



Aplicação integrada da modelagem da qualidade da água e das curvas de permanência de qualidade como ferramenta para a gestão de recursos hídricos na bacia do rio Piauitinga, em Sergipe

Integrated application of water quality modeling and quality retention curves as a tool for water resources management in the Piauitinga river basin, in Sergipe

A. N. dos Santos*; A. P. B. Á. Macêdo; R. G. de Souza; M. R. M. Fernandes;
W. T. C. Silva; E. H. M. Schneider; L. R. Pimenta

Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Sustentabilidade e Ações Climáticas, Av. José Carlos Silva, 4.444 - Inácio Barbosa, 49040-850, Aracaju - SE, Brasil

**aline.engamb@outlook.com*

(Recebido em 13 de maio de 2024; aceito em 20 de junho de 2024)

O presente trabalho tem por objetivo propor uma metodologia para subsidiar o futuro processo de enquadramento dos cursos d'água superficiais da bacia do rio Piauitinga, baseada na aplicação concomitante da modelagem de qualidade da água e das curvas de permanência de qualidade. Foram estabelecidas duas condições para simulações da qualidade da água, sendo a condição atual com eficiência de 0% e a segunda considerando eficiência de 70% de remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), considerando os cenários de ocorrência e não ocorrência de autodepuração, para o ano de 2024. As cargas totais de DBO_{5,20} foram estimadas nas ottobacias da bacia, no nível 6, considerando-se o esgotamento doméstico e efluentes industriais como fontes poluidoras. Através do modelo QUAL-UFMG, foram simulados os perfis de DBO_{5,20} e de Oxigênio Dissolvido (OD) ao longo do rio Piauitinga. As curvas de permanência de qualidade para o parâmetro DBO_{5,20} foram construídas para rio de água doce, classes 1, 2 e 3. A capacidade de autodepuração do rio Piauitinga permitiu a redução acima de 25% da carga total de DBO_{5,20}, indicando a necessidade de ampliação da cobertura do serviço de tratamento de esgotos na área de estudo. Os resultados demonstram que a metodologia adotada se mostrou adequada para auxiliar o processo de enquadramento de corpos d'água.

Palavras-chave: autodepuração, enquadramento, ottobacias.

The present work aims to propose a methodology to support the future process of framing surface watercourses in the Piauitinga river basin, based on the concomitant application of water quality modeling and quality retention curves. Two conditions were established for water quality simulations, the current condition being 0% efficiency and the second considering an efficiency of 70% removal of biochemical oxygen demand (BOD), considering the scenarios of occurrence and non-occurrence of self-purification, for the year 2024. Total loads of BOD_{5,20} were estimated in the basin's ottobasins, at level 6, considering domestic sewage and industrial effluents as polluting sources. Using the QUAL-UFMG model, the BOD_{5,20} and Dissolved Oxygen (DO) profiles were simulated along the Piauitinga River. The quality retention curves for the BOD_{5,20} parameter were constructed for freshwater rivers, classes 1, 2 and 3. The self-purification capacity of the Piauitinga river allowed a reduction of over 25% of the total BOD_{5,20} load, indicating the need to expand the coverage of sewage treatment services in the study area. The results demonstrate that the adopted methodology proved to be adequate to assist the process of framing water bodies.

Keywords: self-depuration, framework, ottobasins.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história da civilização humana, tem se observado que os modelos de desenvolvimento estão pautados na apropriação dos recursos naturais como principal meio para o seu crescimento econômico, resultando na sua degradação em diversas escalas e magnitudes, gerando em longo prazo a sua escassez [1, 2]. Nesse sentido, em decorrência dessa realidade os

sistemas aquáticos têm sido significativamente afetados pelas atividades humanas que causam a deterioração da qualidade da água, diminuindo a sua disponibilidade e reduzindo a capacidade de suporte da vida aquática, comprometendo a resiliência das águas e a geodinâmica das bacias, levando ao agravamento do estado de conservação dos recursos naturais [3-5].

Desse modo, utilizar a bacia hidrográfica como unidade de planejamento é uma importante ferramenta para o gerenciamento dos recursos hídricos, pois a sua caracterização através da integração dos aspectos físico, ecológico, socioeconômico e hidroclimatológico proporciona uma visão abrangente e sistêmica dos processos naturais e antrópicos que ocorre no território, sendo uma unidade territorial, primordial para regular e controlar o uso, além de preservar e recuperar os recursos hídricos. E a adequação da gestão dos recursos hídricos é um tema recorrente na atualidade, uma vez que a disponibilidade da água, em especial para fins nobres como abastecimento humano, tem sofrido restrições significativas em função do comprometimento de seus aspectos qualitativo e quantitativo [6, 7].

Diante da vulnerabilidade dos ecossistemas aquáticos e de uma situação de perigos existentes ameaçando a integridade quantitativa e qualitativa das águas, necessita-se de ferramentas que consigam fornecer uma resposta rápida sobre a bacia para apoiar as análises e decisões dos gestores. No entanto, para cada finalidade, pode-se ter uma ferramenta com nível de incerteza aceitável, desde que seja usada para os fins para os quais foi criada [7].

Dentre algumas destas ferramentas, estão os modelos hidrológicos que são desenvolvidos para melhor compreender e representar o comportamento da bacia, além dos modelos matemáticos de qualidade das águas os quais se mostram ferramentas para suporte à decisão no gerenciamento dos recursos hídricos [8]. Além disso, as curvas de permanência de qualidade da água indicam o comportamento dos cursos d'água e o atendimento das concentrações de parâmetros de qualidade às metas estabelecidas no processo de enquadramento. Nesse sentido, a utilização conjunta destas ferramentas é de grande importância para suporte à decisão na gestão de recursos hídricos principalmente na implementação do instrumento de gestão enquadramento dos corpos d'água. Contudo, ainda são poucos os estudos empregando conjuntamente modelos de qualidade das águas e curvas de permanência [9-11].

