

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

USO DIRETO DA ÁGUA EM BACIA CRÍTICAS E GESTÃO DE RECURSOS HIDRÍCOS

Thiago Francisco de Godoy¹; Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes²

Abstract: This paper presents the proposal of a computational tool aimed at supporting decision-making in the selection of technologies for wastewater treatment in urban watersheds. The tool's logic is based on mass balance and the minimum required efficiency for the removal of Biochemical Oxygen Demand (BOD) load, using the limits established by Brazilian Resolution CONAMA No. 357/2005 as a reference. The methodology allows for the simulation of combinations of primary, secondary, and tertiary treatment, with automatic generation of graphs and tables, considering different flow capture percentages, dilution in the water body, and allocation for multiple uses. As a case study, the IG-4 section of the Iguaçu River, located in the Metropolitan Region of Curitiba, was analyzed using four experimental plans with different methods for calculating the BOD load. Plans 1 and 2 adopted the combination of flow and concentration permanence curves, which led to an overestimation of the daily load. On the other hand, Plans 3 and 4 used actual empirical data, resulting in lower daily loads. The results indicate that Plans 3 and 4 required higher removal efficiencies due to the association between low flow rates and high concentrations, which demands greater efficiency to reduce concentrations and meet the established standards. Furthermore, the results highlight the applicability of the tool, offering decision-makers practical support in identifying the best technological combinations for different scenarios, taking into account operational variables, water quality, and allocation for multiple uses.

Resumo: Este trabalho apresenta a proposta de uma ferramenta computacional voltada ao apoio à tomada de decisão na seleção de tecnologias para o tratamento de efluentes em bacias hidrográficas urbanas. A lógica da ferramenta baseia-se em balanço de massa e na eficiência mínima necessária de remoção da carga de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), utilizando como referência os limites da Resolução CONAMA nº 357/05. A metodologia permite simular combinações de tratamento primário, secundário e terciário, com geração automática de gráficos e tabelas, considerando diferentes percentuais de captação de vazão, diluição no corpo hídrico e destinação a usos múltiplos. Como estudo de caso, foi analisado o trecho IG-4 do Rio Iguaçu, na Região Metropolitana de Curitiba, aplicando-se quatro planos experimentais com diferentes métodos de cálculo da carga de DBO. Os planos 1 e 2 adotaram a combinação de curvas de permanência de vazão e concentração, o que superestimou a carga diária. Por outro lado, os planos 3 e 4 utilizaram dados empíricos reais, que resultaram em cargas diárias menores. Os resultados indicam que os planos 3 e 4 exigiram maiores eficiências de remoção, em razão da associação entre vazões baixas e concentrações elevadas, o que demanda maiores eficiências para garantir a redução da concentração e atingir o padrão estabelecido. Ademais, os resultados enfatizam a aplicabilidade da ferramenta, oferecendo ao gestor suporte para identificar, de forma prática, as melhores combinações tecnológicas para cenários diversos, considerando variáveis operacionais, de qualidade e de alocação de usos múltiplos.

Palavras-Chave – Ferramenta de apoio à decisão; Tratamento de efluentes; Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).

1) Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA-UFPR). Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100, Jardim das Américas, Curitiba - PR. thiagogodoy@ufpr.br

2) Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA-UFPR). Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100, Jardim das Américas, Curitiba - PR. cris.dhs@ufpr.br

INTRODUÇÃO

As atividades humanas exercem impactos significativos sobre o ambiente ecológico dos rios, sobretudo em áreas urbanizadas. A descarga de esgotos domésticos e industriais, aliada ao uso excessivo de pesticidas e fertilizantes em zonas agrícolas, contribui de maneira substancial para a poluição das águas superficiais e para o aumento da carga de nutrientes nos recursos hídricos, Chen et al. (2019). Esse cenário torna-se ainda mais crítico no contexto das bacias hidrográficas urbanas, nas quais o controle da poluição hídrica desponta como uma prioridade estratégica. Nesse contexto, a redução da carga de poluentes ao menor custo possível torna-se um desafio para a gestão ambiental e para o planejamento do saneamento, Zeng et al. (2020).

