias	NSE
12	Cota	2,19565	1,97489	1,97489	-1,27898
	Temperatura	0,64697	0,50562	-0,38062	0,83477
	Evaporação	0,00254	0,00198	0,00110	-0,07646
23	Cota	1,80216	1,63135	1,63135	-0,53534
	Temperatura	1,51113	1,23563	-1,19938	0,09859
	Evaporação	0,00358	0,00271	0,00169	-0,02605
29	Cota	1,50185	1,36217	1,36217	-0,06628
	Temperatura	2,02378	1,86250	-1,86250	-0,61676
	Evaporação	0,00381	0,00291	0,00213	-0,11466
30	Cota	1,79478	1,62099	1,62099	-0,52279
	Temperatura	1,53333	1,38188	-1,37938	0,07191
	Evaporação	0,00314	0,00244	0,00170	-0,12216

Fonte: Autor, 2026.

A Figura 06 trata-se dos gráficos gerados após a calibração com o resultado do monitoramento do nível de água, da temperatura e da evaporação, destacando visualmente os valores de MAE para a simulação 12, em que para a temperatura, o valor de MAE apresenta um erro médio de 0,56 °C (Tabela 03).

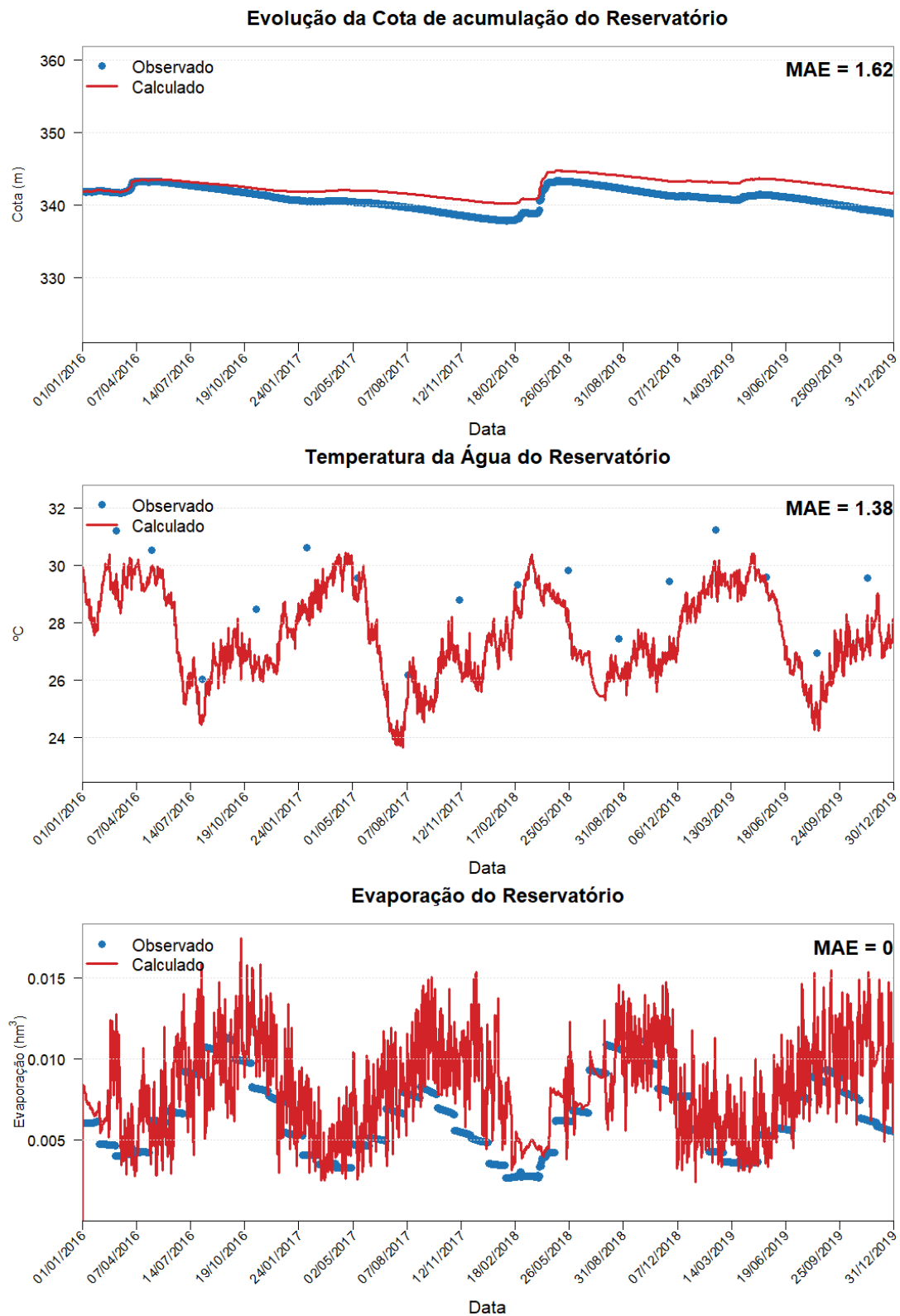
A Figura 07 mostra os gráficos gerados após a calibração com os valores de MAE para a simulação 30, com o MAE de 1,38°C.

Figura 06 - Gráfico da simulação 12 (calibração) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.



Fonte: Modelo FlowQual, 2026.

Figura 07 - Gráfico da simulação 30 (calibração) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.



Fonte: Modelo FlowQual, 2026.

A Tabela 03 mostra as melhores simulações dentre as 38 geradas da etapa da validação, com destaque para as simulações 12 e 30.

