Capacidade de suporte de reservatório de acumulação hidrelétrico no Triângulo Mineiro

Support capacity of hydroelectric accumulation reservoir in Triângulo Mineiro

Data de entrada: 26/03/2025
Data de aprovação: 17/12/2025

Gustavo Marco Silva[1*] | **Marcio Ricardo Salla**[1]

DOI: https://doi.org/10.36659/dae.2026.127

Silva GM https://orcid.org/0009-0003-8729-4127
Salla MR https://orcid.org/0000-0003-2567-6173

Resumo

Reservatórios de acumulação, embora essenciais para diversos usos da água, alteram a dinâmica do ecossistema aquático e favorecem o processo de eutrofização. Por meio da ferramenta computacional *Water Quality Analysis Simulation Program*, em um reservatório de acumulação hidrelétrico localizado a jusante da área urbana de Uberlândia, Triângulo Mineiro, o estudo avaliou a capacidade de suporte, isto é, a máxima carga poluente que o ambiente lêntico suporta. A análise de sensibilidade e calibração de termos cinéticos mais sensíveis possibilitou o ajuste entre as simulações matemáticas e os parâmetros oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, nitrato, amônia e fósforo total monitorados em três estações. Objetivando o atendimento simultâneo, em condições de vazão residual 50% da $Q_{7,10}$, dos padrões de qualidade ambiental para curso de água classe 2 e a manutenção do estado mesotrófico, as cargas máximas admissíveis de DBO, fósforo total, nitrato e amônia são de, respectivamente, 1,61 t/dia, 0,006 t/dia, 2,12 t/dia e 0,95 t/dia. Este estudo pode subsidiar pesquisas e trabalhos técnicos de capacidade de suporte ambiental em hidrografias similares.

Palavras-chave: Modelagem de qualidade da água. Reservatório eutrofizado. Clima tropical.

Abstract

Accumulation reservoirs, although essential for various water uses, alter the dynamics of the aquatic ecosystem and favor the eutrophication process. Using the Water Quality Analysis Simulation Program computational tool in a hydroelectric accumulation reservoir located downstream of the urban area of Uberlândia, Triângulo Mineiro, the study evaluated the support capacity, that is, the maximum pollutant load that the lentic environment supports. Sensitivity analysis and calibration of more sensitive kinetic terms allowed the adjustment between the mathematical simulations and the following parameters: dissolved oxygen, biochemical oxygen demand, nitrate, ammonia and total phosphorus monitored at three stations. Aiming to simultaneously meet, under residual flow conditions of 50% of Q7.10, the environmental quality standards for a class 2 watercourse and maintain the mesotrophic state, the maximum admissible loads of BOD, total phosphorus, nitrate and ammonia are, respectively, 1,61 t/day, 0,006 t/day, 2,12 t/day and 0,95 t/day. This study can support research and technical work on environmental support capacity in similar hydrographies.

Keywords: *Water quality modeling. Eutrophic reservoir. Tropical climate.*

[1] Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica – Uberlândia – Minas Gerais – Brasil.
[*] **Autor correspondente:** gusmarco@outlook.com

CC BY NC

1 INTRODUÇÃO

Os recursos de água doce são ecossistemas particularmente sensíveis à poluição, sobretudo urbana, pois normalmente, quando atravessam as cidades, recebem contaminação difusa e pontual (Valdés *et al.*, 2021). A construção de reservatórios de acumulação, que são implantados para diversas finalidades, incluindo o abastecimento de água, geração de energia e irrigação, modificam a morfologia e dinâmica hídrica do corpo de água e a taxa de renovação do ecossistema, o que favorece a alteração do comportamento da qualidade da água (Salla; Alamy Filho; Pereira, 2023). Uma das consequências da piora da qualidade da água pode ser a eutrofização do corpo hídrico, processo que se constitui no enriquecimento das águas por nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo.

Nesse contexto, destaca-se a avaliação da capacidade de suporte, conceito originado na ecologia, que se refere ao número máximo de organismos (população) que uma determinada área ou hábitat pode sustentar ao longo do tempo (Ribeiro, 2010). Essa avaliação é fundamental, pois envolve a consideração das possibilidades, potencialidades e limitações do meio em relação às demandas e necessidades da sociedade. Nesse sentido, de acordo com Wang *et al.* (2022), o conceito de capacidade de suporte de recursos hídricos representa a capacidade dos corpos hídricos em sustentar as atividades humanas mantendo, ao mesmo tempo, um ambiente aquático saudável.

Portanto, com base no conceito de capacidade de suporte definido por Wang *et al.* (2022), a partir dos dados de monitoramento de qualidade da água é possível utilizar uma modelagem matemática ambiental para estimar a máxima carga poluente que o ambiente lêntico suporta, tanto em respeito aos limites dos parâmetros preconizados por legislações, quanto para manutenção de determinado estado de trofia. Assim sendo, o objetivo geral deste estudo consiste em avaliar a carga máxima de nutrientes (fósforo, nitrogênio e frações) e de matéria orgânica (oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio e clorofila *a*) que o reservatório artificial a fio de água da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Malagone suporta, a fim de atender os limites ambientais definidos por Minas Gerais (2022) e manutenção do Índice do Estado de Trofia (IET) mesotrófico e, na melhor situação, estado oligotrófico.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Uberabinha está localizada no Triangulo Mineiro, região oeste do estado de Minas Gerais, como ilustra a Figura 1. Sua área de drenagem possui cerca de 2.200 km², percorrendo aproximadamente 150 km de suas nascentes até desaguar no rio Araguari. A área de influência do rio Uberabinha se encontra na zona climática Tropical Brasil Central. Conforme Normais Climatológicas do Brasil de 1991 a 2020 (Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, 2024b), a temperatura na região é quente (média maior que 18ºC em todos os meses do ano), com precipitação acumulada anual entre 1.400 e 1.600 mm, em regime semiúmido com cinco meses de estiagem (maio a setembro). No final de seu médio curso, o rio Uberabinha atravessa Uberlândia, cidade com 713.224 habitantes (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2022). A ETE Uberabinha é responsável pelo tratamento de 95% do esgoto coletado (Tratamento de Esgoto, 2024), a qual lança pontualmente seu efluente no rio Uberabinha (ver Figura 1).

Já em seu baixo curso, o rio Uberabinha é represado por duas PCHs tipo fio de água (PCH Martins e PCH Malagone, na sequência). O reservatório da PCH Malagone possui área de contribuição de 1.715 km², comprimento de 7,20 km, área inundada de aproximadamente 1,60 km², e estima-se que o volume máximo normal (na cota da soleira do vertedor), volume mínimo de operação e volume útil sejam de 12,64, 10,93 e 1,71 hm³, respectivamente.

Os dados do Programa de Qualidade das Águas (Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais – FEAM, 2024), executado pelo empreendimento PCH Malagone, demonstram que a qualidade da água varia de média a ruim nos pontos de monitoramento P01, P02 e P03 do reservatório da hidrelétrica, demonstrados na Figura 1. O aumento, nos últimos anos, da concentração de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, vem acarretando o desenvolvimento de algas e macrófitas aquáticas no corpo hídrico.

O trecho do rio Uberabinha modelado possui 14 km, desde a estação de descarga líquida PCH Martins Jusante até o barramento da PCH Malagone, conforme identificado na Figura 1, sendo os 6,8 km iniciais em ambiente lótico e o percurso final de 7,2 km correspondente ao remanso da PCH Malagone.

