

Perspectivas para revisão do enquadramento da bacia hidrográfica do Rio Benevente pelo emprego de curva de permanência e modelagem da qualidade da água

Perspectives for review of the classification of water quality of the Benevente river basin from the use of frequency curves and water quality modeling

Murilo Brazzali Rodrigues^{1*} , José Antonio Tosta dos Reis¹ , Glaucia de Laia Nascimento Sá¹ ,
Karinnie Nascimento Almeida¹ , Antônio Sérgio Ferreira Mendonça¹ 

RESUMO

Este trabalho discute a aplicação das curvas de permanência de qualidade como ferramenta para subsidiar decisões sobre o enquadramento de cursos d'água superficiais. A bacia hidrográfica do Rio Benevente (Espírito Santo, Brasil) constituiu a área de estudo. As cargas totais de $DBO_{5,20}$ foram estimadas para diferentes seções de controle, considerando-se o esgotamento sanitário como a única fonte poluidora. Com o auxílio do modelo QUAL-UFMG, foram avaliadas as perspectivas de enquadramento associadas a diferentes cenários de simulação da autodepuração. As curvas de permanência de qualidade para o parâmetro $DBO_{5,20}$ foram construídas para rios de água doce classes 1, 2 e 3. A capacidade de autodepuração do Rio Benevente permitiu a redução de 17% da carga total de $DBO_{5,20}$ aportada. Independentemente do cenário de simulação avaliado, o Rio Benevente apresentou condições de qualidade usualmente mais próximas dos padrões estabelecidos para a classe 1 de enquadramento. Nesse sentido, ainda que não ocorra ampliação da cobertura do serviço de tratamento de esgotos, as curvas de permanência de qualidade para o parâmetro $DBO_{5,20}$ apontaram condições para enquadramento mais restritivo dos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio Benevente do que aquele acordado no enquadramento legal.

Palavras-chave: instrumentos de gestão; política nacional de recursos hídricos; autodepuração; padrões de qualidade.

ABSTRACT

This study discussed the application of quality frequency curves as a tool to subsidize decisions on the classification of superficial water courses. The watershed of the Benevente River (Espírito Santo, Brazil) was the area of study. The total loads of $BOD_{5,20}$ were estimated for different control sections, considering the sanitary sewage as the only pollutant source. With the aid of the QUAL-UFMG model, the perspectives of establishment water quality classes associated with different scenarios of self-purification simulation were evaluated. The quality frequency curves for the $BOD_{5,20}$ parameter was constructed for freshwater rivers Classes 1, 2, and 3. The self-purification capacity of the Benevente River allowed a reduction of approximately 17% of the total load of $BOD_{5,20}$. Regardless of the simulation scenario evaluated, the Benevente River presented quality conditions usually closest to the standards established for Class 1. In this sense, although there is no expansion of the coverage of the sewage treatment service, the quality frequency curves for the parameter $BOD_{5,20}$ pointed out conditions for more restrictive water quality classes of the watercourses of the basin watershed of the Benevente River than that agreed in the legal classification of surface water rivers.

Keywords: management instruments; national water resources policy; self-purification; quality standards.

¹Universidade Federal do Espírito Santo – Vitória (ES), Brasil.

*Autor correspondente: murilorodrigues1993@hotmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior (CAPES), Código de Financiamento 001.

Recebido: 15/11/2021 – **Aceito:** 06/06/2022 – **Reg. ABES:** 20210295

INTRODUÇÃO

A degradação das águas consiste em um problema mundial, e o seu controle é considerado um dos grandes desafios da gestão dos recursos hídricos não só no Brasil, como no mundo (TEODORO *et al.*, 2015). Dessa forma, a diminuição da disponibilidade quali-quantitativa de água levou à intensificação dos conflitos entre usuários de água e impôs a elaboração de mecanismos de planejamento e coordenação para os usos direcionados à sua otimização (ANA, 2017b).

Nesse sentido, entre os instrumentos de gestão de recursos hídricos dispostos na Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) no Brasil, está o enquadramento de corpos d'água em função dos usos preponderantes (BRASIL, 1997).

A classificação de corpos d'água é um pacto social firmado entre a sociedade, o poder público e os usuários conforme um modelo de gestão participativo e descentralizado, com vistas a promover água em qualidade para os diversos usos inseridos na bacia, por meio do estabelecimento de metas de qualidade (classes) que devem ser mantidas ou atingidas de acordo com um horizonte de planejamento. Em muitos casos, as metas são definidas para um horizonte de 20 anos. Adicionalmente, cada classe de qualidade está associada a diferentes padrões de qualidade da água necessários ao atendimento dos usos a que é destinada (BRASIL, 2005).

Todavia, transcorridos 25 anos da criação da PNRH, a presença do enquadramento ainda é incipiente na maior parte das bacias hidrográficas brasileiras. Segundo dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2017b), apenas 125 bacias apresentam algum curso d'água enquadrado. Logo, passa a ser tarefa relevante desenvolver subsídios que auxiliem na implementação do enquadramento de corpos hídricos.

A modelagem matemática de qualidade da água como ferramenta de apoio ao processo de enquadramento merece especial destaque, uma vez que permite considerar as particularidades das bacias hidrográficas e relacionar diretamente os aspectos quantitativos e qualitativos das águas, conduzindo a proposição de medidas mitigadoras e permitindo a caracterização da autodepuração dos corpos hídricos (KEUPERS; WILLEMS, 2017; SLAUGHTER *et al.*, 2017). No Brasil e em outros países em desenvolvimento, nas áreas próximas a aglomerações urbanas, a poluição de natureza orgânica é a que mais contribui em termos de volume e carga para a deterioração da qualidade das águas (ANA, 2017a; 2017b; NOORHOSSEINI *et al.*, 2017). Assim, num cenário de limitada cobertura do serviço de tratamento de esgotos, a capacidade de autodepuração torna-se o principal meio para a atenuação da carga poluente (KOTNALA; DOBHAL; CHAUHAN, 2016).

Trabalhos como os conduzidos por Gomes e Simões (2014), Lima, Mamede e Lima Neto (2018) e Oliveira Filho e Lima Neto (2018) aplicaram modelos de qualidade da água como ferramentas de apoio à implementação do enquadramento, empregando-os para análise da capacidade de autodepuração dos corpos d'água. Para Tian, Wang and Shang (2011), o fenômeno natural da autodepuração é um importante indicador do equilíbrio aquático, podendo ser adotado como referência para a regulação de padrões de lançamento de efluentes.

Paralelamente, alguns autores vêm abordando o emprego das curvas de permanência de qualidade, estabelecidas mediante a relação entre a curva de permanência de vazões e concentrações de parâmetros de qualidade da água, como ferramenta de apoio à gestão de recursos hídricos (BRITES; PORTO; PERNANDES, 2009; FORMIGONI *et al.*, 2011). De acordo com Cleland (2003), essas curvas são úteis para identificar soluções de melhoria da qualidade da água. Por sua vez, Wang, Bi e Ambrose Jr. (2015) afirmam que as curvas podem fornecer base científica para o órgão gestor na tomada de decisões acerca do gerenciamento de poluição da água.

Por meio da integração quali-quantitativa, base para o desenvolvimento das curvas, é possível identificar a frequência de atendimento de um padrão de qualidade ambiental, estimando-se o percentual de tempo em que a correspondente carga de um poluente é igualada ou superada pelo menos uma vez ao longo do tempo. Dessa forma, quanto menor a frequência de atendimento de um padrão de qualidade desejado, maiores serão os custos em ações de despoluição para que o padrão de qualidade desejado seja atendido. Com base nessa análise, pode-se mensurar o esforço necessário para o alcance de determinada meta final de enquadramento (FERREIRA; FERNANDES; KAVISKI, 2016).

Adicionalmente, as curvas de permanência de qualidade possibilitam, por meio da integração da modelagem hidrológica, da modelagem matemática e de padrões de qualidade de água, estabelecer metas de qualidade para rios em bacias hidrográficas críticas em termos quantitativos e qualitativos, cenário comum em países em desenvolvimento. Assim, as curvas fornecem informações técnicas orientando os tomadores de decisão quanto à definição de metas de qualidade da água ambientalmente corretas, socialmente justas e economicamente viáveis.

Nessa perspectiva metodológica, encontram-se na literatura trabalhos como os apresentados por Bonta e Cleland (2003), Bonta e Dick (2003), Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2007), Babbar-Sebens e Karthikeyan (2009), Cunha e Calijuri (2010), Garcia *et al.* (2012), Cunha, Calijuri e Mendiolo (2012) e Calmon *et al.* (2014; 2016).

Nesse contexto, o presente trabalho teve como principal perspectiva discutir a aplicação das curvas de permanência de qualidade como ferramenta para subsidiar as decisões sobre o enquadramento de segmentos de cursos d'água superficiais.

Área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Benevente (Figura 1) está localizada no sul do estado do Espírito Santo, possui área de drenagem de 1.091,5 km² e abrange em sua totalidade o município de Alfredo Chaves e parcialmente os municípios de Anchieta, Marechal Floriano, Guarapari e Iconha. Com 81,5 km de extensão, o Rio Benevente, principal curso d'água da bacia, deságua diretamente no Oceano Atlântico. Na região, os cursos d'água da bacia do Rio Benevente assumem importante papel para o abastecimento público, recreação de contato primário e irrigação, entre outros usos (LUME, 2013).

A bacia hidrográfica apresenta significativa presença de remanescentes florestais em sua porção superior, sobretudo nos limites de Alfredo Chaves. Atividades como agricultura e pecuária são mais relevantes à medida que se caminha em direção à foz da bacia (LUME, 2013).