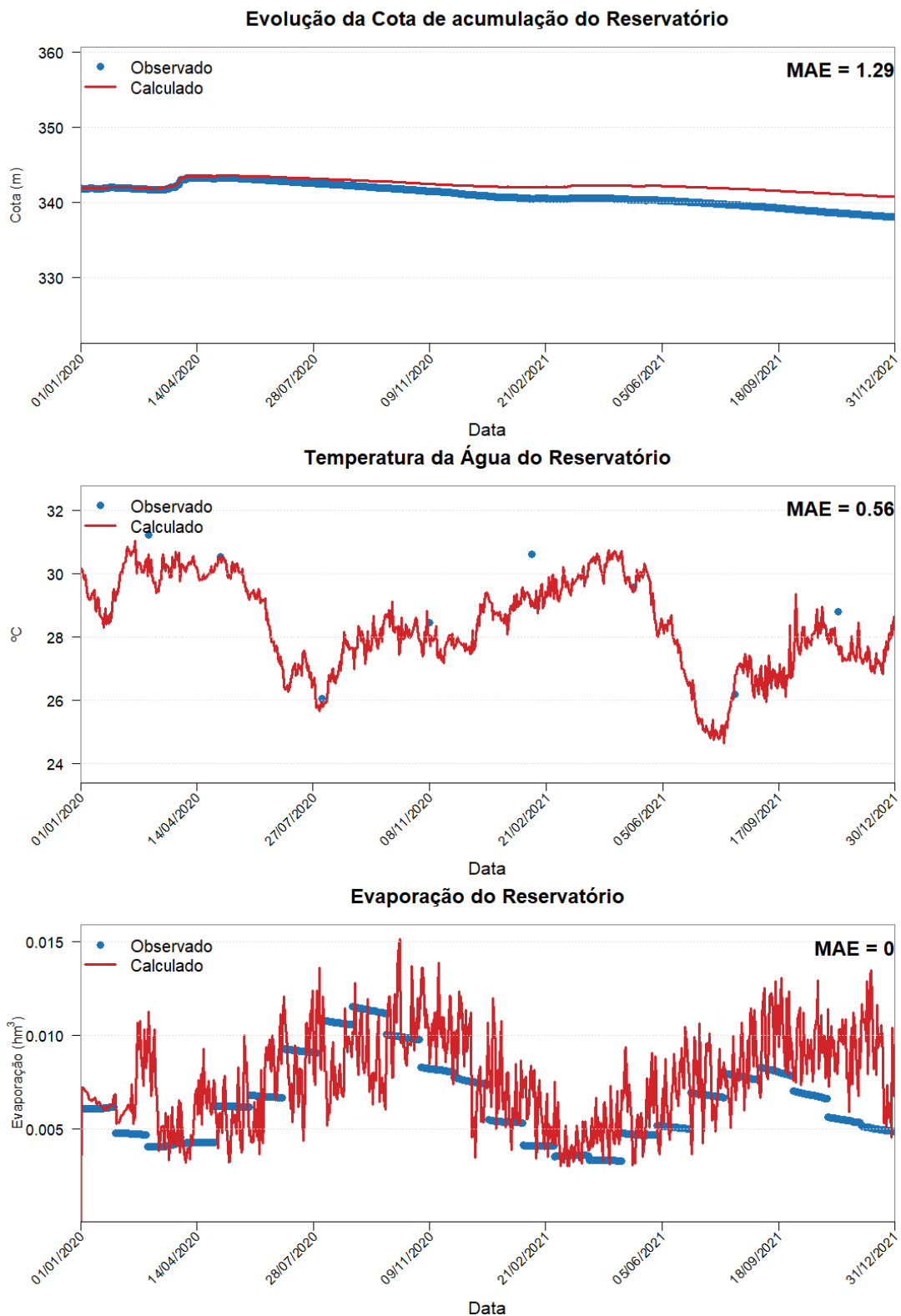
Tabela 03 - Melhores resultados estatísticos da validação do tipo 1

Simulação	Variável	RMSE	MAE	Bias	NSE
12	Cota	1,53562	1,29130	1,29130	-0,14123
	Temperatura	0,73070	0,56000	-0,41250	0,84271
	Evaporação	0,00259	0,00204	0,00112	-0,09556
26	Cota	1,50342	1,26321	1,26321	-0,09388
	Temperatura	0,83200	0,66750	-0,54500	0,79608
	Evaporação	0,00267	0,00212	0,00122	-0,09950
30	Cota	1,32145	1,10859	1,10859	0,15490
	Temperatura	1,57134	1,36250	-1,3575	0,27263
	Evaporação	0,00325	0,00257	0,00177	-0,14732
33	Cota	1,48149	1,24397	1,24397	-0,06219
	Temperatura	0,91261	0,76125	-0,65375	0,75465
	Evaporação	0,00268	0,00213	0,00128	-0,11757

Fonte: Autor, 2026.

A Figura 08 mostra os gráficos gerados a simulação 12 após a etapa de validação com os valores de MAE para a temperatura apresentando um erro médio de 0,56 °C (Tabela 03) entre os dados medidos pelo modelo e os dados reais, sendo esse o valor mais baixo obtido.

