




Modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água como ferramenta para avaliação de enquadramento de corpos d'água

Modelling unsteady flow and water quality as a tool for assessing and managing water bodies

Arthur Humberto Rocha Ferreira¹ , Danieli Mara Ferreira¹ ,
Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes¹ 

¹Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, PR, Brasil. E-mails: arthur.rocha@outlook.com.br, danielimaraferreira@gmail.com, cris.dhs@ufpr.br

Como citar: Ferreira, A. H. R., Ferreira, D.M., & Fernandes, C. V. S. (2021). Modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água como ferramenta para avaliação de enquadramento de corpos d'água. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 18, e20. <https://doi.org/10.21168/rega.v18e20>

RESUMO: O Enquadramento de corpos de água em classes de usos, em acordo com a Lei 9.433/1997, representa um importante instrumento de gestão de recursos hídricos, na medida em que estabelece não só um olhar para a classificação de classes em acordo com concentrações limite de parâmetros de qualidade da água, mas estabelecendo estratégias para a definição de metas futuras de classificação para o rio. Essas metas são importantes para que o gestor tenha noção dos efeitos das alterações de uso da terra na bacia e processos de urbanização, e para que possa basear sua tomada de decisão, tendo uma relação sustentável entre meio ambiente e usos da água e terra. Tradicionalmente, os estudos de enquadramento levam em consideração aspectos de emissão e transporte não considerando variações espaciais e temporais. Este trabalho apresenta uma abordagem alternativa, em que a análise em regime não-permanente é considerada para poder integrar aspectos de emissão em Bacias, sua propagação em rios e a integração com a dinâmica de reservatórios. Neste contexto, avalia-se a aplicabilidade do modelo hidrodinâmico e de qualidade da água HEC-RAS para os rios da união da Bacia do Rio Paranapanema, como ferramenta adicional à gestão de recursos hídricos e enquadramento de corpos de água, considerando a dinâmica espacial e temporal. Destaca-se a implementação do modelo para todo o rio Paranapanema, incluindo a representação do sistema lótico-lêntico, considerando as cinco usinas hidrelétricas a fio d'água e os três reservatórios em operação entre os estados de São Paulo e Paraná. Os parâmetros de qualidade da água considerados foram Demanda Biológica de Oxigênio (DBO), Nitrogênio Total (NT), Fósforo Total (PT) e Oxigênio Dissolvido (OD). Os resultados indicaram capacidade em estimar a frequência de conformidade com os limites de classe para os cenários, em especial NT e DBO, compatível com a dinâmica temporal e espacial, mas com resultados limitados pelos coeficientes cinéticos constantes do modelo e tamanho da área de estudo. A principal contribuição é que resultados confirmam a aplicabilidade da metodologia e da utilização de um modelo de domínio público para incorporação, o HEC-RAS, em ampla escala em bacias hidrográficas.

Palavras-chave: Gestão de Recursos Hídricos; Modelagem em Regime Não-Permanente; HEC-RAS; Reservatórios em Cascata.

ABSTRACT: Part of the management of water resources in Brazil is controlled by the Enquadramento, in accordance with Law 9,433/1997, a tool that defines classes for rivers, based on limit concentrations of water quality parameters, acting as a basis for defining future goals for the river and its basin. These goals can relate land use in the basin and urbanization processes to water quality, which must be guaranteed for the most demanding current and future uses, and crucial for the decision-making on the basin to be based on a sustainable relationship between the environment and the uses of water and land. Traditionally, this type of studies take into account aspects of pollutants emission and transport without considering spatial and temporal variations. This work presents an alternative approach, in which the analysis in the unsteady regime is considered, so it is possible to integrate aspects of emission in Basins, its propagation in rivers and the integration with reservoir dynamics. In this context, the applicability of the hydrodynamic and water quality model HEC-RAS for the rivers Paranapanema and Itararé are evaluated, as an additional tool to the management of the water resources in the river basin, considering the spatial and temporal dynamics. The implementation of the model for the entire Paranapanema River stands out, including the

Recebido: Julho 22, 2021. Revisado: Setembro 26, 2021. Aceito: Outubro 11, 2021.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

representation of the lotic-lentic system, considering the five run-of-river hydroelectric plants and the three reservoirs in operation between the states of São Paulo and Paraná. The water quality parameters considered were Biological Oxygen Demand (BOD), Total Nitrogen (NT), Total Phosphorus (PT) and Dissolved Oxygen (DO). The results indicated the ability of the model to estimate the frequency of compliance with the classes, as presented in the Enquadramento, for multiple scenarios and compatible with the temporal and spatial dynamics. The NT and BOD results stood out, while the other parameters were more strongly limited by the kinetic coefficients approach of the HEC-RAS model and the size of the study area, which challenged the calibration process. The main contribution is that the results confirm the applicability of the methodology and the use of the HEC-RAS, on a large hydrographic basin with a series of cascade-reservoirs.

Keywords: Water Resources Management; Unsteady Flow Modelling; HEC-RAS; Cascade Reservoirs.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico, social e ambiental de uma bacia hidrográfica são os pilares para o crescimento sustentável, que é condicionado ao adequado planejamento visando atenuar os efeitos de emissões poluentes. Setores produtivos como a pecuária, agricultura e indústria tem o protagonismo econômico, mas também são responsáveis pelos impactos no meio ambiente no local com o aumento no lançamento de agrotóxicos, fertilizantes, químicos e poluentes em geral, além de desmatamento e alterações no uso da terra. O equilíbrio entre essas variáveis é um grande desafio, cuja solução demanda o adequado planejamento e gestão sustentável de uso da terra e de recursos hídricos.

Dentro deste contexto, a Lei 9.433/97 instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) com o objetivo de garantir o uso de recursos hídricos em quantidade e qualidade adequada aos seus usos, e assegurar sua disponibilidade para as gerações atuais e futuras. Os fundamentos são: bem de domínio público, recurso escasso e limitado, dotado de valor econômico e cuja gestão deve atender a distintos usos. Também define os mecanismos de governança através dos Comitês de Bacias Hidrográficas, de forma descentralizada e com a participação do poder público, usuários e a Sociedade Civil. Dos 5 instrumentos previstos em lei, destacam-se para esse estudo: planos de recursos hídricos – planos diretores que visam fundamentar e orientar a implementação da PNRH, outorga de uso – instrumento administrativo que visa controlar o uso da água para garantir sua disponibilidade, e o enquadramento de corpos de água. Este tem como objetivo definir classes para os rios, que devem ser atribuídas de forma a garantir que a qualidade da água do rio seja suficiente para seu uso mais exigente, além de diminuir custos de combate à poluição com ações preventivas (Brasil, 1997).