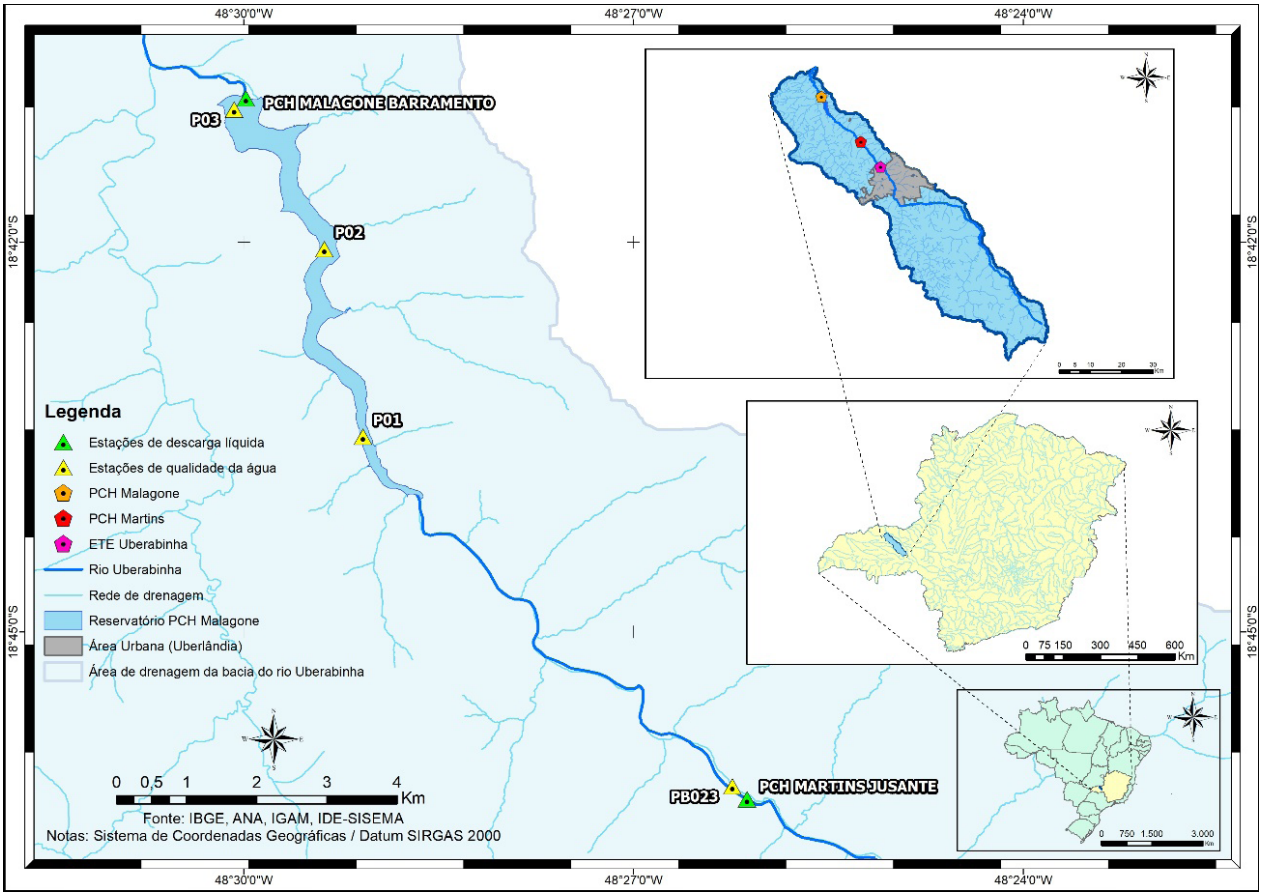


Figura 1 – Bacia hidrográfica do rio Uberabinha e localizações das estações fluviométricas.

2.2 Ferramenta WASP

O módulo EUTRO da ferramenta computacional *Water Quality Analysis Simulation Program* (WASP) (*United States Environmental Protection Agency* – EPA, 2019) foi utilizado na simulação do balanço de massa dos parâmetros oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio orgânico (NO), amônia (NH_3), nitrato (NO_3), fósforo orgânico (P_{org}), fósforo inorgânico (P_{inorg}) e clorofila *a*. As interações cinéticas desses parâmetros de qualidade da água podem ser consultadas em EPA (2019).

A ferramenta WASP pode ser aplicada em transportes de massa líquida advectivo e dispersivo entre compartimentos físicos discretos, também identificados como segmentos de curso de água. A modelagem confeccionada neste estudo considerou apenas tipo de transporte advectivo water column, que simula o transporte na porção sobrenadante, com advecção e diluição dos poluentes. O segmento bentônico foi considerado somente como receptor de material orgânico e nutrientes sedimentados. Com relação aos padrões de fluxo que relacionam a vazão com as grandezas hidráulicas, considerou-se o padrão *Kinematic Wave* ao segmento lótico, o padrão *Ponded Weir* para as camadas de epilímnio em ambiente lêntico e *Flow routing* para as camadas de hipolímnio em ambiente lêntico.

2.3 Segmentação do sistema hídrico

Para o trecho lótico foi adotado apenas um segmento longitudinal (segmento 1 na Figura 2), devido à homogeneidade do percurso de 6,8 km quanto à largura, vazão volumétrica, declividade e rugosidade de fundo. Os 11 segmentos do trecho lêntico (segmentos 2 ao 12 na Figura 2) foram determinados com base nas seções transversais definidas no relatório técnico de outorga do empreendimento. A segmentação vertical foi desconsiderada para o segmento 1, pois em rios pouco profundos comumente considera-se apenas o escoamento unidimensional (direção longitudinal). Já em reservatórios, que possuem maior profundidade, a redução gradual da penetração da radiação solar na coluna d'água pode resultar a estratificação térmica, dividindo-a em camadas de epilímnio (superior) e hipolímnio (inferior). À vista disso, o transporte dispersivo na direção vertical, entre as camadas de epilímnio e hipolímnio no reservatório, não foi incluído nesse estudo devido à diferença de densidade da água entre essas camadas, que dificulta a recirculação vertical de compostos químicos na massa líquida. Sendo assim, se considerou apenas o transporte dispersivo *water column* na direção longitudinal nos trechos de rio e reservatório.

Os relatórios do Programa de Qualidade das Águas da PCH Malagone (FEAM, 2024), apresentam dados de transparência da água nos pontos de monitoramento P01, P02 e P03 do reservatório, medidos a partir do disco de Secchi. Esses dados, do período bimestral entre outubro de 2022 e dezembro de 2023, permitiram mensurar as espessuras das camadas de epilímnio e hipolímnio dos seguimentos sob influência de cada estação de monitoramento, situadas nos segmentos 4, 7 e 12, conforme demonstra a Figura 2.

A profundidade eufótica, considerada como limite inferior da camada de epilímnio, foi estimada como 2,7 h_{Secchi} e o coeficiente de atenuação da luminosidade k (1/m) igual a 1,8/h_{Secchi} (Chapra, 1997), em que h_{Secchi} é a profundidade do disco de Secchi em metros. As variações temporais do coeficiente de atenuação de luminosidade foram consideradas no processo de calibração do modelo.

Conforme Figura 2, a profundidade eufótica nos segmentos 2 e 3 compreende toda coluna de água, isto é, não há estratificação térmica, sendo considerada apenas a camada de epilímnio nesse curso do reservatório, enquanto, entre os segmentos 4 e 12, foram consideradas duas camadas verticais adjacentes, sendo a superior de epilímnio e a inferior de hipolímnio. Uma única camada bentônica foi utilizada simplesmente como receptora das frações particuladas de DBO, NO, P_{org} e fitoplâncton que sedimentam, sendo que nenhuma simulação de interação entre as variáveis de estado foi considerada para a camada bentônica.

