



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 2 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n2ID35630>



Estimativa da qualidade das águas das vertentes do Rio Grande – Brasil em diferentes cenários: modelagem das variáveis DBO e OD utilizando o Qual-UFMG

Estimation of the water quality of the Rio Grande-Brazil slopes in different scenarios: modelling of the BOD and DO variables using Qual-UFMG

Clécio Eustáquio Gomides¹; Mateus Pimentel de Matos²; Ronaldo Fia³; Alysson Rodrigo Fonseca⁴

¹ UEMG, DECP, Divinópolis/MG, Brasil. Email: cleciogomides@yahoo.com.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8566-2913>

² UFLA, Departamento de Engenharia Ambiental, Lavras/MG, Brasil. Email: mateus.matos@ufla.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8384-7466>

³ UFLA, Departamento de Engenharia Ambiental, Lavras/MG, Brasil. Email: ronaldofia@ufla.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6824-0869>

⁴ UEMG, Departamento de Ciências Naturais e da Terra, Divinópolis/MG, Brasil. Email: Alysson.silva@uemg.br

ORCID: <https://orcid.org/0000000275108142>

Resumo: Este trabalho objetivou avaliar e aplicar uma metodologia de modelagem de qualidade das águas, na gestão de recursos hídricos, avaliando dentre outras coisas, a eficácia das obrigações previstas na legislação, frente aos usos previstos na bacia. Utilizou-se como estudo de caso a bacia hidrográfica brasileira GD2, considerando os lançamentos de esgoto de 30 municípios. Foram modelados Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Oxigênio Dissolvido (OD), em quatro cenários, utilizando o modelo Qual-UFMG. Nos dois primeiros cenários, que retratam a situação atual e tendencial (2033), verificou-se uma boa condição para a maior parte da bacia, com exceção dos trechos de cabeceira, onde valores preocupantes para DBO e OD foram encontrados. Em C-03 investigou-se os resultados do atendimento da legislação (90% de esgoto coletado e tratado e 70% de remoção de DBO) para 2033. Constatou-se que, para a maior parte das regiões de cabeceira, não será suficiente para garantir os usos previstos, exigindo maiores percentuais de atendimento e eficiência. Em C-04, foram encontradas as eficiências mínimas de remoção de DBO necessárias para atender aos usos previstos. Foram encontrados, em cursos d'água com pequena razão de diluição, eficiências muito elevadas e muitas vezes inalcançáveis, sugerindo a necessidade de outras medidas de controle.

Palavras-chave: Qualidade das águas; modelagem; Qual-UFMG.

Abstract: This work aimed to evaluate and apply a water quality modeling methodology in the management of water resources, evaluating, among other things, the effectiveness of the obligations foreseen in the legislation, in view of the foreseen uses in the basin. The Brazilian hydrographic basin GD2 was used as a case study, considering the sewage releases from 30 municipalities. Biochemical Oxygen Demand (BOD) and Dissolved Oxygen (DO) were modeled in four scenarios, using the Qual-UFMG model. In the first two scenarios, which portray the current and trending situation (2033), a good condition was verified for most of the basin, with the exception of the headwater stretches, where worrying values for BOD and DO were found. In C-03, the results of complying with legislation were investigated (90% of sewage collected and treated and 70% of BOD removal) for 2033. It was found that, for most headwaters regions, it will not be enough to guarantee the expected uses, requiring higher percentages of attendance and efficiency. In C-04, the minimum BOD removal efficiencies necessary to meet the intended uses were found. Very high and often unattainable efficiencies were found in watercourses with a small dilution ratio, suggesting the need for other control measures.

Keywords: Water quality; modelling; Qual-UFMG.

Recebido: 18/03/2024; Aceito: 07/06/2024; Publicado: 10/07/2024.

1. Introdução

O Brasil é um país com dimensões continentais, possuindo uma população aproximada de 213,3 milhões de habitantes (IBGE, 2022). Segundo o Diagnóstico Temático de Serviços de Água e Esgoto (SNIS, 2023), apenas 60,7% do esgoto gerado no país é coletado, sendo que o percentual de tratamento é ainda menor, de 49,6%, com atendimento desigual entre os grandes centros urbanos (maiores porcentagens) e municípios de menor porte (baixo atendimento da população). Como principais consequências do tratamento insuficiente, pode-se citar a depleção dos níveis de oxigênio dissolvido (OD), elevação da turbidez e liberação de odores, afetando a comunidade aquática e que estão relacionados com o despejo de matéria orgânica, representada pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) (MATOS *et al.*, 2017; VON SPERLING, 2014a). Esse um é problema mundial (SEO *et al.*, 2017), porém é principalmente observado nos países em desenvolvimento, com importantes consequências socioeconômicas e ambientais (ASHOURI; RAFEI, 2018; LIANG; YANG, 2019; PUJOL-VILA *et al.*, 2016).

Visando garantir às águas superficiais qualidade compatível com seus usos, de acordo com a sua classe de enquadramento, além do padrão de lançamento de efluentes (MINAS GERAIS, 2022), foi instituída a Lei Federal Nº 14.026 (BRASIL, 2020), que estabelecendo o *novo marco legal do saneamento no Brasil*.

O padrão de lançamento estabelece que todos os despejos líquidos devem ser devidamente tratados, com eficiência mínima de remoção de DBO de 70% (média anual), enquanto que as concentrações de DBO e OD a serem mantidas (ou alcançadas) no curso d'água dependerão da Classe na qual o trecho foi enquadrado. Já o *novo marco legal do saneamento* determina, dentre outras coisas, que os contratos de prestação dos serviços públicos de saneamento básico deverão garantir 90% da população com coleta e tratamento de esgotos até 31 de dezembro de 2033.

Os modelos de qualidade da água são ferramentas importantes para a gestão eficaz dos recursos hídricos, auxiliando na tomada de decisão ao fornecer simulações da qualidade da água para uma variedade de ações de gestão (KAUFMAN *et al.*, 2021; KOO *et al.*, 2020; WHITE *et al.*, 2021). Além disso, esses modelos diminuem a necessidade de coleta e análise de água, reduzindo custos e tempo gasto (BUI *et al.*, 2019; VON SPERLING, 2014b).

A modelagem pode ser utilizada para avaliar a eficácia das medidas propostas e adotadas (KAUFMAN *et al.*, 2021; KOO *et al.*, 2020; WHITE *et al.*, 2021), no caso o padrão de lançamento de efluentes e o novo marco legal do saneamento, na manutenção da qualidade das águas superficiais dentro dos limites previstos para seus usos. No caso específico do Brasil, é utilizado o enquadramento dos cursos d'água em classes, de acordo com seus usos preponderantes, atuais e futuros.

No que se refere especificamente às águas doces, existem 5 classes, fundamentalmente estabelecidas em acordo com os usos preponderantes dos recursos hídricos (BRASIL, 2005; MINAS GERAIS, 2022): A Classe Especial, que não pode receber despejos de esgoto e serve à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e as Classes de 1 à 4, sendo que a primeira tem parâmetros mais restritivos de qualidade e destinação para usos mais nobres, havendo aumento da permissividade de valores das variáveis nas classes seguintes.