Os principais instrumentos normativos associados ao enquadramento são a Lei 9.984/2000, resolução CONAMA 357 (Brasil, 2005) e a resolução CNRH 91/2008. Essa separa os corpos hídricos por tipo, como água doce, salina e salobra, ambientes lóticos e lênticos, além de apresentar as classes para cada tipo. Cada classe define valores limite para uma série de parâmetros, cujos valores devem ser obedecidos nas condições de vazão de referência. A resolução também indica que possíveis interações entre os parâmetros devem ser observadas, não podendo causar alterações no comportamento do ecossistema local, assim como alterar os usos preponderantes previstos. No entanto, a resolução não detalha critérios para a definição da vazão de referência, apenas que é responsabilidade do Comitê da Bacia Hidrográfica.

Em geral, conforme apresentado por Bitencourt et al. (2019), as metas de enquadramento são obtidas a partir do cálculo das concentrações de constituintes avaliadas no cenário da vazão de referência, em geral, a $Q_{7,10}$ (vazão mínima de 7 dias de duração e tempo de recorrência de 10 anos) ou Q_{95} (vazão com tempo de permanência igual a 95%). Essa abordagem simula uma situação frequente e que não considera a variação temporal de vazões e de concentração de poluentes. Em aplicações de modelagem, essa estratégia implica em menor tempo computacional e utilização de modelos de qualidade da água em regime permanente (Bitencourt et al., 2019).

Mais recentemente, com a necessidade de se avaliar o enquadramento de corpos de água considerando o efeito dinâmico de bacias hidrográficas, influenciado por características do uso da terra e do regime hidrológico, modelos em regime não-permanente para a gestão de recursos hídricos passaram a ser utilizados (Ferreira et al., 2016, 2019; Ferreira, 2019). Essa dinâmica é intensificada em cenários urbanos e com rios controlados por reservatórios (Ferreira, 2021). Fica evidente que estes aspectos, que interferem diretamente na dinâmica de transporte de constituintes, podem ter um impacto significativo nas estratégias de implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos (Ferreira, 2021; Ferreira et al., 2016).

Adicionalmente, outros estudos voltados a aplicações de modelagem na gestão de recursos hídricos apontam a importância de considerar as interações rio-reservatórios e a variação temporal. Tendo como área de estudo a bacia do Rio Tietê, Tercini & Mélo Júnior (2016) desenvolveram um modelo em regime permanente unidimensional, aplicado a 83 quilômetros de rio e um reservatório, considerando 12 cenários que variam o nível do reservatório, vazão de descarga e concentração de entrada de demanda biológica de oxigênio DBO. A conclusão obtida é que o reservatório tem grande influência nos processos dinâmicos associados aos parâmetros de qualidade da água à jusante do barramento, sendo influenciados pela carga de DBO afluente, nível do reservatório e vazão descarregada.

O impacto gerado pela carga de DBO afluente e nível do reservatório indicam a importância da modelagem integrada de bacia e rio. Luo et al. (2020) apontam os efeitos da urbanização e alterações de uso no solo nos rios da região estudada, indicando que os impactos gerados pelo processo de crescimento urbano têm menor impacto nos corpos hídricos e equilíbrio da fauna que as alterações relacionadas a agricultura, agropecuárias e afins. Essa pesquisa também indicou resultados diferentes para as estações seca e úmida, com resultados piores para a estação seca (inverno), destacando a importância da consideração da variação temporal. Resultados semelhantes àqueles apresentados por Moura et al., (2013), que analisou a distribuição de fitoplâncton ao longo do Rio Contas, rio controlado por uma série de reservatórios, também observando a redução na variação das concentrações dos parâmetros associados a qualidade da água, processo chamado de homogeneização, e aumento de algas durante o período seco.

Estabelecida a importância da relação entre alterações no uso de solo e qualidade da água, ressalta-se que as formas de as integrar são avaliando os dados observados, ou usando modelos em regime não-permanente. A pesquisa desenvolvida por da Silva et al. (2019) estudou os dados disponíveis para o Rio Jauru, entre os anos de 1990 e 2013, abrangendo inclusive a construção de um dos seis reservatórios do rio. Esse tipo de abordagem permitiu concluir relações de causa-consequência, como a forma com que as características físicas dos reservatórios influenciam os parâmetros de qualidade da água, mas não permite simular cenários diferentes. Para a simulação de cenários diferentes requer-se o desenvolvimento de modelos em regime não permanente, como desenvolvido por Wang et al., (2016), que avaliou o impacto de projetos de represamento e desvio no transporte de água e poluentes para o Rio Hianjiang (China), e como esses impactariam a classificação do rio. Esse estudo também aponta a regularização das vazões, mas ao contrário dos outros indica que as obras de represamento e desvio implicariam em queda de qualidade da água, fazendo com que o Rio não atendesse mais os critérios mínimos de sua classe.

Dentro deste contexto, no que concerne a aplicação para o enquadramento de corpos de água, Ferreira et al. (2016) propõe o uso de curvas de permanência como alternativa a abordagem baseada em vazões de referência, usando como base a bacia do Rio Iguazu, na Região Metropolitana de Curitiba (PR). O estudo indicou a versatilidade da abordagem em regime não-permanente, trazendo melhor compreensão sobre a variação temporal das vazões e concentrações dos poluentes e os potenciais impactos para melhor avaliar as estratégias de implementação do Enquadramento de corpos de água.

Dentro desse contexto, o presente estudo integra simulações em regime não-permanente, aplicadas a gestão de recursos hídricos. Mais particularmente, destaca uma representação de sistema ambiental que considera a integração Rio-Reservatório para a Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema, com 929 km de extensão e 100.800 km² de área de bacia hidrográfica. A principal contribuição deste artigo é de apresentar estas reflexões através de uma aplicação de modelo hidrodinâmico e de qualidade da água como ferramenta de auxílio a gestão e tomada de decisão. Os resultados são avaliados por curvas de permanência e comparados com os limites de classe (Brasil, 2005) utilizando cenários de referência com aporte de poluentes crescentes (Universidade Federal do Paraná, 2020a). Optou-se por aplicar o modelo HEC-RAS 5.0.7, programa de acesso público e com extensa aplicação em estudos de escoamento de águas superficiais (Che & Mays, 2017; Correia, 2018; Fleischmann et al., 2019; Vijay et al., 2018). Adicionalmente, para complementação de referencial bibliográfico é apresentada uma tabela resumo para a revisão bibliográfica do tema, permitindo categorizar o objetivo de cada estudo, diferenciais, modelos usados, cujo conteúdo é apresentado no item 4 do material suplementar.