O esgoto sanitário produzido pela população urbana da bacia é coletado e tratado de forma parcial. A bacia apresenta nove estações de tratamento de esgoto, das quais oito estão localizadas no município de Alfredo Chaves e uma em Anchieta (LUME, 2013). O Rio Benevente e seus tributários são receptores dos esgotos tratados e não tratados produzidos pelos núcleos urbanos localizados na bacia.

Cabe destacar que o Conselho Estadual de Recursos Hídricos do estado do Espírito Santo (CERH-ES), por meio da Resolução nº 5, de 17 de junho de 2015, homologou o enquadramento dos corpos d'água apresentado pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Benevente (ESPÍRITO SANTO, 2015). A proposta de enquadramento aprovada foi elaborada pela Agência Estadual de Recursos Hídricos por meio da contratação da empresa de consultoria ambiental. Foram enquadrados 14 cursos d'água, subdivididos em 45 trechos (LUME, 2015).

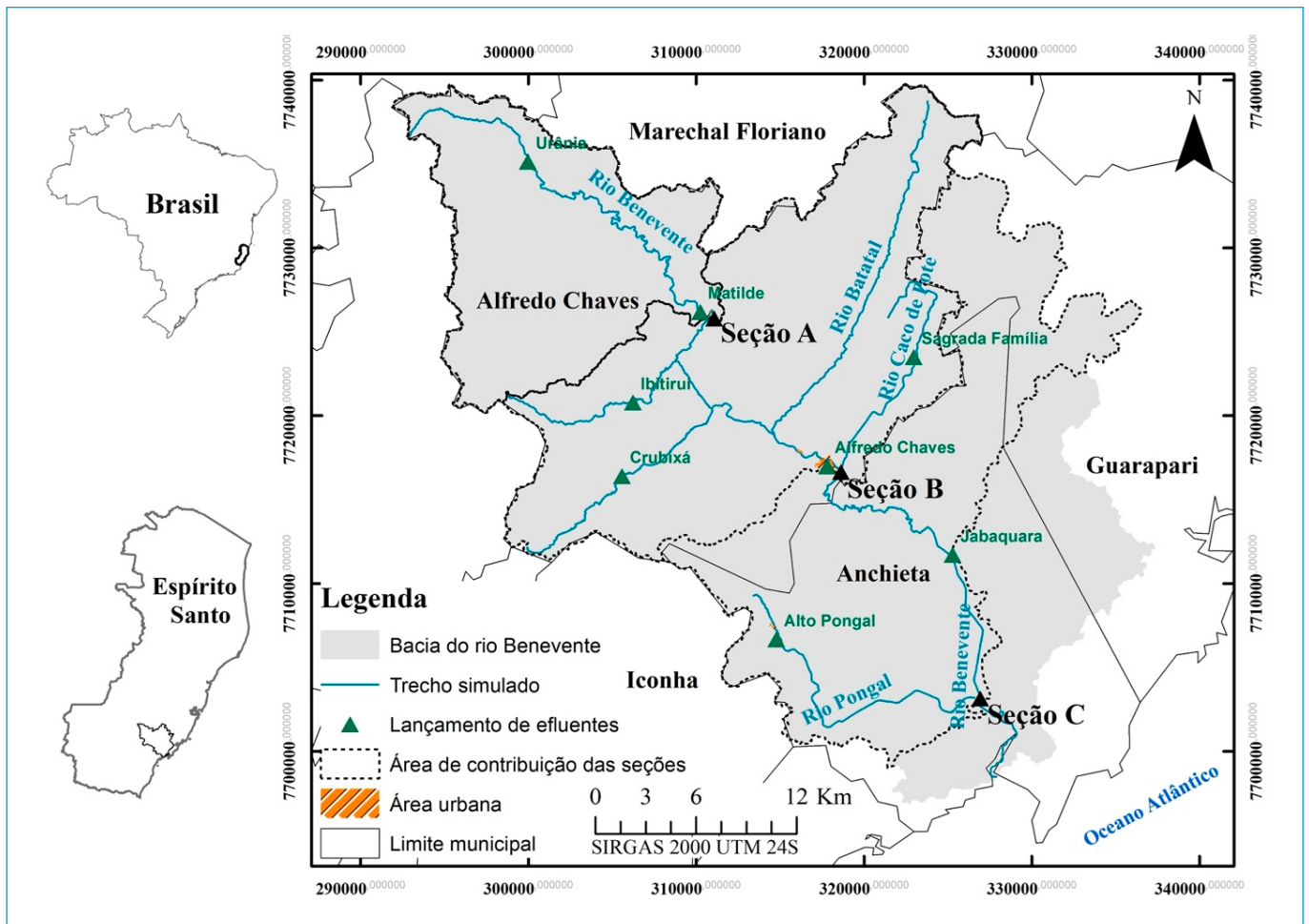


Figura 1 - Bacia hidrográfica do Rio Benevente e representação dos rios modelados com os lançamentos de esgoto e as respectivas seções de controle para avaliação da qualidade da água.

Nesse sentido, a bacia hidrográfica do Rio Benevente, que já passou por processo de enquadramento legal, constituiu a área de estudo, na qual foram avaliadas as respostas do eventual emprego das curvas de permanência de qualidade como subsídio ao processo de enquadramento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para obtenção do modelo digital de elevação hidrologicamente consistido (MDE-HC) e apropriação de características fisiográficas da região de estudo, foi utilizado o programa ArcGIS 10.4, da empresa Environmental Systems Research Institute (ESRI), com auxílio da extensão ArcHydroTools 10.4. Os procedimentos empregados reproduzem aqueles utilizados por Farias *et al.* (2017). O MDE-HC foi gerado com resolução espacial de 30 m.

Avaliação da disponibilidade hídrica da bacia do Rio Benevente

A análise da disponibilidade hídrica superficial do Rio Benevente e seus tributários foi realizada mediante a regionalização da curva de permanência de vazões.

A regionalização foi conduzida buscando-se atualização de funções regionais já estabelecidas para a área de estudo em trabalhos anteriores desenvolvidos por Espírito Santo (2010) e Reis *et al.* (2013). Nesse sentido, foram pré-selecionadas

as estações fluviométricas em operação localizadas nas bacias hidrográficas dos rios Benevente, Juçu, Novo e Iconha (Quadro 1), considerando-se séries históricas de vazões para o período compreendido entre os anos de 1970 e 2014. As séries históricas de vazões das estações fluviométricas selecionadas foram obtidas da base de dados hidrometeorológicos gerenciada pela ANA (HidroWeb) (ANA, 2017c).

Após definição das séries históricas a serem efetivamente utilizadas na análise regional, foram determinadas, com o programa SisCAH 1.0 (SOUSA *et al.*, 2009), as vazões com permanência de 50 (Q_{50}) e 95% (Q_{95}) para cada uma das estações. Nesse programa computacional é empregada metodologia empírica para determinação dessas curvas, com base na análise de frequência associada a cada dado de vazão.

Na regionalização da curva de permanência foi adotado o método da curva exponencial, por meio do qual se ajusta uma função exponencial (Equação 1) às vazões com permanência variando entre 50 e 95%. O método da curva exponencial é detalhadamente apresentado por Tucci (2002).

$$Q_R = e^{[(a.P)+b]} \quad (1)$$

Em que:

Q_R = vazão regionalizada (m^3/s);

Quadro 1 - Localização e caracterização das estações fluviométricas existentes nas bacias hidrográficas dos rios Jucu, Benevente e Novo.

Estação	Área de drenagem (km ²)	Rio	Coordenadas geográficas	
			Latitude	Longitude
Córrego do Galo	979	Jucu	20°18'59" S	40°39'06" W
Fazenda Jucuruaba	1688	Jucu	20°24'54" S	40°29'07" W
Matilde	211	Benevente	20°33'25" S	40°48'43" W
Pau D'Alho	304	Novo	20°53'08" S	40°56'47" W
Iconha Montante	149	Iconha	20°46'38" S	40°49'41" W

P = a probabilidade de ocorrência das vazões (em %);

a e b = os coeficientes determinados por meio das Equações 2 e 3, respectivamente.

$$a = -\frac{\ln(Q_{50R}/Q_{95R})}{0,45} \quad (2)$$

$$b = \ln(Q_{50R}) - (0,5 \cdot a) \quad (3)$$

Em que:

Q_{50R} = vazão regionalizada com permanência de 50% (m³/s);

Q_{95R} = vazão regionalizada com permanência de 95% (m³/s).

Para o estabelecimento das funções regionais para apropriação das vazões Q_{50R} e Q_{95R} , foram determinadas, por análise de regressão, curvas que relacionassem as vazões Q_{50} e Q_{95} com as áreas de drenagem das estações fluviométricas analisadas, assumindo-se uma equação do tipo potência (Equação 4), conforme proposição originalmente definida para a área de estudo por Reis *et al.* (2013).

$$Q_{PR} = c \cdot A^d \quad (4)$$

Em que:

Q_{PR} = vazão de permanência regionalizada (m³/s);

c e d = parâmetros da equação;

A = a área de drenagem das estações fluviométricas (variável independente da função regional) (km²).

A verificação da existência de homogeneidade hidrológica da região de estudo foi realizada por meio da análise da qualidade do ajuste do modelo de regressão de vazões específicas (Q_{50} e Q_{95}). Essa análise foi baseada no valor do coeficiente de correlação (R^2) da equação de regressão (aceitando-se valores acima de 0,8) e no desvio percentual entre os valores das vazões observadas e estimadas pelo modelo — aceitando-se desvios inferiores a 30%, conforme indicação de Eletrobrás (1985).

Foram estabelecidas equações empíricas para a construção das curvas de permanência de vazões regionalizadas (entre 50 e 95% de permanência) para as três seções de controle localizadas no Rio Benevente. A seção de controle A fica a jusante do distrito de Matilde. A seção B, por sua vez, encontra-se a jusante da sede municipal de Alfredo Chaves, na confluência entre o Rio Caco do Pote e o Rio Benevente. Já a seção de controle C está situada na confluência do Rio Pongal com o Rio Benevente. Assumiu-se que as águas nesse último segmento de rio sofrem pouca ou nenhuma influência da maré.