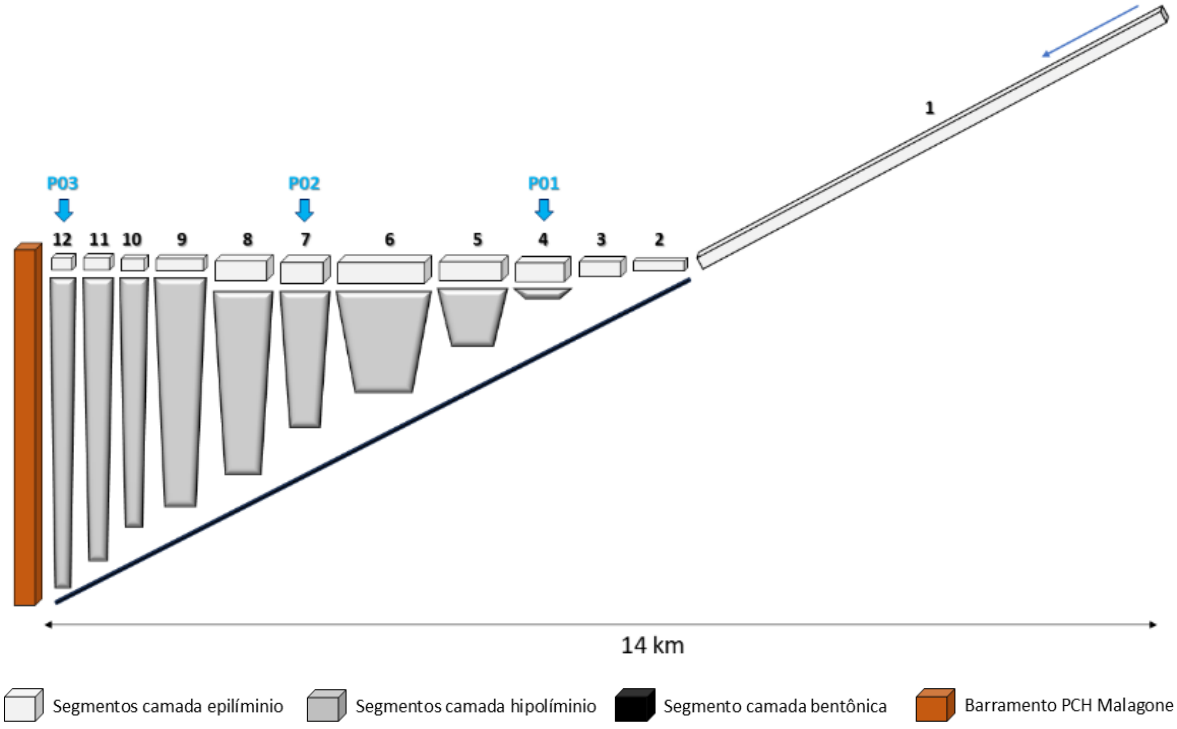


Figura 2 – Esquema geral das segmentações longitudinal e vertical com descrição de cada segmento e indicação das localizações das estações fluviométricas P01, P02 e P03.

2.4 Características hidrogeométricas

O comprimento e largura média dos segmentos e declividade do segmento 1 de 0,003 m/m foram mensurados com auxílio de ferramenta SIG. Perante vazão média de 45,2606 m³/s (para escoamento permanente) e coeficiente de rugosidade de 0,05 para leito com matacões (Chow, 1959), pela equação de Manning e considerando uma seção retangular, obteve-se a profundidade líquida média de 1,25 m do segmento 1, como descreve a Tabela 1.

Sobre o ambiente lêntico, a partir das seções transversais do reservatório da PCH Malagone, levantadas em curvas de nível equidistantes em 5 m, e tomando a cota 600 m como referência, obteve-se cotas de fundo do reservatório e, providencialmente, a profundidade líquida média (h méd.) dos segmentos. Disso em diante, as seções transversais foram demarcadas em ferramenta SIG, atrelando coordenadas UTM às cotas. As coordenadas tridimensionais das seções transversais foram lançadas na ferramenta computacional Surfer 10 que, por meio do método de interpolação krigagem (considerando o tamanho da grade de interpolação igual a 5 m), produziu uma superfície 3D do reservatório e determinou os volumes de cada segmento, como expõe a Tabela 1.

Ainda como dados de entrada, a ferramenta WASP requer, para o ambiente lótico (segmento 1) e para os segmentos de epilímnio do ambiente lêntico, valores do expoente de velocidade (Exp v) e do expoente de profundidade (Exp h). Os valores dos expoentes são definidos conforme formato do canal modelado, aqui considerado como retangular tanto para o segmento 1 quanto para os segmentos de epilímnio do ambiente lêntico.

Tabela 1 – Características hidrogeométricas das segmentações longitudinal e vertical.

Ambiente	Segmento		C (m)	L (m)	h méd. (m)	Vol. méd. (hm³)	Exp. v	Exp. h
Lótico	1		6800,00	30,00	1,25	0,2550	0,4	0,6
Lêntico	2	Epilímnio	692,00	68,95	1,00	0,0072	0,4	0,6
	3	Epilímnio	604,00	114,00	1,50	0,0766	0,4	0,6
	4	Epilímnio	719,00	141,00	1,82	0,0975	0,4	0,6
		Hipolímnio			0,68	0,0609	-	-
	5	Epilímnio	877,00	179,50	1,82	0,1678	0,4	0,6
		Hipolímnio			4,18	0,2523	-	-
	6	Epilímnio	1206,00	195,50	2,06	0,3698	0,4	0,6
		Hipolímnio			7,44	1,3596	-	-
	7	Epilímnio	631,00	229,00	2,06	0,1528	0,4	0,6
		Hipolímnio			9,94	0,6999	-	-
	8	Epilímnio	746,00	264,00	2,06	0,2733	0,4	0,6
		Hipolímnio			13,44	1,3683	-	-
	9	Epilímnio	658,00	272,00	1,22	0,1603	0,4	0,6
		Hipolímnio			16,78	1,2535	-	-
	10	Epilímnio	348,00	293,00	1,22	0,1461	0,4	0,6
		Hipolímnio			18,28	1,1709	-	-
	11	Epilímnio	383,00	369,50	1,22	0,1925	0,4	0,6
		Hipolímnio			20,28	2,0966	-	-
	12	Epilímnio	314,00	479,50	1,22	0,1613	0,4	0,6
		Hipolímnio			22,78	1,8209	-	-

2.5 Dados de entrada ambientais

A contribuição quantitativa de entrada é a vazão do rio Uberabinha, obtida na Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (Sistema Hidro-Telemetria, 2024) pela estação PCH Martins Jusante (ver Figura 1). A série histórica disponível para ser considerada no processo de calibração do modelo foi de 22 de outubro de 2022 a 31 de dezembro de 2023. A maior vazão observada no período foi de 124,68 m³/s, em 3 de janeiro de 2023, e a menor de 5,03 m³/s, em 19 e 20 de dezembro de 2023, conferindo média de 45,26 m³/s na série histórica.

A ANA (Sistema Hidro-Telemetria, 2024) também disponibiliza os níveis horários da lâmina líquida registrados pela estação PCH Malagone Barramento (ver Figura 1), não vinculando a estes os dados de vazão. A ferramenta computacional Surfer 10 foi utilizada para quantificar o volume do reservatório e, a partir disso, os dados limnimétricos diários de 22 de outubro de 2022 a 31 de dezembro de 2023 foram transformados em valores de volume por meio da equação cota x volume. Estimada a variação diária de volume do reservatório, pelo balanço hídrico, isto é, as contribuições de entrada menos as de saída, foi possível verificar os volumes diários defluentes do reservatório (quantitativo de saída do sistema hídrico), posteriormente convertidos para vazão. Por se tratar de um reservatório a fio de água, o comportamento da vazão defluente foi semelhante ao da vazão afluente.

Coincidente à estação PCH Martins Jusante, o Instituto Mineiro e Gestão das Águas (IGAM) realiza a amostragem de qualidade da água no ponto de monitoramento PB023 (ver Figura 1). A periodicidade do programa de monitoramento é trimestral; com isso, de forma a compatibilizar com os dados de vazão, foram consideradas seis monitoramentos entre setembro de 2022 e dezembro de 2023 para dados qualitativos de entrada, obtidos em Portal Infohidro (2024).

A ferramenta WASP requer dados diários de entrada para suprimento do modelo. Diante disso, considerou-se, como dados de entrada qualitativos no processo de calibração, as concentrações médias das variáveis de estado clorofila *a* (1,36 µg/L), DBO (7,03 mg/L), P_{inorg} (0,054 mg/L), P_{org} (0,192 mg/L), NO_3 (0,61 mg/L), NH_3 (5,59 mg/L), NO (0,66 mg/L) e OD (6,33 mg/L). Ressalta-se que a estação PB023 disponibiliza resultados apenas de P_{total}, no entanto, a ferramenta WASP permite a modelagem de P_{org} e P_{inorg}. As proporções de P_{org} e P_{inog} em P_{total} foram consideradas similares às do rio Paraopeba (Portal Infohidro, 2024).