No lançamento de águas residuárias em corpo receptor, deve-se observar as eficiências mínimas e as concentrações máximas definidas na legislação, bem como respeitar a não alteração da classe do curso d'água no qual o trecho foi enquadrado, de acordo com os usos pretendidos (Classes 1 a 4). Porém, devido à ineficiência dos serviços de saneamento em muitas localidades, frequentemente o rio já se apresenta em condições inferiores a que deveria apresentar, dificultando o atendimento dos requisitos legais para lançamento do despejo tratado (TEODORO *et al.*, 2013). Esse é o caso de muitas bacias hidrográficas, como da bacia do Rio Grande e de suas unidades de planejamento, tal como a GD2 (Vertentes do rio Grande), com elevado grau de contaminação (em determinados trechos) como observado em estudos como de Amâncio *et al.* (2018) e Menezes *et al.* (2015).

Com a realização do presente trabalho, objetivou-se adaptar, aplicar e avaliar uma metodologia de modelagem matemática de qualidade das águas superficiais, visando, dentre outras coisas, verificar a efetividade das obrigações previstas na legislação ambiental. Como estudo de caso adotou-se uma bacia hidrográfica brasileira (GD2), considerando as condições atual, tendencial e de atendimento à legislação.

Desta forma, objetiva-se, além de identificar as condições atual e tendencial da bacia, verificar se as obrigações presentes no padrão de lançamento de efluentes e no novo marco legal do saneamento serão suficientes para garantir o atendimento ao enquadramento das águas e, conseqüentemente, aos usos preponderantes existentes na bacia. Para isso, o trabalho possibilitou a definição das eficiências mínimas de remoção de DBO necessárias para cada municipalidade, além de concentrações mínimas de OD no efluente tratado em alguns casos.

2. Metodologia

O Brasil possui 8 grandes bacias hidrográficas, sendo que a bacia do rio São Francisco, juntamente com a bacia do rio Paraná, cobrem boa parte da região mais populosa do país. Uma das principais sub-bacias do rio Paraná é a bacia do rio Grande, que está subdividida em 24 Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos – UPGRH (IGAM, 2013). Para o presente trabalho foi escolhida uma dessas unidades de planejamento, denominada de GD2 (Vertentes do rio Grande), que compreende as áreas drenadas pelo rio das Mortes, Jacaré e Cervo.

O GD2 está localizado na Região do Sul de Minas, com ponto mais alto a 1.200 m e mais baixo a 780 m de altitude. O clima é tropical de altitude, com uma estação chuvosa e outra seca, com períodos de estiagem com pouca ou nenhuma pluviosidade. A área da Bacia é de 10.533 km², dividida em 10 Sub-bacias (Figura 01). Em seu interior estão presentes terras de 42 municípios, sendo que desses, 30 lançam ali seus efluentes sanitários (IGAM, 2013).

Na Tabela 01 é apresentado o resumo dos sistemas de esgotamento sanitário na bacia, no qual observa-se que apenas 13 sedes municipais possuem alguma forma de tratamento de esgoto sanitário. Da população urbana total da bacia (541.576 habitantes), 95% é atendida com coleta de esgotos, entretanto, somente 21,7 % do esgoto coletado é tratado antes de seu lançamento nos corpos receptores, situação que se mostra preocupante.

Foram modelados os cursos d'água que recebem despejos de áreas urbanas ou possuem pontos de monitoramento de qualidade de água, estando apresentados na Figura 01, bem como a alocação das sedes municipais com seus respectivos pontos de lançamentos de despejos líquidos. Os cursos d'água modelados estão representados na figura como linhas largas coloridas: verde (classe 1), amarelo (classe 2) e vermelho (classe 3), conforme o enquadramento. Estas são as classes desejadas/necessárias para atender aos usos previstos para as águas superficiais da bacia. Elas foram definidas pelo Comitê de Bacia do GD2 (CBH-GD2, 2018).

As cargas poluidoras consideradas são aquelas relativas aos lançamentos de esgoto sanitário das áreas urbanas dos 30 municípios localizadas no interior da bacia. As vazões consideradas estão apresentadas na Tabela 01. Como não há monitoramento qualitativo sistemático dos esgotos sanitários nos municípios, considerou-se na modelagem os valores típicos reportados na literatura, conforme a Tabela 02.

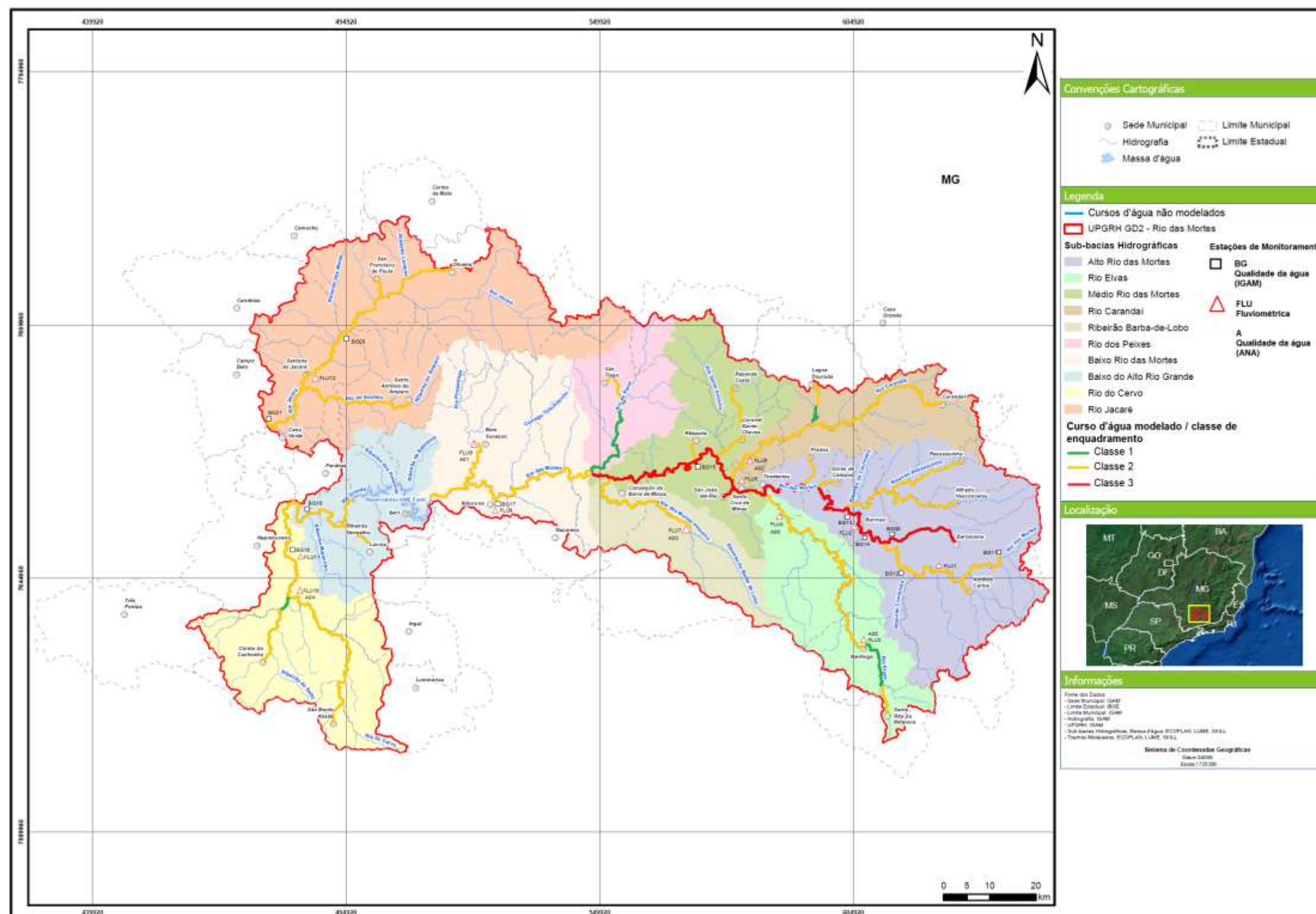


Figura 01 – Bacia hidrográfica, trechos modelados, enquadramento, sedes municipais, estações de qualidade e fluviométricas
Fonte: Adaptado de IGAM (2013)