Diante desse contexto, este trabalho tem por objetivo propor uma metodologia para subsidiar o processo futuro de enquadramento dos cursos d'água superficiais da bacia do rio Piauitinga, baseada na análise conjunta de informações resultantes da aplicação do modelo matemático de qualidade de água QUAL-UFMG e das curvas de permanência de qualidade aplicados ao rio principal dessa bacia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Piauitinga se constitui em parte integrante da bacia hidrográfica do rio Piauí, localizada na porção Centro-Sul do estado de Sergipe (Figura 1). Possui área de 461,33 km² e abrange parcialmente cinco municípios: Estância, Boquim, Itaporanga d'Ajuda, Lagarto e Salgado, os quais ocupam, respectivamente, 36%, 3%, 1%, 17% e 43% da área total da bacia. Dentre os vários usos dos recursos hídricos nessa bacia, destaca-se os abastecimentos público e industrial. O primeiro se dá por meio de captações localizadas no rio Piauitinga, visando o atendimento das cidades de Estância, através do Serviço Autônomo de Água e Esgoto – SAAE deste município, e de Simão Dias, Lagarto, Riachão do Dantas, Pedrinhas e Boquim e povoados atendidos pelo Sistema Integrado de Abastecimento d'Água do Piauitinga, operado pela Companhia de Saneamento de Sergipe – DESO. O segundo, que também é realizado a partir de captações no rio Piauitinga, visa o atendimento da demanda proveniente de um polo industrial localizado na cidade de Estância [12].

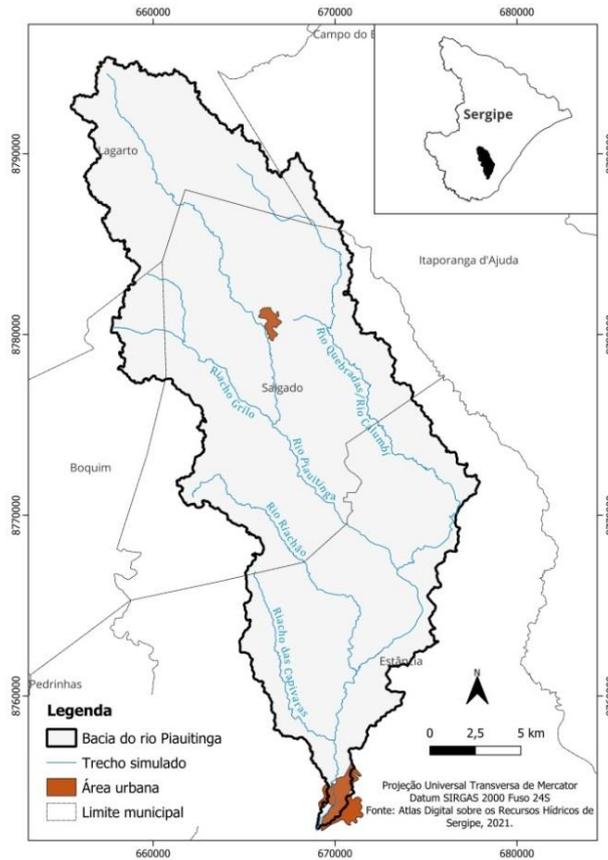


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Piauitinga, em Sergipe.

2.2 Determinação das cargas poluidoras

A Demanda Bioquímica de Oxigênio, medida durante um período de 5 dias a uma temperatura de 20°C (DBO_{5,20}), foi o parâmetro selecionado para representar as cargas poluidoras, tendo em vista que o estudo considerou as cargas provenientes de esgotamento doméstico e de efluentes industriais.

As cargas correspondentes ao esgotamento doméstico foram calculadas com base na estimativa populacional, enquanto as cargas dos efluentes industriais foram obtidas a partir do cadastro de declarações de cargas poluidoras existente na Secretaria do Meio Ambiente, Sustentabilidade e Ações Climáticas – SEMAC, órgão gestor de recursos hídricos do Estado.

A população, urbana e rural, da bacia do rio Piauitinga foi estimada a partir da sobreposição dos limites dos setores censitários estabelecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Pesquisa (IBGE) sobre a base de ottobacias, no nível 6, adotada pela SEMAC, através do software QGIS (Figura 2).

Utilizou-se os dados dos setores censitários relativos ao CENSO 2010 [13]. Através da superposição dos arquivos, as áreas dos setores censitários contidos nas nove ottobacias integrantes da bacia em estudo foram identificadas e calculadas. Nos casos em que o setor censitário não estava contido integralmente na área da ottobacia, a população residente na fração do setor censitário foi estimada pela Equação 1:

$$P_{otto} = \left(\frac{\text{Área da fração do setor censitário contida na ottobacia}}{\text{Área total do setor censitário}} \right) \times P_{sc} \quad (1)$$

onde P_{otto} indica a população residente na fração do setor censitário contida na área da ottobacia (hab) e P_{sc} , a população contida no setor censitário (hab).

