

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MODELAGEM DE FÓSFORO USANDO CE-QUAL-W2 NO RESERVATÓRIO JABURU I

Luciana César Torres Melo Lima¹ ; Daniel Antonio Camelo Cid²

Abstract: Eutrophication, caused by excess nutrients such as nitrogen and phosphorus, compromises water quality in reservoirs and is intensified by human activities like fertilizer use and sewage discharge. In semi-arid regions, water body modeling is an important tool for water resource management. This study used the two-dimensional CE-QUAL-W2 model to simulate hydrodynamics, thermal regime, and phosphorus dynamics in the Jaburu I reservoir, located in Ceará, Brazil. The model was calibrated using an optimization algorithm developed in R at FUNCEME, adjusting parameters based on observed data. The adopted methodology considered only water levels, temperature, dissolved oxygen, chlorophyll-a, and phosphate, using average values for some inputs and estimating inflow phosphorus concentrations based on inflow rates and measured reservoir concentrations. Despite data uncertainties, the results were highly satisfactory, validating the model's application to this reservoir.

Resumo: A eutrofização, provocada pelo excesso de nutrientes como nitrogênio e fósforo, compromete a qualidade da água em reservatórios, sendo intensificada por ações humanas como uso de fertilizantes e descarte de esgoto. Em regiões semiáridas, a modelagem de corpos hídricos é uma ferramenta importante para a gestão da água. Este estudo utilizou o modelo bidimensional CE-QUAL-W2 para simular a hidrodinâmica, o regime térmico e a dinâmica do fósforo no reservatório Jaburu I, no Ceará. A calibração do modelo foi feita com o algoritmo desenvolvido em R na FUNCEME, ajustando parâmetros com base em dados observados, possibilitando uma otimização dos mesmos. A metodologia adotada considerou apenas níveis de água, temperatura, oxigênio dissolvido, clorofila a e fosfato, usando valores médios para algumas entradas e de concentrações afluentes para o fósforo estimadas em função das vazões afluentes e das concentrações medidas no reservatório. Apesar das incertezas, os resultados foram muito satisfatórios, validando a aplicação do modelo para o referido açude.

Palavras-Chave – hidrodinâmica, qualidade da água, CE-QUAL-W2

INTRODUÇÃO

A eutrofização é um problema ambiental que afeta muitos corpos hídricos, em especial, reservatórios de água doce ao redor do mundo. Esse fenômeno ocorre quando há um aumento excessivo de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, na água, geralmente devido a atividades humanas como agricultura intensiva, despejo de esgoto não tratado, e uso de fertilizantes. Para mitigar a eutrofização, é essencial adotar práticas agrícolas sustentáveis, melhorar o tratamento de

1) Pesquisadora da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME. Avenida Rui Barbosa, 1246 – Aldeota. Fortaleza-CE. CEP 60115-211. Fone (85) 3125-8244 . email: luciana.cesar@funceme.br

2) Pesquisador da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME. Avenida Rui Barbosa, 1246 – Aldeota. Fortaleza-CE. CEP 60115-211. Fone (85) 3125-8244. email: daniel.cid@funceme.br

esgoto, reduzir o uso de fertilizantes fosfatados e promover políticas de gestão ambiental que visem a conservação e o uso racional dos recursos hídricos.

A modelagem de corpos hídricos tem sido amplamente utilizada com estratégia de gestão dos recursos hídrico, especialmente em regiões semiáridas, onde a escassez de água é uma realidade constante devido às características climáticas intrínsecas dessas áreas. Nesse sentido, diversos modelos com diferentes abordagens podem ser aplicados na busca por soluções, tais como os modelos de ordem-zero, unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais.

O CE-QUAL-W2 é um modelo hidrodinâmico bidimensional e de qualidade de água para rios, lagos e estuários, desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos. Por ser um modelo de duas dimensões, ele assume homogeneidade lateral, e calcula os processos que acontecem na vertical e longitudinal. Esse método é particularmente adequado a sistemas aquáticos com pouca variação lateral na qualidade da água, como é o caso dos reservatórios.