Tabela 01 – Situação atual de esgotamento sanitário na bacia

Município/Sub-Bacia	População Urbana 2020	Atendimento coleta de esgoto (%)	Q med - esgotos (L.s ⁻¹)		Índice de tratamento (%) *
			Produzido	Coletado	
Bacia do Alto Rio das Mortes					
Alfredo Vasconcelos	4632	100,0	6,29	6,29	0,0
Antônio Carlos	8069	95,0	9,68	9,20	0,0
Barbacena	126477	91,1	122,37	111,48	31,3
Barroso	20236	91,8	39,77	36,51	6,4
Dores de Campos	9297	100,0	17,36	17,36	0,0
Ressaquinha	3091	99,6	3,18	3,17	0,0
Tiradentes	6234	62,8	12,85	8,07	0,0
Prados	6423	97,4	6,01	5,86	100,0
Bacia do Rio das Mortes Pequeno					
Conceição da B. de Minas	2787	61	2,96	1,80	71,8
Bacia do Médio Rio das Mortes					
Coronel Xavier Chaves	1876	100,0	3,52	3,52	0,0
Resende Costa	9280	39,4	11,80	4,65	100,0
Ritópolis	3156	20,0	3,64	0,73	0,0
Santa Cruz de Minas	8664	100,0	28,67	28,67	0,0
São João Del-Rei	85556	99,5	427,98	425,84	3,2
Bacia do Rio Elvas					
Ibertioga	3439	100,0	6,25	6,25	100
Santa Rita do Ibitipoca	2120	90,0	2,48	2,23	0
Bacia do Baixo do Alto Rio Grande					
Ijaci	6323	100,0	11,10	11,10	85,7
Lavras	99846	90,6	132,32	119,88	100,0
Ribeirão Vermelho	3748	100,0	3,59	3,59	0,0
Bacia do Rio Jacaré					
Oliveira	37301	100,0	50,77	50,77	10,0
Santana do Jacaré	4623	100,0	12,72	12,72	0,0
Santo Antônio do Amparo	16297	100,0	18,18	18,18	33,0
São Francisco de Paula	4678	100,0	26,96	26,96	0,0
Bacia do Rio dos Peixes					
São Tiago	8791	63	11,00	6,96	62,5
Baixo rio das Mortes					
Bom Sucesso	14494	99,8	21,14	21,09	100,0
Ibituruna	2598	100,0	3,01	3,01	0,0
Rio Carandaí					
Carandaí	20016	100,0	41,21	41,21	0,0
Lagoa Dourada	7343	90,0	27,75	24,97	0,0
Rio do Cervo					
Carmo da Cachoeira	9228	84,5	11,23	9,49	0,0
São Bento do Abade	4953	100,0	6,98	6,98	0,0

Fonte: SNIS (2021).

* Com relação ao volume de esgoto coletado

Tabela 02 – Caracterização qualitativa média dos esgotos sanitários brutos

Variável	Valor considerado (mg L ⁻¹)
Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO	350
Nitrogênio Orgânico	20
Nitrogênio Amoniacal	30
Oxigênio Dissolvido – OD	0

Fonte: Matos *et al.*, (2017); Von Sperling (2014a)

Optou-se pela utilização do QUAL-UFGM, um modelo bastante utilizado no Brasil, em razão de sua versatilidade e facilidade de utilização, permitindo maior aplicabilidade e boa confiabilidade (SRIKRISHNAN; KELLER, 2021). Consiste em uma plataforma em Excel desenvolvida por von Sperling (2014b), a partir de simplificações do modelo QUAL2E (BROWN; BARNWELL, 1987) e adaptação de suas equações para planilhas eletrônicas (DE OLIVEIRA FILHO; LIMA NETO, 2018; LIMA; MAMEDE; LIMA NETO, 2018). Para simplificação técnica, é excluído do modelo o componente algas e a dispersão longitudinal, uma vez que a advecção é o principal fenômeno de transporte em rios. Os cálculos são feitos considerando a integração numérica pelo método de Euler (TEODORO *et al.*, 2013).

No Qual-UFGM, pode-se avaliar a dinâmica de algumas variáveis, no entanto, o estudo irá se restringir a apenas duas, a Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO e do Oxigênio Dissolvido – OD. A DBO é uma das variáveis mais utilizadas para avaliação da qualidade de água e os impactos causados pelo lançamento de despejos, principalmente em virtude de sua relação direta com o decréscimo do OD. Já OD é de fundamental importância para a manutenção do equilíbrio no ambiente aquático, sendo indispensável para a manutenção de todas as formas de vida aeróbias (MATOS *et al.*, 2017).

Na legislação do estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2022), a eficiência de remoção de DBO média anual deve ser de no mínimo 70%, enquanto que as concentrações de DBO e OD a serem mantidas no curso d'água dependerão da Classe na qual o trecho foi enquadrado.

O processo de decomposição da matéria orgânica na água segue uma reação de cinética de primeira ordem, onde a taxa de redução da matéria orgânica (DBO) é proporcional à concentração do substrato presente no meio (VON SPERLING, 2014a). Segundo Streeter e Phelps (1925), o processo envolve duas equações, relacionadas à dinâmica da concentração de DBO e de OD, que, por sua vez, envolvem os processos físicos, químicos e biológicos no corpo hídrico, como na desoxigenação e reaeração. No Qual-UFGM, o modelo também considera o consumo de OD devido à conversão da amônia a nitrito e deste a nitrato, no chamado processo de nitrificação, consistindo na demanda nitrogenada.

A vazão considerada para diluição de despejos em corpos receptores foi a mínima, média de 7 dias consecutivos, para um tempo de recorrência de 10 anos ($Q_{7,10}$), de acordo com a legislação do Estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2022).

Para a obtenção da $Q_{7,10}$, em cada ponto dos cursos d'água da bacia, utilizou-se a Equação 1, que relaciona a referida vazão com a área de drenagem a montante. Esta equação foi obtida pela ferramenta Hidrotec (UFV, 2009), disponibilizada pela Universidade Federal de Viçosa – UFV, que fez os estudos hidrológicos para as 12 estações fluviométricas existentes dentro da bacia (Figura 01 – Apêndice A).

$$Q_{7,10} = 0,00686 * A^{0,9495} \quad (1)$$

Em que:

$Q_{7,10}$ = Vazão mínima, média de 7 dias, para um tempo de recorrência de 10 anos (m³ s⁻¹);

A = Área de drenagem a montante do ponto (km²);

Salienta-se que, para estudos futuros, seria interessante utilizar séries históricas de vazão mais recentes e obter novas equações para a $Q_{7,10}$, o que aumentaria a segurança e confiabilidade dos resultados.

Já para a definição das velocidades e profundidades a serem adotadas no trabalho, variáveis que irão condicionar os valores dos coeficientes de reaeração (K_2) a serem adotados, foi feita a análise de regressão, para as séries históricas das 12 estações fluviométricas existentes dentro da bacia. Foram considerados os dados dos últimos 10 anos de monitoramento, para o período de estiagem (abril a setembro).