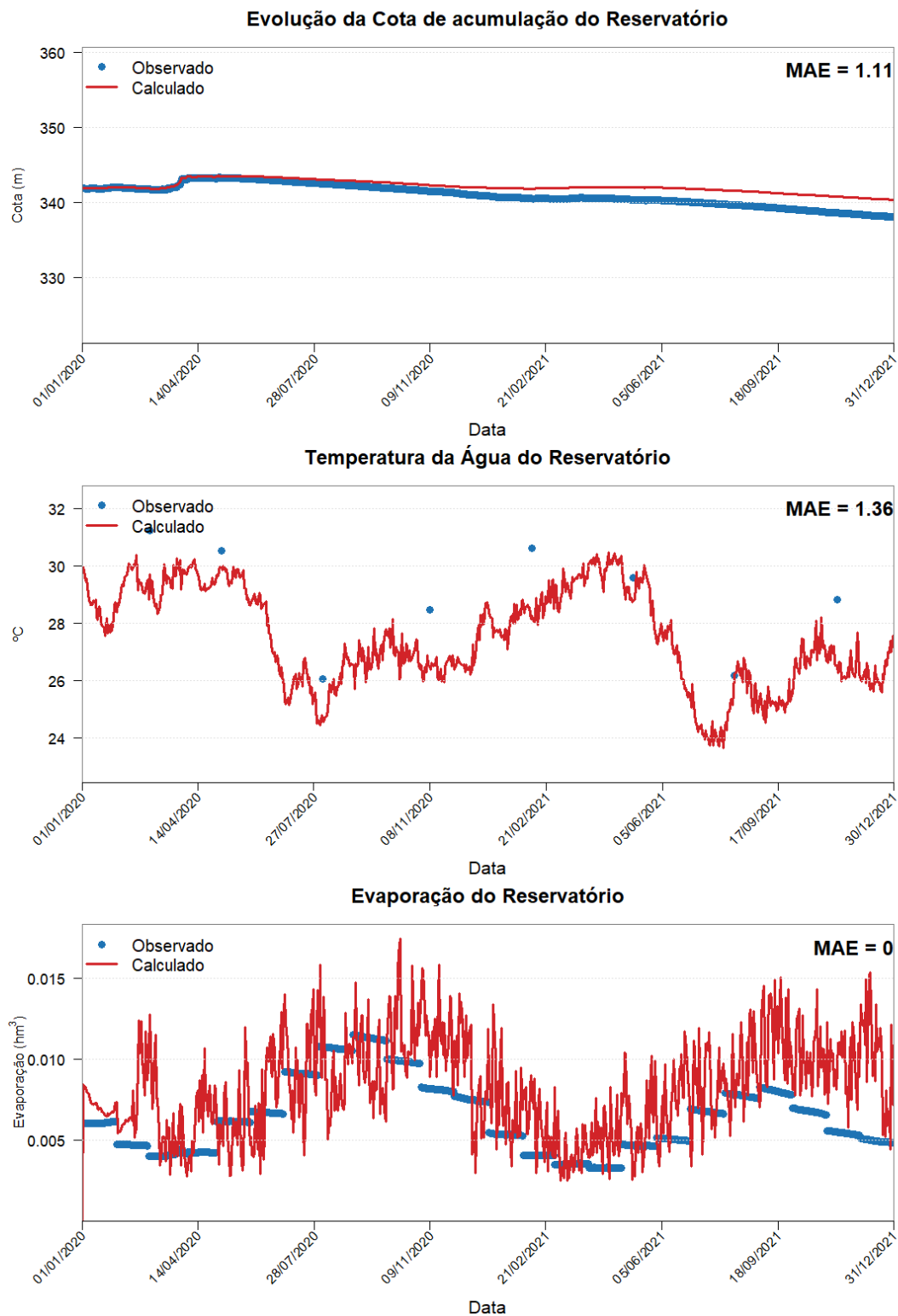
Figura 08 - Gráfico gerado da simulação 12 (validação) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.



Na Figura 09 os gráficos representam a simulação 30 após a etapa de validação com os valores de MAE para a cota, a evaporação e a temperatura. Com destaque a temperatura

apresentando um erro médio aproximado de 1,36 °C (Tabela 03) entre os dados medidos pelo modelo e os dados reais, sendo esse o valor mais alto obtido.

Figura 09 - Gráfico gerado da simulação 30 (validação) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.



Com relação às etapas de calibração e de validação, dentre as simulações selecionada como as melhores, a simulação 12 se destaca, pois apresentou os melhores resultados para as métricas estatísticas com relação a temperatura e a evaporação, como pode ser observado na Tabela 03.

Com relação a cota, a 30 mostra-se relativamente melhor, mas de modo geral a simulação 12 é a mais indicada pois apresenta predominância de resultados convergentes, tanto na calibração quanto na validação.

6.1.2 Simulação Tipo 2

Para a simulação do tipo 2, que incluem os parâmetros adicionais ax , dx , $cbhe$, exh_2O e β , após realizar a etapa de calibração e otimização foram geradas novamente 38 simulações, prosseguiu-se de modo semelhante para selecionar as simulações que obtiveram os melhores valores estatísticos. As simulações escolhidas na calibração foram a 7, 10, 15, 16 e 18. Na Tabela 04, destaca a simulação 7 que apresentou os melhores valores estatísticos de temperatura e de evaporação, e a simulação 15 que apresentou os melhores resultados estatísticos para a cota.

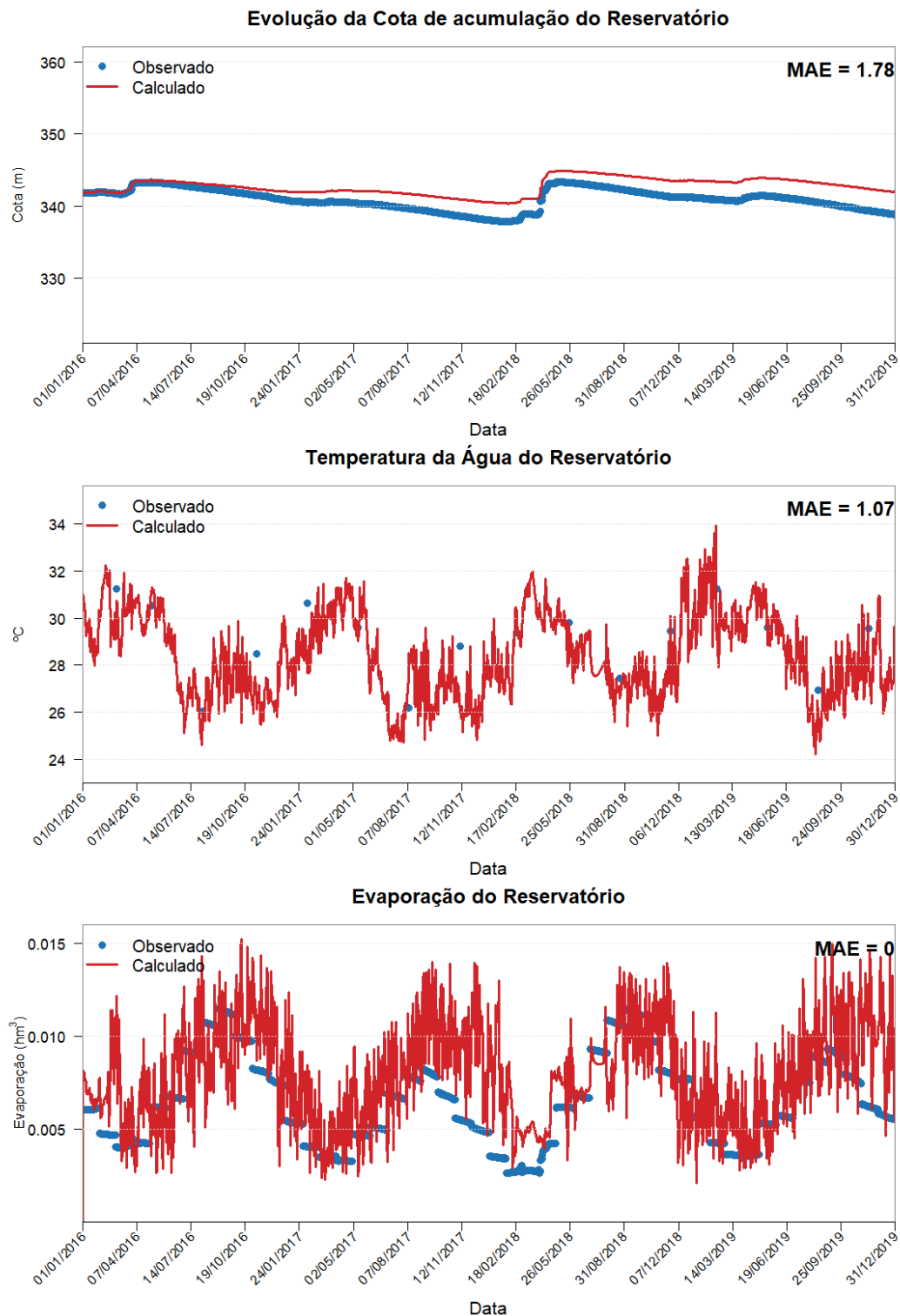
Tabela 04 - Melhores resultados da calibração do tipo 2