Determinação das cargas totais de DBO_{5,20}

Nesta etapa foram determinadas as cargas remanescentes totais de DBO_{5,20} para cada seção de controle, considerando-se o esgotamento sanitário como a única fonte poluidora da bacia. Essas cargas correspondem às cargas domésticas de DBO_{5,20} produzidas e não coletadas (cargas diretas) e às cargas de DBO_{5,20} nos efluentes dos sistemas de tratamento de esgoto (cargas remanescentes).

As cargas de DBO_{5,20} da bacia do Rio Benevente foram estimadas com base em diferentes panoramas de tratamento de esgoto doméstico:

- No panorama 1, assumiu-se que todo o esgoto gerado pela população urbana da bacia foi coletado e disposto nos cursos d'água sem nenhum tratamento;
- Para o panorama 2, reproduziu-se a condição atual de coleta e tratamento de esgoto da bacia do Rio Benevente. Segundo Lume (2013; 2014), os distritos de Matilde, Ibitiruí, Aparecida, Alfredo Chaves e Jabaquara apresentam índices de atendimento de coleta de esgoto doméstico que variam entre 50 e 80% e índices de tratamento para os mesmos distritos de, no máximo, 80%, com eficiência média de remoção de DBO_{5,20} de 70% para todos os distritos, exceto Aparecida, cujo esgoto é lançado diretamente no curso d'água. Já os distritos de Urânia, Crubixá, Sagrada Família e Alto Pongal não apresentam rede coletora de esgoto doméstico, sendo adotadas soluções de tratamento individual por fossas sépticas, mesma perspectiva de tratamento e disposição final associada à parcela de esgoto não coletado dos distritos que possuem rede coletora;
- No panorama 3, foi assumido que 100% da população urbana seria atendida com serviço de coleta e tratamento de esgoto com eficiência de 70% de remoção de DBO_{5,20}.

Reproduzindo-se as condições assumidas para a condução das etapas de diagnóstico e prognóstico, não foi considerada a perspectiva de tratamento para o esgoto doméstico produzido pela população rural. As estimativas das cargas totais de DBO_{5,20} foram realizadas para os horizontes de 2017, 2022 e 2032, seguindo-se o horizonte de planejamento estabelecido nas metas previstas no plano da bacia.

A população urbana e rural residente em cada distrito da bacia do Rio Benevente foi estimada por meio da sobreposição da malha digital de setores censitários e do limite da bacia, ambos manipulados com o auxílio do ArcGis 10.4. Com a identificação do setor censitário contido na bacia e sua respectiva área, foi possível contabilizar a população por meio da tabela base de informações dos setores de 2010 (IBGE, 2011). Quando o setor não estava totalmente inserido na bacia, considerou-se a equivalência de área tendo como base a distribuição homogênea da população no setor censitário.

As projeções de crescimento populacional para anos de interesse e para os municípios que compõem a bacia do Rio Benevente foram obtidas com base na aplicação da taxa média geométrica de crescimento populacional disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As taxas anuais de crescimento populacional adotadas foram: 0,25% para Alfredo Chaves; 2,23% para Anchieta; 1,76% para Guarapari; 0,87% para Iconha; e 1,58% para Marechal Floriano (IBGE, 2011).

Estimativa da vazão média de esgotos domésticos

As vazões dos esgotos sanitários produzidos pela população (urbana e rural) dos distritos da bacia do Rio Benevente foram obtidas de Lume (2014), estudo no qual as vazões foram estimadas por meio da Equação 5, originalmente proposta por Von Sperling (2005).

$$Q_{(u,r)} = P_{(u,r)} \cdot QPC \cdot R \quad (5)$$

Em que:

$Q_{(u,r)}$ = vazão média de esgotos domésticos inerentes à população urbana ou rural (L/d);

$P_{(u,r)}$ = população urbana ou rural (habitantes);

QPC = cota *per capita* de água (L/hab.dia);

R = coeficiente de retorno esgoto/água.

Neste trabalho, reproduzindo-se a perspectiva de Lume (2014), foi adotada a QPC de 125 L/hab.dia para todos os distritos, exceto para a sede municipal de Alfredo Chaves, para a qual foi adotada a QPC de 196 L/hab.dia. Para o coeficiente de retorno, estabeleceu-se 0,8, valor recomendado pelas normas brasileiras (NBR) 9649/1986 e 14486/2000 em situações nas quais não há dados locais comprovados oriundos de pesquisas (ABNT, 1986; 2000).

Estimativa da carga direta de DBO_{5,20} no esgoto doméstico rural

Para a estimativa das cargas diretas de DBO_{5,20} no esgoto doméstico relativas à população rural, foi empregada a Equação 6, baseada em Von Sperling (2005).

$$CDr_{(DBO_{5,20})} = Q_r \cdot C_{(DBO)} \cdot 10^{-9} \quad (6)$$

Em que:

$CDr_{(DBO_{5,20})}$ = carga direta de DBO_{5,20} no esgoto doméstico referente à população rural (t.DBO_{5,20}/dia);

Q_r = vazão de esgoto doméstico relativa à população rural (L/dia);

$C_{(DBO)}$ = concentração de DBO_{5,20} no esgoto doméstico bruto (mg/L).

Adotou-se a concentração de DBO_{5,20} do esgoto bruto de 500 mg/L, conforme Lume (2014), valor limite para a faixa de concentração de DBO_{5,20} no esgoto doméstico bruto segundo Von Sperling (2005).

Estimativa da carga de DBO_{5,20} no esgoto doméstico urbano

As cargas de DBO_{5,20} nos esgotos domésticos coletado e não coletado relativas à população urbana foram estimadas utilizando-se as Equações 7 e 8, respectivamente.

$$CRuc_{(DBO_{5,20})} = \{ \{ Q_u \cdot \%C \cdot [C_{(DBO)} - (C_{(DBO)} \cdot \%E_T) \cdot \%T] \} \} \cdot 10^{-9} \quad (7)$$

$$CRun_{(DBO_{5,20})} = \{ \{ Q_u \cdot (1 - \%C) \cdot [C_{(DBO)} - (C_{(DBO)} \cdot \%E_{fo})] \} \} \cdot 10^{-9} \quad (8)$$

Em que:

$CRuc_{(DBO_{5,20})}$ = carga remanescente de DBO_{5,20} no esgoto doméstico urbano coletado;

$CRun_{(DBO_{5,20})}$ = carga remanescente de DBO_{5,20} no esgoto urbano não coletado (t.DBO_{5,20}/dia);

Q_u = vazão de esgoto doméstico relativa à população urbana (L/dia)

$\%C$ = índice de atendimento por coleta de esgoto doméstico urbano (%);

$\%E_T$ = percentual de eficiência do tratamento de esgoto em relação à remoção de DBO_{5,20} (%);

$\%T$ = índice de tratamento de esgoto doméstico urbano (%);

$\%E_{fo}$ = percentual de eficiência do tratamento de esgoto por fossa séptica em relação à remoção de DBO_{5,20} (%).

Conforme Lume (2014), o índice de atendimento por coleta de esgoto doméstico dos distritos é de 80% para Matilde, Ibitiruí, Alfredo Chaves e Jabaquara. Por outro lado, em Aparecida, apenas 50% do esgoto é coletado e tratado. Paralelamente, o mesmo percentual de tratamento foi verificado em Matilde e Ibitiruí. Para Alfredo Chaves, o índice de tratamento do esgoto coletado é de 17%, enquanto para Jabaquara o percentual alcança 80%. Em todas as localidades, foi considerado lançamento direto para o esgoto urbano coletado e para o não tratado. Para a parcela de esgoto urbano não coletado foi considerada a solução de tratamento individual por fossas sépticas, para o qual se adotou a eficiência de 50% na remoção de DBO_{5,20}, conforme Jordão e Pessoa (2011).

Estimativa das cargas totais de DBO_{5,20} no esgoto doméstico

As cargas totais de DBO_{5,20} do esgoto doméstico nas seções de controle estudadas foram estimadas por meio da Equação 9.

$$CT_{(DBO_{5,20})} = CRr_{(DBO_{5,20})} + CRuc_{(DBO_{5,20})} + CRun_{(DBO_{5,20})} \quad (9)$$

Em que:

$CT_{(DBO_{5,20})}$ = carga total de DBO_{5,20} de esgoto doméstico na seção de controle (t. DBO_{5,20}/dia).

Avaliação da capacidade de autodepuração dos cursos d'água da bacia do Rio Benevente

A avaliação da capacidade de autodepuração foi realizada por meio do modelo matemático de qualidade de água QUAL-UFGM, detalhadamente apresentado e discutido por Von Sperling (2007). O referido modelo é uma adaptação do modelo QUAL-2E, desenvolvido pela EPA. Na adaptação foram desconsideradas a influência das algas e de suas inter-relações com os demais constituintes e a dispersão longitudinal, sendo empregado o método de Euler na integração numérica das equações diferenciais ordinárias utilizadas para a descrição das taxas de variação dos parâmetros de qualidade de água matematicamente modelados (VON SPERLING, 2007).

Quando da simulação da qualidade da água dos rios da bacia hidrográfica do Rio Benevente, foram utilizadas temperatura, saturação de oxigênio dissolvido (OD), velocidade do curso d'água, profundidade da lâmina d'água, constante cinética que regula o processo de reaeração atmosférica (K_2), constante de desoxigenação (K_1), constante de sedimentação (K_s), vazão doméstica de esgotos da população urbana, concentração de DBO_{5,20} no esgoto bruto de origem doméstica e vazões outorgadas utilizadas por Lume (2014).