MATERIAIS E MÉTODOS

Usaram-se como base os dados disponibilizados na plataforma HidroWeb (Agência Nacional de Águas, 2020), e pelas instituições Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE-SP), Instituto Água

e Terra (IAT) e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Os dados de vazão, medidos em intervalo diário, passaram pelas etapas de obtenção, processamento e seleção, nas quais se definiu o ano base de 2012, por ter a maior quantidade de dados disponíveis. Para as condições de contorno do modelo hidrodinâmico, usaram-se as estações com dados disponíveis para 2012, enquanto para qualidade da água usaram-se aquelas com dados disponíveis para o período 2000 – 2017 e localizadas nas entradas e saídas dos reservatórios, denominadas “estações de referência” (Universidade Federal do Paraná, 2019).

Modelagem Hidrodinâmica

As simulações foram conduzidas em regime não-permanente na direção longitudinal (1D), baseando-se nas equações de Saint-Venant. Essa abordagem permite avaliar a influência da variação temporal no sistema, um dos objetivos da pesquisa, para um esquema de escoamento compatível com aquele observado em rios. Cabe destacar que representações em Sistemas 2D são indicados para usos mais específicos (J

eppson, 2010), usualmente em situações em que o foco está nas características de escoamento e qualidade da água entre as margens, exigindo mais dados, esforço computacional e tempo de desenvolvimento. Aplicou-se o modelo em regime 1D para todas as simulações, sendo que os trechos de reservatórios são representados como seções de rios mais largas e controlados pelas vazões de descarga das barragens, ao contrário da abordagem tradicional, que usualmente simula de forma separada os reservatórios e considera seu início e fim como condições de contorno.

Essa abordagem é vista em estudos de otimização de operação de reservatórios (Che & Mays, 2017), onde usa-se o HEC-RAS para simular o volume de água e descargas de reservatório; assim como em estudos de rompimento de barragem (Goodell, 2005), onde também se usa o programa para simular o volume contido na barragem e o hidrograma gerado pelo seu rompimento – no entanto, nenhum dos casos explora características de qualidade da água.

Desenvolvidas no século XIX, as equações de Saint-Venant (Equações 1 e 2) permitem simular o comportamento hidrodinâmico de rios. Sendo equações diferenciais sem soluções exatas, requerem métodos numéricos para sua solução, além das condições iniciais e de contorno (U.S. Army Corps of Engineers, 2016):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial VQ}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (2)$$

Onde: t = tempo [s]; Q = Vazão [m³/s]; A = Área da seção transversal [m²]; q = Contribuição lateral por unidade de distância [m³/s.m]; g = Aceleração da gravidade [m/s²]; S_f = Inclinação da linha de energia [-]; V = Velocidade [m/s]; z = Elevação da superfície [m].

A solução das equações de Saint-Venant não é um processo simples, envolvendo o desenvolvimento de programas ou o uso de ferramentas prontas. Optou-se nesse caso pelo uso do programa HEC-RAS, ferramenta de modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água de domínio público, com módulo de integração com dados georreferenciados (SIG) e ampla base de usuários. As Equações 1 e 2 são resolvidas usando o esquema numérico de diferenças finitas implícito de 4 pontos, conhecido como *box scheme* (U.S. Army Corps of Engineers, 2016).

Modelagem de Qualidade da Água

Com os resultados da simulação hidrodinâmica, é possível desenvolver as simulações de qualidade da água, que tem como base a equação Advecção – Dispersão – Reação (ADR) (Brunner, 2016).

$$\frac{\partial}{\partial t} V\phi = - \frac{\partial}{\partial x} (Q\phi) \Delta x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \Delta x \pm S \quad (3)$$

Onde:

V = Volume [m³]; \varnothing = Temperatura da Água (°C) ou concentração [kg/m³]; Q = Vazão [m³/s]; Γ = Coeficiente de dispersão [m²/s]; A = Área da seção transversal [m²]; S = Fontes e sumidouros [kg/s].

A equação ADR avalia a concentração do poluente baseado nos dados de escoamento da célula computacional e nas taxas de conversão dos poluentes, que podem ser negativas (decaimento) ou positivas (acumulação). Essa é calculada individualmente para cada nutriente simulado, dependendo da concentração e taxas de conversão de outros nutrientes, temperatura, taxa de oxidação, etc. (Brunner, 2016). Além desses processos de transformação, o termo S, calculado por equações únicas para cada fração, inclui cargas pontuais e difusas que o sistema recebe ao longo do escoamento. Na versão utilizada do HEC-RAS, considerou-se os processos que simulam oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo e nitrogênio, interpretados como fósforo total (PT) e nitrogênio total (NT), cujas equações são apresentadas no item 1 do material suplementar.

O ciclo de nitrogênio representa as transformações pelas quais o elemento passa em contato com a água: frações dissolvidas de Nitrogênio Orgânico (OrgN), Amônia (NH₄), Nitrito (NO₂) e Nitrato (NO₃), apresentados nos resultados como a soma das frações, denominada Nitrogênio Total (NT). No ciclo de fósforo, são contabilizadas as frações dissolvidas de Fósforo Orgânico (OrgP) e ortofosfato (PO₄); Fósforo Total (PT) é considerado como a soma dessas frações. O termo Γ da Equação 3 representa a dispersão, forma como os poluentes são misturados na água pelos efeitos do fluxo turbulento e diferenças de velocidade. A equação ADR é resolvida usando o método explícito Quicket-Ultimate (Brunner, 2016).