Simulação	Variável	RMSE	MAE	Bias	NSE
7	Cota	1,97506	1,77951	1,77951	-0,84406
	Temperatura	1,34540	1,07375	-0,68500	0,28547
	Evaporação	0,00284	0,00223	0,00143	-0,06846
10	Cota	1,86461	1,68021	1,68021	-0,64358
	Temperatura	1,53133	1,263125	-0,93063	0,07433
	Evaporação	0,00285	0,00226	0,00159	-0,15160
15	Cota	1,30605	1,18736	1,18736	0,19362
	Temperatura	2,12505	1,729375	-1,70813	-0,78263
	Evaporação	0,00411	0,00313	0,00240	-0,13427
16	Cota	1,38647	1,25939	1,25939	0,09126
	Temperatura	2,11467	1,7175	-1,64875	-0,76524
	Evaporação	0,00403	0,00309	0,00229	-0,10761
18	Cota	1,48763	1,34851	1,34851	-0,04618
	Temperatura	1,82266	1,46187	-1,36687	-0,31139
	Evaporação	0,00372	0,00286	0,00214	-0,12164

Fonte: Autor, 2026.

Na Figura 10, os gráficos representam a simulação 7 após a etapa de calibração com os valores de MAE para a cota, a evaporação e a temperatura. Com destaque para a temperatura apresentando um erro médio aproximado de 1,07 °C (Tabela 04) entre os dados medidos pelo modelo e os dados reais, sendo esse o valor mais baixo obtido.

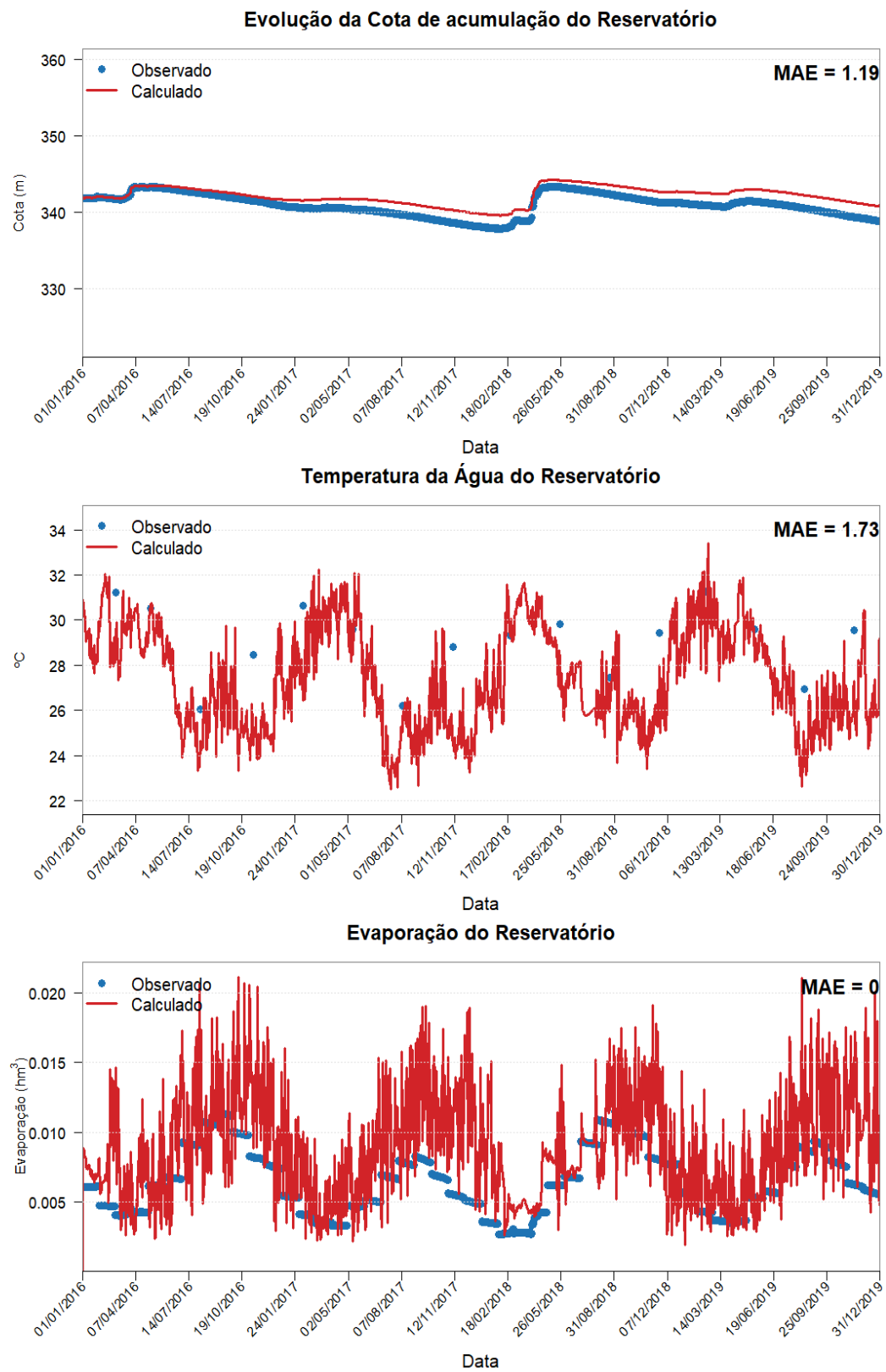
Figura 10 - Gráfico gerado da simulação 7 (calibração) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.