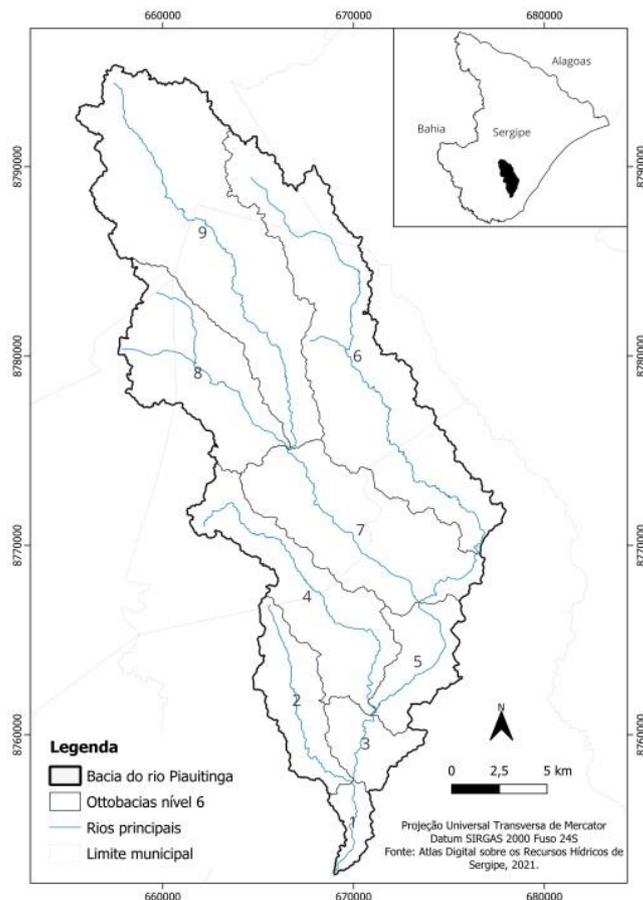


Figura 2 – Bacias otocodificadas, no nível 6, na bacia hidrográfica do rio Piauitinga, em Sergipe.

As projeções de crescimento populacional para o ano de 2024, ano selecionado para o estudo, foram realizadas por meio da aplicação das taxas médias de crescimento geométrico anual (entre os anos de 2010 e 2022) aos municípios da região de estudo: Lagarto (0,57%), Salgado (0,39%), Boquim (-0,30%), Itaporanga d’Ajuda (1,03%) e Estância (0,09) [14].

As vazões médias de esgotos domésticos gerados pela população, rural e urbana, foram estimadas, para cada otobacia, pela Equação 2 [15]:

$$Q_{(u,r)} = P_{(u,r)} \cdot QPC \cdot R \quad (2)$$

onde $Q(u,r)$ representa a vazão média de esgotos domésticos inerentes à população, urbana ou rural (L/dia); $P(u,r)$, a população, urbana ou rural (habitantes); QPC , a cota per capita de água (L/hab.dia) e R , o coeficiente de retorno esgoto/água.

Assumiu-se para o coeficiente de retorno, o valor de 0,8. Para os valores de QPC , adotou-se os valores médios relativos às faixas típicas de consumo per capita de acordo com o porte da população, conforme indicado por von Sperling (2014) [15] (Tabela 1).

Tabela 1 – Faixas típicas de consumo per capita de água. Fonte: von Sperling (2014) [15.]

Porte da comunidade	Faixa de população	QPC (L/hab.d)
Povoado rural	< 5.000	90 – 140
Vila	5.000 – 10.000	100 – 160
Pequena localidade	10.000 – 50.000	110 – 180
Cidade média	50.000 – 250.000	120 – 220

Para a estimativa das cargas diretas de $DBO_{5,20}$ no esgoto doméstico, relativa à população, rural e urbana, em cada ottobacia, foi utilizada a Equação 3 [15]:

$$CDr_{(DBO_{5,20})} = Q_r \cdot cb_{(DBO_{5,20})} \cdot 10^{-9} \quad (3)$$

onde, $CDU_{(u,r)}$ indica a carga de $DBO_{5,20}$ no esgoto doméstico relativo à população, urbana ou rural (t $DBO_{5,20}$ /dia) e $cb_{(DBO_{5,20})}$, a concentração de $DBO_{5,20}$ no esgoto doméstico (mg/L).

Na determinação das cargas de $DBO_{5,20}$, considerou-se duas condições:

- Condição 1: não há remoção de cargas, portanto, eficiência de remoção de 0%. Refere-se à situação atual da bacia do rio Piauitinga, ou seja, condição de lançamento de esgoto doméstico bruto, uma vez que não há informações consistentes sobre esgotamento sanitário nas áreas urbanizadas dos municípios pertencentes a essa bacia. Adotou-se o valor de 400 mg/L para a concentração de $DBO_{5,20}$ nessa condição. Segundo von Sperling (2014) [15], esse valor corresponde ao limite superior da faixa de concentração de $DBO_{5,20}$, característico de esgoto doméstico bruto.
- Condição 2: eficiência de 70% para remoção de cargas de $DBO_{5,20}$ (ou seja, concentração de $DBO_{5,20}$ igual a 120 mg/L). Refere-se à situação na qual se assume que 100% da população urbana seria atendida com serviço de coleta e tratamento de esgoto.

2.3 Análise da capacidade de autodepuração do rio Piauitinga

A avaliação da capacidade de autodepuração foi realizada por meio do modelo matemático de qualidade de água QUAL-UFMG, detalhadamente apresentado e discutido por von Sperling et al. (2014) [15]. Este modelo segue o modelo Qual2E da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), sendo desconsiderados o módulo de algas e suas inter-relações com os demais constituintes e a dispersão longitudinal [15].

No presente estudo, o modelo foi utilizado para simulação dos perfis de $DBO_{5,20}$ e de Oxigênio Dissolvido (OD) ao longo do rio Piauitinga, assumindo-se sistema hídrico funcionando em regime permanente.

Ressalta-se que a modelagem foi conduzida considerando-se apenas o processo de autodepuração no rio Piauitinga, tendo em vista a indisponibilidade de alguns parâmetros necessários à estimativa das características hidráulicas dos tributários, as quais são requeridas no processo de simulação.

Para simulação das concentrações de $DBO_{5,20}$ ao longo do rio Piauitinga foram considerados os fenômenos de desoxigenação associados à oxidação da matéria orgânica e de remoção da DBO em função da sedimentação, bem como as contribuições de cargas provenientes das ottobacias dos tributários do rio Piauitinga, no caso, as cargas de DBO advindas de esgoto doméstico produzido pela população rural, visto que não há núcleos urbanos nelas localizados. Já para a simulação das concentrações de OD foram consideradas a reaeração atmosférica e desoxigenação produzida pela oxidação da matéria orgânica.