Área de Estudo

Separando parte da fronteira entre os estados Paraná e São Paulo, a bacia do Paranapanema tem 100.800 km² de área e abriga uma população de 4,2 milhões de pessoas, além de dois rios de domínio da união – Rio Paranapanema, com 929 km de comprimento, e Itararé, com 220 km. Os rios são caracterizados pela influência de usinas hidrelétricas, que totalizam oito ao longo do Rio Paranapanema, e das quais cinco são a fio d'água. Os três reservatórios com barragens são Jurumirim, Chavantes e Capivara, sendo que o reservatório de Chavantes fica logo após a junção dos rios e é único ao longo da calha do Rio Itararé. A área de estudo é representada pela Figura 1, que ilustra as variações de altitude do Modelo de Elevação de Terreno (MDE) e posição das estações usadas no modelo hidrodinâmico, e pela Figura 2, que localiza as estações de referência usadas para calibração e avaliação dos resultados de qualidade da água.

Características do Modelo Hidrodinâmico

Um dos desafios para o desenvolvimento e utilização de modelos como o proposto, baseado no HEC-RAS, parte da demanda de dados necessários para sua adequada implementação. No que concerne aos dados de geometria, para melhor traduzir as características do relevo local para inclinação do canal e área das seções transversais, foram utilizadas um total de nove seções transversais medidas, disponibilizadas no banco de dados HidroWeb (Agência Nacional de Águas, 2020); estas foram complementadas com a geração de outras seções transversais a partir de um arquivo de Modelo de Elevação de Terreno (MDE) da região nos trechos sem medições disponíveis. Esse uniu as elevações da bacia, com resolução de 30 metros, com as batimetrias dos oito reservatórios da bacia hidrográfica, com resolução de 25 metros, permitindo a geração de mais seções transversais (Figura 1). O trecho de rio com seções transversais geradas a partir da batimetria do reservatório tem comprimento de 556,8 km, sendo que comprimento total do trecho simulado é de 720,5 km. Esse método se mostra eficaz (Fleischmann et al., 2019) mas dependente da resolução dos dados disponíveis, condição que nesse caso é contornada pelo grande porte do Rio Paranapanema, com quase 1km de largura em sua foz, e com a geração das seções transversais majoritariamente nos trechos de reservatório. Esses dados mostram boa precisão pois as elevações dos reservatórios vêm das batimetrias, dado mais preciso que as elevações de terreno geradas via satélite.

A condição de contorno de montante controla a entrada de água do modelo, para a qual usou-se os hidrogramas diários observados para o ano de 2012. Como condição de contorno interna, usou-se a diferença entre as vazões diárias observadas nas estações indicadas na Figura 1, gerando uma série de dados diários que representa as interações do rio com o ambiente ao seu redor – contribuição lateral causada por chuva, afluentes, pontos de captação de água, entre outros. As descargas das barragens são representadas como condições de contorno internas, na forma de vazões média diárias,

dado obtido nas estações localizadas nas saídas dos reservatórios – 64215080, 64270090 e 64516080 (Figura 1). As simulações nos reservatórios seguem o mesmo método proposto para os rios, sendo tratados como trechos de rio com seções transversais maiores e controlados pelo fluxo de água afluente e vazões de descarga definidas para a barragem a jusante.

A condição de contorno de jusante é a profundidade normal, calculada a partir da equação de Manning e função da inclinação do fundo do canal no ponto e coeficiente de rugosidade. Essa inclinação foi obtida a partir da elevação e distância entre as duas últimas estação HidroWeb no rio, e tem valor de 0,027%. Como condição inicial, que define os valores de início para solução das equações de Saint-Venant, usou-se os dados referentes ao primeiro dia do período considerado (01/01/2012), com término no dia 31/12/2012. O menor intervalo de tempo que gerou simulações estáveis foi 2 minutos, com seções transversais interpoladas para cada 200 metros, e coeficiente de rugosidade de Manning = $0,02 \text{ m}^{-1/3}$. S. A faixa de valores sugeridos pela literatura para o coeficiente de Manning é entre 0,02 e $0,05 \text{ m}^{-1/3}$. S (Chapra, 1997; Jeppson, 2010). Esse valor foi definido como o inicial, baseado em valores de apresentados em (Chapra, 1997; Ferreira et al., 2020) para as simulações e calibração, que não foi necessária por conta dos bons resultados iniciais.

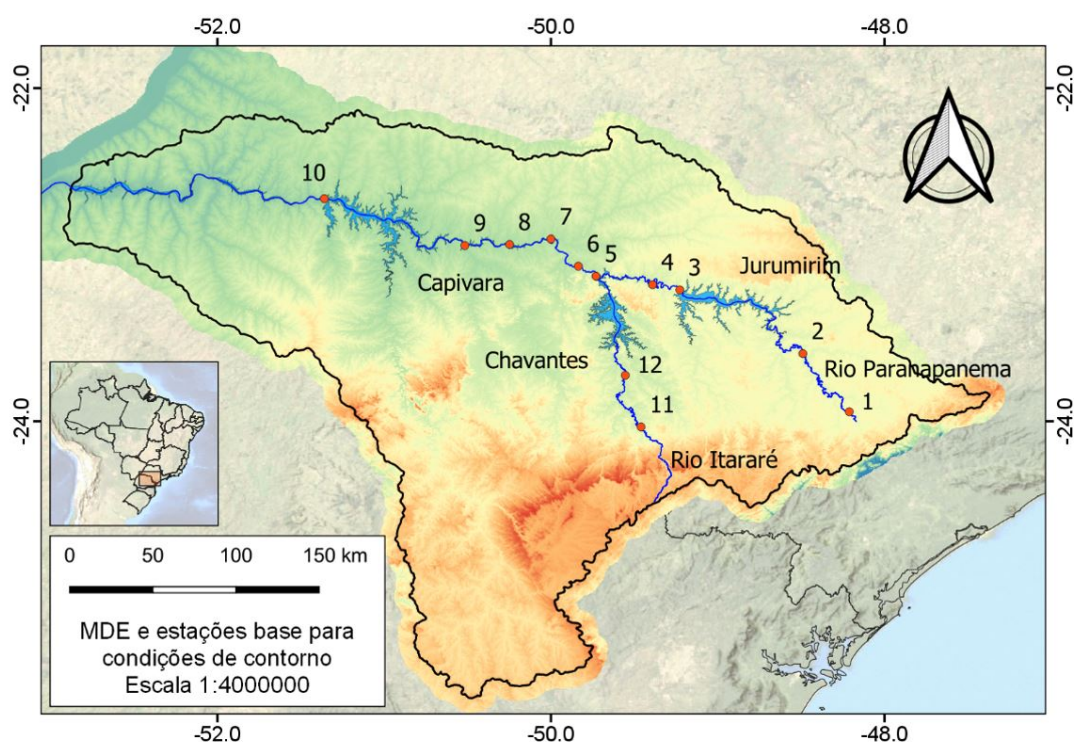


Figura 1 - mapa base do MDE e estações usadas para gerar as condições de contorno do modelo hidrodinâmico, onde os números correspondem às estações: 1 = 64005000; 2 = 64080000; 3 = 64215080; 4 = 64220050; 5 = 64270080; 6 = 64278080; 7 = 64332080; 8 = 64345075; 9 = 64345080; 10 = 64516080; 11 = 64231000; 12 = 64247000.