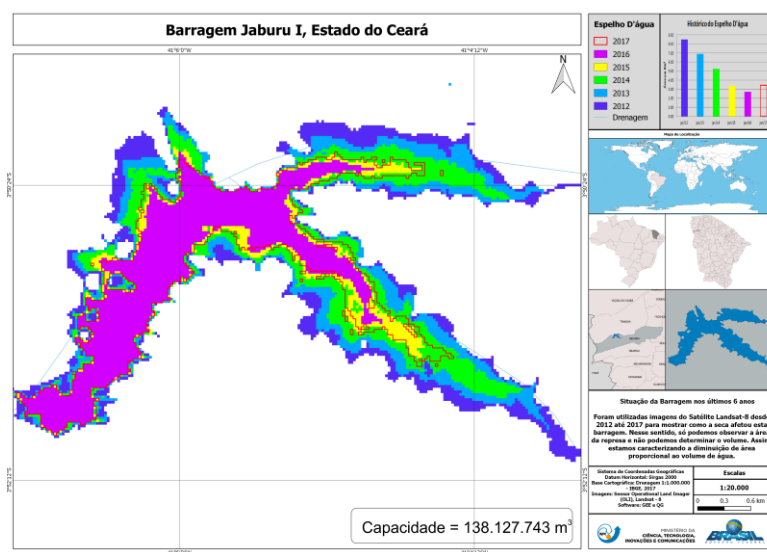
Nesse estudo, o modelo CE-QUAL-W2 foi usado para calibrar a hidrodinâmica, o regime térmico e a dinâmica da qualidade da água, com foco no fósforo, no reservatório Jaburu I, no estado do Ceará.

METODOLOGIA

Corpo Hídrico em Estudo

O açude Jaburu I está localizado no município de Ubajara, fazendo parte da bacia hidrográfica da Serra da Ibiapaba. Situa-se sobre os leitos dos riachos Jaburu e Pitanga, nos municípios de Ubajara e Tianguá e teve suas obras concluídas em 1983. Com a bacia hidrográfica drenando uma área de 314 km² e capacidade de 141.0 hm³, segundo sua ficha técnica, é o maior açude em cima de uma serra ou montanha do mundo. Sua vazão regularizada, conforme dados do Portal Hidrológico do Ceará, é de 1.44 m³/s. A altura máxima da barragem é de 46.0 m, com uma cota de 720.2 m. O sangradouro encontra-se na cota 716.38 m e tem uma largura de 25.0 m. A tomada d'água é do tipo galeria, com 205.0 m de extensão. A Figura 1 apresenta a localização do açude, mostrando a evolução do espelho d'água deste manancial entre os anos de 2012 a 2017.

Figura 1 – Mapa de localização do açude Jaburu I Fonte: INPE. Disponível em: http://geopro.crn.inpe.br/RH_reser_CE_jaburuI.htm



Período de estudo dados requeridos

O período de tempo considerado nesse estudo foram os anos de 2016 a 2021, compreendendo 72 meses, com intervalo diário. O período de estudo foi dividido em 2: i) 2016 a 2020 para a etapa de calibração; e ii) 2021 para a etapa de validação.

Os dados de entrada requeridos pelo modelo são: i) representação geométrica do corpo d'água (arquivo de batimetria); ii) dados meteorológicos (temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, velocidade e direção dos ventos e nebulosidade; iii) dados hidrológicos (temperatura da água dos fluxos afluentes, série de vazões afluentes e efluentes; iv) dados de qualidade da água, função dos parâmetros que deseja simular.

O arquivo de batimetria foi construído a partir dos dados do levantamento batimétrico realizado pela COGERH. A malha geométrica do açude Jaburu I foi concebida com uma discretização de células de tamanho médio de 390 m de comprimento e 1 m de altura. Nesta configuração, o reservatório foi modelado contendo 42 segmentos longitudinais, distribuídos em 2 ramos/braços, e 48 camadas (sendo 46 ativas e 2 virtuais). A Figura 2 apresenta a geometria do açude, mostrando a segmentação da bacia hidráulica do açude.

Figura 2 – Mapa de localização do açude Jaburu I Fonte: INPE. Disponível em: http://geopro.crn.inpe.br/RH_reser_CE_jaburuI.htm



Foram consideradas variáveis meteorológicas das estações automática A314 e convencional 82487, ambas localizadas no município de Guaramiranga, selecionada por ser a única estação meteorológica com série histórica extensa localizada em altitudes elevadas (região serrana) no Ceará, situação geográfica do reservatório em estudo.