Com auxílio do modelo QUAL-UFGM foram simulados os perfis de DBO_{5,20} e OD, assumindo-se o sistema hídrico funcionando em regime permanente. Para simulação das concentrações de DBO_{5,20} foram considerados os fenômenos de desoxigenação associados à oxidação da matéria orgânica e à remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) em função da sedimentação, não sendo levadas em conta as contribuições referentes às cargas internas de DBO_{5,20} sem acréscimo de vazão. Para a simulação das concentrações de OD

foram consideradas a reaeração atmosférica e a desoxigenação produzida pela oxidação da matéria orgânica.

Descrição do sistema fluvial simulado

Para simulação das capacidades de autodepuração dos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio Benevente, foi considerado o trecho do Rio Benevente com extensão de 74 km, desde sua formação até a localização da seção de controle C. A construção do modelo hidráulico envolveu a segmentação da rede de drenagem em elementos computacionais (unidades de integração) com 500 m de comprimento cada um para o Rio Benevente e 200 m para os seus principais tributários.

O trecho simulado foi caracterizado pela contribuição de fontes pontuais e distribuídas. Constituíram as fontes pontuais os principais tributários do Rio Benevente (Rio Santa Maria, Ribeirão São Joaquim, Rio Batatal, Rio Caco do Pote e Rio Pongal) e os efluentes domésticos de nove núcleos urbanos situados na bacia (Urânia, Matilde, Crubixá, Ibitiruí, Alfredo Chaves, Aparecida, Sagrada Família, Jabaquara e Alto Pongal). As fontes distribuídas foram aquelas geradas pela população rural da bacia. Nesse sentido, as fontes distribuídas foram consideradas de forma incremental ao longo dos trechos simulados, visto que não foi levada em conta a perspectiva de tratamento do esgoto rural.

Concentração e carga dos constituintes modelados

Pensando nos três panoramas de tratamento de esgoto doméstico urbano (definidos em função das eficiências de remoção da $DBO_{5,20}$ do esgoto) e considerando-se a concentração de $DBO_{5,20}$ no esgoto doméstico bruto adotada neste estudo (500 mg/L), foram determinadas as concentrações de $DBO_{5,20}$ no esgoto doméstico tratado. Em favor da segurança, a concentração de OD dos efluentes tratados foi assumida como 0 nos três panoramas analisados.

No panorama 1, a concentração de $DBO_{5,20}$ no esgoto doméstico foi assumida como 500 mg/L, uma vez que não seria realizado o tratamento. No panorama 2, as concentrações de $DBO_{5,20}$ no esgoto doméstico tratado apresentaram valores entre 226 e 402,4 mg/L, dado que a coleta e o tratamento são realizados de forma parcial. Levando-se em conta que todo o esgoto produzido na bacia seria tratado com eficiência mínima de 70% de remoção de DBO, a concentração de $DBO_{5,20}$ no esgoto doméstico tratado no panorama 3 foi de 150 mg/L.

Conforme Lume (2014), as concentrações de $DBO_{5,20}$ e OD na vazão incremental apresentaram variações nos trechos simulados. Foram adotados valores entre 3 e 4 mg/L de $DBO_{5,20}$ no Rio Benevente. A concentração de OD na vazão incremental foi considerada uniforme em toda a extensão do rio, com valor de 8 mg/L. Para os tributários, adotaram-se concentrações para $DBO_{5,20}$ entre 1,5 e 3 mg/L e para OD entre 7,4 e 7,8 mg/L.

A carga direta incremental de DBO produzida pela população rural foi estimada por meio da razão entre a carga direta e a extensão total dos cursos d'água da bacia contidos nas seções de controle. Na Tabela 1 são exibidos os valores das cargas diretas incrementais de $DBO_{5,20}$ relativas às populações

Tabela 1 - Valores da carga direta incremental de $DBO_{5,20}$ relativos à população rural.

Seção de controle	Carga direta incremental de $DBO_{5,20}$ (g $DBO_{5,20}$ /dia.m)		
	2017	2022	2032
Seção A	0,56	0,56	0,58
Seção B	2,07	2,10	2,15
Seção C	3,63	3,83	4,29

rurais contidas na área de contribuição para cada seção de controle, conforme o horizonte de análise.

Faz-se relevante observar que, diferentemente do procedimento originalmente empregado por Calmon et al. (2016), as estimativas de crescimento populacional foram automatizadas e interligadas ao ambiente computacional do modelo QUAL-UFMG, tornando-se também automática a conformação das condições de contorno definidas para as simulações de qualidade de água associadas aos diferentes panoramas de tratamento de esgoto, horizontes de análise ou condição de abatimento de cargas orgânicas. Ainda que o presente estudo tenha considerado os horizontes de planejamento estabelecidos nas metas previstas no plano da bacia hidrográfica do Rio Benevente (2017, 2022 e 2032), a interligação entre as estimativas de crescimento populacional e a modelagem de qualidade de água torna expedita a avaliação para cenários intermediários ou para além dos horizontes estabelecidos, garantindo flexibilidade quando da eventual revisão do enquadramento proposto para a área de estudo.

Cenários considerados para a simulação da qualidade das águas

Foram assumidas duas condições de abatimento de cargas orgânicas na modelagem com o QUAL-UFMG:

- Condição 1: não se considera o processo de abatimento de carga orgânica pelo processo de autodepuração (K_d e K_s nulos);
- Condição 2: o processo de autodepuração foi incorporado (K_d e K_s estimados).

Assim, foram considerados, para cada um dos três panoramas de tratamento de esgoto em relação à remoção de $DBO_{5,20}$, seis cenários de simulação da qualidade da água, conformados por duas condições de abatimento de cargas orgânicas e três horizontes de análise.

Determinação das curvas de permanência de qualidade para o parâmetro $DBO_{5,20}$

Mediante a construção das curvas de permanência de vazões regionalizadas entre as vazões Q_{50} e Q_{95} , para cada seção de controle considerada na etapa de avaliação da disponibilidade hídrica superficial, as curvas de permanência de qualidade foram apropriadas por meio do produto das vazões regionalizadas pelas concentrações máximas estabelecidas por classe de enquadramento para o parâmetro $DBO_{5,20}$ definido pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) nº 357/2005 (BRASIL, 2005) para os rios de água doce classes 1, 2 e 3, hoje em dia 3, 5 e 10 mg/L, respectivamente.

Frequência de atendimento dos padrões de qualidade relativos ao parâmetro $DBO_{5,20}$

As frequências de atendimento dos padrões de qualidade relativos ao parâmetro de $DBO_{5,20}$ nas diferentes classes de qualidade de água doce estabelecidas pela Resolução Conama nº 357/2005 foram determinadas por meio das intercessões das cargas totais (condição 1) e remanescentes (condição 2) de $DBO_{5,20}$ com as curvas de permanência de qualidade estabelecidas. Faz-se relevante observar que, diferentemente da abordagem empregada por Calmon et al. (2016), as frequências de atendimento foram obtidas de forma automática após a conformação das curvas de permanência de qualidade. Para a condução dessa etapa do trabalho foi empregada a ferramenta Solver, disponível na planilha eletrônica Microsoft Excel®.

As cargas remanescentes de $DBO_{5,20}$ foram apropriadas, por seção de controle, pela vazão e pelos perfis de concentração de $DBO_{5,20}$ simulados com auxílio do modelo de qualidade de água. Essas cargas correspondem às cargas remanescentes de $DBO_{5,20}$ após abatimento pelo processo de autodepuração (condição 2) e às cargas totais de $DBO_{5,20}$ quando não se considera o abatimento de matéria orgânica pelo processo de autodepuração (condição 1).

Comparação entre os resultados obtidos por meio das curvas de permanência de qualidade e o enquadramento legal do Rio Benevente

Foram adotados as metas finais do enquadramento legal (Lume, 2015) e o panorama 3 deste estudo para fins de comparação entre os resultados obtidos pelas curvas de permanência de qualidade e o enquadramento legal dos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio Benevente. O nível de qualidade desejado (meta final) deverá ser alcançado no ano de 2032, quando implementado o tratamento de esgoto com eficiência mínima de 70% de remoção de DBO, cenário compatível com o panorama 3.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Disponibilidade hídrica superficial

As Equações 10 e 11 constituem as funções regionais produzidas para a apropriação das vazões Q_{50R} e Q_{95R} na bacia hidrográfica do Rio Benevente, respectivamente.

$$Q_{50R} = 0,0846A^{0,7260} \quad (10)$$

$$Q_{95R} = 0,0309A^{0,7769} \quad (11)$$

Os coeficientes de correlação obtidos para as vazões regionalizadas com permanência de 50 (Q_{50R}) e 95% (Q_{95R}) foram 0,99 e 0,95, respectivamente. Ademais, os desvios percentuais entre os valores reais e estimados das referidas vazões foram inferiores a 30%, limite máximo recomendado por Piol *et al.* (2019) para estudos de regionalização de vazões. Com as funções regionais estabelecidas, foram construídas curvas de permanência de vazões aplicáveis às seções de controle. As vazões regionalizadas estimadas para permanências de 50 e 95% e as equações empíricas obtidas para a construção das curvas de permanência de vazões para as seções de controle estão na Tabela 2.

Determinação das cargas totais de $DBO_{5,20}$

As cargas de $DBO_{5,20}$ associadas aos diferentes horizontes de tempo analisados nos distritos pertencentes a Alfredo Chaves, independentemente do

Tabela 2 - Equações empíricas para a construção da curva de permanência de vazões regionalizadas das seções de controle.