Visto que as taxas das reações bioquímicas alteram com a mudança da temperatura, para os dados de temperatura da água assumiu-se que o valor pontual medido nos meses de março (24,8°C em 2023), junho (21,5°C em 2023), setembro (25,8°C em 2022 e 24,8°C em 2023) e dezembro (25,9°C em 2022 e 26,2°C em 2023) representa uma concentração fixa, respectivamente, em todos os dias de fevereiro a abril, maio a julho, agosto a outubro e novembro a janeiro, considerando a similaridade meteorológica entre os meses que constituem os trimestres.

Os dados meteorológicos incluem a radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento, precipitação e umidade relativa do ar, obtidos pela estação automática A507 (INMET, 2024a).

2.6 Análise de sensibilidade dos termos cinéticos

Para os termos cinéticos físicos, químicos e biológicos inseridos no equacionamento de transporte e transformação de cada variável de estado, foram adotados valores iniciais indicados por Chapra (1997) e von Sperling (2007), além de padrões informados na própria ferramenta WASP (EPA, 2019) e valores calibrados por Salla *et al.* (2013a) no baixo curso do rio Uberabinha (ver Tabela 3).

A análise da sensibilidade foi realizada a fim de entender quais termos cinéticos possuem magnitude nas concentrações das variáveis de estado. Para isso, os termos cinéticos foram variados isoladamente em ± 50% sobre o valor inicialmente adotado e incluem as constantes listadas na Tabela 2. Os resultados da análise da sensibilidade foram averiguados por regressão linear múltipla em nível de confiança de 95%, com o objetivo de verificar a relação da variável dependente (variáveis de estado) em função das variáveis independentes (termos cinéticos). Para aquelas relações em que o p-valor foi menor que 0,05, a hipótese de influência significativa foi aceita.

2.7 Calibração do modelo

O processo de calibração ajustou os dados monitorados de qualidade da água com os simulados na ferramenta WASP, a partir da otimização dos termos cinéticos mais sensíveis, ou seja, aqueles que mais impactam nas concentrações das variáveis de estado. O processo de calibração foi realizado, primeiramente, pela comparação gráfica do ajuste dos dados monitorados em superfície e fundo com os resultados gerados na ferramenta WASP para as camadas de epilímnio e hipolímnio, respectivamente, no ponto P01 com o segmento 4, no ponto P02 com o segmento 7 e no ponto P03 com o segmento 12.

A periodicidade do Programa de Qualidade das Águas (FEAM, 2024) do empreendimento é bimestral e o período utilizado no processo de calibração foi de outubro de 2022 a dezembro de 2023, abrangendo oito campanhas. No entanto, a Figura 3 demonstra apenas as comparações realizadas para o período de estiagem, em razão da análise da capacidade de suporte ter focado na vazão crítica ou residual 50% da $Q_{7,10}$. O período de estiagem abrange as campanhas de abril/23, junho/23 e agosto/23. Apesar de abril ser comumente considerado um mês chuvoso, trata-se de uma época de transição pluviométrica e, devido à baixa pluviosidade acumulada em abril/23, foi considerado como o início da estiagem. Nesse sentido, foram obtidos valores pontuais por segmento dos dados simulados a partir de média aritmética dos resultados diários compreendidos no mesmo intervalo do período sobredito.

O teste t de amostra única de médias determinou, para aquelas comparações em que o p-valor foi superior a 0,05, que a média dos valores observados em cada ponto de monitoramento não difere do valor médio pontual simulado do segmento correspondente (valor de referência). Ademais, por questão hidrodinâmica, o processo de calibração foi dividido em duas regiões distintas. A primeira região, entre os segmentos 1 e 4, representa o ambiente lótico e de transição, onde ocorreu o ajuste dos dados simulados como os dados monitorados no ponto P01. Já a segunda região, entre os segmentos 5 e 12, representa o ambiente lêntico, sendo utilizadas as estações de monitoramento P02 e P03 para o ajuste dos dados simulados com os monitorados.

2.8 Capacidade de suporte

Devido ao não enquadramento aprovado para o rio Uberabinha, foi considerada a classe 2, de acordo com Minas Gerais (2022). Tendo em vista a eutrofização estabelecida no reservatório da PCH Malagone, o estudo utilizou o Índice de Estado Trófico (IET) para estimar a capacidade de suporte do corpo de água para manutenção de estado mesotrófico e, na melhor situação, estado oligotrófico. A metodologia de cálculo do indicador é oriunda de Lamparelli (2004) e os limites dos seis estados de trofia do IGAM (2023).

A descarga líquida de referência $Q_{7,10}$ no rio Uberabinha, na altura da estação fluviométrica PB023, é de 5,91 m³/s (Infraestrutura de Dados Espaciais, 2025). Tendo em conta que o IGAM (2019) estabelece que o limite máximo de captações em recursos hídricos nas bacias hidrográficas do Estado de Minas Gerais é de 50% da $Q_{7,10}$, e que a vazão mínima entre 22 de outubro de 2022 e 31 de dezembro de 2023 foi de 5,03 m³/s (inferior à $Q_{7,10}$), a análise da capacidade de suporte focou na vazão crítica ou residual 50% da $Q_{7,10}$ igual a 2,96 m³/s para o rio Uberabinha. Os dados hidrogeométricos e meteorológicos foram mantidas iguais aos utilizados no processo de calibração, podendo avaliar sazonalmente a capacidade de suporte.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de sensibilidade dos termos cinéticos

Conforme Tabela 2, a análise de sensibilidade mostrou, pelos valores em negrito, quais termos cinéticos possuem magnitude significativa (p-valor menor que 0,05) nas concentrações de cada variável de estado.

Tabela 2 – P-valores da regressão linear múltipla em nível de confiança de 95%.

	NO	NO_3	Clorofila *a*	NH_3	DBO	OD	P_{total}
kan	1,00	2,50E-13	1,00	8,41E-07	3,38E-05	1,62E-16	1,00
kNO	5,75E-08	0,27	1,00	1,02E-07	0,89	0,03	1,00
kPorg	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
kd	1,00	4,46E-04	1,00	0,25	1,34E-12	4,50E-17	1,00
ka	1,00	0,99	1,00	1,00	0,96	9,66E-10	1,00
kcresc.fito	0,99	1,00	0,39	0,98	1,00	0,59	0,61
kC:Chl	0,74	0,88	1,00	0,88	0,93	0,02	1,37E-10
kresp.fito	0,95	0,92	5,13E-04	0,88	0,94	0,01	0,01
kmorte.fito	0,79	0,84	4,36E-09	0,92	0,95	0,33	5,47E-09
kC:N	0,74	0,99	1,00	0,91	1,00	0,99	1,00
kC:P	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,37E-10

Legenda: kan: constante de nitrificação; kNO: constante de mineralização do NO dissolvido; kPorg: constante de mineralização do Porg dissolvido; kd: constante de desoxigenação global; ka: constante de reaeração natural; kcresc.fito: constante de crescimento máximo do fitoplâncton; kC:Chl: proporção de carbono para clorofila *a* do fitoplâncton; kresp.fito: constante de respiração do fitoplâncton; kmorte.fito: constante de mortalidade do fitoplâncton (predação não zoológica); kN:C: proporção de nitrogênio para carbono do fitoplâncton; kP:C: proporção de fósforo para carbono no fitoplâncton.

A variável de estado OD possui interferência estatisticamente significativa dos coeficientes kan, kNO, kd, ka, kC:Chl e kresp.fito. Destes, em exceção ao ka, todos possuem influência no balanço de massa de outras variáveis de estado.