As vazões afluentes foram estimadas através do balanço hídrico reverso. Assim, de posse dos dados de retirada, evaporação, vertimento e volume armazenado, calculou-se os dados de vazões de entrada. A evaporação utilizada no balanço reverso foi estimada com base nos dados médios mensais da estação evaporimétrica do município de Jaburu. Os demais dados são monitorados pela COGERH. Final mente, a série de vazões adentrantes em cada braço foram calculadas de acordo com as proporções da área de contribuição de cada um.

Os dados de qualidade da água do reservatório foram fornecidos pela COGERH. O banco de dados conta com uma série de medições, iniciando em 2008, com frequência trimestral, para diversos parâmetros.

O Processo de Calibração e Validação

Para o processo de calibração e validação do modelo adotou-se a seguinte sequência de passos: i) coleta e organização de dados; ii) montagem dos arquivos de entrada; iii) simulação inicial do modelo para identificação e correção de erros; iv) calibração dos níveis da água do reservatório e da temperatura da água (hidrodinâmica); e, v) calibração da qualidade da água (*nesse estudo, a calibração do fósforo*).

Visando automatizar a calibração foi desenvolvido um script em linguagem R para a otimização dos parâmetros. Para tanto, foi utilizada a biblioteca MOPSOCD, que consiste em um pacote em R usado para implementação da Multi-Objective Particle Swarm Optimization-MOPSO (NAVAL, 2013).

MOPSO é uma abordagem de otimização utilizada para resolver problemas que envolvem múltiplos critérios simultaneamente. Em problemas de otimização multiobjetivo, busca-se não apenas uma solução única, mas um conjunto de soluções conhecido como frente de Pareto, onde qualquer melhoria em um dos objetivos geralmente implica a piora em outro (BARROS, et al. 2010).

A rotina de automatização desenvolvida segue os seguintes passos: i) seleção dos parâmetros que participarão da etapa de calibração, definindo seus limites máximos e mínimos; ii) início do algoritmo de otimização, o qual faz a amostragem dos parâmetros a serem calibrados e gera os arquivos ii) execução do CE-QUAL-W2, onde, ao fim da simulação, o programa salva arquivos outputs, que são comparados com os dados observados e realizado o cálculo da função objetivo, além da construção das figuras com os resultados; iv) armazenamento dos valores de parâmetros e das funções objetivos calculadas em arquivo simul_erro.txt; v) geração de um arquivo final (param_simul.txt) contendo os melhores resultados dos parâmetros;

As funções objetivas serão dadas através da raiz do erro quadrático médio comparando-se os dados de cota (Função objetivo 1) e temperatura (Função objetivo 2)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

onde: n : o número total de observações ou amostras; y_i : o valor observado na i -ésima amostra; \hat{y}_i : o valor previsto ou estimado para a i -ésima amostra.

Calibração Hidrodinâmica

O CE-QUAL-W2 simula a hidrodinâmica e o transporte de calor iniciando pelo cálculo da elevação da superfície da água (equação da superfície livre). Em seguida, resolve as equações de conservação de massa e quantidade de movimento (hidrodinâmica). Posteriormente, calcula as trocas de calor, e, finalmente, simula a equação de transporte de partir da qual também é possível calcular a massa específica da água (equação de estado) (Mesquita 2022).

O modelo utiliza o método de transferência de massa (Lei de Dalton) para calcular a perda do calor evaporativo do lago.

$$H_e = f(u)(e_s - e_a) \quad (2)$$
$$f(u) = a + bu^c \quad (3)$$

onde: H_e : é calor evaporativo (W/m^2); $f(u)$: função do vento ($W \cdot m^{-2} \cdot mmHg^{-1}$); u é a velocidade do vento medida a 2 metros acima do solo ou fora do lago (m/s); e_s : pressão de vapor de saturação na superfície do lago ($mmHg$); e_a : pressão de vapor atmosférico ($mmHg$); a :

coeficiente empírico ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mmHg}^{-1}$); b: coeficiente empírico ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mmHg}^{-1}\cdot(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{-1}$); e c: coeficiente empírico (adimensional).