Os rios urbanos, por sua vez, apresentam baixa capacidade de autodepuração devido à retilinização e à elevada carga orgânica a que são submetidos continuamente, o que limita a recuperação natural da qualidade da água, conforme Zeng et al. (2020). Diante dessa limitação, intervenções antrópicas para o tratamento da água fluvial tornam-se necessárias, mesmo que o padrão de potabilidade não seja plenamente alcançado. Ainda assim, a água tratada pode ser destinada a usos menos exigentes em termos de qualidade, como irrigação, lavagem de vias ou processos industriais, conforme previsto na Resolução CONAMA nº 357/05, o que contribui para a redução da demanda por água potável. Essa abordagem representa não apenas uma estratégia de gestão racional dos recursos hídricos, como também promove o uso sustentável e eficiente da água tratada, agregando valor ao recurso e ampliando suas possibilidades de reaproveitamento.

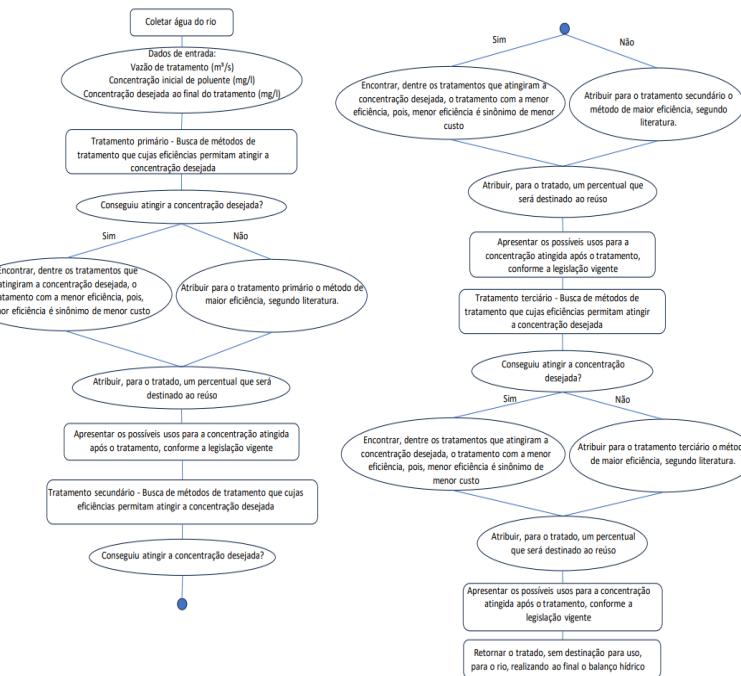
Neste contexto, esta pesquisa apresenta uma ferramenta para auxiliar os gestores de bacias na escolha de métodos ou tecnologias para tratamento de rios poluídos, considerando os mesmos como efluentes domésticos, visando usos múltiplos (Godoy, 2025).

MATERIAIS E MÉTODO

O estudo baseou-se no desenvolvimento e aplicação de uma ferramenta computacional elaborada em ambiente Microsoft Excel®, com o objetivo de simular cenários de tratamento de efluentes em bacias hidrográficas urbanas poluídas. A ferramenta foi feita como uma rotina estruturada, capaz de integrar dados de entrada sobre condições do corpo hídrico — incluindo vazão média, concentração de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e classe de qualidade desejada — com informações provenientes de uma base de tecnologias de tratamento documentadas na literatura técnica.

A Figura 1 apresenta o fluxograma implementado na rotina para que se tenha as análises, trazendo os resultados em forma de gráficos e tabelas.