Fonte: Modelo FlowQual, 2026.

Na Figura 11 os gráficos representam a simulação 15 após a etapa de calibração com os valores de MAE para a cota, a evaporação e a temperatura. O erro médio de 1,73 °C (Tabela 04) para a temperatura.

Figura 11 - Gráfico gerado da simulação 15 (calibração) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.



Fonte: Modelo FlowQual, 2026.

Na etapa de validação, realizada com os anos finais da série histórica, 2020 e 2021, também foram selecionadas as simulações 7, 10, 15, 16 e 18 com os resultados mais satisfatórios. Assim como na etapa anterior, a simulação 7 também apresentou os melhores valores estatísticos da temperatura e da evaporação, a simulação 15 obteve os melhores valores estatísticos para a cota, como mostra a Tabela 05.

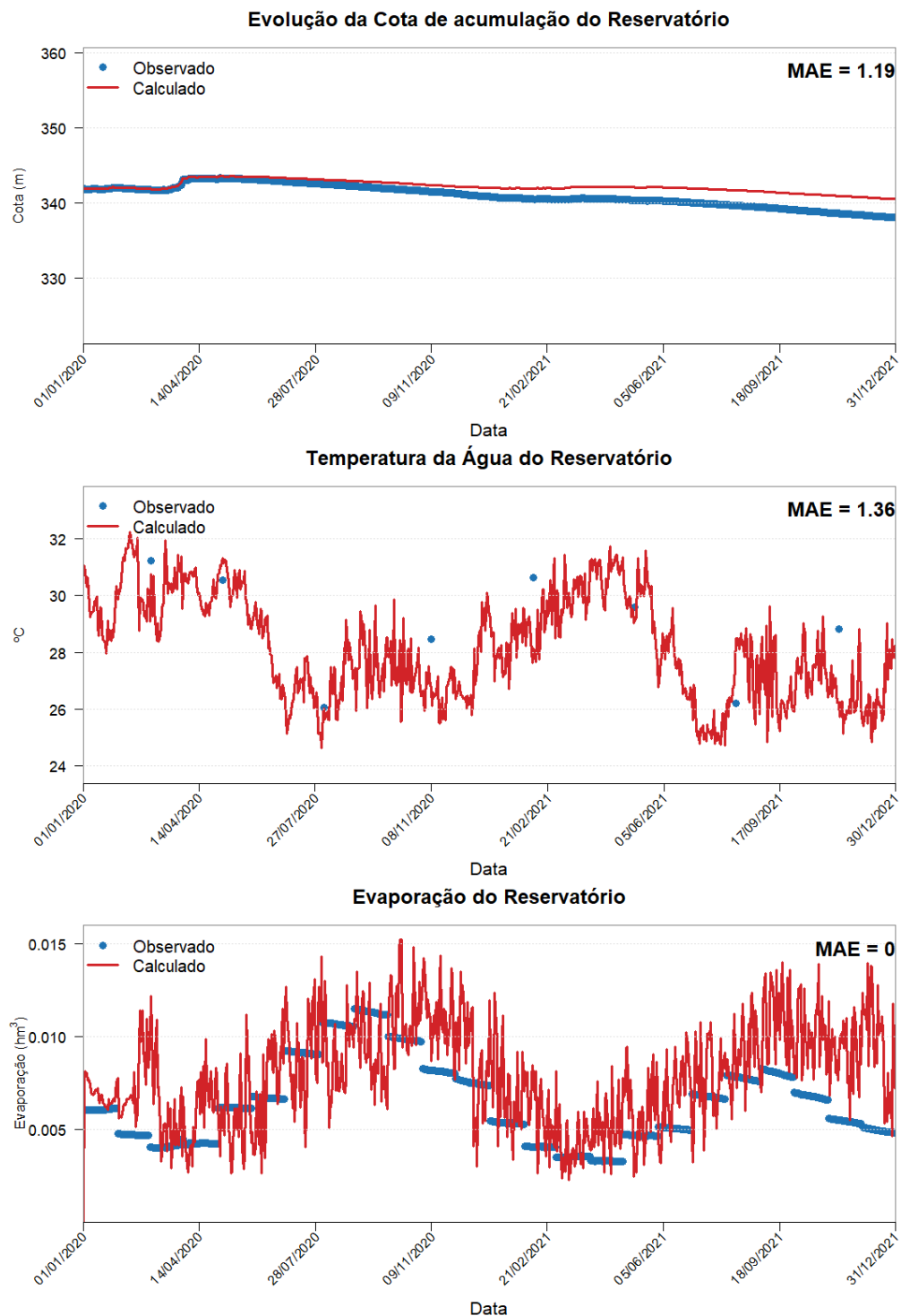
Tabela 05 - Melhores resultados estatísticos da validação do tipo 2