Em relação aos dados de qualidade, utilizou-se dados de 11 estações de monitoramento de qualidade das águas superficiais (Figura 01) operadas pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM (IGAM, 2022) e de 6 estações operadas pela Agência Nacional das Águas – ANA (ANA, 2022), estando os valores médios dos últimos cinco anos, no período de estiagem (abril a outubro), apresentados na Tabela 03.

Tabela 03 – Valores médios para os parâmetros relacionados ao modelo nas estações de monitoramento

Estação	Variáveis (mg L ⁻¹)						Temperatura (° C)
	DBO	OD	N org	N amo	Nitrito	Nitrato	
BG – 08	10,2	6,0	0,87	9,04	0,077	1,87	17,1
BG – 11	2,0	8,1	0,23	0,19	0,008	0,74	16,4
BG – 12	2,0	8,3	0,30	0,25	0,022	1,22	17,1
BG – 13	2,7	7,6	0,45	0,68	0,077	1,81	18,3
BG – 14	2,4	8,4	0,46	0,69	0,086	1,59	17,8
BG – 15	2,1	7,6	0,32	0,38	0,036	0,70	18,9
BG – 17	2,2	8,2	0,24	0,18	0,006	1,10	17,7
BG – 18	2,0	8,8	0,11	0,12	0,002	0,48	17,4
BG – 19	2,0	7,4	0,28	0,20	0,003	0,51	20,7
BG – 20	2,0	7,4	0,31	0,32	0,011	1,02	20,5
BG – 21	2,0	7,9	0,25	0,15	0,002	0,77	20,0
A – 01	-	9,5	-	-	-	-	21,2
A – 02	-	9,9	-	-	-	-	18,9
A – 03	-	9,9	-	-	-	-	18,4
A – 04	-	8,3	-	-	-	-	17,9
A – 05	-	8,5	-	-	-	-	16,3
A – 06	-	9,3	-	-	-	-	18,1

Fonte: Autores (2024)

BG = Estações de Monitoramento do IGAM

A = Estações de Monitoramento da ANA

N org = Nitrogênio orgânico

N amo = Nitrogênio amoniacal

Os dados apresentados na Tabela 03 foram utilizados na calibração do modelo, para a $Q_{7,10}$.

Das estações de monitoramento, a única que se encontra a montante das ocupações urbanas, e por isso, com pouco ou quase nenhum lançamento de despejos, é a BG – 011. Por esse motivo, seus resultados médios de monitoramento foram utilizados como dados de cabeceira, sendo assumidos como valores iniciais, para as variáveis modeladas, nos trechos iniciais dos cursos d'água. A única exceção está para a variável OD, onde considerou-se 90% da concentração de saturação – Cs (VON SPERLING, 2014b).

Para a calibração do modelo utilizou-se o Coeficiente de Determinação – CD, que consiste na relação entre a soma dos resíduos ao quadrado e variância total dos dados observados, conforme a Equação 2;

$$CD = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{obsméd})^2} \quad (2)$$

Onde:

 Y_{obs} = valor observado Y_{est} = valor estimado $Y_{obsméd}$ = média dos valores observados

Foi utilizada a ferramenta Solver do Excel, buscando maximizar CD, variando os coeficientes do modelo dentro das faixas reportadas pela literatura. Para a variável DBO, obteve-se CD = 0,98 (com erro relativo de 0,0691). Já para OD, o CD encontrado foi de 0,77 (com erro relativo de 0,0087). Nos dois casos, o desempenho do modelo foi considerado adequado.

Após a sua calibração, o modelo foi utilizado para fazer simulações para os quatro cenários propostos a seguir, sempre considerando a $Q_{7,10}$ do corpo receptor. No primeiro cenário (C-01), considerou-se as populações, vazões e níveis de coleta e tratamento de esgoto atuais, conforme apresentado na Tabela 01 (SNIS, 2021). No cenário futuro (C-02), projetou-se as populações urbanas dos municípios para o ano de 2033, mantendo-se os atuais índices de coleta e tratamento de esgoto

(Tabela 01). Nos cálculos de projeção populacional, considerou-se os dados dos últimos dois censos demográficos brasileiros, de 2000 e 2020 (IBGE, 2022), aplicando uma progressão geométrica para obter-se a população do ano de 2033.

O terceiro cenário (C-03) consistiu na consideração das populações urbanas projetadas para o ano de 2033 e 90 % de coleta e tratamento de esgotos, conforme determinação do Marco Legal do Saneamento (BRASIL, 2020). Considerou-se uma eficiência, na remoção de DBO, de 70%, visando o atendimento do padrão de lançamento de efluentes. Já no que diz respeito a nitrogênio, como não há limites para esgoto sanitário, considerou-se uma remoção de 30%, compatível com o nível de tratamento secundário. O oxigênio dissolvido – OD, no efluente tratado, foi considerado como zero (VON SPERLING, 2014b).

Por fim, o quarto cenário (C-04) refere-se ao modelo determinístico para encontrar as eficiências necessárias de remoção de matéria orgânica, para que o enquadramento proposto para a bacia (CBH-GD2, 2018), ilustrado na Figura 01, fosse alcançado, considerando a população de 2033. Os valores máximos para DBO e mínimos para OD, para que o curso d'água esteja em cada classe, são apresentados na Tabela 04.

Tabela 04 – Limites para OD e DBO em cada classe de enquadramento

Parâmetros	Classe de enquadramento			
	1	2	3	4
OD (mg/L)	≥ 6,0	≥ 5,0	≥ 4,0	≥ 2,0
DBO (mg/L)	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 10,0	-

Fonte: Brasil (2005); Minas Gerais (2022)

3. Resultados e discussão

A seguir são apresentados os resultados determinísticos do modelo, que se mostraram adequadas para a análise do enquadramento. Uma abordagem probabilística, com análise de incerteza e sensibilidade pode ser consultada em Gomides et al. (2023).

3.1 DBO

Na Figura 03 são apresentadas as condições esperadas para a bacia, para cada um dos quatro cenários estudados, de acordo com as 4 classes de enquadramento.

No C-01, podemos verificar que a maior parte do leito principal do Rio das Mortes, mesmo com as condições atuais precárias de esgotamento sanitário, apresenta ótima qualidade de água, com 91,3% de sua extensão dentro dos limites da Classe 1. Este fato também já foi verificado, em parte da bacia, por Amâncio et al. (2018). Isto se justifica pela sua grande área de drenagem e, conseqüentemente, grande vazão de diluição. O mesmo acontece com o Rio das Mortes Pequeno, Elvas, Pirapetinga e maior parte dos rios do Cervo e Jacaré.

No C-02, com o aumento da população e a manutenção dos atuais níveis de coleta e tratamento de esgoto, verificamos uma redução da Classe 1 e aumento das Classes 2 e 3, entretanto, ainda dentro do proposto no enquadramento para a bacia (Figura 01), já que a maior parte do leito principal do rio das Mortes está enquadrado como Classe 3. Quando se analisa os Cenário 3 e 4, vemos que toda a extensão do leito principal ficaria dentro dos limites da Classe 1. Na Figura 02 são apresentados os perfis longitudinais para os 4 Cenários estudados.