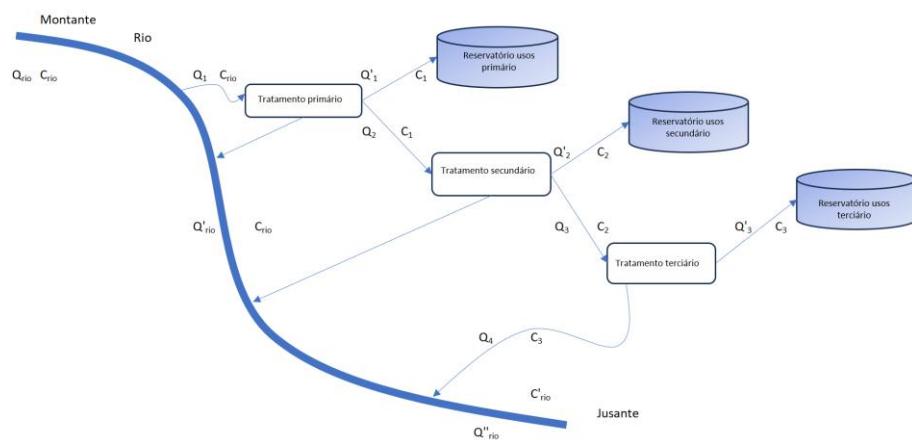
Figura 1 - Esquema lógico da ferramenta



Fonte: Autor, 2024

O sistema se baseia em algoritmos de balanço de massa e eficiência de remoção, Figura 2, permitindo identificar quais tecnologias são capazes de atingir os padrões definidos na Resolução CONAMA nº 357/05 para enquadramento de rios. A rotina foi programada para simular combinações de tratamentos primário, secundário e terciário, analisando a eficiência de cada etapa, bem como sua capacidade de redução de carga e concentração de DBO.

Figura 2 - Esquema do balanço de massa



Fonte: Autor, 2024

As seguintes equações são referentes à Figura 2.

$$Q_{rio} = Q'_{rio} + Q_1 \quad (1)$$

$$Q_1 = Q'_1 + Q_2 \quad (2)$$

$$Q_2 = Q'_2 + Q_3 \quad (3)$$

$$Q_3 = Q'_3 + Q_4 \quad (4)$$

$$(Q_1 * c_{rio}) * (1 - e_{tratamento\ 1}) = (Q'_1 * c_1) + (Q_2 * c_1) \quad (5)$$

$$(Q_2 * c_1) * (1 - e_{tratamento\ 2}) = (Q'_2 * c_2) + (Q_3 * c_2) \quad (6)$$

$$(Q_3 * c_2) * (1 - e_{tratamento\ 3}) = (Q'_3 * c_3) + (Q_4 * c_3) \quad (7)$$

$$Q''_{rio} * C'_{rio} = (Q_4 * C_3) + (Q'_{rio} * C_{rio}) \quad (8)$$

onde “Q” e “C” as vazões (m^3/s) e concentrações (mg/L) em cada trecho, respectivamente, e “e” as eficiências adotadas em cada tratamento.

As Tabela 1 Tabela 2 e Tabela 3, trazem as eficiências médias de remoção de DBO para os tratamentos primário, secundário e terciário, respectivamente. A tomada de decisão é guiada pela identificação das menores eficiências de remoção necessárias para atingir os padrões desejados, priorizando o uso racional de recursos.

Tabela 1 - Eficiências médias de tratamento primário

Tratamento primário	Eficiência média DBO (%)	Referências
Decantador primário	32,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Fossa séptica	32,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Primário avançado	62,5%	Von Sperling, 2017.

FONTE: O autor (2024).

Tabela 2 - Eficiência média de tratamento secundário

Tratamento Secundário	Eficiência média DBO (%)	Referências
Cesta de medida 1 - 70% até 79%		
UASB	69,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Lagoa Facultativa	77,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Lagoa anaeróbia - Lagoa facultativa	77,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Lagoa aerada facultativa	77,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Lagoa aerada de mistura completa - Lagoa sedimentação	77,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Cesta de medida 2 - 80% até 89%		
UASB + lagoa aerada facultativa	80,0%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
UASB + lagoa aerada mista completa + lagoa de decantação	80,0%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
UASB + filtro anaeróbio	81,0%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
UASB + lagoas de polimento	82,0%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Fossa séptica + Filtro anaeróbio	82,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação	82,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de alta taxa	82,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
UASB + escoamento superficial	83,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Filtro biológico (Alta carga)	85,0%	Von Sperling, 2017.
Escoamento superficial no solo	85,0%	Von Sperling, 2017.
Wetlands	85,0%	Von Sperling, 2017.
UASB + filtro biológico percolador de alta carga	86,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.

Lagoa anaerobia + lagoa facultativa + remoção de algas	87,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
UASB + Lodos ativados	88,0%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Uasb + biofiltro aerado submerso	88,0%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
UASB + flotação por ar dissolvido	88,0%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Lodos ativados convencionais	89,0%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Filtro biológico (Baixa carga)	89,0%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Lodos ativados convencional com remoção biológica de N	89,0%	Von Sperling, 2017.
Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P	89,0%	Von Sperling, 2017.