Simulação	Variável	RMSE	MAE	Bias	NSE
7	Cota	1,41890	1,19007	1,19007	0,02566
	Temperatura	1,67420	1,36500	-0,58750	0,17428
	Evaporação	0,00290	0,00232	0,00147	-0,08920
10	Cota	1,35656	1,13387	1,13387	0,10939
	Temperatura	1,75027	1,41875	-0,75375	0,09754
	Evaporação	0,00289	0,00234	0,00163	-0,16872
15	Cota	1,03902	0,87580	0,87580	0,47753
	Temperatura	2,39642	1,91250	-1,87	-0,69178
	Evaporação	0,00439	0,00341	0,00265	-0,21375
16	Cota	1,08754	0,91643	0,91643	0,42761
	Temperatura	2,33441	1,88375	-1,74625	-0,60536
	Evaporação	0,00429	0,00335	0,00251	-0,18076
18	Cota	1,14415	0,96156	0,96156	0,36647
	Temperatura	2,17233	1,74000	-1,69000	-0,39017
	Evaporação	0,00394	0,00308	0,00233	-0,19063

Fonte: Autor, 2026.

Na Figura 12, os gráficos representam a simulação 7 após a etapa de validação com os valores de MAE para a cota, a evaporação e a temperatura. Com um erro médio de 1,36 °C para a temperatura.

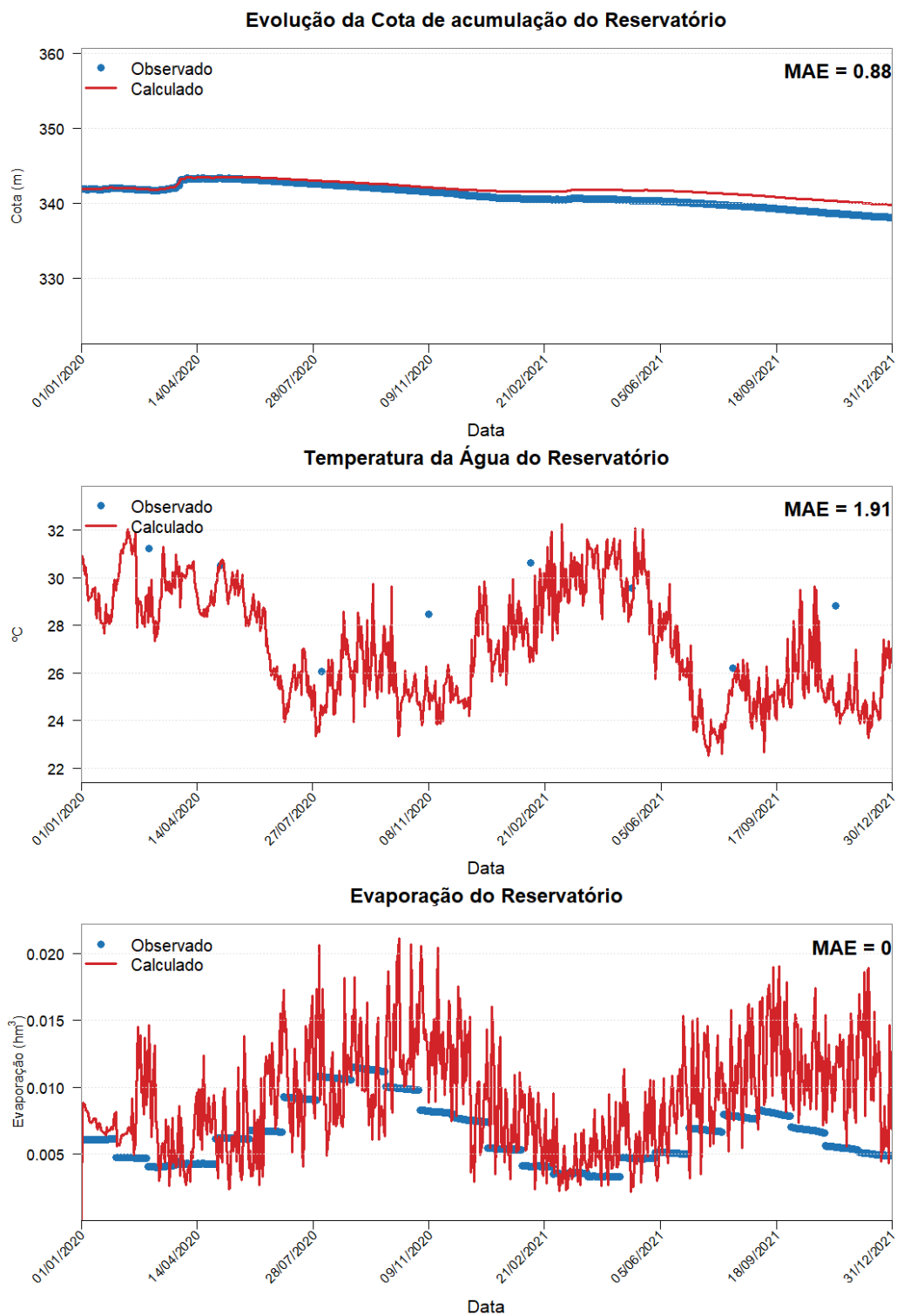
Figura 12 - Gráfico gerado da simulação 7 (validação) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.



Fonte: Modelo FlowQual, 2026.

Os gráficos na Figura 13 representam a simulação 15 após a etapa de validação no modelo CE-QUAL-W2, com os valores de MAE para a cota, a evaporação e a temperatura. Com um erro médio de 1,91 °C (Tabela 05) para a temperatura.

Figura 13 - Gráfico gerado da simulação 15 (validação) com valores de MAE para a Cota, Temperatura e Evaporação.



Fonte: Modelo FlowQual, 2026.

Ao analisar as duas melhores simulações do tipo 2, a 7 e a 15, os conjuntos de parâmetros da simulação 7 é a mais indicada, pois com relação a temperatura e a evaporação

do reservatório, apresenta os resultados mais próximos de 0 para RMSE, MAE e Bias e resultados mais próximos de 1 para o NSE.