O modelo CE-QUAL-W2 possui um grande número de parâmetros que influenciam a hidrodinâmica e termodinâmica do modelo, relacionadas à formação de gelo, taxas evaporativas, atritos entre interfaces água-fundo, viscosidade turbulenta, atenuação da luz, entre outros. Nesse estudo foram considerados alguns parâmetros apontados no manual, cuja estipulação impacta de forma mais substancial. Esses são: i) os coeficientes empíricos da função do vento (a, b e c); ii) a quantidade de radiação solar de onda curta que chega à superfície do reservatório (SHADE); e iii) o coeficiente de proteção contra o vento (WSC).

Calibração do Fósforo

Para a etapa seguinte, que consiste na da modelagem de qualidade da água (fósforo), utilizamos as equações propostas por Lima Neto (2023). O modelo CE-QUAL-W2 não trabalha com fósforo total nem com clorofila como constituintes principais nos termos de reação fonte/sumidouro em suas equações de balanço de massa. Esses constituintes são calculados como derivados de ortofosfato (PO_4) e algas, respectivamente.

Lima Neto (2023) utiliza simplificações nas equações completas apresentadas por Cole & Wells (2018) para algas, fósforo e oxigênio dissolvido, as quais incluem vários termos adicionais para considerar as interações entre diferentes sólidos inorgânicos, matéria orgânica e frações de nitrogênio, espécies de fitoplâncton, zooplâncton e macrófitas, metano, sulfeto de hidrogênio, ferro e manganês (Equações 4 a 6)

$$S_a = K_{ag}\phi_a - K_{ar}\phi_a - K_{ae}\phi_a - K_{am}\phi_a - \omega_a \frac{\partial \phi_a}{\partial z} \quad (4)$$

$$S_p = (K_{ar} - K_{ag})\delta_{pa}\phi_a + \text{PO4R} \cdot \text{SOD} \frac{A_{sed}}{V} \quad (5)$$

$$S_{DO} = (K_{ag} - K_{ar})\phi_a + \frac{A_{sur}}{V_{sur}} K_L (\phi_{SDO} - \phi_{DO}) - \text{SOD} \frac{A_{sed}}{V} \quad (6)$$

em que S_a , S_p e SDO são os termos de fonte/sumidouro de clorofila-a (Chla), fosfato (PO_4) e oxigênio dissolvido (DO) [$\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{dia})$], respectivamente. K_{ag} (AG), K_{ar} (AR), K_{ae} (AE) e K_{am} (AM) são as taxas de crescimento, respiração, excreção e mortalidade das algas (1/dia), respectivamente. ϕ_a é a concentração de Chla (mg/L), ω_a (AS) é a taxa de sedimentação das algas (m/dia), δ_{pa} (AHSP) é o coeficiente estequiométrico das algas para o fósforo, PO4R é a taxa de liberação de PO_4 do sedimento sob condições anaeróbicas, especificada como uma fração da demanda de oxigênio do sedimento (SOD) [$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{dia})$]. A_{sed} é a área da superfície do sedimento (m^2), V é o volume da célula (m^3), K_L é a taxa de troca interfacial para o oxigênio (m/s), ϕ_{SDO} e ϕ_{DO} são a concentração de saturação e a concentração atual de DO (mg/L), respectivamente. A_{sur} e V_{sur} são a área de superfície (m^2) e o volume (m^3), respectivamente.

A calibração de K_{ag} , K_{ar} , K_{ae} , K_{am} , ω_a e SOD é realizada por meio de análise estatística, comparando os resultados do modelo com as medições de Chla , PO_4 e OD obtidas próximo a saída do reservatório, por meio da minimização do erro quadrático médio (RMSE) entre esses três parâmetros. Como tanto K_{ag} quanto K_{ar} estão incluídos nas três equações dos termos de fonte/sumidouro, estes foram considerados os principais parâmetros de ajuste responsáveis pela dinâmica da qualidade da água. Por fim, valores padrão e fórmulas empíricas de Cole & Wells (2018) foram utilizados para os demais parâmetros.

Para estimativa de PO4 e algas (constituintes não monitorados) foram admitidas as proporções de que PO4 corresponde a 40% do fósforo total e de que as algas correspondem a 1% da clorofila total, seguindo a metodologia desenvolvida pelo autor.