Como dados de entrada necessários à modelagem, tem-se:

- Temperatura, OD e $DBO_{5,20}$: atribuiu-se os valores de 25°C, 7,2 mg/L e 7,09 mg/L, respectivamente, os quais se constituem em valores médios referentes à estação DESO-SIP (F37), localizada a 19,7 km da nascente do rio Piauitinga e integrante da Rede Estadual de Qualidade de Água (REQUA), relativos ao período de 2012 a 2023.
- Saturação de OD: 8,11 mg/L, estimado a partir dos valores médios de altitude e temperatura.
- Características hidráulicas do rio Piauitinga (relações entre vazão e velocidade e entre vazão e profundidade) para definição dos coeficientes das equações de velocidade e profundidade estabelecidas a partir de registros de medições de vazão realizadas na estação fluviométrica Estância, de responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a qual se localiza no exutório do rio Piauitinga;

- Coeficiente de desoxigenação atmosférica (K_1): 0,40, curso d'água recebendo esgoto bruto concentrado;
- Constante de desoxigenação (K_d): 0,5, valor típico geralmente utilizado na literatura técnica corrente (considerado conservador em termos de abatimento de carga);
- Constante de sedimentação (K_s): 0,10, valor para rios rasos (varia segundo a profundidade média dos canais);
- Vazão doméstica de esgotos das populações urbanas (Estância e Salgado): calculado pela Equação 2;
- Concentração de $DBO_{5,20}$ no esgoto bruto de origem doméstica: 400 mg/L, conforme descrito anteriormente.

As simulações foram conduzidas com base no valor médio da vazão de referência com garantia de 90% (Q_{90}), obtida a partir da série de vazões diárias registradas na estação fluviométrica Estância. As vazões de referência Q_{90} relativas aos tributários do rio Piauitinga foram estimadas utilizando-se o conceito de descarga específica – o qual admite que as bacias otocodificadas em estudo possuem características homogêneas – tendo como base, os dados oriundos da estação fluviométrica Estância.

A construção do modelo hidráulico envolveu a segmentação do rio Piauitinga em elementos computacionais (unidades de integração) com 100 m de comprimento.

A vazão incremental específica foi estimada como sendo o resultado da divisão da diferença entre as vazões Q_{90} na seção final do trecho (exutório do rio Piauitinga) e na cabeceira do sistema hídrico e o comprimento do rio Piauitinga (59 km). A partir dela, considerando-se a unidade de integração supramencionada, obteve-se como vazão incremental, o valor de 0,00164 m³/s.

A carga incremental produzida pela população rural foi estimada, como sendo o resultado da divisão da carga de $DBO_{5,20}$ relativa à população rural e a extensão total dos cursos d'água, representando as cargas contidas na área de contribuição de cada otobacia.

Os trechos simulados foram caracterizados pela contribuição de fontes do tipo pontual, representadas pela contribuição dos tributários (riacho Grilo, rio Quebradas, rio Riachão e riacho das Capivaras) em suas respectivas otobacia, pelos esgotos domésticos brutos dos dois núcleos urbanos situados na bacia (Salgado e Estância) e pelos efluentes de duas indústrias têxteis (Figura 3).

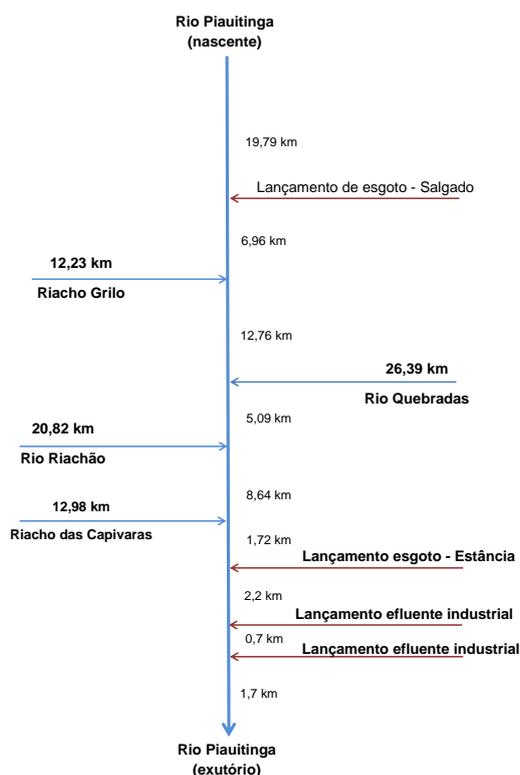


Figura 3 – Diagrama unifilar da bacia do rio Piauitinga, em Sergipe.

Para a realização da modelagem foram assumidos cenários associados ao abatimento de cargas, considerando duas condições de autodepuração:

- Cenário 1: não se considera o processo de autodepuração de carga orgânica (Kd e Ks nulos).
- Cenário 2: o processo de autodepuração foi incorporado, ocorrendo redução da carga orgânica (Kd e Ks estimados, conforme descrito anteriormente). Neste cenário, devido ao processo de autodepuração, parte da carga de DBO inicial é assimilada pelo corpo hídrico, outra parte continua remanescente.

Ressalta-se que a incorporação do cenário 1 na análise foi realizada reproduzindo a perspectiva adotada por Calmon et al. (2014) [16], considerada ambientalmente mais conservadora. Dessa forma, as duas condições de análise foram estabelecidas para que fosse possível analisar a influência do processo de autodepuração no abatimento da carga orgânica, que consequentemente impactará na perspectiva de enquadramento dos corpos d'água estudados.

2.4 Curvas de permanência de qualidade para o parâmetro DBO_{5,20}

As curvas de permanência de qualidade foram elaboradas por meio da Equação 4:

$$Cad_{(DBO_{5,20})} = Q_{CPV} \cdot C \cdot 0,0864 \quad (4)$$

onde $Cad_{(DBO_{5,20})}$ representa a carga máxima admissível de DBO_{5,20} no rio (t DBO_{5,20}/dia); Q_{CPV} , as vazões da curva de permanência de vazões do rio (m³/s) e C, a concentração de DBO_{5,20} referente aos padrões ambientais estabelecidos pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA nº 357/2005 [17]. Para os rios de água doce, como é o caso do rio Piauitinga, essa Resolução estabelece para as classes 1, 2 e 3, os valores de 3, 5 e 10 mg/L, respectivamente.