Cesta de medida 3 - 90% até 95%

Biodisco	91,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Infiltração rapida no solo	91,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Biofiltro aerado submerso com nitrificação	91,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N	91,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Lodos ativados - Aeração Prolongada	93,5%	Von Sperling, 2017; ANA, 2017.
Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)	93,5%	Von Sperling, 2017.
Fossa séptica + infiltração	94,0%	Von Sperling, 2017.
Infiltração lenta no solo	94,5%	Von Sperling, 2017.

Cesta de medida 4 - 96% até 99%

Lodos ativados convencional + filtração terciária	95,5%	Von Sperling, 2017.
---	-------	---------------------

FONTE: O autor (2024).

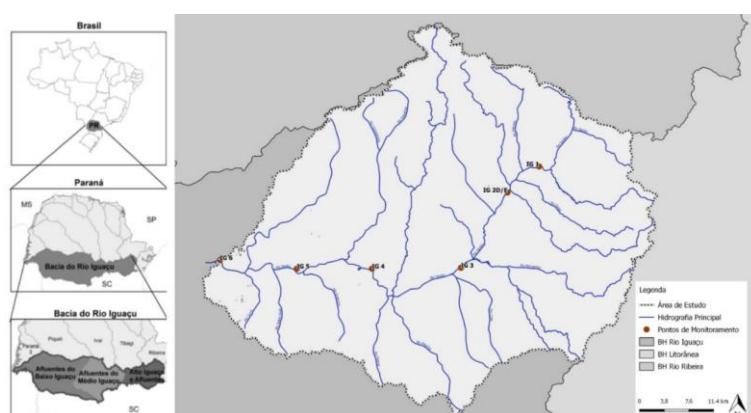
Tabela 3 - Eficiência média de tratamento terciário

Tratamento Terciário	Eficiência média DBO (%)	Referências
Ozonização com ultrassom	90,0%	Ren et al. 2020; Zhang et al. 2023
Nano CaO2	74,7%	Zhou et al.2017
Palm oil boiler	99,0%	Manikam et al. 2019
Flotação	60,0%	Von Sperling, 2017; Barros et.al. 2018

FONTE: O autor (2024).

A metodologia foi aplicada a um estudo de caso no trecho IG-4 do Rio Iguaçu, localizado na Região Metropolitana de Curitiba, Figura 3. Foram definidos quatro planos experimentais (PE), os quais diferenciam na abordagem de cálculo da carga de DBO.

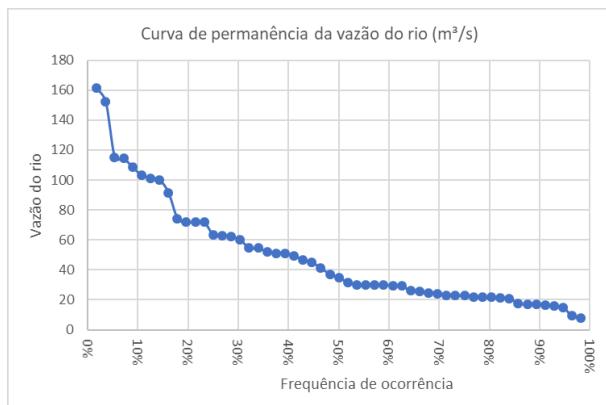
Figura 3 - Local de estudo



FONTE: Bitencourt e Fernandes (2019).

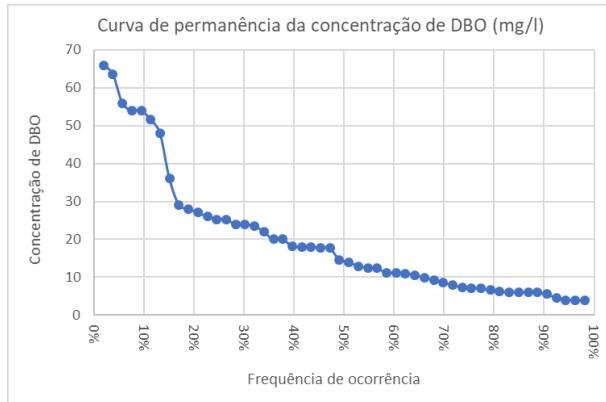
Os planos PE1 e PE2 fizeram a multiplicação direta entre as curvas de permanência, da série histórica dos anos de 2005 a 2016, de vazão (Figura 4) e concentração (Figura 5), assumindo uma perspectiva conservadora e superestimada.