Características do Modelo de Qualidade da Água

Para solução da equação ADR e simulações de qualidade da água, usaram-se cargas de DBO, PT e NT geradas por ottobacia, representando a forma com que os diferentes usos de solo contribuem com poluentes que chegam ao rio, na forma de cargas diárias anuais constantes distribuídas em 123 trechos (Universidade Federal do Paraná, 2019), expandidos para 6 cenários referentes aos anos 2025 e 2035, com aumento de aporte de cargas estagnado, tendencial e acelerado (Tabela 1 – adaptado de (Universidade Federal do Paraná, 2020a). Esses trechos foram compatibilizados com aqueles usados para geração das contribuições laterais do modelo hidrodinâmico, permitindo gerar séries de concentrações de entrada desses poluentes. Fez-se então a mistura dessas cargas na vazão com tempo de permanência de 50% (Q_{50}) do trecho avaliado, resultando na concentração de entrada diária constante para o cenário base. A condição de contorno de montante são séries sintéticas para cada fração de poluente avaliado, na forma de concentrações diárias geradas a partir do método autorregressivo de primeira ordem e do conjunto histórico de monitoramento, como apresentado por

Ferreira et al. (2019). Como condição inicial usou-se os dados referentes ao primeiro dia do período considerado, 01/01/2012. Os coeficientes de aumento no aporte de carga para os cenários futuros são apresentados na Tabela 1, aplicados aos 123 trechos base de acordo com sua localização. Os detalhes do método são apresentados no item 2 do material suplementar.

Tabela 1 - Coeficiente de aumento no aporte de cargas nos cenários futuros, onde: UGRH = Unidade de Gestão de Recursos Hídricos, UPH = Unidade de Planejamento Hídricos.

UGRH/UPH	Cenário Tendencial		Cenário Acelerado		Cenário Estagnado	
	2025	2035	2025	2035	2025	2035
Alto Paranapanema	1,53	1,99	1,77	2,75	1,37	1,62
Médio Paranapanema	1,63	2,27	1,97	3,63	1,43	1,74
Pontal do Paranapanema	1,57	2,17	1,90	3,53	1,37	1,63
Norte Pioneiro	1,55	2,18	1,93	3,83	1,35	1,61
Tibagi	1,34	1,83	1,63	3,17	1,21	1,40
Piraponema	1,47	1,94	1,74	3,09	1,33	1,54

A resolução espacial é de 1000 metros, enquanto o intervalo de tempo não é definido diretamente. A resolução temporal é calculada de forma dinâmica a cada passo de tempo, variando conforme os coeficientes de dispersão do rio e dos coeficientes de Peclet e Courant da célula para cada passo de tempo (Brunner, 2016). A calibração foi conduzida de forma a aproximar a mediana das séries diárias geradas àquela do conjunto dos dados históricos, tendo como base as estações indicadas na Figura 2, em um processo de tentativa e erro. Este processo abrangeu as frações de nitrogênio, fósforo na forma de ortofosfato dissolvido, OD e DBO, atuando nas taxas de reação e sedimentação. A temperatura não foi simulada, assumindo valor constante de 20 °C, assim como os coeficientes de dispersão, que tiveram valor fixo de 20 m²/s. Os valores usados para os coeficientes cinéticos, assim como a faixa de valores de referência recomendados, são apresentados no item 1 do material suplementar.

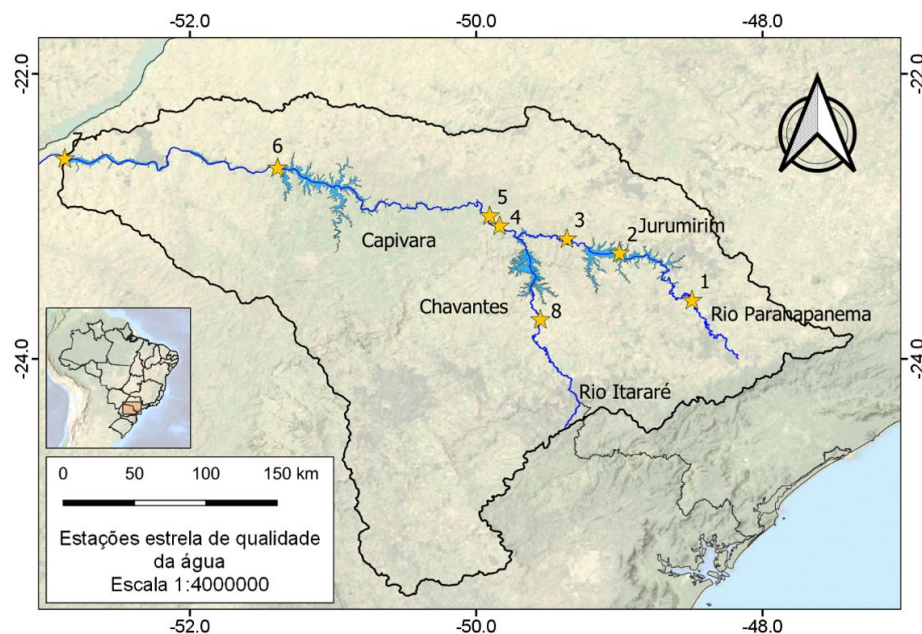


Figura 2 - localização da bacia, rios, reservatórios e estações de referência, onde os números das estações correspondem às estações Hidroweb e código alternativo CETESB: 1 = 64081000 / PARP 02100; 2 = 64214000 / JURU 02500; 3 = 64219000; 4 = 64278080; 5 = 64326000 / PARP02500; 6 = 64516900 / PARP 02750; 7 = 64571100 / PARP02900; 8 = 64245200 / ITAR 02500.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise Hidrodinâmica

Os resultados são expressos pela comparação dos hidrogramas e curvas de permanência para a estação 64332080 (Figuras 3 e 4), considerada representativa por estar em uma seção de rio após a junção dos rios Paranapanema e Itararé, e a 54 km da barragem de Chavantes; e para a estação 64080000 (Figuras 5 e 6), localizada na cabeceira do Rio Paranapanema e não sem receber a influência do remanso do reservatório de Jurumirim. Os resultados para as demais estações, destacando os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS) entre os dados observados e simulados, são apresentados na Tabela 2 e indicados no item 3.1 do material suplementar.