Estimativa dos aportes de Fósforo

Na estimativa das concentrações de fósforo que adentram ao reservatório adotamos a metodologia desenvolvida por ROCHA E LIMA NETO (2021). A metodologia baseia-se no balanço de massa do reservatório para estimativa da carga recebida a partir da concentração medida dentro no corpo hídrico. De posse dessa carga, ajusta-se uma equação relacionando a vazão afluente a carga estimada no período e, consequentemente, à concentração afluente.

$$TP_r(t) = TP_{r,0} \cdot \exp\left(-\left(\frac{Q_s}{V} + k\right) \cdot t\right) + [W / (Q_s + kV)] \cdot [1 - \exp\left(-\left(\frac{Q_s}{V} + k\right) t\right)] \quad (7)$$

onde: TP_r: concentração de fósforo total na saída do reservatório em um determinado tempo (kg/m³); TP_{r,0}: concentração inicial de fósforo total na saída do reservatório (kg/m³); t: tempo decorrido (ano); V: Volume médio do reservatório durante um determinado período (m³); W: carga de fósforo total (kg/ano); Q_s: volume liberado (m³/ano); k: coeficiente de decaimento de fósforo (1/ano).

O coeficiente de decaimento do fósforo (k) foi calculado aplicando a **equação 8**, em função do tempo de residência RT. Essa correlação empírica foi ajustada e validada por TON'E E LIMA NETO (2020) para diversos reservatórios do semiárido brasileiro, tomando por base as relações empíricas desenvolvidas para lagos temperados e tropicais por VOLLENWEIDER (1976).

$$k = 4 / RT^{1/2} \quad (8)$$

A concentração de TP na entrada dos reservatórios (TP_{in}) é calculada através da razão entre as cargas modeladas (W) e as afluências (Q) para cada período. Sob a forma matemática, a concentração de TP_{in} pode ser expressa conforme apresentado na equação 9, contabilizando a contribuição da poluição PS (primeiro termo) e da poluição NPS (segundo termo), conforme proposto por BOWES et al. (2008).

$$TP_{in} = A \cdot Q^{B-1} + C \cdot Q^{D-1} \quad (9)$$

Os quatro parâmetros de ajuste A, B, C e D na Eq. (3) foram calibrados utilizando o procedimento de regressão não linear de mínimos quadrados. Os coeficientes A e C possuem unidade de carga enquanto B e D são adimensionais. São aplicadas restrições para as soluções da otimização dos parâmetros serem confiáveis: i) 0 ≤ B ≤ 1, que implica que a concentração de fósforo total das cargas advindas das fontes pontuais diminuirá com o aumento da vazão do rio; ii) 1 ≤ D ≤ 4, o que implica que a concentração de fósforo total das cargas advindas das fontes não pontuais aumenta com o aumento da vazão afluente; iii) os parâmetros A e B foram ambos restritos como maiores que zero.

A Eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) foi calculada para cada modelo ajustado como indicador de desempenho e como parâmetro a ser maximizado na otimização dos valores dos parâmetros A, B, C e D.

RESULTADOS

Seguindo a estratégia traçada, foi inicialmente realizada a calibração hidrodinâmica. De forma automatizada pelo código desenvolvido em R foram realizadas 600 simulações variando-se os 05 parâmetros do modelo selecionados para serem calibrados, utilizando-se para tanto os anos de 2016 a 2020, sendo selecionadas pelo próprio desenvolvido 75 soluções “ótimos” (cada uma contendo 1 valor para cada variável a ser calibrada). Os parâmetros “ótimos” obtidos na etapa de calibração foram, então utilizados para realizar as simulações de validação do modelo para o ano 2021, a qual retornou apenas 06 soluções com melhores resultados. A **Tabela 1** apresenta os erros de cota e de temperatura desses 06 jogos de parâmetros finais, tanto para calibração quanto para a validação.