Figura 4 – curva de permanência de vazão – Rio Iguaçu (IG-4)



FONTE: O autor (2024).

Figura 5 – curva de permanência de concentração de DBO – Rio Iguaçu (IG-4)



FONTE: O autor (2024).

A Tabela 4 resume as características de vazão e concentração de DBO das curvas de permanência para esses planos de análises.

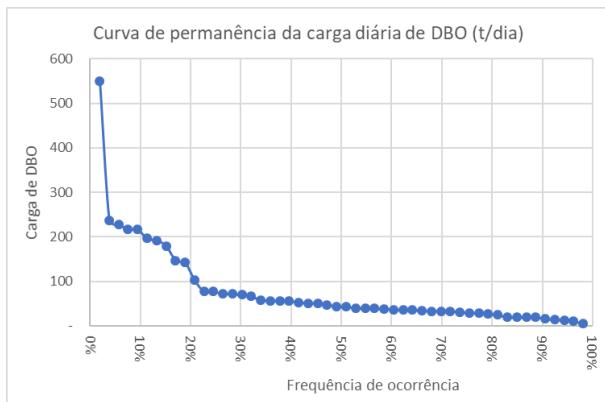
Tabela 4 – Resumo das curvas de permanência de vazão e concentração de DBO

Vazão do Rio (m³/s)	Dados de entrada no sistema		
	Q _{Entrada} (m³/s)	C _{DBO} (mg/l)	Carga (kg/dia)
Q ₁₀	102,11	10,21	44,16
Q ₂₀	80,11	8,01	33,55
Q ₃₀	62,85	6,29	25,48
Q ₄₀	49,31	4,93	19,36
Q ₅₀	38,69	3,87	14,71
Q ₆₀	30,36	3,04	11,17
Q ₇₀	23,82	2,38	8,49
Q ₈₀	18,69	1,87	6,45
Q ₉₀	14,66	1,47	4,90
Q ₉₅	12,99	1,30	4,27

FONTE: O autor (2024).

Os planos PE3 e PE4 consideraram séries históricas reais, cruzando dados empíricos de vazão e concentração de DBO, dos anos de 2005 a 2016, o que resultou em cenários mais realistas e exigentes do ponto de vista tecnológico (Figura 6).

Figura 6 – curva de permanência da carga diária de DBO – Rio Iguaçu (IG-4)



FONTE: O autor (2024).

A Tabela 5 resume as características de vazão e concentração de DBO observadas, que originou a curva de permanência de carga diária de DBO.

Tabela 5 – Resumo das vazões e concentrações da curva de permanência da carga diária de DBO

Vazão do Rio (m ³ /s)	Dados de entrada no sistema		
	Q _{Entrada} (m ³ /s)	C _{DBO} (mg/l)	Carga (kg/dia)
Q ₁₀	52,20	5,22	48,00
Q ₂₀	29,32	2,93	56,00
Q ₃₀	46,76	4,68	17,78
Q ₄₀	24,70	2,47	26,00
Q ₅₀	7,58	0,76	66,00
Q ₆₀	15,89	1,59	28,00
Q ₇₀	21,18	2,12	18,00
Q ₈₀	30,16	3,02	10,56
Q ₉₀	54,48	5,45	4,00
Q ₉₅	17,03	1,70	8,53

FONTE: O autor (2024).

A ferramenta permite a análise de diferentes percentuais de captação da vazão do rio com parte do efluente tratado sendo destinado a usos múltiplos e o restante retornando ao corpo hídrico como estratégia de diluição de carga.