Seção de controle	Área de drenagem (km ²)	Q_{50R} (m ³ /s)	Q_{95R} (m ³ /s)	Equação empírica
Seção A	211	4,12	1,98	$Q_R = e^{[-1,63.P]+2,23}$
Seção B	591	8,70	4,40	$Q_R = e^{[-1,51.P]+2,92}$
Seção C	940	12,18	6,31	$Q_R = e^{[-1,46.P]+3,23}$

Q_R : vazão regionalizada; P: probabilidade de ocorrência.

panorama de tratamento assumido, não apresentaram diferenças significativas, como mostra a Tabela 3. Esses resultados estão relacionados ao fato de esse município apresentar a menor taxa de crescimento populacional aliada à baixa densidade populacional dos seus distritos. A sede de Alfredo Chaves apresenta-se como exceção, uma vez que abrange a maior população urbana da bacia e, conseqüentemente, a maior carga de $DBO_{5,20}$, representando até 40% de toda a carga de DBO produzida na bacia. Para os demais distritos, as cargas de $DBO_{5,20}$ exibiram diferenças significativas nos horizontes de tempo analisados. O crescimento da carga de DBO na bacia do Rio Benevente entre os anos de 2017 e 2032 foi de 12%. Os maiores percentuais de crescimento estão associados aos municípios de Anchieta, com 28%, Marechal Floriano e Guarapari, com percentuais pouco superiores a 20%. Vale ressaltar, porém, que a população residente na bacia hidrográfica do Rio Benevente é predominantemente rural.

Avaliação da capacidade de autodepuração do Rio Benevente

As concentrações de $DBO_{5,20}$ simuladas no Rio Benevente permaneceram-se próximas à condição inicial, conforme a Figura 2. A diluição da concentração de $DBO_{5,20}$ causada pela entrada do Ribeirão São Joaquim (km 40,5) contrasta com a elevação da concentração por causa do aporte de esgoto da sede do município de Alfredo Chaves (km 50,5), aporte que produziu a maior variação nos perfis de DBO em todo o trecho do Rio Benevente. Todavia, as maiores concentrações de $DBO_{5,20}$ na bacia foram registradas no Rio Pongal, em razão do lançamento próximo à cabeceira.

A Figura 2 permite observar, adicionalmente, que as concentrações de DBO simuladas com e sem autodepuração apresentaram variações expressivas, quando considerados os resultados associados às seções de controle B (km 51,5) e C (km 74), aos distintos panoramas de tratamento de esgoto e aos horizontes de análise. A concentração média de DBO nas seções de controle B e C, quando não levada em conta a autodepuração, conservou-se próxima de 4 mg/L para disposição final de esgoto bruto (panorama 1) e em torno de 3 mg/L quando esgoto era tratado com 70% de eficiência na remoção de DBO (panorama 3). Da mesma forma, quando incorporada a autodepuração, as concentrações de DBO permaneceram próximas a 3 mg/L no panorama 1 e abaixo de 3 mg/L no panorama 3. As maiores concentrações de DBO no Rio Benevente foram 4,11 (condição 1) e 3,67 mg/L (condição 2), resultados associados ao ano 2032 e panorama 1.

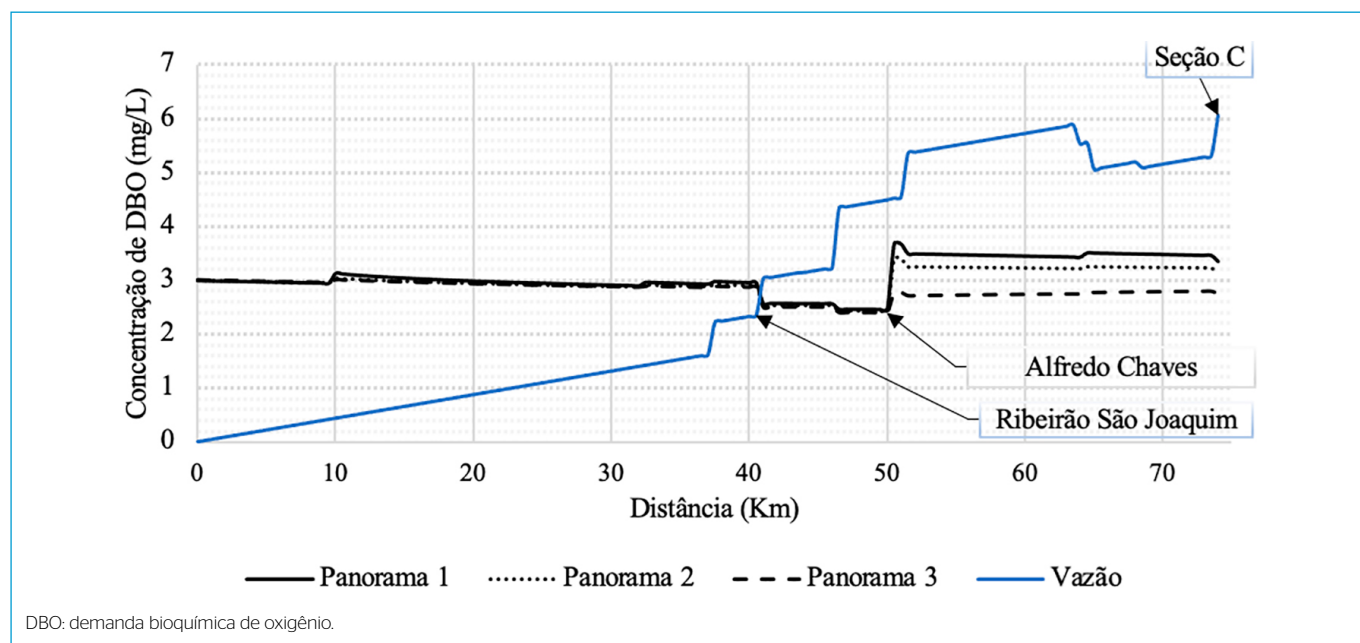
Com os perfis de vazão e concentração de DBO estabelecidos pela modelagem com o modelo QUAL-UFMG, foram apropriadas as cargas totais (condição 1) e as cargas remanescentes (Condição 2) de $DBO_{5,20}$ nas diferentes seções de controle. Assim, foi possível estimar a redução da carga de $DBO_{5,20}$ em função do fenômeno de autodepuração, redução representada na Tabela 4 como cargas assimiladas. Os percentuais de redução da carga total de $DBO_{5,20}$ em função da autodepuração, por sua vez, estão na Tabela 5. As cargas totais e remanescentes de $DBO_{5,20}$ nas seções de controle A, B e C permaneceram praticamente constantes, independentemente do período avaliado para um mesmo panorama de tratamento de esgoto, pois o incremento de carga de DBO em função do crescimento populacional projetado para os horizontes de análise foi pouco expressivo.

Nesse contexto, as cargas assimiladas e percentuais de redução da carga total de $DBO_{5,20}$ permaneceram muito próximos para uma seção, a despeito

Tabela 3 – Cargas totais de $DBO_{5,20}$ produzidas nos distritos da bacia do Rio Benevente relativas à área de contribuição da seção C, segundo os horizontes de tempo e panorama 1 de tratamento de esgoto (0%).

Município	Distrito	População (habitantes)						Carga produzida (kg $DBO_{5,20}$ /dia)								
		2017		2022		2032		2017			2022			2032		
		Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural	CTu	CDr	Total	CTu	CDr	Total	CTu	CDr	Total
Alfredo Chaves	Urânia, Matilde, Ibitirui, Crubixá, Sagrada Família, Ribeirão do Cristo e Alfredo Chaves	6.989	7.212	7.077	7.302	7.255	7.488	514,74	360,6	875,33	521,21	365,12	886,33	534,38	374,35	908,73
Marechal Floriano	Araguaia	229	10	248	11	290	13	17,96	0,5	18,46	19,43	0,54	19,97	22,72	0,64	23,36
Anchieta	Anchieta, Alto Pongal, Jabaquara	1.173	4.315	1.311	4.819	1.634	6.008	58,69	215,82	274,53	65,54	240,99	306,53	81,71	300,46	382,17
Guarapari	Guarapari, Rio Calçado, Todos os Santos	28	1.084	31	1.183	37	1.410	1,41	54,23	55,64	1,54	59,17	60,71	1,83	70,45	72,28
Iconha	Iconha	0	24	0	25	0	28	0	1,21	1,21	0	1,27	1,27	0	1,38	1,38
Total		8.419	12.645	8.667	13.340	9.216	14.947	592,8	632,4	1.225,2	607,7	667,1	1.274,8	640,6	747,3	1.387,9

CDr: carga direta de $DBO_{5,20}$ referente ao esgoto doméstico da população rural; CTu: carga de $DBO_{5,20}$ no esgoto doméstico tratado relativa à população urbana.

**Figura 2** – Perfis de concentração de $DBO_{5,20}$ e vazão simulados para o Rio Benevente, ano de 2032, considerando a autodepuração.

do horizonte de análise considerado. Observou-se também que a influência da autodepuração aumentou da perspectiva de ampliação da cobertura do serviço de tratamento de esgoto.

Quando avaliados os resultados referentes à seção de controle A (Tabelas 4 e 5), a autodepuração foi responsável pelo decaimento de 0,020 t. $DBO_{5,20}$ /dia, o que representa um percentual médio de redução da carga total de $DBO_{5,20}$ de 5,18%. Para a seção B, a carga média assimilada foi de 0,219 t. $DBO_{5,20}$ /dia, que representa percentual médio de 13,18% de redução da carga total de $DBO_{5,20}$. Já para a seção C, a autodepuração foi responsável pela assimilação de 0,310 t. $DBO_{5,20}$ /dia, ou seja, percentual médio de redução da carga total de 16,27%.

Frequência de atendimento dos padrões de qualidade relativos ao parâmetro $DBO_{5,20}$

Nas Figuras 3 e 4 estão representadas as cargas totais (condição 1) e remanescentes (condição 2) de $DBO_{5,20}$, em conjunto com as curvas de permanência de qualidade para o parâmetro $DBO_{5,20}$ referentes à seção de controle C e à projeção para o ano de 2032, segundo os diferentes panoramas de tratamento de esgoto.