Tabela 1 – Resultados das etapas de calibração e validação hidrodinâmica do açude Jaburu I

Solução	Calibração		Validação	
	RMSE Cota (m)	RMSE Temp (°C)	RMSE Cota (m)	RMSE Temp (°C)
1	3.08	0.69	0.73	0.76
2	1.33	4.68	0.17	4.66
3	3.03	0.98	0.69	0.53
4	2.86	1.96	0.61	1.69
5	2.79	2.20	0.59	1.69
6	1.49	4.60	0.20	4.54

Analisando a tabela, com base nos resultados obtidos nas etapas de calibração e validação, julgou-se que a solução 3 apresentou um melhor ajuste. Assim sendo, foi a solução selecionada e os valores dos parâmetros considerados otimizados estão apresentados na **Tabela 2**. As **Figuras 3 e 4** apresentam graficamente o melhor ajuste hidrodinâmico obtido para o **Jaburu I**.

Tabela 2 – Parâmetros selecionados para representar a hidrodinâmica do açude Jaburu I

A	B	C	WSC	SHADE
7.74	2.761	0.74	0.84	0.87

Após a definição dos parâmetros ótimos para representar a hidrodinâmica, iniciou-se o processo de calibração e validação dos dados de qualidade da água. No entanto, para atingir esse objetivo é necessária a estimativa da carga de fósforo afluyente ao reservatório, já que não é feita uma medição sistemática de parâmetros de qualidade de água em rios no estado do Ceará como é feito em açudes. Seguindo a metodologia acima descrita, desenvolvida por Rocha e Lima Neto (2023), o foi ajustado o modelo vazão afluyente (Qin) e concentração de fósforo total afluyente (TP) na entrada do reservatório Jaburu I, cujos resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros e indicadores de desempenho do modelo Qin-TP para o açude Jaburu I

Parâmetros do Modelo				NSE	R ²
A	B	C	D	0,883	0,883
0.668	0.507	18.024	2.046		

Figura 3 – Melhor ajuste da hidrodinâmica do reservatório Jaburu I (Calibração)

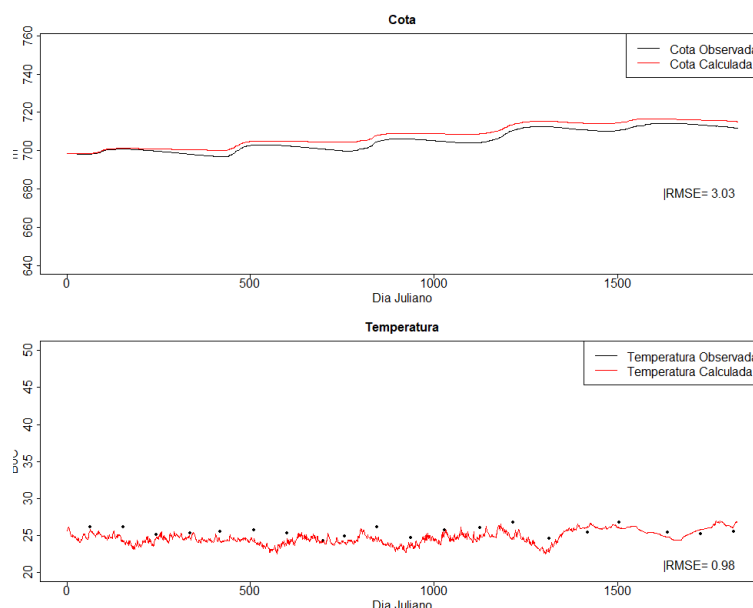
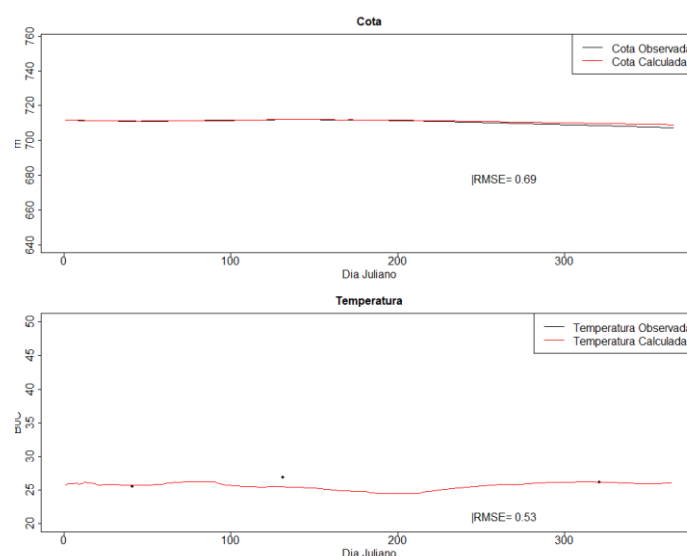