Por meio da intercessão entre as curvas de permanência com as retas representativas das cargas totais (nas quais não é considerada a autodepuração – Cenário 1) e remanescentes (nas quais é considerada a autodepuração – Cenário 2), é possível verificar as frequências de atendimento aos padrões de qualidade relativos ao parâmetro DBO_{5,20} nas diferentes classes de qualidade de água doce estabelecidas pela Resolução supramencionada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

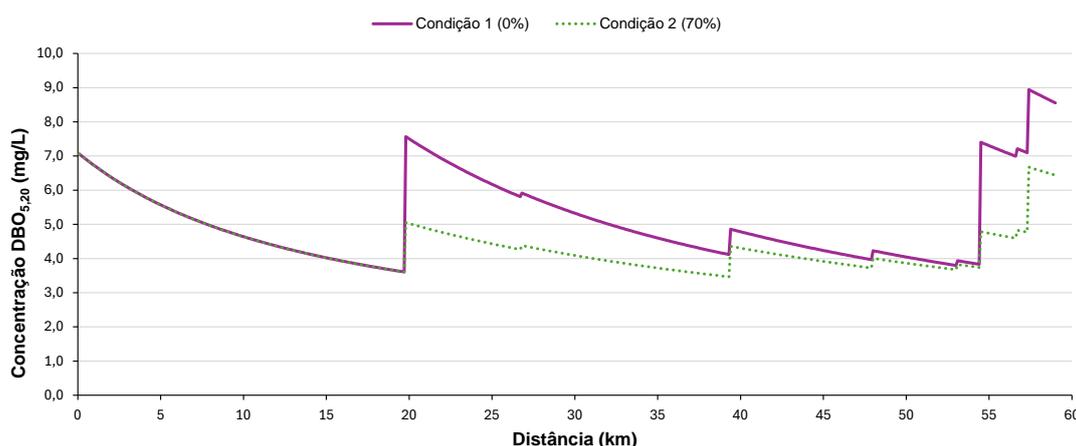
A Tabela 2 apresenta as cargas totais de DBO_{5,20} associadas às ottobacias da bacia do rio Piauitinga, oriundas do lançamento de esgoto doméstico bruto (Condição 1), sem considerar o abatimento da carga orgânica pelo processo de autodepuração (Cenário 1). É possível observar que a condição atual da bacia do rio Piauitinga indica que as maiores contribuições para carga de DBO_{5,20} advêm das ottobacias 1 e 9, uma vez que estas abrangem a população urbana da bacia. Nessas ottobacias, as cargas de DBO_{5,20} produzidas representam, respectivamente, 34,5% e 41,8% da carga total. Pode ser observado na Tabela 2, contudo, que a população da bacia em estudo é predominantemente rural.

Tabela 2 – Cargas totais de $DBO_{5,20}$ associadas às ottobacias do rio Piauitinga, em Sergipe, para o ano de 2024.

Ottobacia	População (hab)		Carga totais (t $DBO_{5,20}$ /dia)	
	Urbana	Rural	Urbana	Rural
1	15.862	0	0,609	0
2	0	702	0	0,020
3	818	235	0	0,011
4	0	1.404	0	0,040
5	0	472	0	0,014
6	0	4.665	0	0,135
7	0	2.782	0	0,080
8	0	3.136	0	0,090
9	6.506	16.896	0,256	0,481
Total	23.186	30.292	0,896	0,872

Considerando-se o cenário de abatimento de carga orgânica (Cenário 2) foram gerados perfis de concentração $DBO_{5,20}$ para as condições 1 e 2, os quais podem ser vistos na Figura 4. Observa-se que elevações nos perfis estão associadas a lançamento de esgoto doméstico da área urbana de Salgado (localizado a 19,79 km à jusante da nascente do rio Piauitinga), esgoto doméstico bruto associado às áreas urbanas de Estância, seguido pelos lançamentos de efluentes industriais próximo ao exutório do rio. A entrada do riacho Grilo (km 39,51) contribuiu para o decaimento da concentração do esgoto doméstico produzido, pela população urbana de Salgado, cuja contribuição foi a que produziu uma das maiores variações nos perfis de DBO nos trechos do rio estudado. O rio Quebradas, levou a um pequeno incremento na elevação no valor da concentração de $DBO_{5,20}$ no rio Piauitinga, produzindo valores não superiores a 5 mg/L.

No rio Piauitinga, aumentos expressivos ocorrem no trecho que possui influência da área urbana e distrito industrial de Estância, o lançamento de esgoto bruto produzido pelas populações urbanas de Estância, seguido pelo lançamento de efluentes industriais conduziu a maior concentração estimada como o auxílio do modelo de qualidade de água que foi de 8,9 mg/L.

Figura 4 – Perfis de concentração de $DBO_{5,20}$ simulados para o rio Piauitinga, em Sergipe, no ano de 2024 (Cenário 2).

Na Tabela 3 apresenta-se os valores de carga de $DBO_{5,20}$ estimados para as 4 combinações de situações simuladas, considerando-se as condições 1 e 2 e cenários 1 e 2. Verifica-se que, independentemente da condição simulada, houve uma redução de 26,08% e 28,41% nas cargas de $DBO_{5,20}$, para as condições atuais (0% eficiência) e 70% de eficiência, respectivamente, demonstrando a relevância do fenômeno de autodepuração no abatimento dos compostos orgânicos eventualmente despejados nos corpos d'água.

Tabela 3 – Valores de cargas de $DBO_{5,20}$ em função das situações de simulação consideradas.