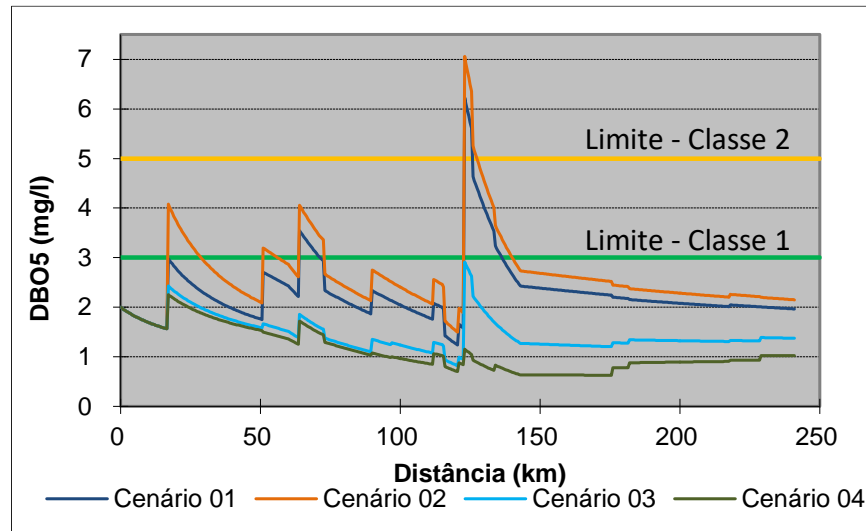


Figura 02 – Perfis longitudinais para o rio das Mortes (DBO)
Fonte: Autores (2024)

Para os demais trechos modelados, que não apresentam vazão de diluição tão elevada, pelo seu posicionamento de cabeceira, a situação não é tão confortável, apresentando trechos dentro das classes 4 e 3 (Cenários 01, 02 e 03), mesmo com o enquadramento (CBH-GD2, 2018) determinando classe 2 para a maioria dos trechos (Figura 01). Na Tabela 05 são apresentados os trechos com situação em desacordo com o enquadramento proposto, de acordo com os cenários estudados.

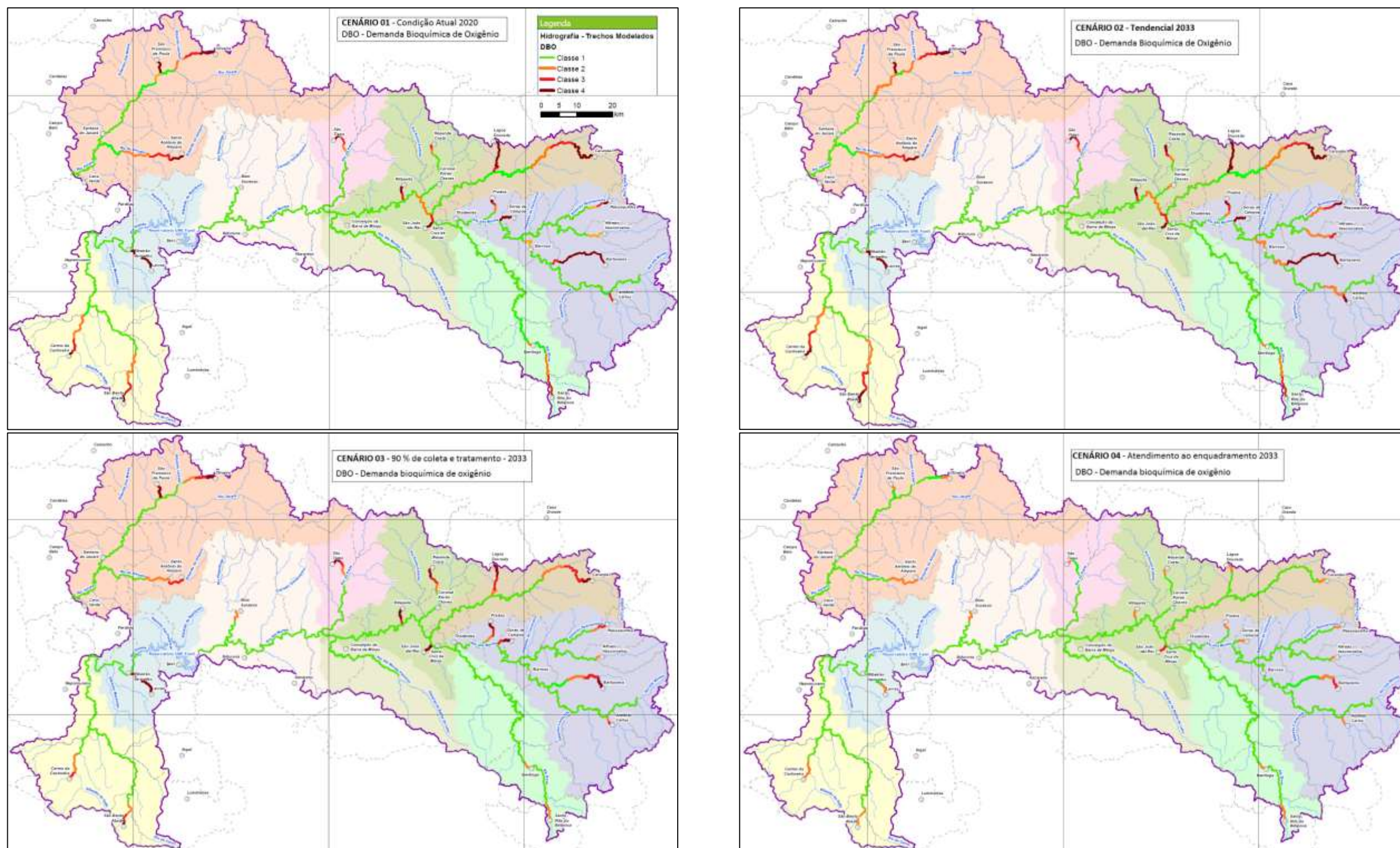


Figura 03 – Condições esperadas para a bacia (DBO)
Fonte: adaptado de IGAM (2013)

Tabela 05 – Trechos com condição adversa do enquadramento proposto

Cidade	Curso d'água	Sub-bacia	Enquadramento	Condição de qualidade por Cenário			
				C-01	C-02	C-03	C-04
Antônio Carlos	Bandeirinha	ARM	2	3	3,4*	3,2	2
Barbacena	Caieiros	ARM	3	4,3	4,3	4,3,2,1	3,2,1
Ressaquinha	Ressaquinha	ARM	2	4,3,2,1	4,3,2,1	3,2,1	2,1
Dores de Campos	Patusca	ARM	2	4	4	4,3	2,1
Prados	Pinhão	ARM	2	4,3,2,1	4,3,2,1	4,3,2,1	2,1
Carandaí	Carandaí	CAR	2	4,3,2,1	4,3,2,1	4,3,2,1	2,1
Lagoa Dourada	Tanque Grande	CAR	2	4,3	4	4,3,2	2,1
São João Del Rei	Água Limpa	MRM	3	4	4	4	3
Resende Costa	Quilombo	MRM	2	3,2,1	4,3,2,1	4,3,2,1	2,1
Ritópolis	Paiol	MRM	2	4,3	4,3	4,3	2,1
Lavras	Ribeirão Vermelho	ABRG	2	4	4	4	2,1
São Bento Abade	Algodão / Cervo	CER	2	4,3,2,1	4,3,2,1	4,3,2,1	2,1
Carmo Cachoeira	Carmo / Salto	CER	2	4,3,2,1	4,3,2,1	3,2,1	2,1
Oliveira	Maracanã/Lambari	JAR	2	4,3,2	4,3,2	4,3,2,1	2,1
S. F. de Paula	Machadinha	JAR	2	4	4	4	2,1
S. A. do Amparo	Amparo	JAR	2	4,3,2,1	4,3,2,1	3,2,1	2,1

Fonte: Autores (2024)

*Um mesmo curso d'água pode se encontrar em diferentes classes ao longo de sua extensão

ARM = Alto rio das Mortes CAR = Carandaí MRM = Médio rio das Mortes

BARG = Baixo do alto rio Grande CER = Rio do Cervo JAR = Rio Jacaré

Verifica-se que, mesmo para o C-03, que considera o Marco Legal do Saneamento, o enquadramento proposto pela legislação (CBH-GD2, 2018) não é integralmente atendido, indicando que as medidas propostas não são suficientes.