Figura 4 – Melhor ajuste da hidrodinâmica do reservatório Jaburu I (Validação)



Com as concentrações de fósforo adentrantes ao açude foi realizada a etapa de calibração/validação do fósforo. De forma automatizada pelo código desenvolvido em R foram realizadas 1000 simulações variando-se os 08 parâmetros do modelo selecionados para serem calibrados, utilizando-se para tanto os anos de 2016 a 2020, sendo selecionadas pelo próprio desenvolvido 47 soluções “ótimos” (cada uma contendo 1 valor para cada variável a ser calibrada). Os parâmetros “ótimos” obtidos na etapa de calibração foram, então utilizados para realizar as simulações de validação do modelo para o ano 2021, a qual retornou apenas 13 soluções com melhores resultados. De forma a ampliar a avaliação dos resultados, também foi realizada uma simulação dos 47 jogos de parâmetros ótimos calibrados para o período completo de estudo, abrangendo anos de 2016 a 2021.

A **Tabela 4** apresenta a comparação entre a calibração e a validação em 2021 e a simulação em todo o período de estudo, considerando apenas os resultados cujo erro é menor que 0.01mg/L.

Tabela 4 – Resultados das etapas de calibração e validação do fósforo para o açude Jaburu I

MELHORES RESULTADOS									
Solução	CALIBRAÇÃO			VALIDAÇÃO			SIMULAÇÃO		
	PO4	Alga	OD	PO4	Alga	OD	PO4	Alga	OD
3	0.0043	0.34	0.37	0.0059	0.59	0.64	0.0059	0.59	0.64
6	0.0065	0.38	0.37	0.0029	0.63	0.28	0.0062	0.60	0.65
7	0.0066	0.34	0.36	0.0029	0.63	0.27	0.0064	0.59	0.65
8	0.0028	0.40	0.36	0.0084	0.46	0.25	0.0090	0.79	0.56
17	0.0023	0.55	0.39	0.0047	0.85	0.29	0.0058	0.73	0.66
22	0.0026	0.59	0.38	0.0049	0.85	0.29	0.0060	0.76	0.63
45	0.0015	0.63	0.37	0.0058	0.93	0.28	0.0063	0.78	0.63
47	0.0025	0.54	0.38	0.0047	0.84	0.28	0.0056	0.73	0.65

Analisando a tabela, com base nos resultados obtidos nas etapas de calibração e validação, julgou-se que a solução do conjunto de parâmetros 17 apresentou o melhor ajuste geral, sendo o 2º melhor ajuste na calibração, o 3º melhor na validação e o 2º melhor na simulação. Assim sendo, foi a solução selecionada e os valores dos parâmetros considerados otimizados estão apresentados na **Tabela 5**. As **Figuras 4.15 e 4.16** apresentam graficamente o melhor ajuste obtido para o Jaburu I.

Tabela 5 – Parâmetros calibrados para representar a dinâmica do fósforo no açude Jaburu I

Kag	Kar	Kae	Kam	oa	AHSP	ASAT	SOD
2.87733	0.09762	0.62163	0.23088	0.08757	0.02491	75.51388	0.58882

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste estudo foi a calibração de parâmetros para simular a hidrodinâmica e a qualidade da água (fósforo) do reservatório Jaburu I, localizado no município de Ubajara, no estado do Ceará, utilizando o modelo CE-QUAL-W2. Para atingir esse objetivo, utilizou-se uma metodologia de calibração e validação que empregou um algoritmo de otimização (MOSCEM), desenvolvida na FUNCEME, para ajustar os parâmetros que influenciam essas variáveis.

Para lidar com a escassez de dados, vários ajustes e simplificações são realizados, de modo que apenas os parâmetros, cota, temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD), clorofila a (Chla) e fósforo (PO4) são mantidos no processo de modelagem.