Com relação a comparação entre os tipos de simulação, tipo 1 e tipo 2, tanto na etapa de calibração quanto na etapa de validação, as simulações 7 e 12 se destacam.

A simulação 12 apresenta os melhores valores das métricas estatísticas RMSE, MAE, e Bias sendo os resultados obtidos mais próximos de 0 e o NSE mais próximos de 1, tanto na calibração quanto na validação. A simulação 7 também apresenta os melhores valores das métricas estatísticas RMSE, MAE, Bias e NSE tanto na calibração quanto na validação.

Tabela 06 - Comparação entre a simulação tipo 1 e a tipo 2.

—	Simulação		Variável	RMSE	MAE	Bias	NSE
Calibração	Tipo 1	12	Cota	2,19565	1,97489	1,97489	-1,27898
			Temperatura	0,64697	0,50562	-0,38062	0,83477
			Evaporação	0,00254	0,00198	0,00110	-0,07646
	Tipo 2	7	Cota	1,97506	1,77951	1,77951	-0,84406
			Temperatura	1,34540	1,07375	-0,68500	0,28547
			Evaporação	0,00284	0,00223	0,00143	-0,06846
Validação	Tipo 1	12	Cota	1,53562	1,29130	1,29130	-0,14123
			Temperatura	0,73070	0,56000	-0,41250	0,84271
			Evaporação	0,00259	0,00204	0,00112	-0,09556
	Tipo 2	7	Cota	1,41890	1,19007	1,19007	0,02566
			Temperatura	1,67420	1,36500	-0,58750	0,17428
			Evaporação	0,00290	0,00232	0,00147	-0,08920

Fonte: Autor, 2026.

A Tabela 06 faz uma comparação entre as simulações, realçando os valores das métricas obtidas para a simulação 12 (tipo 1), que de modo geral, apresentou os melhores valores tanto para a calibração quanto para a validação com relação às métricas da temperatura e da evaporação, sendo a que melhor indica a qualidade do ajuste entre os valores simulados e observados. Os valores relativamente altos da variável cota, indica inconsistências no balanço hídrico, sendo necessário ser revisto e as simulações executadas novamente. De modo semelhante aos estudos de Cid *et al.*, (2024), as simulações neste estudo demonstraram, em grande parte, uma sensibilidade dos coeficientes no cálculo da cota com a da temperatura, ou seja, observou-se uma relação inversa entre os valores de RMSE e MAE entre as duas variáveis.

7. CONCLUSÃO

A aplicação do modelo bidimensional permitiu calibrar e validar a série temporal de dados para os anos de 2016 a 2021 para o açude Olho D'Água, em que obteve-se as métricas RMSE, MAE, Bias e NSE para cada simulação processada pelo *software*.

Após a realização de aproximadamente 600 iterações, foram geradas 38 simulações, dentre estas foram escolhidas as melhores, em que os resultados das métricas apresentaram valores relativamente bons. Com a temperatura sendo a variável de maior interesse na calibração e validação da série temporal para o açude Olho D'Água, após a comparação entre todas as simulações do tipo 1 e do tipo 2, a simulação 12 (tipo 1) apresentou-se superior, pois obteve o melhor ajuste dos dados entre os valores simulados e observados.

Desse modo, a modelagem hidrodinâmica com o *software* CE-QUAL-W2 no açude Olho D'Água permitiu gerar dados técnicos do açude estudado, com relação a algumas variáveis como a temperatura, evaporação e a cota, refletindo a importância da modelagem para contribuir em futuras tomadas de decisão pelos órgãos responsáveis no gerenciamento dos recursos hídricos.

No entanto, como proposta de melhorias para trabalhos futuros, verificou-se a necessidade de reavaliar o balanço hídrico devido aos valores relativamente altos da variável cota e acrescentar a avaliação de padrões hidrodinâmicos do reservatório como a estratificação térmica e o tempo de residência hidráulica ao longo da coluna d'água do reservatório.

REFERÊNCIAS

ANDRIETTI, G. ; FREIRE, R. ; AMARAL, A.G. do; ALMEIDA, F. T. de; BONGIOVANI, M. C.; SCHNEIDER, R. M. **Índices de qualidade da água e de estado trófico do rio Caiabi, MT.** Rev. Ambient. Água vol. 11 n. 1 Taubaté – Jan. / Mar. 2016.

ANTENEH, Y.; ZELEKE, G.; GEBREMARIAM, E.; **Assessment of surface water quality in Legedadie and Dire catchments, Central Ethiopia, using multivariate statistical analysis.** Acta Ecologica Sinica, Ecological Society of China. Published by Elsevier B.V. 2018.

BASHI-AZGHADI, S. N.; KHAJEPOUR, M. E.; ZAMANPOORE, M.; GHAFFARIAN, V.; RAVANBAKHSH, H.; ASDAGHI, E. **Application of CE-QUAL-W2 model for simulation of water quality and ecological conditions in Doroudzan dam reservoir.** Springer Nature Link, 2026.

BECKER, A. C. C.; SIECIECHOWICZ, M. S. F.; FERNANDES, C. V. S.; N. M. B. DE ARRUDA, N. M. B. DE; ALCIDES, A. C. **Séries históricas como ferramentas para a verificação de padrões sazonais de estratificação térmica e química na qualidade da água.** Rev. Gest. Água Am. Lat., Porto Alegre, v. 17, e12, 2020. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/107/XXIII-SBRH0071-1-20190411-091150.pdf> Acesso em: 26 de dezembro 2025.

BENICIO, S. H. M.; RAVIEL EURICO BASSO, R. E.; FORMIGA, K. T. M. **Global Applications of the CE-QUAL-W2 Model in Reservoir Eutrophication: A Systematic Review and Perspectives for Brazil.** Water 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/24/3556> Acesso em: 22 de dezembro de 2025.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F. ; MACHADO, R. E.; & OLIVEIRA, M. P. de. **Calibração de Modelo Para a Simulação de Vazão e de Fósforo Total nas Sub-Bacias dos Rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR).** R. Bras. Ci. Solo, 34:253-261, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/9kcbbtZRp3YtJNhBq3KrQvq/?lang=pt> Acesso em: 07 de julho de 2026.