Para atender ao enquadramento proposto, a eficiência mínima de 70% na remoção de DBO, prevista na legislação, nem sempre é suficiente. De acordo com os resultados da modelagem, para o C-04 (atendimento ao enquadramento), seriam necessárias as eficiências apresentadas na Tabela 06.

Tabela 06 – Eficiência Mínima de Remoção de DBO para atendimento do enquadramento

Município	Eficiência mínima de remoção (%) DBO	Município	Eficiência mínima de remoção (%) DBO
Alfredo Vasconcelos	70	Oliveira	94
Antônio Carlos	75	Prados	94
Barbacena	97 *	Resende Costa	96
Barroso	70	Ressaquinha	81
Bom Sucesso	70	Ribeirão Vermelho	70
Carandaí	90	Ritópolis	96
Carmo da Cachoeira	77	Santa Cruz de Minas	70
Conceição da Barra de Minas	70	Santa Rita do Ibitipoca	70
Coronel Xavier Chaves	70	Santana do Jacaré	75
Dores de Campos	96	Santo Antônio do Amparo	84
Ibertioga	70	São Bento do Abade	89
Ibituruna	70	São Francisco de Paula	98 **
Ijaci	70	São João Del-Rei	94 **
Lagoa Dourada	98	São Tiago	97
Lavras	98	Tiradentes	70

Fonte: Autores (2024)

* O esgoto tratado deverá ter ainda $OD \geq 1 \text{ mg L}^{-1}$

** O esgoto tratado deverá ter ainda $OD \geq 3 \text{ mg L}^{-1}$

Verifica-se que, em municípios onde a área de drenagem do ponto de lançamento é grande, e consequentemente também a vazão de diluição do corpo receptor, a eficiência necessária para o tratamento é pequena (LIANG; YANG, 2019; SEO et al., 2017; TEODORO et al., 2013). Municípios tais como Barroso e Santa Cruz de Minas, que se encontram nas margens do rio das Mortes, podem ter eficiência de tratamento mínima, que ainda atenderão ao enquadramento. Já municípios tais como Oliveira e Prados, por estarem próximos à cabeceira, necessitam de eficiências de tratamento elevadas.

Conforme observado, os quatro maiores municípios da bacia, em conjunto, geram 67,7% do esgoto. Devido à localização destes municípios, com corpos receptores com reduzida área de drenagem, eles também possuem dificuldades em atender ao enquadramento. O município de Barbacena lança 111 L s^{-1} de esgotos no ribeirão Caieiros que, imediatamente a jusante da área urbana da cidade, possui vazão mínima de referência ($Q_{7,10}$) de somente $6,2 \text{ L s}^{-1}$, o que dá uma razão de diluição de 0,056. Desta forma, mesmo tratando 100% do esgoto coletado, a eficiência mínima de remoção de DBO deveria ser de 97 %.

Situação semelhante ocorre com os municípios de São João del Rei, Lavras e Oliveira. O surgimento e crescimento das cidades no Brasil é um processo espontâneo, na grande maioria das vezes sem planejamento, por isso a localização dentro da bacia hidrográfica e consequentemente a razão de diluição para os despejos líquidos, não é considerada, trazendo problemas como os relatados acima (MOTA, 2003). Outros municípios, que também se encontram na cabeceira, com corpo receptor de reduzida área de drenagem, poderiam diminuir as eficiências de remoção de DBO necessárias às ETEs com a construção de emissários de esgoto tratado, caso de Dores de Campos, Prados, Resende Costa, Ritópolis, São Francisco de Paula, São Tiago e Lagoa Dourada.

3.2 OD

Na Figura 05 são apresentadas as condições esperadas para a bacia, para cada um dos quatro cenários estudados, para a variável OD. Podemos verificar que, mesmo para os Cenários 01 e 02, sem intervenções na bacia, há uma predominância absoluta para Classe 1 nos trechos modelados, evidenciando, de maneira geral a boa qualidade da água. Segundo Teodoro *et al.* (2013) e von Sperling (2014b), elevadas vazões favorecem maior diluição de despejos e também maiores condições para reoxigenação, permitindo encontrar maiores valores de OD.

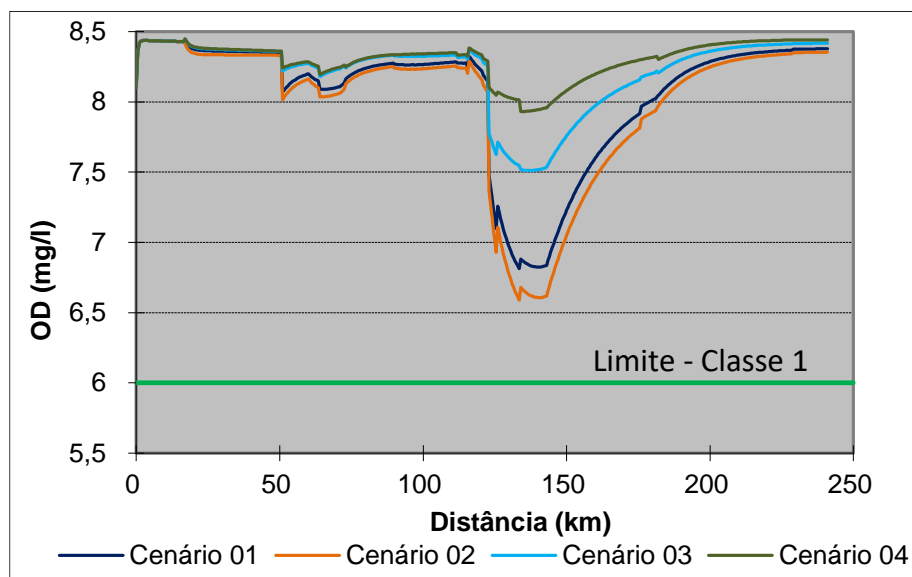


Figura 04 – Perfis longitudinais para o rio das Mortes (DBO)

Fonte: Autores (2024)