Sobre a cinética do fitoplâncton (como clorofila *a*), a análise de sensibilidade retornou que, embora estatisticamente relevante em poucos casos, kcresc.fito, kresp.fito e kmorte.fito possuem certo grau de sensibilidade no OD, NO, NH_3, P_{total} e fitoplânton (clorofila *a*), além de kresp.fito e kmorte.fito em DBO e NO_3, o que corrobora que a cinética do fitoplâncton assume um papel central na eutrofização. Perante isso, salienta-se que a interpretação acerca da sensibilidade do modelo também depende do conhecimento e experiência do analista (von Sperling, 2007).

O coeficiente kNO demonstrou interferência nas concentrações de NO e NH_3, enquanto kan em NH_3 e NO_3. A constante kan também foi sensível para as variáveis de estado OD e DBO. Nesse ponto, se esclarece que as interações cinéticas também podem ser indiretamente relevantes. A nitrificação é a oxidação da matéria nitrogenada, ou seja, é uma dinâmica que consome OD e, consequentemente, afeta a DBO acerca da degradação aeróbia da matéria orgânica. O processo descrito também pode explicar o porquê de kd, pertencente à cinética da DBO e OD, ter sido detectado nesse estudo como sensível para NO_3, pois a degradação aeróbia da matéria orgânica pode ditar a disponibilidade de OD para o processo de nitrificação.

Por fim, evidencia-se que a variável de estado P_{total} esteve elencada à cinética do fitoplânton, enquanto não foi sensível à kPorg, visto que o estudo não assumiu a incorporação do nutriente inorgânico pelo fitoplâncton.

3.2 Calibração do modelo

A Figura 3 traz o ajuste entre os dados monitorados com os dados simulados na ferramenta WASP. Percebe-se que não foi possível realizar o ajuste de clorofila *a*, uma vez que todos resultados dos dados medidos são inferiores ao limite de quantificação do método. O mesmo ocorre para NO no período de estiagem. Como consequência

de não se calibrar os coeficientes relacionados aos processos cinéticos do fitoplâncton (clorofila *a*), os ajustes dos demais termos cinéticos considerados como sensíveis podem ter sido afetados, pois a cinética do fitoplâncton possui certo grau de sensibilidade em todas as variáveis de estado consideradas neste estudo, mesmo que estatisticamente relevante em poucos os casos.

O teste t de amostra única retornou que a média dos dados observados de NO_3, NH_3 e DBO, em geral, não diferem do valor médio pontual simulado do segmento correspondente. Por outro lado, OD se ajustou relativamente bem somente na camada de epilímnio e P_{total} somente na camada de hipolímnio. No entanto, a calibração do modelo compreende uma pequena série histórica de dados observados, o que resulta em uma fraca inferência estatística.

Isto posto, considera-se, com base na visualização gráfica (ver Figura 3), que os ajustes dos parâmetros NO_3, NH_4, DBO, OD e P_{total} foram representativos no processo de calibração. Entretanto, os dados monitorados indicam certo grau de inconsistência, aludida pelos altos valores de OD nas amostragens de fundo do reservatório (alusivas à camada de hipolímnio), onde pode haver condições anóxicas. Diante disso, enfatiza-se que o refino do processo de calibração deste modelo hídrico deve ser realizado perante banco de dados mais abrangente.

Sobre os valores calibrados exibidos na Tabela 3, o resultado obtido de ka para a 1ª região de 2,50 dia^{-1} é discrepante ao que obtiveram Salla *et al.* (2013a) no baixo curso do rio Uberabinha de 0,04 dia^{-1}. O trecho da 1ª região se trata, em grande parte, de corredeiras, e o valor de 2,50 dia^{-1} é condizente à bibliografia consagrada de von Sperling (2007), que indica ka superior a 1,61 dia^{-1} para este tipo de curso de água. Além do mais, também para o baixo rio Uberabinha, o menor valor obtido de ka por Salla *et al.* (2016) foi de 5,20 dia^{-1}. Já em ambiente lêntico, o valor de ka obtido para a 2ª região de 0,50 dia^{-1} é superior aos valores alcançados por Salla, Alamy Filho e Pereira (2023) de 0,05 dia^{-1} e por Salla, Cunha e Soares (2020) de 0,10 dia^{-1} em reservatórios situados na mesma região climática.

Acerca do coeficiente kd, o valor de 0,06 dia^{-1} calibrado por Salla *et al.* (2013a) foi bem inferior ao obtido na 1ª região desse estudo de 1,00 dia^{-1}, que se encontra entre os valores de 0,68 dia^{-1} obtido por Oliveira Filho e Lima Neto (2017) e de 1,10 dia^{-1} por Pereira, Paz e Barbosa (2019) em corpos de água sob influência urbana, situados em clima tropical. No entanto, o processo de calibração concebeu a Salla *et al.* (2016) o intervalo de kd entre 0,21 e 0,50 dia^{-1}. O valor de kd de 0,45 dia^{-1} atingido na 2ª região também demonstra estar engrandecido, uma vez que que Tercini e Méllo Júnior (2016) obtiveram kd calibrado de 0,282 e 0,183 dia^{-1} para reservatórios poluídos. Os altos valores de kd calibrados nesse estudo para as duas regiões estão associados às baixas concentrações, em geral, da DBO, em muitas campanhas apurada igual ou menor a 2 mg/L nas estações de qualidade da água da PCH Malagone. Contudo, considerando as medições das três estações no período completo utilizado no processo de calibração, há resultados de DBO iguais ou acima de 5 mg/L em quase 20% das amostragens. Sendo assim, reitera-se que a calibração deve ser refinada perante maior gama de dados apurados.

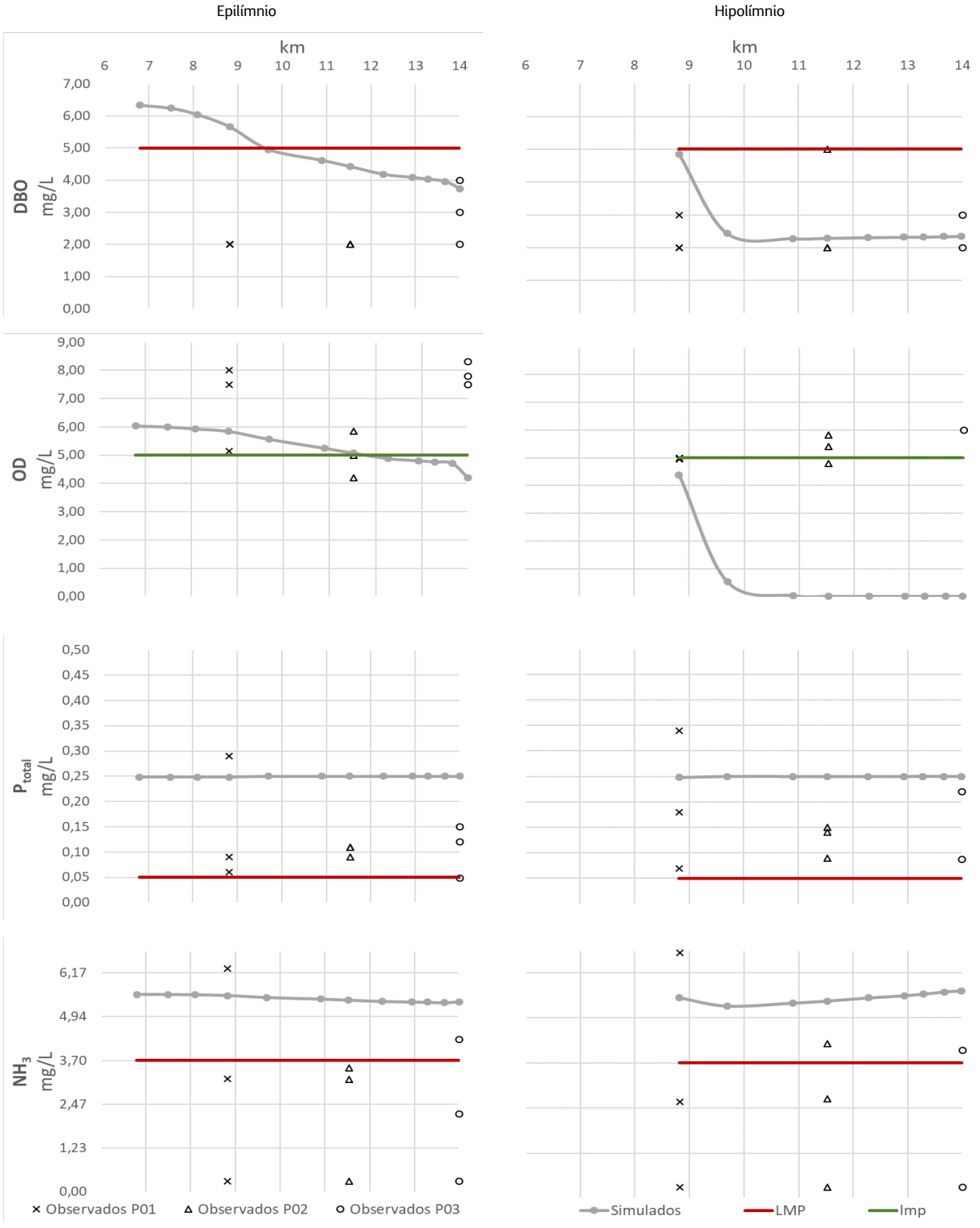
Sobre a constante kan, o valor obtido para a 1ª região de 0,05 dia^{-1}, descrito na Tabela 3, se demonstra consonante ao calibrado por Salla *et al.* (2013b) de 0,10 dia^{-1} em rio com qualidade da água semelhante ao do Uberabinha e em mesma região climática. Na 2ª região, o valor de kan de 0,05 dia^{-1} se manteve. Salla, Alamy Filho e Pereira (2023) e Salla, Cunha e Soares (2020) obtiveram o valor de 0,01 dia^{-1} em reservatórios de boa qualidade da água na mesma região da PCH Malagone. Logo, acredita-se que o valor obtido neste estudo esteja em concordância, uma vez que os coeficientes bioquímicos se elevam em corpos de