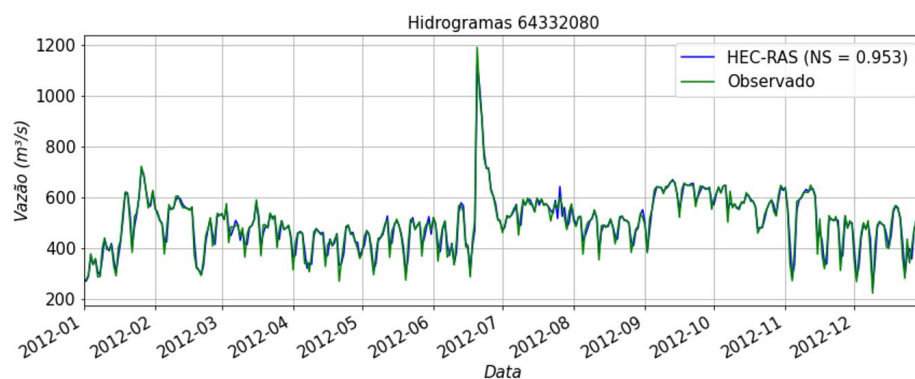


Figura 3 - Comparação entre hidrogramas observado e simulado para a estação 64332080.

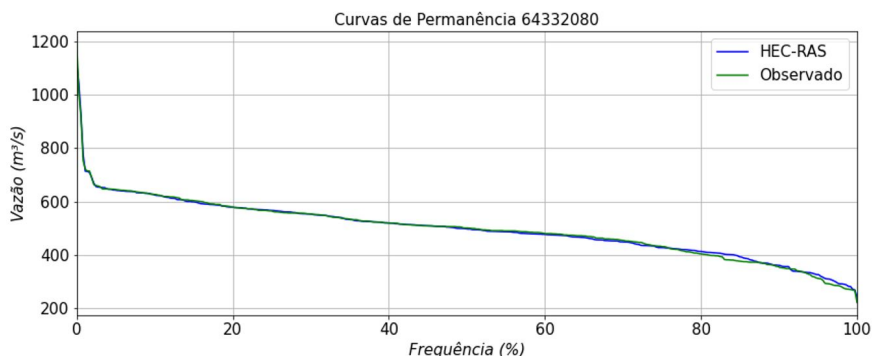


Figura 4 - Comparação entre as curvas de permanência das vazões observadas e simuladas para a estação 64332080.

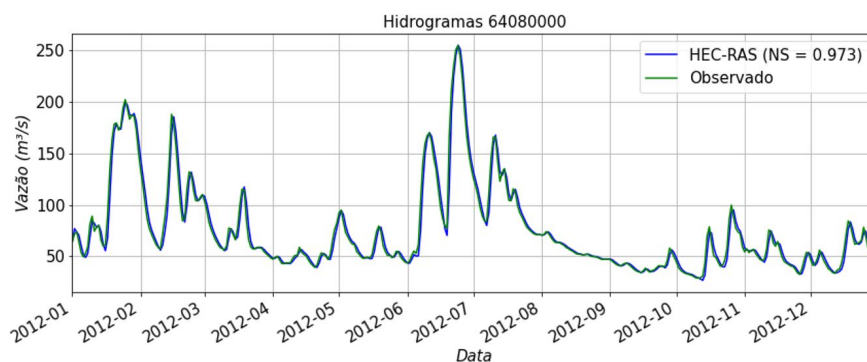


Figura 5 - Comparação entre hidrogramas observado e simulado para a estação 64080000

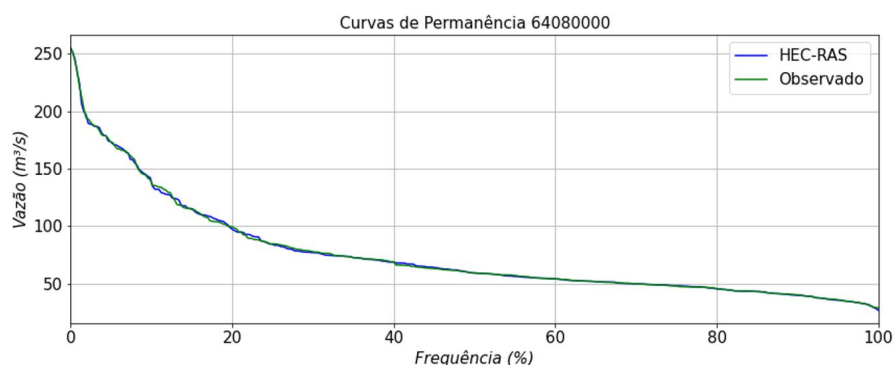


Figura 6 - Comparação entre as curvas de permanência das vazões observadas e simuladas para a estação 64080000.

Tabela 2 - Coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS) para as hidrogramas simulados e observados.

Estação	64080000	64220050	64247000	64278080	64332080	64345075	64345080
Nash-Sutcliffe (NS)	0,973	0,994	0,984	0,992	0,953	0,905	0,860

A estação 64332080, com os resultados expressos na Figura 3, representa um trecho com escoamento controlado pela barragem de Chavantes, após a junção dos rios. As vazões diárias simuladas são próximas das observadas (NS=0,953), incluindo os picos, comportamento observado também nas outras estações.

Os resultados das simulações hidrodinâmicas utilizando o modelo HEC-RAS foram considerados satisfatórios, em acordo com a Tabela 2 para as sete estações de referências, indicando a eficiência do modelo em propagar as vazões e representar adequadamente a geometria dos rios e reservatórios. Esses resultados complementam os de Ferreira (2019), que utilizou o mesmo método para estimar as contribuições laterais em seu estudo do Rio Iguaçu, no trecho da Bacia do Alto Iguaçu, com vazões diárias simuladas próxima aquelas observadas, inclusive nos picos. Esses picos também indicam a influência dos reservatórios nos hidrogramas a jusante, sujeitos às regras de operação de vazões descarregadas. Estações sem essa influência, como a 64080000, com seus hidrogramas de vazões medidas e simuladas ilustrados na Figura 5, tem variações de valores menos bruscas.