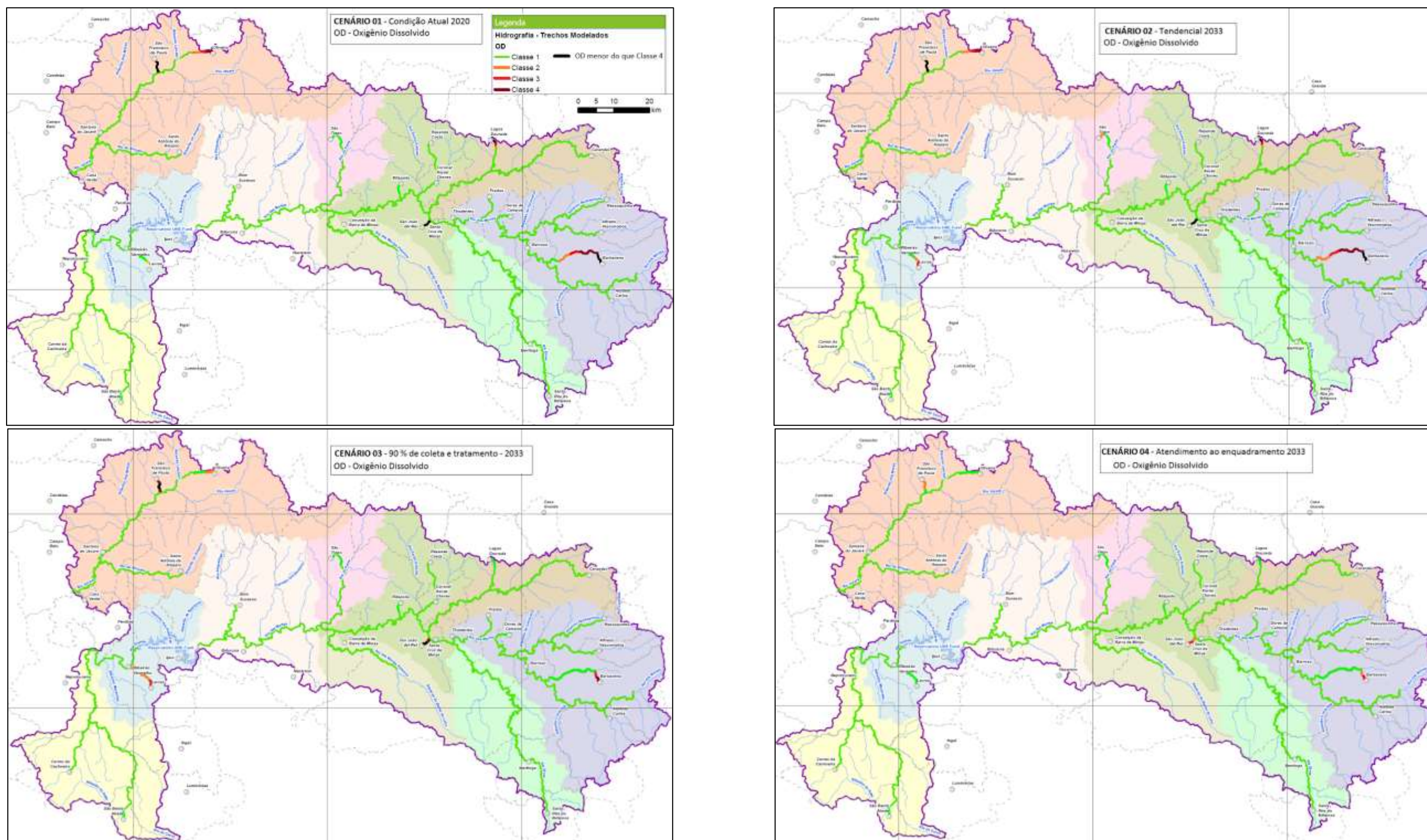


Figura 05 – Condições esperadas para a bacia (OD)
Fonte: adaptado de IGAM (2013)

Nos perfis longitudinais para o rio das Mortes (Figura 04), podemos verificar que o OD sempre está acima de 6,5 mg L⁻¹, mesmo a jusante do município de São João Del Rei, onde ocorre o OD crítico. As exceções aos excelentes valores para OD ocorrem em 6 trechos específicos, localizados em cabeceiras e com lançamentos de esgotos significativos, conforme descrito na Tabela 07.

Tabela 07 – Trechos com condição adversa do enquadramento proposto

Cidade	Curso d'água	Sub-bacia	Enquadramento	Condição por Cenário			
				C-01	C-02	C-03	C-04
Barbacena	Caieiros	ARM	3	(a)	(a)	4,3,1	3,2,1
Lagoa Dourada	Tanque Grande	CAR	2	(b)	(b)	1	1
São João Del Rei	Água Limpa	MRM	3	(c)	(c)	(d)	4,3
Lavras	Ribeirão Vermelho	ABRG	2	2,1	3,2,1	3,2	1
Oliveira	Maracanã/Lambari	JAR	2	4,3,2,1	4,3,2,1	2,1	1
S. F. de Paula	Machadinha	JAR	2	(e)	(e)	(d)	2,1

Fonte: Autores (2024)

ARM = Alto rio das Mortes CAR = Carandaí MRM = Médio rio das Mortes

ABRG = Alto do baixo rio Grande JAR = Rio Jacaré

(a) Apresenta as 4 classes, um trecho abaixo da classe 4 (OD < 2,0 mg L⁻¹) e anaerobiose

(b) Apresenta as 4 classes e um trecho abaixo da classe 4

(c) Parte do trecho abaixo da classe 4 e anaerobiose

(d) Parte do trecho na classe 4 e parte abaixo dela

(e) Anaerobiose

Os cursos d'água elencados na Tabela 07, que apresentam não conformidade ao enquadramento para a variável OD, consistem em trechos da bacia problemáticos para o licenciamento ambiental de empreendimentos geradores de efluentes líquidos, não sendo autorizado o lançamento de novos despejos, até que o atendimento do enquadramento seja estabelecido.

O ribeirão Caieiros, para os dois primeiros cenários, apresenta trechos abaixo da classe 4 e até mesmo de anaerobiose. As intervenções propostas no C-3 não se mostraram suficientes, ocorrendo ainda um trecho na classe 4 (Figura 05). Para alcançar a Classe 3, mantendo o ponto de lançamento logo a jusante da área urbana do município, além de uma eficiência de remoção de DBO de 97%, o OD do esgoto tratado deveria ficar acima de 1,0 mg L⁻¹ (Tabela 06).

Situação semelhante ocorre no ribeirão Água Limpa (São João Del Rei) e no Machadinha (São Francisco de Paula), onde eficiências superiores a 93% na remoção de DBO e esgoto tratado com OD ≥ 3,0 mg L⁻¹ são necessários para o atendimento do enquadramento. No ribeirão Vermelho (Lavras), a partir do ano de 2033, eficiências superiores a 97% seriam necessárias. Dos seis trechos, apenas para o Tanque Grande (Lagoa Dourada) e Maracanã/Buriti (Oliveira), as exigências previstas no Marco Legal do Saneamento (BRASIL, 2020) seriam suficientes para manter OD dentro dos limites do enquadramento.

De maneira geral verificou-se que as obrigações previstas no Marco Legal do Saneamento não serão suficientes para manter os cursos d'água dentro do enquadramento proposto. A implantação de ETES com elevada eficiência na remoção de DBO e/ou implantação de emissários de esgoto tratado, sobretudo para municípios de cabeceira, se fará necessário.

3.3 Discussão

Considerando as variáveis modeladas (DBO e OD), para a condição atual (C-01) e tendencial (C-03), os resultados mostraram ótimos valores para os trechos baixos dos cursos d'água, e valores quase sempre preocupantes para os trechos altos, onde a vazão dos cursos d'água é reduzida. Amâncio *et al.* (2018) também já haviam constatado isto para parte da bacia do rio das Mortes, bem como Menezes *et al.* (2015) para o ribeirão Vermelho.

A razão de diluição é um importante fator a ser considerado na alocação de recursos e definição das modalidades de tratamento a serem implementadas na bacia. Os municípios de cabeceira, em sua grande maioria, precisarão de ETEs com elevada eficiência, muitas vezes proibitivas ou da implantação de longos emissários. Conclusão semelhante também já foi reportada por Liang e Yang (2019), Seo *et al.* (2017) e Teodoro *et al.* (2013). Deste modo, para estes municípios, o estudo de emissários de esgoto tratado, visando realizar o lançamento em trechos mais caldalosos, pode ser uma alternativa interessante.