água que recebem cargas poluidoras de origem sanitário (Salla; Cunha; Soares, 2020) e, por esse motivo, a represa da PCH Malagone possui qualidade da água inferior em relação aos corpos de água dos estudos supracitados.

A constante kNO de 0,05 dia^{-1} obtida nesse estudo (ver Tabela 3), em ambas as regiões, encontra-se na mesma ordem de grandeza dos valores máximos obtidos no baixo rio Uberabinha por Salla *et al.* (2014) e Fernandes (2016) de 0,04 e 0,06 dia^{-1}, respectivamente. No entanto, no que tange ao ambiente lêntico, o valor apresentado está acima ao alcançado por Salla, Alamy Filho e Pereira (2023) de 0,002 dia^{-1}. Já a constante kPorg, por não se demonstrar sensível a nenhuma variável de estado, se manteve no valor adotado via literatura de 0,01 dia^{-1} em ambas as regiões. Salla, Alamy Filho e Pereira (2023) alcançaram este mesmo valor.

Tabela 3 – Valores dos termos cinéticos adotados conforme literatura e obtidos nas calibrações.

Coeficiente	Un.	Literatura	1ª região	2ª região
Constantes globais				
Elevação acima do nível do mar	m	600	600	600
Água doce = 0; água salgada = 1	-	0	0	0
Nutrientes inorgânicos				
Constante de nitrificação a 20°C	dia^{-1}	0,01	0,05	0,05
Coeficiente de temperatura de nitrificação	-	1,07	1,07	1,07
Temperatura mínima para reação de nitrificação	°C	7	7	7
Constante de saturação média para limite de oxigênio de nitrificação	mgO_2/L	0,5	0,5	0,5
Nutrientes orgânicos				
Constante de mineralização de NO dissolvido a 20°C	dia^{-1}	0,4	0,05	0,05
Constante de mineralização de P_{org} dissolvido a 20°C	dia^{-1}	0,01	0,01	0,01
Coeficiente de temperatura de mineralização de NO dissolvido	-	1,08	1,08	1,08
Coeficiente de temperatura de mineralização de P_{org} dissolvido	-	1,08	1,08	1,08
DBO				
Constante de desoxigenação global a 20°C	dia^{-1}	0,06	1,00	0,45
Coeficiente de correção de temperatura da desoxigenação global	-	1,047	1,047	1,047
Limite de oxigênio de meia saturação da DBO	mgO_2/L	0,5	0,5	0,5
OD				
Constante de reaeração natural a 20°C	dia^{-1}	0,04	2,50	0,50
Razão estequiométrica de oxigênio para carbono	-	2,667	2,667	2,667
Correção de temperatura de reaeração	-	1,024	1,024	1,024
Correção de temperatura para demanda de fundo de oxigênio	-	1	1	1
Limite de luz no fundo para inibir demanda de fundo de oxigênio	W/m^2	0	0	0
Fitoplâncton como clorofila *a*				
Constante de crescimento máximo do fitoplâncton a 20°C	dia^{-1}	1	1	1
Proporção de carbono para clorofila *a* do fitoplâncton	mgC/mg clorofila *a*	50	50	50
Constante de respiração do fitoplâncton a 20°C	dia^{-1}	0,1	0,1	0,1
Constante de mortalidade do fitoplâncton (predação não zoológica)	dia^{-1}	0	0	0
Coeficiente de temperatura de crescimento do fitoplâncton	-	1,068	1,068	1,068
Coeficiente de temperatura da respiração do fitoplâncton	-	1,07	1,07	1,07
Proporção de nitrogênio para carbono do fitoplâncton	mgN / mgC	0,25	0,25	0,25
Proporção de fósforo para carbono no fitoplâncton	mgP /mgC	0,025	0,025	0,025


Epilímnio
Hipolímnio
km
DBO mg/L
OD mg/L
P_{total} mg/L
NH_3 mg/L
Observados P01
Observados P02
Observados P03
Simulados
LMP
lmp

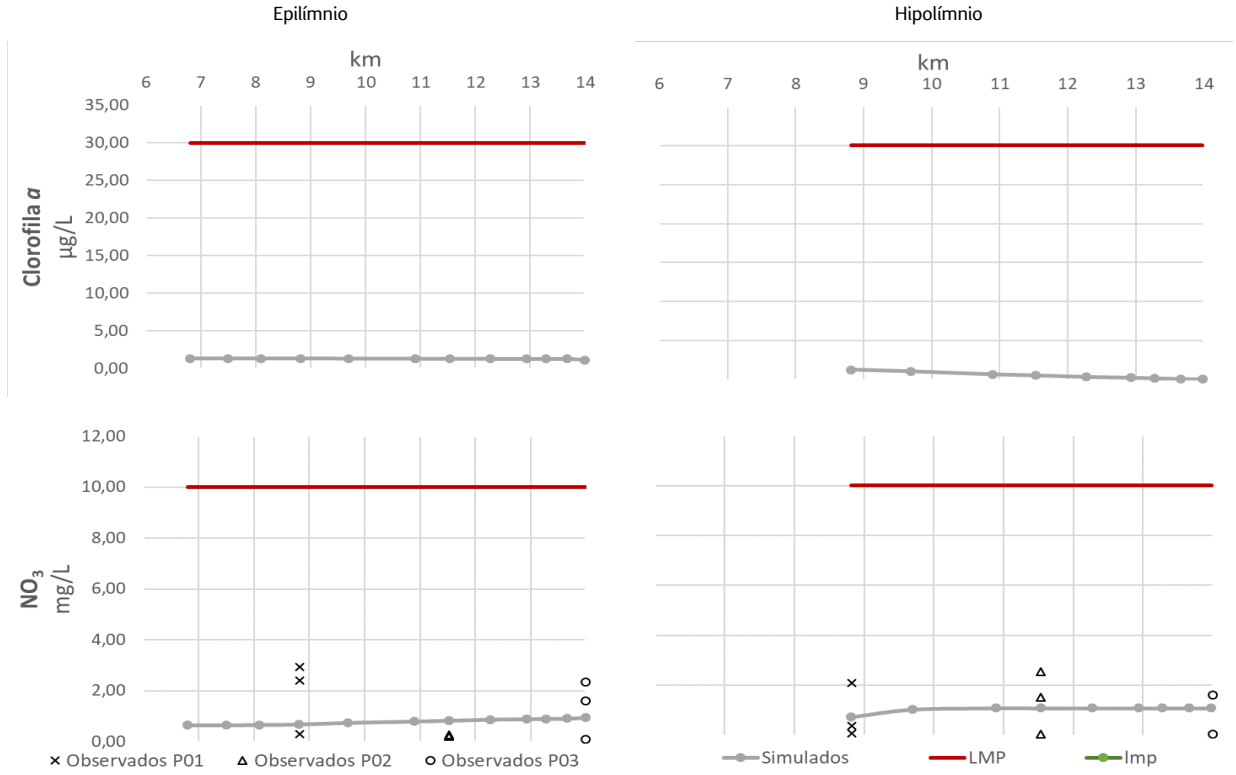


Figura 3 – Comparação entre os dados observados e simulados em perfil longitudinal para o período de estiagem.