Comparando-se os hidrogramas apresentadas nas Figuras 3 e 5, nota-se um dos efeitos dos reservatórios no escoamento indicado por outros estudos (Guo et al., 2020; Poff et al., 2007): a regularização das vazões. As curvas de permanência das estações 64332080 (Figura 4) e 64247000 (Figura 6) apresentam uma variação aproximadamente linear. Resultados similares para as demais estações estão indicados no item 3.1 do material suplementar.

Esse comportamento reflete as regras de operação das usinas hidrelétricas e consequentes vazões de descarga dos reservatórios, e do efeito de regularização de vazões, típico de aproveitamento de queda energética com reservatórios em cascata.

Análise de Qualidade da Água

Os resultados para as simulações de qualidade da água são representados pelas curvas de permanência para os parâmetros Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Fósforo Total (PT), Nitrogênio Total (NT) e Oxigênio Dissolvido (OD) para as estações 64326000 (Figura 7), por estar logo após a junção dos rios e 64571100 (Figura 8), por estar na foz do Rio Paranapanema e 64245200 (Figura 9), representando o Rio Itararé.

Adicionalmente, apresenta-se os resultados para a estação 64326000 considerando os resultados para os cenários futuros (Figura 10 - Universidade Federal do Paraná, 2020b), destacando-se os limites de classe definidos na resolução CONAMA nº 357/2005 (Brasil, 2005). Para o parâmetro NT, os limites foram arbitrados para fins de comparação, dado que a norma não define valores únicos de referência; para PT, assumiu-se os limites compatíveis a ambientes intermediários entre sistema lântico e lótico, enquanto OD e DBO utilizam-se dos valores especificados para regime fluvial (Ferreira, 2021).

As curvas de permanência foram construídas ordenando a concentração do poluente de forma decrescente, indicando a frequência de tempo que determinada concentração é excedida. OD tem as

concentrações ordenadas de forma crescente para que valores de permanência maiores continuem indicando os valores mais críticos, portanto indicando a frequência de tempo em que determinada concentração de oxigênio dissolvido é atingida. Os resultados de qualidade da água são apresentados na íntegra no item 3.2 do material suplementar.

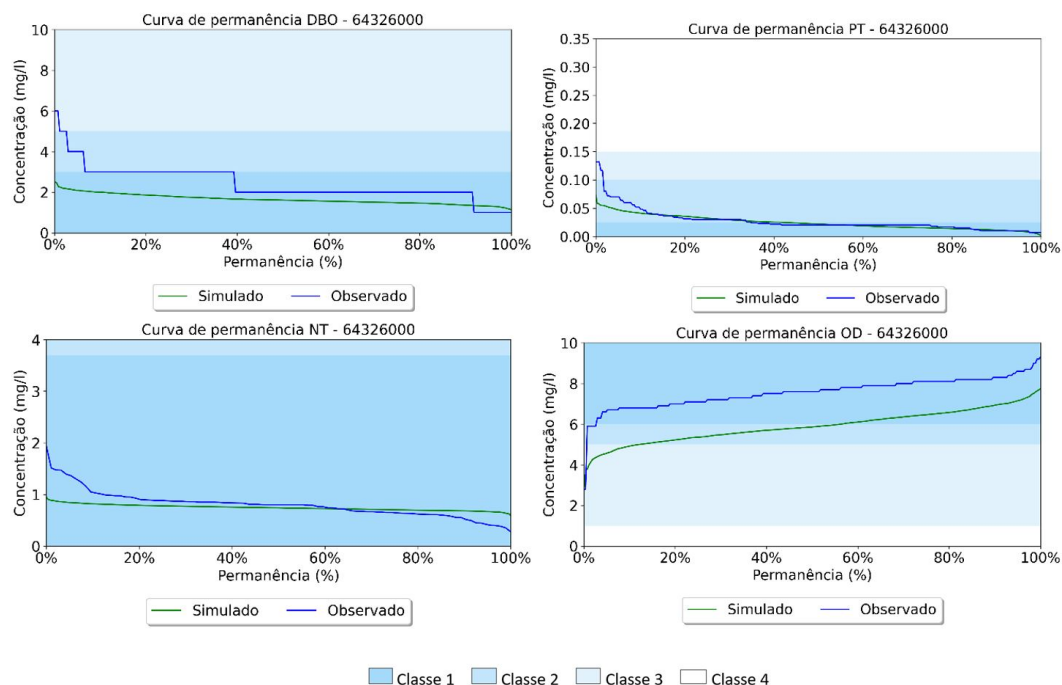


Figura 7 - Resultados das simulações de qualidade da água para a estação 64326000 e comparação com os dados observados.