Eficiência (%)	Tipos de carga $DBO_{5,20}$	Carga $DBO_{5,20}$ (t $DBO_{5,20}$ /dia)	Percentual de redução de carga $DBO_{5,20}$ pela autodepuração (%)
Condição 1 (Atual) (0%)	Carga total (Cenário 1)	2,19	26,08
	Carga remanescente (Cenário 2)	1,62	
	Carga assimilada	0,57	
Condição 2 (70%)	Carga total	1,39	28,41
	Carga remanescente	1,00	
	Carga assimilada	0,39	

Em geral, estas curvas de permanência são elaboradas no intuito de estimar a probabilidade de compatibilidade entre as condições de qualidade nas seções de controle com os padrões de qualidade ambiental para assegurar os usos da água na bacia, similarmente uma ferramenta desenvolvido pela EPA o TMDL (*total maximum daily load*) - carga total máxima desenvolvido pela EPA também visa permitir a melhoria contínua dos ecossistemas aquáticos das bacias hidrográficas, bem como auxiliar na efetivação do processo de enquadramento [18]. Contudo, tendo em vista que os cursos d'água da bacia em estudo ainda terem seu enquadramento efetivado, as curvas serviram para identificar a probabilidade de permanência do rio Piauitinga em diferentes classes de uso, de acordo com as cargas estimadas e auxiliar em um processo futuro de enquadramento.

A partir da construção das curvas de permanência de vazão, foram estabelecidas as curvas de permanência de qualidade para o parâmetro $DBO_{5,20}$ associadas às classes 1, 2 e 3 de água doce, considerando-se o Cenário 1 (Figura 5) e Cenário 2 (Figura 6). Na Figura 5 estão indicados os percentuais de permanência correspondentes à intercessão das curvas relativas às classes 1, 2 e 3 com as retas correspondentes às cargas decorrentes do lançamento do esgoto bruto (Condição 1) e do esgoto com 70% de eficiência no tratamento (Condição 2), não considerando a autodepuração (Cenário 1). Quando ocorre a disposição de efluentes brutos (Condição 1), observou-se permanência de apenas 52,19% na classe 3 e 65,42%. Adicionalmente, a reta toca as curvas de qualidade referente às Classes 1 e 2 em permanência inferior a 9% e 20% do tempo, respectivamente. No caso da Condição 2, o rio apresenta um valor de permanência inferior a 15% na classe de uso 1; já para as classes 2 e 3, a permanência em condição de qualidade compatíveis foi de 31,47 e 65,42%, respectivamente.

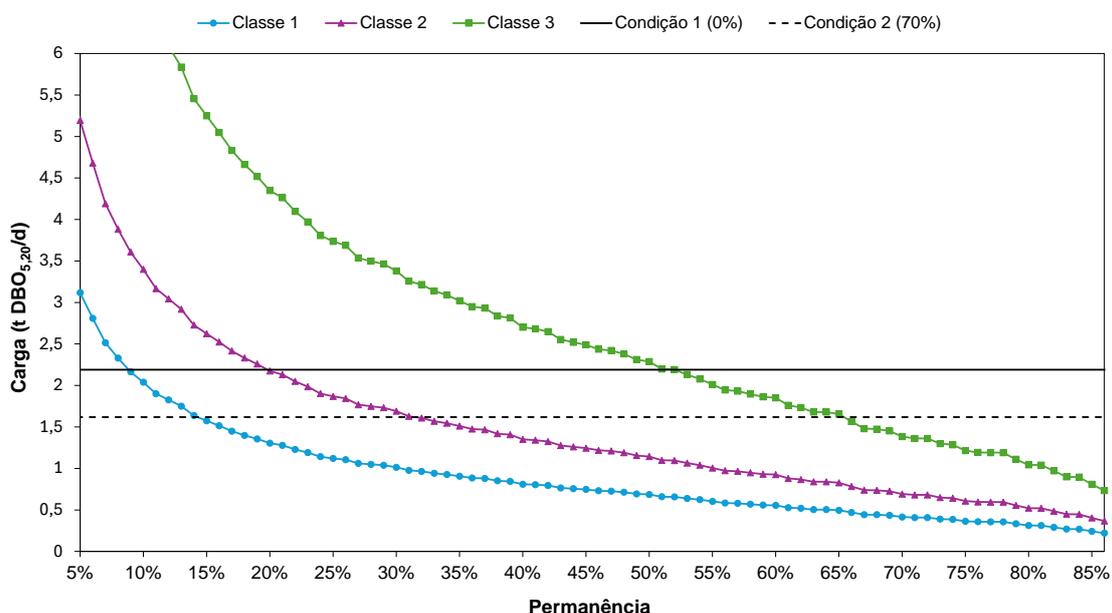


Figura 5 – Permanência nas classes de enquadramento, sem consideração de autodepuração (Cenário 1), no rio Piauitinga, em Sergipe.

Quando incorporado o processo de autodepuração (Figura 6), o rio passou a atender à condição de qualidade da classe 3 em torno de 69,92% do tempo, quando observado o estado atual da bacia (Condição 1), já quando considerou-se a eficiência de 70% na remoção das cargas de $\text{DBO}_{5,20}$ (Condição 2), o tempo de permanência na classe 3 foi superior a 80%.

A bacia apresentou qualidade compatível à classe 2 no cenário atual (Condição 1) em apenas 18,21% do tempo, já em relação a curva de classe 1, a reta intercepta a curva em permanência de 39,30%. Quando se considera o lançamento de efluente tratado com eficiência de 70% (Condição 2), a bacia passou a atender à condição de classe 1 em 30,51% do tempo e de classe 2 em 55,32% do tempo.