Legenda: LMP: Limite Máximo Permitido; lmp: limite mínimo permitido.

Nota: Nesse caso, o LMP de P_{total} é 0,05 mg/L, pois o tempo de residência médio do trecho hídrico é menor que 40 dias e, assim, caracteriza-se como ambiente intermediário por Minas Gerais (2022).

3.3 Capacidade de suporte

O modelo matemático calibrado de qualidade da água trouxe o comportamento longitudinal dos parâmetros na situação tão próxima quanto foi possível da situação real do corpo hídrico. De acordo com a Figura 3, a concentração de OD decai no curso de água, ficando abaixo do limite mínimo permitido na camada de epilímnio após o decorrer de 12 km (correspondente ao segmento 8), consequência, principalmente, da degradação da matéria orgânica, representada pela diminuição da concentração da DBO, que fica em conformidade com o limite ambiental após o km 9,7 (segmento 5) na camada de epilímnio, e em todo o comprimento hídrico da camada de hipolímnio. Nessa conjuntura, a concentração de OD na camada de hipolímnio atinge a condição anóxica após a distância de 11 km (segmento 6).

Os elevados valores mensurados na estação PB023 e inseridos como dados de entrada no processo de calibração para os parâmetros P_{total} e NH_3 resultaram em concentrações acima dos limites máximos permitidos ao longo de toda segmentação hídrica. No mais, clorofila *a* e NO_3 mantiveram conformidade ambiental de suas concentrações em toda distância do corpo hídrico.

Sobre o IET, o modelo calibrado evidenciou estado de trofia mesotrófico para o ambiente lótico (segmento 1) e eutrofização acentuada (estado supereutrófico) do reservatório (segmentos 2 ao 12). De acordo com Ferreira *et al.* (2023) e Lima Neto (2023), o aporte de carga poluente urbana

tem uma contribuição considerável na eutrofização de reservatórios em clima tropical.

Diante desta situação de poluição hídrica, a capacidade de suporte traz as concentrações e cargas poluentes máximas que o corpo hídrico suporta em situação crítica de disponibilidade hídrica. Nesse contexto, para a vazão residual 50% da $Q_{7,10}$ no rio Uberabinha, fixou-se OD de entrada na estação PB023 igual a 5 mg/L, como evidencia a Tabela 4. Por conseguinte, os parâmetros NO e clorofila *a* foram considerados em suas respectivas observações máximas de 0,94 mg/L e 2,91 µg/L na estação PB023 entre setembro de 2022 e dezembro de 2023. Altos valores de clorofila *a* elevam as concentrações de NH_3 e P_{total} e, por esse motivo, a concentração de entrada de clorofila *a* foi definida em 2,91 µg/L, em vez de um valor próximo ao seu limite ambiental de 30 µg/L, de acordo com Minas Gerais (2022). Essa escolha se baseou na necessidade de representar a condição mais desfavorável e restritiva dentro da série histórica considerada, mas permitindo, ao mesmo tempo, determinar valores mais elevados de referência para NH_3 e P_{total}, parâmetros que comumente possuem concentrações registradas acima de seus limites ambientais no ponto de monitoramento PB023.

Os valores de referência descrito na Tabela 4 retratam uma situação em que os dados de entrada registrados na altura da estação fluviométrica PB023 não excedem os padrões da classe 2 e o estado de trofia mesotrófico em nenhum tempo e distância do trecho hídrico modelado. Ao utilizá-los, o analista deve estar ciente de que maiores concentrações de clorofila *a* e NO restringem a capacidade de suporte, enquanto menores concentrações de clorofila *a* e NO e maior concentração de OD a flexibiliza.

Tabela 4 – Valores de referência de entrada ao modelo para manutenção conjunta do padrão classe 2 e do estado de trofia mesotrófico em toda segmentação hídrica estudada em condição de cenário de vazão residual 50% da $Q_{7,10}$.

P_{total}		Clorofila *a*		NO		OD		DBO		NH_3		NO_3	
mg/L	t/dia	µg/L	t/dia	mg/L	t/dia	mg/L	t/dia	mg/L	t/dia	mg/L	t/dia	mg/L	t/dia
0,023	0,006	2,91	0,0007	0,94	0,24	5,00	1,28	6,30	1,61	3,70	0,95	8,30	2,12

Nota: Os valores especificados na tabela não garantem a concentração de OD acima de 5 mg/L para a segmentação da camada de hipolímnio.

A baixa vazão residual 50% da $Q_{7,10}$ de 2,96 m³/s proporciona maior tempo de residência no primeiro trecho do modelo hídrico de reaeração elevada, favorecendo a degradação da matéria orgânica. Portanto, mesmo com a concentração de entrada de 6,3 mg/L, correspondente a carga de 1,61 t/dia, a DBO decai rapidamente e, já no segmento 1, se mantém abaixo do seu limite ambiental de 5 mg/L. Para este caso, tendo em conta que as cinéticas da DBO e NH_3 possuem influencia na dinâmica de OD, a concentração de NH_3 deve ser de no máximo 3,7 mg/L (0,95 t/dia), tanto para conformidade ao seu próprio limite ambiental quanto para que OD permaneça acima de 5 mg/L em toda segmentação hídrica.

Concentrações de DBO acima de 5 mg/L são assentidas por Minas Gerais (2022) para cursos de água classes 2 e 3 em condições de vazão de referência na zona de mistura. Logo, a concentração de DBO de 6,3 mg/L denota a carga de 1,61 t/dia que o corpo hídrico pode receber, em condição de vazão de 2,96 m³/s, sem comprometer a qualidade da água e seus usos determinados pela classe de enquadramento. Perante isso, destaca-se que esse tipo de verificação não deve ser feita em termos de concentração, mas sim de carga poluidora, uma vez que a concentração de DBO de 6,3 mg/L pode representar uma carga poluidora superior à capacidade de assimilação do corpo hídrico em cenários de maiores vazões.

Sobre a variável de estado P_{total}, a entrada de 0,023 mg/L (0,006 t/dia) provém conformidade ao limite ambiental de 0,030 mg/L e ao estabelecimento do estado mesotrófico em toda segmentação hídrica. Evidencia-se que nas atuais condições de qualidade da água do baixo rio Uberabinha, o melhor estado de trofia a ser alcançado no reservatório da PCH Malagone é mesotrófico, pois mesmo que as concentrações de entrada ao modelo de clorofila *a* e P_{total} fossem os menores valores apurados na série histórica considerada no estudo de 1 ug/L e 0,03 mg/L, respectivamente, a oligotrofia ainda estaria longínqua.

Assim como P_{total}, a concentração e carga de entrada de NO_3 de 8,3 mg/L e 2,21 t/dia, variável de estado que possui relação inversamente proporcional com a concentração de NH_3, devem ser mais restritas ao limite definido pelo padrão classe 2 de 10 mg/L, a fim de garantir que as águas da represa da PCH Malagone se enquadrem nessa classe.