Para efeito de comparação, foram feitas simulações, com o objetivo de atingir a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/05, com captação de 10%, 20% e 30% das vazões Q₁₀ a Q₉₅, tendo a cada tratamento reservado 30% do tratado para usos múltiplos, 30% lançado no rio e 40% destinado para o próximo tratamento. Após o tratamento terciário será 30% para usos múltiplos e 70% lançado no rio, como forma de diluição. Ao longo das simulações, são gerados gráficos de variação de carga e concentração de DBO, bem como tabelas síntese com as configurações tecnológicas ideais para cada condição de vazão simulada (Q₁₀ a Q₉₅).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com a aplicação da rotina computacional evidenciam o potencial da ferramenta como suporte técnico à tomada de decisão na gestão de bacias hidrográficas urbanas. Ao simular múltiplas configurações de captação e tratamento para o trecho IG-4 do Rio Iguaçu, a ferramenta demonstrou capacidade de selecionar, de forma automatizada, as tecnologias mais adequadas para atender às exigências de qualidade da água estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 357/05, considerando como critério de seleção a eficiência. Com base na eficiência de remoção de

DBO e nos parâmetros de entrada (vazão, concentração e classe desejada), o sistema apresentou resultados consistentes, fornecendo ao gestor uma visão comparativa entre diferentes estratégias de intervenção.

Nas Tabela 6 e Tabela 7 é possível observar que no tratamento secundário foi atingido o objetivo estipulado, além de que há simulações que foram além e atingiram a classe 1, sendo assim, dispensável o tratamento terciário. Para fins de análise, foi incluído o tratamento terciário nas simulações e observa-se que todas as concentrações remanescentes atendem o critério da classe 1, o que demonstra a efetividade das alternativas de tratamento escolhidas.

Tabela 6 – Resumo das simulações dos planos 1 e 2

Curva de permanência	% de captação do rio	Tratamento Primário				Tratamento Secundário				Tratamento Terciário			
		Método escolhido	Efic _{DBO} (%)	C _{DBO} tratamento 1 (mg/l)	Possíveis usos	Método escolhido	Efic _{DBO} (%)	C _{DBO} tratamento 2 (mg/l)	Possíveis usos	Método escolhido	Efic _{DBO} (%)	C _{DBO} tratamento 3 (mg/l)	Possíveis usos
Q10	10% Primário avançado	63%	16,56	Classe 4	Cesta de Medida 1	70%	4,97	Classe 2	Nano CaO2	75%	1,26	Classe 1	
Q20	10% Primário avançado	63%	12,58	Classe 4	Cesta de Medida 1	70%	3,77	Classe 2	Nano CaO2	75%	0,95	Classe 1	
Q30	10% Primário avançado	63%	12,58	Classe 4	Cesta de Medida 1	70%	3,77	Classe 2	Nano CaO2	75%	0,95	Classe 1	
Q40	10% Primário avançado	63%	12,58	Classe 4	Cesta de Medida 1	70%	3,77	Classe 2	Nano CaO2	75%	0,95	Classe 1	
Q50	10% Decantador primário	33%	9,93	Classe 3	Cesta de Medida 1	70%	2,98	Classe 1	Nano CaO2	75%	0,75	Classe 1	
Q60	10% Decantador primário	33%	7,54	Classe 3	Cesta de Medida 1	70%	2,26	Classe 1	Nano CaO2	75%	0,57	Classe 1	
Q70	10% Decantador primário	33%	5,73	Classe 3	Cesta de Medida 1	70%	1,72	Classe 1	Nano CaO2	75%	0,43	Classe 1	
Q80	10% Decantador primário	33%	4,35	Classe 2	Cesta de Medida 1	70%	1,31	Classe 1	Nano CaO2	75%	0,33	Classe 1	
Q90	10% Decantador primário	33%	3,31	Classe 2	Cesta de Medida 1	70%	0,99	Classe 1	Nano CaO2	75%	0,25	Classe 1	
Q95	10% Decantador primário	33%	2,88	Classe 1	Cesta de Medida 1	70%	0,86	Classe 1	Nano CaO2	75%	0,22	Classe 1	

FONTE: O autor (2024).