Analisando-se as intercessões das cargas com a curva correspondente à classe 1, a seção de controle C, quando assumido o panorama 1 e não considerada a autodepuração (Figura 3), o padrão definido pela classe 1 foi atendido em 78% do tempo. Levando-se em conta as condições de disposição de efluentes

Tabela 4 – Cargas total, remanescente e assimilada de $DBO_{5,20}$ para as seções de controle, considerados os diferentes panoramas de tratamento de esgoto e horizontes de tempo avaliados.

Panorama	Carga de $DBO_{5,20}$	Carga de $DBO_{5,20}$ (t. $DBO_{5,20}$ /dia)								
		Seção A			Seção B			Seção C		
		2017	2022	2032	2017	2022	2032	2017	2022	2032
Panorama 1	Carga total (condição 1)	0,395	0,395	0,395	1,821	1,828	1,841	2,052	2,063	2,086
	Carga remanescente (condição 2)	0,374	0,375	0,375	1,598	1,604	1,617	1,728	1,737	1,757
	Carga assimilada	0,020	0,020	0,020	0,224	0,224	0,224	0,325	0,326	0,329
Panorama 2	Carga total (condição 1)	0,388	0,388	0,389	1,710	1,715	1,725	1,936	1,943	1,957
	Carga remanescente (condição 2)	0,368	0,368	0,369	1,491	1,496	1,506	1,625	1,631	1,643
	Carga assimilada	0,020	0,020	0,020	0,219	0,219	0,219	0,311	0,312	0,313
Panorama 3	Carga total (condição 1)	0,384	0,384	0,385	1,461	1,463	1,467	1,722	1,725	1,732
	Carga remanescente (condição 2)	0,364	0,364	0,365	1,249	1,250	1,254	1,430	1,432	1,438
	Carga assimilada	0,020	0,020	0,020	0,213	0,213	0,213	0,292	0,293	0,294

DBO: demanda bioquímica de oxigênio; condição 1: condição de disposição de efluentes que não considera o processo de autodepuração; condição 2: condição de disposição de efluentes que incorpora o processo de autodepuração.

Tabela 5 – Percentual de redução da carga total de $DBO_{5,20}$ em função da autodepuração, para as diferentes seções, considerados os diferentes panoramas de tratamento de esgoto e horizontes de tempo avaliados.

Panorama	Seção A (%)			Seção B (%)			Seção C (%)		
	2017	2022	2032	2017	2022	2032	2017	2022	2032
Panorama 1	5,16	5,16	5,16	12,29	12,26	12,19	15,81	15,80	15,79
Panorama 2	5,18	5,18	5,18	12,80	12,77	12,71	16,05	16,04	16,02
Panorama 3	5,20	5,20	5,20	14,56	14,55	14,52	16,97	16,96	16,95

DBO: demanda bioquímica de oxigênio.

referentes aos panoramas 2 e 3 (remoções de $DBO_{5,20}$ na condição atual e 70%, respectivamente), a seção de controle C apresentou condições de qualidade compatíveis com a classe 1 por, respectivamente, 83 e 91% do tempo. Observa-se, ademais, que as retas referentes às cargas associadas aos distintos panoramas de disposição de efluentes não tocaram as curvas de qualidade correspondentes às classes 2 e 3. Dessa forma, foram observadas permanências superiores a 95% do tempo nessas possíveis classes de enquadramento.

Quando incorporado o processo de autodepuração (condição 2), a seção C passou a atender à condição de qualidade da classe 1 em torno de 90% do tempo quando analisado o panorama 1 (disposição final do esgoto em seu estado bruto). Para as classes 2 e 3, as permanências foram superiores a 95% do tempo, independentemente do panorama de tratamento efluente adotado, conforme Figura 4.

De forma similar, foram determinadas as permanências nas distintas classes de enquadramento para as diferentes seções de controle analisadas e projeções de crescimento populacional. Esses resultados estão na Tabela 6. As menores permanências nas classes de qualidade consideradas, segundo os distintos panoramas de tratamento de esgoto e seções de controle, se encontram destacadas na Tabela 6. Nas situações em que os percentuais de permanência se apresentaram maiores que o limite superior do intervalo de análise, a permanência foi representada por > 95%, o que corresponde a permanências superiores a 95%.

Uma simples inspeção na Tabela 6 permite observar que o Rio Benevente, independentemente da seção de controle analisada, da perspectiva de crescimento populacional e do tratamento de esgoto, atende às condições de qualidade

relacionadas às classes 2 e 3 em mais de 95% do tempo, mesmo quando não levado em conta o fenômeno de autodepuração. A seção de controle A atende aos critérios de qualidade em mais de 95% do tempo também para a classe 1 de enquadramento, situação que não se repete nas seções B e C. As menores permanências obtidas no Rio Benevente para a classe 1 foram registradas na seção B, seção associada às maiores cargas orgânicas e à disponibilidade hídrica inferior àquela estimada para a seção C.

Sem considerar a autodepuração, foram obtidas permanências médias na classe 1 de 64% para o panorama 1, 68% para o panorama 2 e 79% para o panorama 3. Incorporando-se a autodepuração, as permanências médias foram 73, 77 e 89%, nos panoramas 1, 2 e 3, respectivamente. É relevante observar que diferenças entre os percentuais de atendimento dos padrões estabelecidos para a classe 1 decorrentes do eventual crescimento populacional foram pouco significativas, entretanto a autodepuração mostrou-se responsável por elevar o atendimento dos padrões impostos para rios da classe 1 em cerca de 10% do tempo.

Para a seção de controle C, quando avaliadas as permanências na classe 1, o panorama 1 de tratamento de esgoto conduziu a permanências que variaram de 79 (condição 1) a 91% (condição 2). Na condição atual de tratamento e disposição de esgoto (panorama 2), as permanências médias variaram de 83% na condição 1 a valores maiores ou iguais a 95% na condição 2. Para eficiências na remoção de carga de $DBO_{5,20}$ de 70% (panorama 3), as permanências foram superiores a 91% quando não se considerou a autodepuração e em mais de 95% do tempo quando incorporada a autodepuração, independentemente do horizonte avaliado.

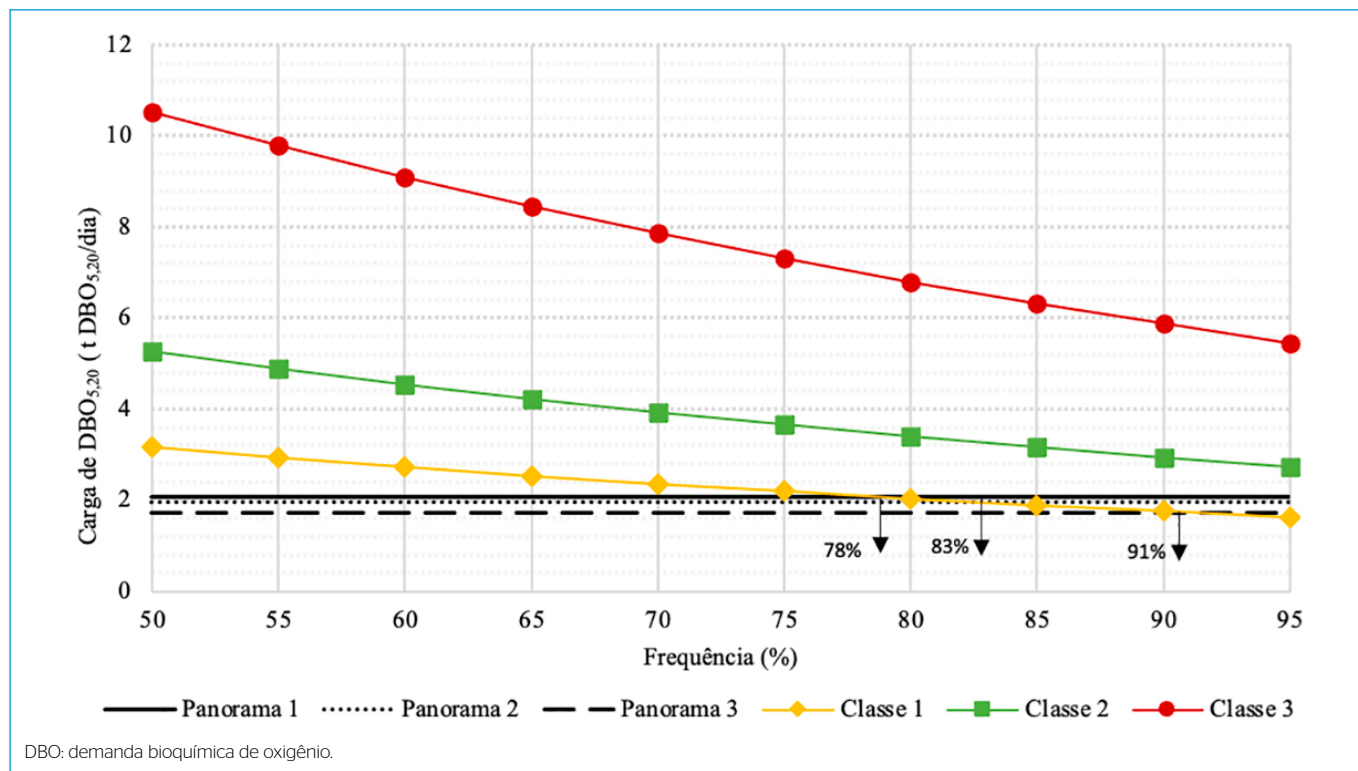


Figura 3 - Permanências nas classes de enquadramento da seção de controle C para o ano de 2032, sem considerar o processo de abatimento de cargas orgânicas pelo processo de autodepuração (condição 1).