4 CONCLUSÕES

O estudo enfrentou limitações na obtenção de uma representação consistente do sistema ambiental analisado, tais como indisponibilidade da realização da batimetria do reservatório, técnica essencial para uma melhor representação da hidrodinâmica; monitoramento do fósforo apenas como P_{total}, exigindo a estimativa das frações de P_{org} e P_{inorg}; série histórica restrita de dados de vazão da estação PCH Martins Jusante, o que limitou o aproveitamento da gama de dados qualitativos e, consequentemente, o processo de calibração; alto limite de quantificação do método adotado para a mensuração de clorofila *a* na represa da PCH Malagone, o que impediu o ajuste dessa variável de estado no processo de calibração.

Embora tenha sido considerado que, graficamente, os ajustes dos parâmetros NO_3, NH_4, DBO, OD e P_{total} tenham sido representativos no processo de calibração do modelo de qualidade da água, a qualidade da calibração não pode ser considerada plenamente garantida. Assim, é fundamental mitigar as limitações identificadas e aprimorar a calibração para o trecho hídrico estudado, utilizando uma série histórica mais extensa de dados de qualidade da água. Apesar disso, considerou-se que a calibração tornou o modelo viável para avaliar a capacidade de suporte da represa da PCH Malagone. No entanto, os resultados obtidos não devem ser interpretados como definitivos, mas sim como indicativos que contribuem para a garantia da qualidade desse sistema ambiental.

Nesse contexto, foram obtidos valores de referência para a manutenção simultânea do padrão classe 2 e do estado mesotrófico no trecho hídrico estudado para o cenário de vazão residual 50% da $Q_{7,10}$. Ademais, conclui-se que o reservatório da PCH Malagone está atualmente recebendo cargas orgânica e de nutrientes superiores à capacidade de assimilação do corpo de água para manutenção de uma boa qualidade da água.

Conclui-se, também, que, apesar das limitações enfrentadas, o estudo pode servir como base para futuras investigações e para o gerenciamento integrado da quantidade e qualidade da água, com o objetivo de minimizar a poluição hídrica.

5 CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Conceitualização: Silva GM e Salla MR; **Metodologia**: Silva GM e Salla MR; **Investigação**: Silva GM; **Redação – Primeira versão**: Silva GM; **Redação – Revisão & Edição**: Silva GM e Salla MR; **Supervisão**: Salla MR.

6 AGRADECIMENTOS

Este estudo teve apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os autores agradecem à CAPES pelo fomento e consolidação do programa de pós-graduação *stricto sensu* em Qualidade Ambiental e demais programas no Brasil, à Universidade

Federal de Uberlândia (UFU), à Pró-Reitora de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPP-UFU), ao Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) e ao Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental (PPGMQ) pela promoção da pesquisa e formação de recursos humanos na área de meio ambiente, qualidade ambiental e gestão sustentável dos recursos naturais.

7 REFERÊNCIAS

CHAPRA, S. C. **Surface Water-Quality Modelling**. New York: McGraw-Hill, 1997.

CHOW, V. T. **Open-channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Water Quality Analysis Simulation Program (WASP)**. WASP8. Washington, DC: EPA, 2019. Disponível em: https://www.epa.gov/hydrowq/water-quality-analysis-simulation-program-wasp. Acesso em: 21 ago. 2024.

FERREIRA, L. K. R. *et al.* Uma análise quantitativa sobre o estado trófico em reservatórios no Ceará, Semiárido brasileiro. **Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica**, Ciudad de México, v. 16, n. 3, p. 971-986, 2023.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS. **Relatórios de atendimento às condicionantes da licença de operação**. Uberlândia: FEAM, 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE | Cidades | Minas Gerais | Uberlândia | Panorama. **IBGE Cidades**, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/uberlandia/panorama. Acesso em: 1 ago. 2024.

INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS. **Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, 2025. Disponível em: https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis. Acesso em: 25 mar. 2025.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Estação: Uberlandia A507. **Instituto Nacional de Meteorologia**, Brasília, DF, 2024a. Disponível em: https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A507. Acesso em: 20 ago. 2024.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. INMET: Clima. Normais Climatológicas. **Instituto Nacional de Meteorologia**, Brasília, DF, 2024b. Disponível em: https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1961-1990/precipitacao_acumulada_mensal_anual. Acesso em: 1 ago. 2024.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Avaliação da qualidade das águas superficiais de Minas Gerais em 2022**: resumo executivo anual. Belo Horizonte: IGAM, 2023.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Portaria IGAM nº 48, de 4 de outubro de 2019**. Estabelece normas suplementares para a regularização dos recursos hídricos de domínio do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Belo Horizonte: IGAM, 4 out. 2019.

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

LIMA NETO, I. E. Modeling water quality in a tropical reservoir using CE-QUAL-W2: handling data scarcity, urban pollution and hydroclimatic seasonality. **RBRH**, Porto Alegre, v. 28, jan. 2023.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 1, de 8 de novembro de 2022**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Belo Horizonte: COPAM/CERH, 21 nov. 2022.

OLIVEIRA FILHO, A. A.; LIMA NETO, I. E. Modelagem da qualidade da água do rio Poti em Teresina (PI). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, p. 3-14, 6 jul. 2017.

PEREIRA, R. A.; PAZ, D. H. F.; BARBOSA, I. M. B. R. Redução da carga orgânica lançada em um trecho do rio Capibaribe para atendimento à legislação ambiental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 12, n. 3, p. 837-847, 2019.

PORTAL INFOHIDRO. **Instituto Mineiro de Gestão das Águas**, Belo Horizonte, 2024. Disponível em: https://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/. Acesso em: 6 ago. 2024.

RIBEIRO, A. S. **Ecologia I**. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2010. Disponível em: https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalago/08413418082016Ecologia_I_aula_1.pdf. Acesso em: 2 jul. 2025.

SALLA, M. R.; ALAMY FILHO, J. E.; PEREIRA, C. E. Modeling of aquatic ecosystem dynamics in a run-of-river reservoir in the Brazil. **Clean – Soil Air Water**, Hoboken, n. 5, 2200286, 2023.

SALLA, M. R.; CUNHA, N. B.; SOARES, S. S. P. Modelagem de qualidade da água no rio São Marcos, bacia hidrográfica do alto Paraná. **Revista DAE**, São Paulo, v. 68, n. 221, p. 20-41, 2020.

SALLA, M. R. *et al.* Sistema de suporte à decisão em recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Uberabinha, Minas Gerais. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Uberlândia, v. 19, n. 1, p. 189-204, set. 2013a.

SALLA, M. R. *et al.* Estudo da autodepuração do rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do rio Dourados. **Engenharia**

Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 105-114, jun. 2013b.

SALLA, M. R. *et al*. Integrated modeling of water quantity and quality in the Araguari River basin, Brazil. **Latin American Journal of Aquatic Research**, Valparaíso, v. 42, n. 1, p. 224-244, 2014.

SALLA, M. R. *et al*. Importance of calibration for mathematical modeling of self-purification of lotic environments. **Acta Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v. 28, n. 27, 19 dez. 2016.

SISTEMA HIDRO-TELEMETRIA. **Rede Hidrometeorológica Nacional**, Brasília, DF, 2024. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/serieHistorica.aspx. Acesso em: 2 ago. 2024.

TERCINI, J. R. B.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Modelo de simulação de OD e DBO integrando rio e reservatório aplicado ao rio Tietê/Simulation model of DO and BOD integrating river and reservoir applied to the Tietê River. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. *l*.], v. 21, n. 2, p. 338-346, 1 abr. 2016.

TRATAMENTO DE ESGOTO. **Portal da Prefeitura de Uberlândia**, Uberlândia, 2024. Disponível em: https://www.uberlandia.mg.gov.br/prefeitura/orgaos-municipais/dmae/tratamento-de-esgoto/. Acesso em: 1 ago. 2024.

VALDÉS, M. E. et al. Distribution of antibiotics in water, sediments and biofilm in an urban river (Córdoba, Argentina, LA). **Environmental Pollution**, Amsterdam, v. 269, 116133, 15 jan. 2021.

VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. 7. ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

WANG, X. Y. *et al*. Dynamic simulation and comprehensive evaluation of the water resources carrying capacity in Guangzhou city, China. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 135, 108528, Feb. 2022.