Tabela 7 – Resumo das simulações dos planos 3 e 4

Curva de permanência	% de captação do rio	Tratamento Primário				Tratamento Secundário				Tratamento Terciário			
		Método escolhido	Efic _{DBO} (%)	C _{DBO} tratamento 1 (mg/l)	Possíveis usos	Método escolhido	Efic _{DBO} (%)	C _{DBO} tratamento 2 (mg/l)	Possíveis usos	Método escolhido	Efic _{DBO} (%)	C _{DBO} tratamento 3 (mg/l)	Possíveis usos
Q10	10% Primário avançado	63%	18,00	Classe 4	Cesta de Medida 1	78%	4,05	Classe 2	Nano CaO2	75%	1,02	Classe 1	
Q20	10% Primário avançado	63%	21,00	Classe 4	Cesta de Medida 1	78%	4,73	Classe 2	Nano CaO2	75%	1,20	Classe 1	
Q30	10% Primário avançado	63%	6,67	Classe 3	Cesta de Medida 1	70%	2,00	Classe 1	Nano CaO2	75%	0,51	Classe 1	
Q40	10% Primário avançado	63%	9,75	Classe 3	Cesta de Medida 1	70%	2,93	Classe 1	Nano CaO2	75%	0,74	Classe 1	
Q50	10% Primário avançado	63%	24,75	Classe 4	Cesta de Medida 2	80%	4,95	Classe 2	Nano CaO2	75%	1,25	Classe 1	
Q60	10% Primário avançado	63%	10,50	Classe 4	Cesta de Medida 1	70%	3,15	Classe 2	Nano CaO2	75%	0,80	Classe 1	
Q70	10% Primário avançado	63%	6,75	Classe 3	Cesta de Medida 1	70%	2,03	Classe 1	Nano CaO2	75%	0,51	Classe 1	
Q80	10% Primário avançado	63%	3,96	Classe 2	Cesta de Medida 1	70%	1,19	Classe 1	Nano CaO2	75%	0,30	Classe 1	
Q90	10% Decantador primário	33%	2,70	Classe 1	Cesta de Medida 1	70%	0,45	Classe 1	Nano CaO2	75%	0,11	Classe 1	
Q95	10% Primário avançado	63%	3,20	Classe 2	Cesta de Medida 1	70%	0,96	Classe 1	Nano CaO2	75%	0,24	Classe 1	

FONTE: O autor (2024).

As Figura 7 e Figura 8 trazem a comparação entre os diferentes percentuais de captação, 10%, 20% e 30%, para a mesma vazão da curva de permanência (Q95). Essa comparação se faz importante pois é possível observar o poder de diluição da concentração do rio após o lançamento no corpo hídrico, servindo de alerta para o gestor sobre o volume a ser tratado para que se tenha uma diluição satisfatória.

Figura 7 – Comparação entre diferentes percentuais de captação para tratamento – simulações 1 e 2

Curva de permanência	% de captação do rio	Dados Finais						
		Q _{tratado} (m ³ /s)	C _{tratado} (mg/l)	Q _{rio antes do lançamento} (m ³ /s)	C _{rio antes do lançamento} (mg/l)	C _{após o lançamento} (mg/l)	% de redução de concentração	
Q95	10%	0,69	0,22	11,69	4,27	4,14	2,9%	
Q95	20%	1,38	0,22	10,39	4,27	4,01	6,1%	
Q95	30%	2,07	0,22	9,09	4,27	3,86	9,6%	

FONTE: O autor (2024).

Figura 8 – Comparação entre diferentes percentuais de captação para tratamento – simulações 3 e 4

Curva de permanência	% de captação do rio	Dados Finais						
		Q _{tratado} (m ³ /s)	C _{tratado} (mg/l)	Q _{rio antes do lançamento} (m ³ /s)	C _{rio antes do lançamento} (mg/l)	C _{após o lançamento} (mg/l)	% de redução de concentração	
Q95	10%	0,91	0,24	15,33	8,53	8,18	4,1%	
Q95	20%	1,81	0,24	13,62	8,53	7,80	8,6%	
Q95	30%	2,72	0,24	11,92	8,53	7,37	13,5%	

FONTE: O autor (2024).