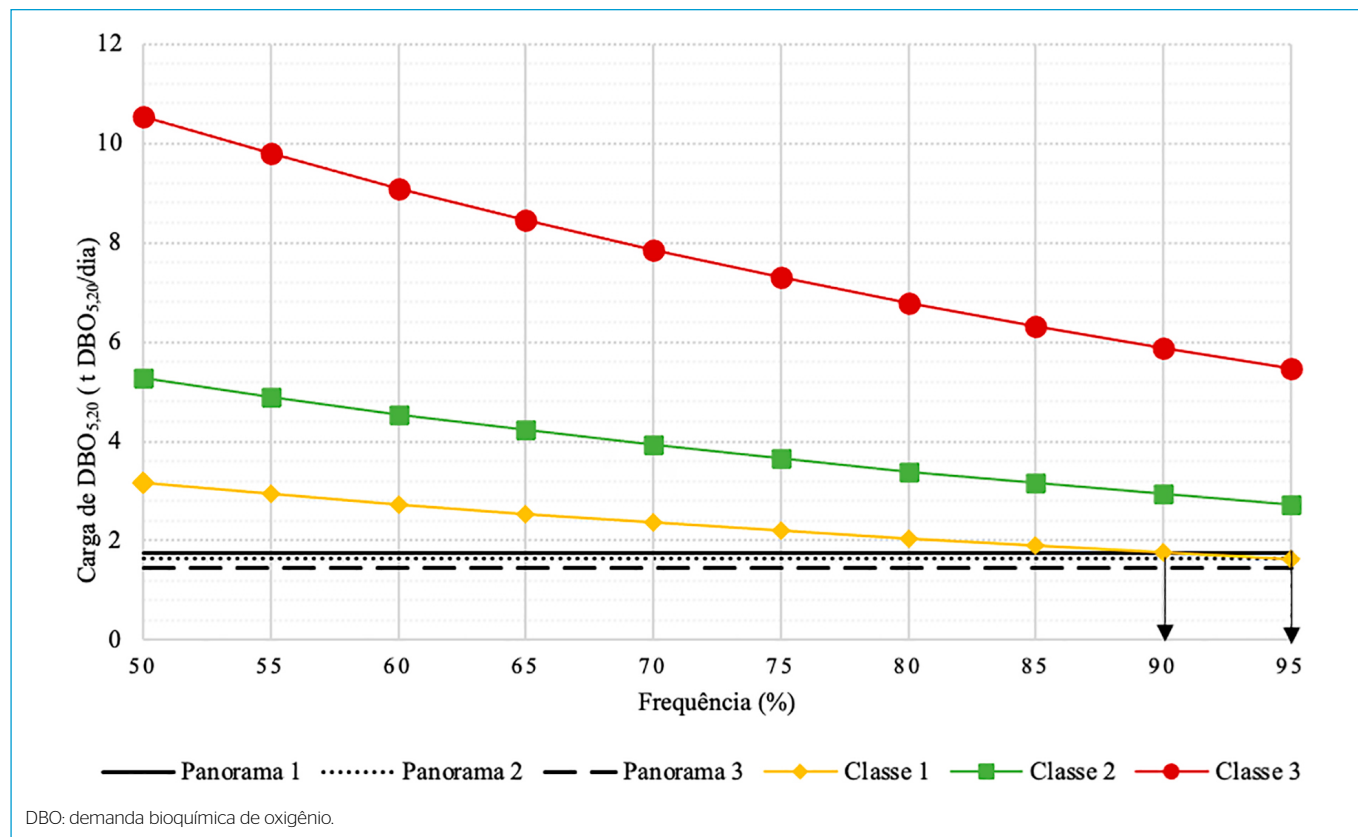


Figura 4 - Permanências nas classes de enquadramento da seção de controle C para o ano de 2032, considerando o processo de abatimento de cargas orgânicas pelo processo de autodepuração (condição 2).

Tabela 6 – Percentagem de compatibilidade com as diferentes classes de enquadramento.

Seção de controle	Ano	Condição de abatimento de carga orgânica	Panorama 1 (%)			Panorama 2 (%)			Panorama 3 (%)		
			Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Seção A	2017	Condição 1	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95
		Condição 2	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95
	2022	Condição 1	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95
		Condição 2	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95
	2032	Condição 1	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95
		Condição 2	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95
Seção B	2017	Condição 1	64,09	> 95	> 95	68,27	> 95	> 95	78,65	> 95	> 95
		Condição 2	72,76	> 95	> 95	77,32	> 95	> 95	89,06	> 95	> 95
	2022	Condição 1	63,86	> 95	> 95	68,07	> 95	> 95	78,56	> 95	> 95
		Condição 2	72,50	> 95	> 95	77,10	> 95	> 95	88,96	> 95	> 95
	2032	Condição 1	63,39	> 95	> 95	67,68	> 95	> 95	78,39	> 95	> 95
		Condição 2	71,98	> 95	> 95	76,66	> 95	> 95	88,76	> 95	> 95
Seção C	2017	Condição 1	79,50	> 95	> 95	83,49	> 95	> 95	91,52	> 95	> 95
		Condição 2	91,29	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95
	2022	Condição 1	79,15	> 95	> 95	83,26	> 95	> 95	91,40	> 95	> 95
		Condição 2	90,93	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95
	2032	Condição 1	78,39	> 95	> 95	82,76	> 95	> 95	91,13	> 95	> 95
		Condição 2	90,15	> 95	> 95	94,71	> 95	> 95	> 95	> 95	> 95

Curvas de permanência de qualidade versus enquadramento legal

Conforme previamente indicado, o processo de enquadramento envolve o estabelecimento de um pacto social entre a sociedade civil, o poder público e os usuários. Esses atores deverão estabelecer um modelo de gestão participativo e descentralizado, buscando a definição de metas de qualidade que terão de ser mantidas ou atingidas num horizonte de planejamento. Nesse contexto, o emprego associado de curvas de permanência de qualidade e da modelagem da capacidade de autodepuração dos cursos d'água estabelece importante lastro para o processo de tomada de decisão associado ao processo de enquadramento, uma vez que as frequências de atendimento dos padrões de qualidade das diferentes classes de uso podem tornar mais claras e consistentes as decisões dos diferentes atores envolvidos no processo.

No enquadramento legal estabelecido para a bacia hidrográfica do Rio Benevente, todo o trecho onde se localizam as seções de controle A, B e C foi classificado como classe 2. Todavia, quando avaliados os resultados apresentados pelo panorama 3 referentes ao ano 2032, as seções A e C apresentaram condições de qualidade que atenderiam ao padrão de qualidade imposto para a DBO_{5,20} na classe 1 em mais de 95% do tempo. Para a seção B, o padrão estabelecido para a classe 1 foi atendido em aproximadamente 90% do tempo e em mais de 95% do tempo para os padrões das classes 2 e 3. Observou-se, assim, que eficiências de remoção de DBO superiores a 70% elevariam a permanência na classe 1 para percentuais superiores a 95%.

Nesse contexto, quando considerada exclusivamente a evolução espacial e temporal da poluição orgânica, a definição de classe 2 como meta final de enquadramento no Rio Benevente, no trecho compreendido entre as seções A e C, pode ser alcançada mesmo que não haja investimentos em melhoria no atendimento por coleta e tratamento de esgoto na bacia. Dessa forma, quando

considerados os resultados decorrentes das curvas de permanência de qualidade para o parâmetro DBO_{5,20}, a definição de classe 2 como meta final para trechos de rios nos quais as permanências na classe 1 se apresentam superiores em 95% do tempo não constitui, a princípio, decisão tecnicamente consistente.

Merece atenção, entretanto, o fato de que o processo de enquadramento conduzido para a bacia do Rio Benevente envolveu a avaliação de outros parâmetros de qualidade de água, como, por exemplo, coliformes termotolerantes — parâmetro que, segundo Lume (2015), apresentou as maiores variações nos resultados que conformaram a fase de diagnóstico.

Ainda que não tenha sido objeto do presente trabalho, a aplicação das curvas de permanência de qualidade para coliformes não constitui limitação metodológica. As curvas podem ser aplicadas para avaliar a qualidade da água em qualquer bacia hidrográfica e para qualquer parâmetro de qualidade da água, desde que um padrão de qualidade esteja associado ao parâmetro de interesse.

Cabe destacar ainda que a aplicação das curvas de permanência de qualidade em uma bacia hidrográfica que já apresenta enquadramento definido abre caminho para que essa abordagem metodológica possa ser utilizada para monitorar a qualidade da água enquanto as medidas estruturais e não estruturais estejam sendo implementadas, a fim de controlar a poluição e, ao final do processo, identificar se a meta final do enquadramento foi cumprida.

CONCLUSÕES

A capacidade de autodepuração do Rio Benevente permitiu a redução de 17% da carga total de DBO_{5,20} aportada aos cursos d'água da bacia. Os rios Batatal e Santa Maria e o Ribeirão São Joaquim apresentaram-se como importantes tributários para diluição da carga poluente no Rio Benevente.

As maiores concentrações de $DBO_{5,20}$, entre os trechos simulados, foram associadas aos rios Pongal e Batatal, pois as fontes se localizam próximas a zonas de cabeceira. Suas vazões, no entanto, não produziram grandes variações no perfil de $DBO_{5,20}$ do Rio Benevente, que apresentou as maiores concentrações após o lançamento de esgoto da sede municipal de Alfredo Chaves.

Independentemente do panorama de tratamento de esgoto, do crescimento populacional e da incorporação da autodepuração, o Rio Benevente apresentou maior compatibilidade com a classe 1 de enquadramento, exceto no trecho a jusante da sede municipal de Alfredo Chaves, que se apresentou mais alinhado com a perspectiva de enquadramento na classe 2.