Para algumas variáveis de entrada, como clorofila e oxigênio dissolvido (OD) afluentes ao reservatório, foram utilizados valores médios observados no açude durante o período simulado. Além disso, o fósforo foi calculado por meio de uma equação em função da vazão, o que demonstra incertezas relacionadas as entradas.

Em relação à modelagem do fósforo, o algoritmo de calibração conseguiu alcançar resultados muito bons, com valores bem próximos aos dados observados, tanto na calibração quanto na validação, apesar da incerteza dos dados de entrada.

Figura 5 – Melhor ajuste do fósforo no açude Jaburu I (Calibração)

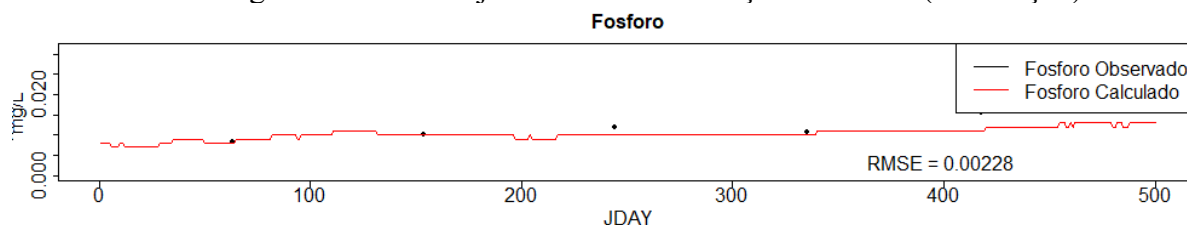
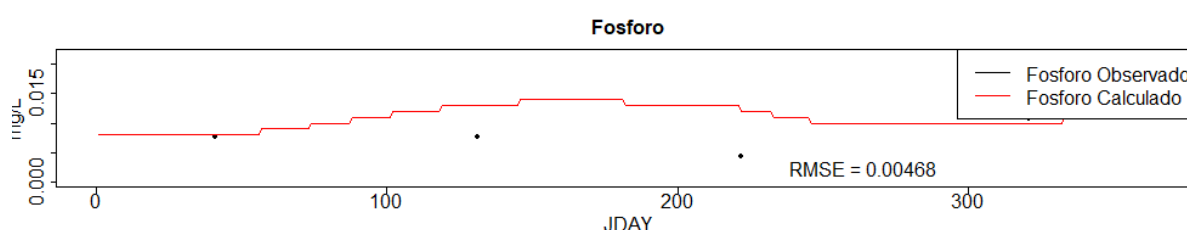


Figura 6 – Melhor ajuste do fósforo no açude Jaburu I (Validação)



AGRADECIMENTOS

À FUNCEME, por meio do Projeto MMCQual - Melhoria da Gestão Hídrica em Ambientes Semiáridos: Monitoramento, Modelagem e Cenarização da Qualidade da Água (Chamada Universal CNPq - Processo No: 409204/2023-4).

REFERÊNCIAS

- BOWES, M.J., SMITH, J.T., JARVIE, H.P., NEAL, C., (2008). *Modelling of phosphorus inputs to rivers from diffuse and point sources*. Sci. Total Environ. 395, pp.125–138.
- COLE, T.M.; WELLS, S. A. (2018). *CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 4.1..*
- LIMA NETO, I.E. (2003). “Modeling water quality in a tropical reservoir using CE-QUAL-W2: handling data scarcity, urban pollution and hydroclimatic seasonality”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 28, c8, pp..
- MESQUITA, J.B. de F.; LIMA NETO, I.E. (2022). *Coupling hydrological and hydrodynamic models for assessing the impact of water pollution on lake evaporation*. Sustainability, v. 14, n. 20, p. 13465,.
- NAVAL P (2013). *MOPSOCD: Multi-objective Particle Swarm Optimization with Crowding Distance*. R package version 0.5.1, <<https://CRAN.R-project.org/package=mopsocd>>.
- ROCHA, M. de J.D.; LIMA NETO, I.E. (2021). *Modeling flow-related phosphorus inputs to tropical semiarid reservoirs*. Journal of Environmental Management, v. 295, pp. 113-123.
- TON'E, A.; LIMA NETO, I.E.(2020). *Modelagem simplificada do fosforo total em lagos e reservatórios brasileiros*. Rev. DAE 221, pp.142–156.