A abordagem dos planos PE1 e PE2 superestimam as cargas, pois presume que as maiores concentrações ocorrem simultaneamente com as maiores vazões — o que raramente ocorre em rios urbanos. Já nos Planos 3 e 4, os pares de dados foram extraídos diretamente da série histórica, o que

permite combinações mais realistas, como a ocorrência de altas concentrações de DBO durante períodos de baixa vazão. Apesar de a carga diária total simulada nesses casos ser inferior à dos Planos 1 e 2, a elevada concentração associada à baixa diluição faz com que o sistema identifique a necessidade de tecnologias com maiores eficiências de remoção, a fim de garantir que os limites de concentração final sejam atendidos. Isso evidencia a robustez da lógica de cálculo empregada, que ajusta automaticamente as condições das soluções propostas com base no cenário hidrológico e de qualidade analisado.

CONCLUSÃO

Entre as tecnologias de remoção de cargas sugeridas e compiladas nos exemplo das tabelas 6 e 7, indicam que houve padrão de recorrência nas soluções indicadas. Para o tratamento primário, o proposta de um primário avançado foi a opção mais frequente, aparecendo como recomendação em grande parte das simulações. Para o tratamento secundário, a Cesta de Medidas 1, composta por diferentes alternativas tecnológicas, foi suficiente para atender à maioria das configurações. No tratamento terciário, a tecnologia baseada no uso de Nano CaO₂ se mostrou eficaz em todos os cenários simulados, sendo capaz de levar as concentrações de DBO abaixo dos limites da Classe 1. Esse padrão de soluções, replicado em diversos cenários de captação (10%, 20% e 30% da vazão) e em toda a faixa de permanência (Q10 a Q95), reforça a confiabilidade dos resultados gerados pela ferramenta e a padronização da resposta técnica esperada.

Além da seleção das tecnologias, a ferramenta também permitiu simular a destinação da água tratada, separando-a entre a parcela devolvida ao rio, com o objetivo de contribuir para a diluição da carga orgânica remanescente, e a parcela destinada a usos múltiplos, ampliando os benefícios do tratamento para além da simples melhoria da qualidade do corpo hídrico. É importante salientar que, caso o volume a ser tratado seja elevado e/ou o potencial de diluição do corpo hídrico seja baixo, é possível reduzir o percentual destinado para usos múltiplos, aumentando o residual de lançamento no rio, o que torna mais eficiente a diluição da carga orgânica.

Por fim, os resultados validam o potencial de aplicação da ferramenta em estudos técnicos e em políticas públicas de planejamento ambiental. A lógica de operação, baseada em eficiência mínima necessária, aliada à clareza dos resultados e à capacidade de simulação de múltiplos cenários, confere à rotina computacional desenvolvida um caráter prático e replicável. Ainda que limitações tenham sido identificadas, como a necessidade de entrada manual dos dados, ausência de atualização automática das tecnologias e limitação na representação de múltiplos pontos de emissão, o sistema se apresenta como uma base sólida para aplicações futuras, podendo ser expandido com rotinas de dimensionamento, avaliação econômica e análise espacial mais detalhada.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional das Águas (ANA), 2017. “*Atlas Esgotos – Despoluição de Bacias Hidrográficas*”. Disponível em: <https://metadados.snhirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1d8cea87-3d7b-49ff-86b8-966d96c9eb01>.
- Bitencourt, C., C., A., Fernandes, C., V., S., 2019. “*Correlação entre parâmetros de qualidade da água e uso do solo como ferramenta para subsidiar o enquadramento*”. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/works/6032>.
- Chen, X., Srokal, M., Kroese, C., Ma. L., Shen, Z., Wu, J., Chen, Xiping, Shi, X., 2019. “*Seasonality in river export of nitrogen: A modelling approach for the Yangtze River*”. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.323>.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. (2005) Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. 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. Brasília: Diário Oficial da União.
- Godoy, T. F., 2025– Uso direto da água em bacias críticas e gestão de recursos hídricos. Dissertação. 244 p.
- Von Sperling, M, 2017. “*Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*”, Vol. I. 3.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2017. 472p.
- Zeng, Y., Cai, Y., Tan, Q., Dai, C., 2020. “*An integrated modeling approach for identifying cost-effective strategies in controlling water pollution of urban watersheds*”. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124373>.

AGRADECIMENTOS

Este projeto foi parcialmente financiado pela CAPES e CNPq, com bolsa de estudo para o primeiro autor (CAPES) e bolsa produtividade do segundo autor (CNPq).