A aplicação das curvas de permanência de qualidade no Rio Benevente, considerados os padrões de qualidade definidos para as classes 2 e 3 de enquadramento, indicou percentuais de atendimento às referidas classes de qualidade superiores a 95% do tempo, independentemente dos cenários estabelecidos.

As curvas de permanência de qualidade para o parâmetro $DBO_{5,20}$ levando-se em conta o tratamento de esgoto atualmente implantado e em operação na bacia hidrográfica do Rio Benevente indicam perspectiva de enquadramento mais restritiva do que acordado no enquadramento legal em vigor e, portanto, auxiliam os tomadores de decisão a priorizarem objetivos de qualidade da água

mais restritivos, buscando maior proteção à bacia. Adicionalmente, as curvas representam de forma consistente a inter-relação dos aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos, essencial à gestão hídrica.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), Projeto Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes)/Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) AUXPE nº 2.717/2015, o apoio técnico-científico aportado até o momento

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Rodrigues, M.B.: Curadoria de Dados, Software, Análise Formal, Escrita — Primeira Redação, Metodologia. Reis, J.A.T.: Metodologia, Supervisão, Análise Formal, Escrita — Revisão e Edição. Sá, G.L.N.: Análise Formal, Escrita — Revisão e Edição. Almeida, N.K.: Análise Formal, Escrita — Revisão e Edição. Mendonça, A.S.F.: Supervisão, Análise Formal, Escrita — Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Atlas Esgotos: despoluição de bacias hidrográficas*. Brasília: ANA, 2017a.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno*. Brasília: ANA, 2017b.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Hidro-Web: sistemas de informações hidrológicas*. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb>. Acesso em: 1º set. 2017c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9649 - Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 14486 - Sistemas enterrados para condução de esgoto sanitário*. Projeto de redes coletoras com tubos de PVC. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000.
- BABBAR-SEBENS, M.; KARTHIKEYAN, R. Consideration of sample size for estimating contaminant load reductions using load duration curves. *Journal of Hydrology*, v. 372, n. 1-4, p. 118-123, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.008>
- BONTA, J.V.; CLELAND, B. Incorporating natural variability, uncertainty, and risk into water quality evaluations using duration curves. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 39, n. 6, p. 1481-1496, 2003. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2003.tb04433.x>
- BONTA, J.V.; DICK, W.A. Impact of coal surface mining and reclamation on surface water chemical concentrations and load rates in three Ohio watersheds. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 39, n. 4, p. 793-815, 2003. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2003.tb04406.x>
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/l9433.htm. Acesso em: 10 jul. 2017.
- BRASIL. Resolução nº 357 de 18 de março de 2005 do Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Diário Oficial da União*, Brasília, 2005.
- BRITES, A.P.Z.; PORTO, M.F. do A.; PERNANDES, C.S. Enquadramento dos corpos d'água: uma nova visão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18, 2009, Campo Grande. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2009. CD-ROM, p. 1-16.
- CALMON, A.P.S. et al. Combined use of river water quality flow-duration curves and modeling as a tool to support class definition according to conama 357/2005 regulation. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 118-133, 2016. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p118-133>
- CALMON, A.P.S. et al. Subsídios para o enquadramento dos cursos de água da bacia hidrográfica do Rio Itapemirim considerando aportes de esgotos sanitários. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 255-270, 2014. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p255-270>
- CLELAND, B.R. TMDL development from the "bottom up" - part III: duration curves and wet-weather assessments. *Proceedings of the Water Environment Federation*, v. 2003, n. 4, p. 1740-1766, 2003. <https://doi.org/10.2175/193864703784828976>
- CUNHA, D.G.F.; CALIJURI, M. do C. Probabilistic analysis of the occurrence of incompatibility of the water quality with the legal framework of aquatic systems - case study of Pariquera-Açu River (SP, Brazil). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 15, n. 4, p. 337-346, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522010000400006>

- CUNHA, D.G.F.; CALIJURI, M. do C.; MENDIONDO, E.M. Integration between cumulative frequency curves for water quantity and quality as a tool for effective water resources management. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 17, n. 4, p. 369-376, 2012.
- ELETROBRÁS. *Metodologia para regionalização de vazões*. Brasília: Eletrobrás, 1985.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *An approach for using load duration curves in the development of TMDLs*. Washington, DC.: United States Environmental Protection Agency, 2007.
- ESPÍRITO SANTO. Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo. Resolução nº 005 de 17 de junho de 2015. *Diário Oficial [do] Estado do Espírito Santo*, Vitória, 2015. Disponível em: <https://ioes.dioes.gov.br/portal/visualizacoes/pdf/3158#/p:38/e:3158?find=benevente>. Acesso em: 3 mar. 2017.
- ESPÍRITO SANTO. *Projeto de Gerenciamento da Poluição Costeira e de Águas do Estado do Espírito Santo - Projeto Águas Limpas*. Vitória, 2010.
- FARIAS, P.L.C. de et al. Spatial analysis on the watershed of Goiana River - PE: comparison with the use of geoprocessing and ANA data. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v. 7, n. 3, p. 111-124, 2017.
- FERREIRA, D.M.; FERNANDES, C.V.S.; KAVISKI, E. Frequency curves for water quality as support for the framework of water bodies from mathematical modeling under unsteady regime. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 3, p. 479-492, 2016. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011615143>
- FORMIGONI, Y. et al. Análise crítica da curva de permanência de qualidade da água com base em dados históricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19, 2011, Maceió. *Anais*. Porto Alegre: ABRH, 2011. CD-ROM. p. 1-14.
- GARCIA, C.S. et al. *Instrumentos de gestão de recursos hídricos no saneamento básico*. Gestão do Saneamento Básico - Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário. Barueri, 2012.
- GOMES, F.; SIMÕES, S. Simulação de modelagem qualitativa para avaliação preliminar da qualidade da água na bacia do Ribeirão das Perdizes em Campos do Jordão/SP, como subsídio ao enquadramento. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 3, p. 309-326, 2014.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Sinopse do Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2011. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php>. Acesso em: 10 abr. 2017.
- JORDÃO, E.P.; PESSÔA, C.A. *Tratamento de esgotos domésticos*. 6. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.
- KEUPERS, I.; WILLEMS, P. Development and testing of a fast conceptual river water quality model. *Water Research*, v. 113, p. 62-71, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.054>
- KOTNALA, G.; DOBHAL, S.; CHAUHAN, J.S. Monitoring the self-purification capacity of the River Alaknanda stretch at Srinagar, Uttarakhand, India. *International Journal of River Basin Management*, v. 14, n. 4, p. 491-498, 2016. <https://doi.org/10.1080/15715124.2016.1193506>
- LIMA, B.P.; MAMEDE, G.L.; LIMA NETO, I.E. Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 23, n. 1, p. 125-135, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018167115>
- LUME. *Enquadramento dos Corpos de Água e Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Benevente - REA - Relatório Etapa A - Diagnóstico e Prognóstico*. Vitória: Lume, 2013. Disponível em: www.lumeambiental.com.br/prhbenevente. Acesso em: 5 jan. 2017.
- LUME. *Enquadramento dos Corpos de Água e Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Benevente - RS - Relatório Síntese*. Vitória: Lume, 2015. Disponível em: www.lumeambiental.com.br/prhbenevente. Acesso em: 5 jan. 2017.
- LUME. *Modelagem da Qualidade das Águas do rio Benevente - Planilhas QUAL-UFMG*. Vitória: Lume, 2014. Disponível em: www.lumeambiental.com.br/prhbenevente. Acesso em: 5 jan. 2017.
- NOORHOSSEINI, S.A. et al. Public environmental awareness of water pollution from urban growth: The case of Zarjub and Goharrud rivers in Rasht, Iran. *Science of the Total Environment*, v. 599-600, n. 2017, p. 2019-2025, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.128>
- OLIVEIRA FILHO, A.A. de; LIMA NETO, I.E. Water quality modeling at Poti river in Teresina (Piauí, Brazil). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 23, n. 1, p. 3-14, 2018. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522017142354>
- PIOL, M.V.A. et al. Performance evaluation of flow duration curves regionalization methods. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 24, e9, 2019. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920170202>
- REIS, J.A.T. dos et al. Análise regional de vazão mínima de referência na região centro-sul do estado do Espírito Santo. *Revista CIATEC-UPF*, v. 5, n. 2, p. 1-11, 2013. <https://doi.org/10.5335/ciatec.v5i2.3161>
- SLAUGHTER, A.R. et al. A management-oriented water quality model for data scarce catchments. *Environmental Modelling and Software*, v. 97, p. 93-111, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.015>
- SOUSA, H.T. de et al. *SisCAH: Sistema Computacional para Análise Hidrológica*. Versão 1.0. Viçosa: Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Viçosa, 2009. Disponível em: <http://www.gprh.ufv.br/?area=softwares>. Acesso em: 6 set. 2017.
- TEODORO, A. et al. Implementação do conceito Capacidade de Diluição de Efluentes no modelo de qualidade da água QUAL-UFMG: estudo de caso no Rio Taquarizinho (MS). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 3, p. 275-288, 2015. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000300010>
- TIAN, S.; WANG, Z.; SHANG, H. Study on the self-purification of Juma River. *Procedia Environmental Sciences*, v. 11, Part C, p. 1328-1333, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.199>
- TUCCI, C.E.M. *Regionalização de vazões*. Porto Alegre: [s.n.], 2002.
- VON SPERLING, M. *Estudos e modelagem da qualidade da água de rios*. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2007.
- VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3. ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2005.
- WANG, C.; BI, J.; AMBROSE JR., R.B. Development and application of mathematical models to support total maximum daily load for the Taihu Lake's influent rivers, China. *Ecological Engineering*, v. 83, p. 258-267, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.036>