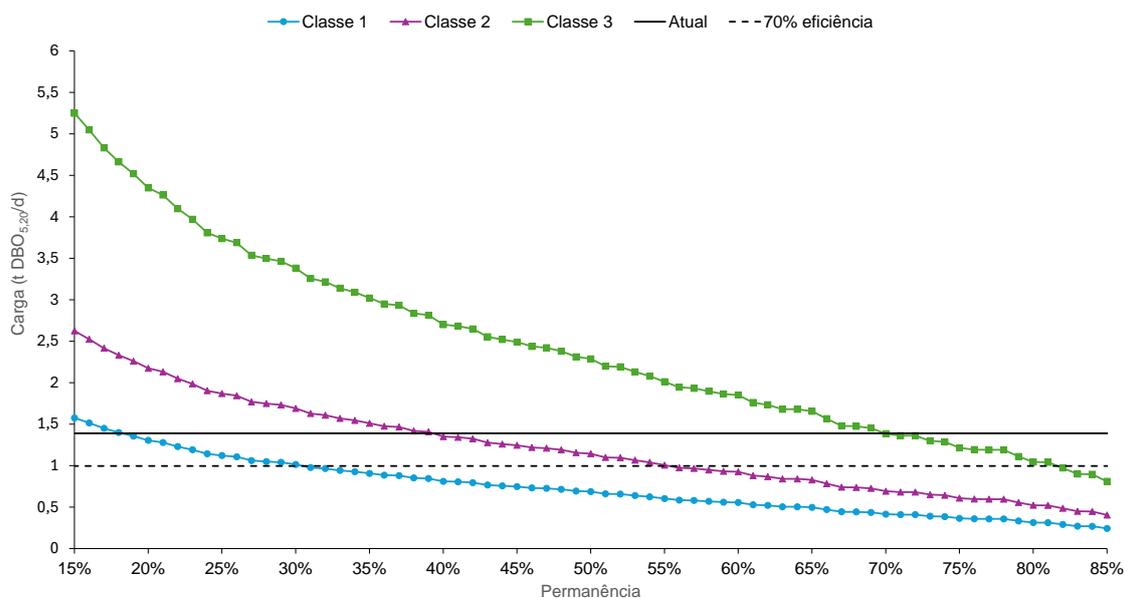


Figura 6 – Permanência nas classes de enquadramento, considerando a autodepuração (Cenário 2), no rio Piauitinga, em Sergipe.

Estudos desenvolvidos por diversos autores mostram que a utilização de curvas de permanência é viável e de grande importância para auxílio nos programas de gerenciamento dos recursos hídricos, bem como para avaliar o estabelecimento de metas para efetivação do enquadramento dos corpos de água [19, 20]. De acordo com Rodrigues et al. (2022) [19] e Conceição et al. (2023) [11] a integração das curvas de permanência aos modelos de qualidade das águas são importantes ferramentas, as quais fornecem subsídios para o gerenciamento de recursos hídricos, facilitando a verificação de atendimento aos padrões de qualidade da legislação vigente, além de permitir o estabelecimento de cenários ambientais.

A Tabela 4 apresenta-se um resumo dos percentuais de permanência no tempo considerando-se as quatro situações de simulações contempladas no estudo. Observa-se que os percentuais de permanência no tempo variaram de 8,84 a 78,1%. Os percentuais de permanência aumentaram naquelas simulações onde foram consideradas o processo de autodepuração (Cenário 2), eficiência de 70% na remoção das cargas de $\text{DBO}_{5,20}$ (Condição 2) e classes de uso menos restritivas. A permanência na Classe 1 somente é atingida com permanência superior a 25%, quando se considera o Cenário 2 (com autodepuração), no entanto, com permanência baixa. A permanência no tempo relativa à Classe 2, que se apresenta como aquela compatível com os atuais usos da água ao longo do rio, resultou em tempos inferiores a 54% em quaisquer das situações simuladas.

Tabela 4 – Percentuais de permanência no tempo considerando-se as quatro situações de simulações.

	Cenário 1 (%)			Cenário 2 (%)		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Condição 1	8,84	19,82	52,19	18,21	39,30	69,92
Condição 2	14,30	31,47	65,42	30,51	55,32	81,65

Os resultados observados demonstram a relevância das ferramentas de modelagem matemática e o estudo do comportamento das curvas de permanência em diferentes cenários relativos aos níveis percentuais de tratamento de esgotos industriais e domésticos, os quais permitiram observar a importância de investimentos necessários para melhorar a qualidade da água e, além de futuramente ocorrer a necessidade de limitar a emissões de outorga e aumentar o preço da cobrança pelo uso da água.

De acordo com o estudo de Machado et al. (2019) [21] a curva de permanência de qualidade é uma das principais metodologias utilizadas no monitoramento da efetivação do enquadramento, a qual pode fornecer diferentes cenários de qualidade da água permitindo assim uma melhoria contínua na gestão de recursos hídricos, principalmente em relação ao instrumento enquadramento. Segundo Costa et al. (2019) [22] através da efetivação do enquadramento este instrumento pode funcionar como um processo de reabilitação dos rios, assegurando acesso os usos múltiplos da água.

4. CONCLUSÃO

A capacidade de autodepuração do rio Piauitinga permitiu a redução acima de 25% da carga total de $DBO_{5,20}$ aportada ao mesmo. Contudo, apenas os efeitos de autodepuração não são suficientes para influenciar na melhoria da qualidade das águas, relativa ao parâmetro $DBO_{5,20}$ desta bacia.

Com o desenvolvimento do presente estudo, pode-se afirmar que o emprego das curvas de permanência de qualidade associadas à modelagem da capacidade de autodepuração dos cursos d'água é de grande importância para a gestão de recursos hídricos, principalmente no processo de tomada de decisão associado ao processo de enquadramento dos corpos d'água, uma vez que se torna possível verificar o atendimento aos padrões de qualidade das diferentes classes de uso, tornando mais claros e consistentes as ações a serem realizadas no âmbito do enquadramento, pelos diferentes atores envolvidos no processo. Adicionalmente, essa ferramenta pode contribuir significativamente no processo de enquadramento, uma vez que permite verificar em que permanência o padrão de qualidade da classe foi respeitado, além de apenas avaliar se o padrão foi atendido.