As obrigações previstas na legislação, conforme C-03, não serão suficientes para garantir, nos trechos de cabeceira, qualidade compatível com os usos previstos no enquadramento. Já nos trechos baixos, com vazão considerável, algumas das obrigações podem até mesmo ser desnecessárias. Daí a importância de se estudar e discutir ponto a ponto. Gomides *et al.* (2023) chegou a conclusão semelhante, para a variável coliformes termotolerantes, com a modelagem da mesma bacia.

Para alcançar integralmente a qualidade prevista no enquadramento da bacia, que em sua grande maioria é classe 2 (Figura 01), a universalização da coleta e do tratamento de esgoto se faz necessária em quase todos os municípios, com elevadíssima eficiência nos municípios de cabeceira.

O enquadramento é feito de acordo com os usos preponderantes encontrados ou previstos na bacia, refletindo a qualidade da água necessária e, principalmente, desejada. Entretanto, ele deve ser feito de forma criteriosa, levando-se em conta critérios técnicos e principalmente econômicos relacionados ao tratamento dos esgotos sanitários, sob pena de impor pesados fardos aos municípios (principalmente menores) e às companhias de saneamento. Um exemplo é o pequeno município de Lagoa Dourada (7.343 habitantes), que precisaria de 98 % de eficiência de remoção de DBO, além da universalização da coleta e tratamento dos esgotos, para atender ao enquadramento. Deve-se avaliar caso a caso, tendo em vista os usos reais e necessários de cada trecho, bem como os lançamentos existentes de despejos e as capacidades econômicas de cada município. Caso seja necessário, os usos podem ser revistos ou mesmo criadas metas intermediárias. Isto é de fundamental importância no Brasil e demais países em desenvolvimento, onde os investimentos em saneamento são bastante limitados.

4. Considerações finais

A metodologia de modelagem adotada se mostrou uma interessante ferramenta de gestão de recursos hídricos. A sua relativa simplicidade de utilização, com poucos parâmetros de entrada, além da utilização gratuita, a tornam uma boa alternativa para países em desenvolvimento, onde os dados de monitoramento e os recursos financeiros são escassos.

É importante que, em estudos futuros, estes trechos sejam objeto de estudos específicos e mais detalhados, feitos com dados de monitoramento de campo reais e atuais.

Referências Bibliográficas

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA. **Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos - SNIRH**. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 3 jan. 2022.
- AMÂNCIO, D. V. *et al.* Qualidade da água nas sub-bacias hidrográficas dos rios Capivari e Mortes, Minas Gerais. **Scientia Agraria**, v. 19, n. 1, p. 75, 10 abr. 2018.
- ASHOURI, M. J.; RAFEI, M. Analysis of asymmetries in air pollution with water resources, and energy consumption in Iran. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 18, p. 17590–17601, 2018.
- BRASIL. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 - classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento**. BRASIL: Diário Oficial da União, 2005.
- BRASIL. **Lei Nº 14.026, de 15 de julho de 2020 - marco legal do saneamento básico**. Brasília: Diário Oficial da União, 2020.

- BROWN, L.; BARNWELL, T. **The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual**. Athens: US Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. Environmental Research Laboratory, 1987.
- BUI, H. H. et al. Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 19, n. 2, p. 210–223, abr. 2019.
- CBH-GD2. **Deliberação Normativa CBH GD2 N° 22, de 13 de agosto de 2018. Enquadramento dos corpos de água da Bacia Hidrográfica do Rio das Mortes - UPGRH GD2**. São João Del Rei: Comitê da Bacia Hidrográfica do rio das Mortes, 2018.
- DE OLIVEIRA FILHO, A. A.; LIMA NETO, I. E. Modelagem da qualidade da água do rio poti em teresina (PI). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 3–14, 6 jul. 2018.
- GOMIDES, C. E. et al. Deterministic and probabilistic modeling of microbiological quality using the QUAL-UFMG: a water resource management tool applied on the slope waters of the Grande River, Brazil. **Water Science and Technology**, 13 abr. 2023.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censos demográficos dos anos de 2000 e 2010**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 3 jan. 2022.
- IGAM, I. M. DE G. DAS Á.-. **Monitoramento de Qualidade das Águas Superficiais**. Disponível em: <<http://repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/handle/123456789/416>>. Acesso em: 3 jan. 2022.
- IGAM, I. M. DE G. DAS Á. –. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio das Mortes**. Belo Horizonte: IGAM, 2013.
- KAUFMAN, D. E. et al. Supporting cost-effective watershed management strategies for Chesapeake Bay using a modeling and optimization framework. **Environmental Modelling and Software**, v. 144, n. July, p. 105141, 2021.
- KOO, H. et al. A global sensitivity analysis approach for identifying critical sources of uncertainty in non-identifiable, spatially distributed environmental models: A holistic analysis applied to SWAT for input datasets and model parameters. **Environmental Modelling & Software**, v. 127, p. 104676, maio 2020.
- LIANG, W.; YANG, M. Urbanization, economic growth and environmental pollution: Evidence from China. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 21, p. 1–9, mar. 2019.
- LIMA, B. P.; MAMEDE, G. L.; LIMA NETO, I. E. Monitoring and modeling of water quality in a semiarid watershed. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 125–135, 1 jan. 2018.
- MATOS, M. P. DE et al. Modelagem da progressão da DBO obtida na incubação de esgoto doméstico sob diferentes temperaturas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 821–828, out. 2017.
- MENEZES, J. P. C. et al. Deoxygenation rate, reaeration and potential for self-purification of small tropical urban stream. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 10, n. 4, 28 out. 2015.
- MINAS GERAIS. **DELIBERAÇÃO NORMATIVA CONJUNTA COPAM-CERH/MG N° 8, DE 21 DE NOVEMBRO DE 2022. Enquadramento e Padrão de lançamento de efluentes**. Minas Gerais: Diário Oficial de Minas Gerais, 2022.
- MOTA, S. **Urbanização e Meio Ambiente**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2003.
- PUJOL-VILA, F. et al. Portable and miniaturized optofluidic analysis system with ambient light correction for fast in situ determination of environmental pollution. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 222, p. 55–62, jan. 2016.
- SEO, M. et al. Evaluating the Impact of Low Impact Development (LID) Practices on Water Quantity and Quality under Different Development Designs Using SWAT. **Water**, v. 9, n. 3, p. 193, 7 mar. 2017.

SNIS. Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto - Visão Geral Ano de Referência 2022. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS**, p. 1–91, 2023.

SRIKRISHNAN, V.; KELLER, K. Small increases in agent-based model complexity can result in large increases in required calibration data. **Environmental Modelling and Software**, v. 138, n. February, p. 104978, 2021.

STREETER, H. W.; PHELPS, E. B. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. US Public Health Service. **Public Health Bulletin**, v. 146, p. 75, 1925.

TEODORO, A. et al. Implementação do conceito capacidade de diluição de efluentes no modelo de qualidade da água QUAL-UFGM: Estudo de caso no Rio Taquarizinho (MS). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 275–288, set. 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV. **Hidrotec**. Disponível em: <<http://www.hidrotec.ufv.br/>>. Acesso em: 9 maio. 2022.

VON SPERLING, M. **Princípio do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFGM, 2014a.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. 2. ed. Belo Horizonte: UFGM, 2014b.

WHITE, J. T. et al. Towards improved environmental modeling outcomes: Enabling low-cost access to high-dimensional, geostatistical-based decision-support analyses. **Environmental Modelling & Software**, v. 139, p. 105022, maio 2021.