BOHN, V. Y.; PERILLO, G. M. E.; PICCOLO, M. C. **Distribution and morphometry of shallow lakes in a temperate zone (Buenos Aires Province, Argentina)**. Asociación Ibérica de Limnología, Madrid. Spain. 2011.

COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário Ambiental do Açude Olho D'água: Fatores Condicionantes da Qualidade das Águas**. Fortaleza, Ceará, 2008. Disponível em: https://cdn.funceme.br/hidro-ce/data/arquivos/inventarios_synced_201605/Inventario%20Ambiental%20do%20Acude%20Olho%20Dagua-dez2008.pdf Acesso em: 11 de maio de 2026.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)**. Infraestrutura Hídrica. Ceará. Disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/90/2018/12/0281014-PLANERH-DIAGN%C3%93STICO-Capitulo-7-Infra-Estrutura-Hidrica.pdf> Acesso em: 28 de dezembro de 2025. Ceará, Brasil. 2025.

CHAPRA, S. C. **Surface Water-Quality Modeling**, McGraw-Hill, 2008.

CID, D. A. C; LIMA, L. C. T. M. **Calibração do modelo hidrodinâmico CE-QUAL-W2 para o Reservatório Edson Queiroz**. XVII SRHNE - Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. João Pessoa, Paraíba. 2024.

COLOMBO, G. T.; MANNICH, M. **Estudo da Estratificação Térmica do Reservatório Vossoroca por meio de Índices Físicos**. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis. Santa Catarina. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=2304> Acesso em: 16 de Nov. de 2025.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS - COGERH. **Inventário Ambiental do Açude Curral Velho - Fatores Condicionantes da Qualidade das Águas**. Fortaleza, Ceará, 2012.

DEUS, R., BRITO, D., MATEUS, M., KENOV, I., FORNARO, A., NEVES, R., ALVES, C. **N. Impact evaluation of a pisciculture in the Tucuruí reservoir (Pará, Brazil) using a two-dimensional water quality model.** Journal of Hydrology, v. 487, p.1-12, 2013.

ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de Limnologia.** Editora Interciência, Rio de Janeiro – RJ, 2011.

FORD, D.E. **Reservoir transport processes. Reservoir Limnology: Ecological Perspectives.** Wiley, New York, pag. 15 -41. 1990.

HASSANI, S. Z.; ASHOFTEH, P.-S; AZADI, F. **Qualitative and quantitative assessment of reservoir water resources under the eutrophication using CE-QUAL-W2.** International Journal of Environmental Science and Technology (2025) 22:10501–10514. 2025.

MESQUITA, J. B. DE F.; NETO, I. E. L. **Coupling Hydrological and Hydrodynamic Models for Assessing the Impact of Water Pollution on Lake Evaporation.** Sustainability 2022.

MESQUITA, G. C. **Avaliação da Hidrodinâmica do Reservatório Edson Queiroz, no Ceará.** 2025.

MESQUITA, J. B. DE F.; NETO, I. E. L.; RAABE, A.; ARAÚJO, J. C. DE. **The influence of hydroclimatic conditions and water quality on evaporation rates of a tropical lake.** Elsevier, Journal of Hydrology, v. 590, 2020.

MESQUITA, J. B. DE F.; LIMA NETO, I. **Hidrodinâmica e qualidade da água.** TERRA - Vulnerabilidades e Riscos Ecológicos (pp.411-422). Editora: Barlavento 2021.

MOLINAS, E.; FILHO. F. DE A. DE S. **Modelagem numérica bidimensional da hidrodinâmica e qualidade da água em reservatório: pré-processador para o modelo CE-QUAL-W2 aplicado ao reservatório Pereira de Miranda.** Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 32, n. 1, p. 31-47, jun. 2011.

NETO, I. E. L. **Modeling water quality in a tropical reservoir using CE-QUAL-W2: handling data scarcity, urban pollution and hydroclimatic seasonality.** Brazilian Journal of Water Resources - RBRH, Porto Alegre, v. 28, e8, 2023.

ROCHA, S. M. G.; MESQUITA, J. B. DE F.; NETO, I. E. L. **Análise e Modelagem das Relações entre Nutrientes e Fitoplâncton em Reservatórios do Ceará.** RBCIAMB, n.54. dez. 2019.

ROCHA, S. M. G.; MESQUITA, J. B. DE F.; NETO, I. E. L. **Modelagem Hidrodinâmica e Avaliação do Decaimento do Fósforo em um Lago Urbano Hipereutrófico.** Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica. 2020.

SANTI, G. M.; FURTADO, C. M.; MENEZES, R. S.; KEPPELER, E. C. **Variabilidade espacial de parâmetros e indicadores de qualidade da água na sub-bacia hidrográfica do Igarapé São Francisco, Rio Branco, Acre, Brasil.** Ecología Aplicada, v.11, n.1, 2012.

SANTOS, S.B.F DOS. **Dinâmica Térmica e do Oxigênio Dissolvido do Açude Edson Queiroz, Santa Quitéria-CE.** 2025.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1996.

SOUZA, R. S. **Simulação hidrodinâmica da qualidade da água: estudo de caso: ajuste do modelo CE-QUAL-W2 à sub-bacia do Arroio Demétrio, bacia hidrográfica do Rio Gravataí/RS.** 2006. 139 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) -Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

WELLS, S. A.; COLE, T.M **CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydro-Dynamic and Water Quality Model;** US Army Engineering and Research Development Center: Vicksburg, MS, USA, 2017.

WELLS, S. A.; COLE, T.M. **CE-QUAL-W2: a two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 3.1 User Manual.** Instruction Report EL-03-1, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. 1995.

ZHANG, Z.; SUN, B.; JOHNSON, B. E. **Integration of a benthic sediment diagenesis module into the two dimensional hydrodynamic and water quality model–CE-QUAL-W2.** Elsevier B.V. Ecological Modelling 297. 2015.