De maneira geral, a implementação de infraestrutura no setor de esgotamento sanitário dos municípios pertencentes à bacia em estudo pode produzir mudanças significativas no que se diz respeito a assegurar às águas, qualidade compatível com os usos mais exigentes a que forem destinadas.

Adicionalmente, algumas recomendações para trabalhos futuros são importantes, como: incorporar na metodologia conduzida para o presente trabalho a análise de incerteza à modelagem de qualidade de água, bem como a avaliação das cargas de $DBO_{5,20}$ a serem tratadas para o estabelecimento de classes de enquadramento, bem como a inclusão de cargas difusas.

5. AGRADECIMENTOS

À Secretária do Estado do Meio Ambiente, Sustentabilidade e Ações Climáticas (SEMACE/SE), à Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC/SE) pelo fomento, que possibilitou o desenvolvimento deste estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Tundisi JG, Tundisi TM. Recursos hídricos no século XXI. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos; 2011.
2. Xavier RA, Camargo VC, Cardoso OR, Tassi R. Eco-hidrologia integrada ao manejo dos recursos hídricos em áreas úmidas: caso do Banhado do Taim, RS. *Eng Sanit Ambient.* 2019 Jan;24(1):187-97. doi: 10.1590/S1413-41522019147356
3. Harding LW, Mallonee ME, Perry ES, et al. Long-term trends, current status, and transitions of water quality in Chesapeake Bay. *Sci Rep.* 2019 Apr;9:6709. doi: 10.1038/s41598-019-43036-6
4. Xu Z, Xu J, Yin H, Jin W, Li H, He Z. Urban river pollution control in developing countries. *Nat Sustain.* 2019 Mar;2:158-60. doi: 10.1038/s41893-019-0249-7
5. Wang J, Liu XD, Lu J. Urban river pollution control and remediation. *Procedia Environ Sci.* 2012;13:1856-62. doi: 10.1016/j.proenv.2012.01.179
6. Tundisi JG, Tundisi TM. Integrating ecohydrology, water management, and watershed economy: Case studies from Brazil. *Ecohydrol Hydrobiol.* 2016;16(2):83-91. doi: 10.1016/j.ecohyd.2016.03.006
7. Calijuri MCC, Cunha DGF. *Engenharia Ambiental: Conceitos, tecnologia e gestão.* 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier; 2013.
8. Tucci CEM. *Modelos hidrológicos.* 2. ed. Porto Alegre (RS): Editora da UFRGS; 2005.
9. Cunha DGF, Calijuri MC, Mendiondo EM. Integração entre curvas de permanência de quantidade e qualidade da água como uma ferramenta para a gestão eficiente dos recursos hídricos. *Eng Sanit Ambient.* 2012 Oct;17(4):369-76. doi: 10.1590/S1413-41522012000400003
10. Ferreira DM, Fernandes CVS, Kaviski E. Curvas de permanência de qualidade da água como subsídio para o enquadramento de corpos d'água a partir de modelagem matemática em regime não permanente. *RBRH.* 2016 Jul;21(3):479-92. doi: 10.1590/2318-0331.011615143
11. Conceição G, de Miranda Jr GX, Oliveira JLR. Avaliação integrada da curva de permanência da vazão fluvial e da carga de fósforo em bacia hidrográfica rural. *Braz J Anim Environ Res.* 2023;6(3):2747-55.
12. Sergipe. Superintendência de Recursos Hídricos. Atlas digital sobre os recursos hídricos de Sergipe. Aracaju (SE): Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos; 2021.
13. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [Internet]. Bases e referências – bases cartográficas – malhas digitais; 2010 [acesso em ago 2024]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/26565-malhas-de-setores-censitarios-divisoes-intramunicipais.html>
14. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Sinopse do Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE; 2011.
15. von Sperling M. *Estudos e modelagem da qualidade da água de rios.* 2. ed. Belo Horizonte (MG): Editora UFMG; 2014.
16. Calmon APS, Souza JC, dos Reis JAT, Mendonça ASF. Subsídios para o enquadramento dos cursos de água da bacia hidrográfica do Rio Itapemirim considerando aportes de esgotos sanitários. *RBRH.* 2016 Jan;21(1):118-33. doi: 10.21168/rbrh.v21n1.p118-133
17. Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). 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 (DF): Diário Oficial da União; 2005. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf
18. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Technical guidance manual for developing total maximum daily loads. Book II: Streams and rivers. Part 1: Biochemical oxygen demand/dissolved oxygen and nutrients eutrophication. Washington (US): USEPA; 1997. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-12/documents/technical-guidance-tmdl-book2.pdf>
19. Rodrigues MB, dos Reis JAT, Sá GLN, Almeida KN, Mendonça ASF. Perspectivas para revisão do enquadramento da bacia hidrográfica do Rio Benevente pelo emprego de curva de permanência e modelagem da qualidade da água. *Eng Sanit Ambient.* 2022 Jul;27(4):831-43. doi: 10.1590/S1413-415220210295
20. Calmon APS, Souza JC, dos Reis JAT, Mendonça ASF. Uso combinado de curvas de permanência de qualidade e modelagem da autodepuração como ferramenta para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água superficiais. *RBRH.* 2016 Jan;21(1):118-33. doi: 10.21168/rbrh.v21n1.p118-133
21. Machado ES, Knapik HG, de Bitencourt CCA. Considerações sobre o processo de enquadramento de corpos de água. *Eng Sanit Ambient.* 2019 Mar;24(2):261-9. doi: 10.1590/S1413-41522019181252
22. Costa DA, Assumpção RSFV, de Azevedo JPS, dos Santos MA. Dos instrumentos de gestão de recursos hídricos - o Enquadramento - como ferramenta para reabilitação de rios. *Saúde Debate.* 2019 Dec;43(spe3):35-50. doi: 10.1590/0103-11042019S303