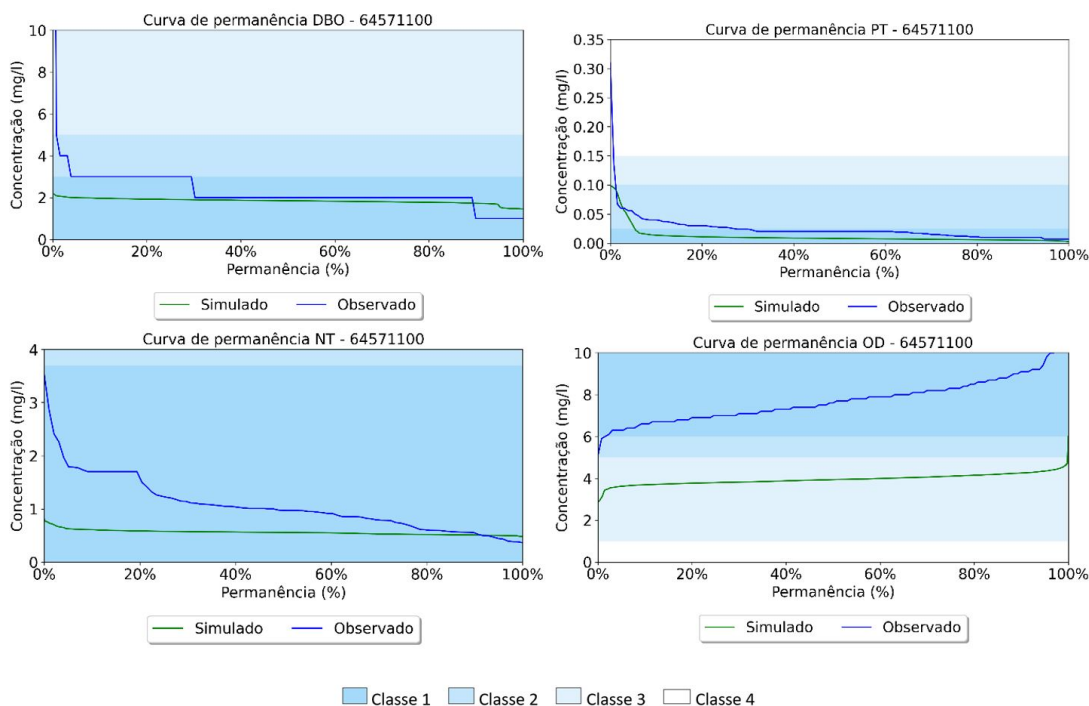


Figura 8 - Resultados das simulações de qualidade da água para a estação 64571100 e comparação com os dados observados.

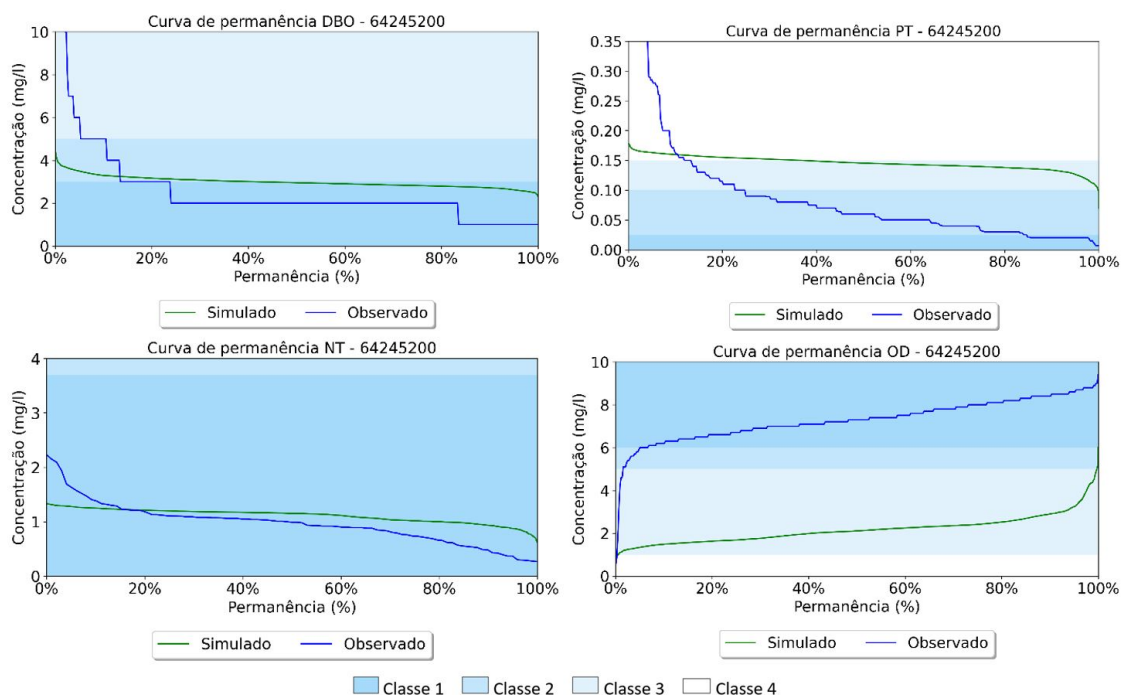


Figura 9 - Resultados das simulações de qualidade da água para a estação 64245200 (Rio Itararé e comparação com os dados observados).

O parâmetro DBO teve resultados mais próximos dos observados, com concentrações dentro dos limites de classe 2 para a estação 64245000 e de classe 1 para as estações 64326000 e 64571100. Nota-se que os valores de permanência nos extremos das curvas de permanência das concentrações observadas, menores que 5% e maiores à 95%, tendem a ser mais distante dos observados, comportamento atribuído a natureza dos valores das séries históricas, que podem não representar a variação esperada no período de análise. Ressalta-se que a comparação com as concentrações observadas também é limitada pela frequência de dados disponível, normalmente medidos com intervalo de meses, e por limitações nos próprios processos usados em laboratório para avaliar as concentrações.

Uma das questões mais significativas na análise apresentada está associada aos processos analíticos utilizados e formalmente registrados nos bancos de dados oficiais. Claramente os valores apontam para medições dentro do limite de detecção, explicando a repetição dos valores de concentração igual a 2 e 3 mg/L para DBO, por exemplo. No que concerne a utilização do modelo HEC-RAS para as simulações de qualidade da água nas condições de regime não permanente, fica evidente o desafio de uma adequada calibração, de forma a melhor representar os processos físicos, químicos e biológicos e de transporte dos poluentes (Beneditini & Tsakiris, 2013).

As simulações de NT também geraram curvas de permanência similares às observadas, com exceção da estação 64571100, que tem concentrações simuladas menores que as observadas. Esse comportamento é atribuído principalmente à sua posição, na exutória da área de estudo logo após uma sequência de reservatórios a fio d'água, representados como seções largas de rio, que tendem a reduzir as concentrações dos poluentes.

De forma análoga, as concentrações de NT na cabeceira dos rios tiveram seus valores superestimados. Esses resultados são corroborados pelo estudo apresentado por Cunha-Santino et al. (2017), que avaliaram o impacto de uma série de 23 reservatórios em cascata na bacia do Rio Juquiá-Guaçu, concluindo que esses tendem a acumular poluentes e reduzir suas concentrações nos trechos a jusante de rio.

Do mesmo modo, há estudos que avaliam como a operação pode influenciar as concentrações de poluentes ao longo do sistema, como sugerido por Chen et al. (2019) em sua análise de PT ao longo do Rio Lancang (China), e por Wang et al. (2018) em seu estudo do rio Han, que focou no desenvolvimento de uma estratégia de operação para reduzir o impacto dos reservatórios. Ambos os estudos concluíram que é possível operar os reservatórios de forma a reduzir os impactos, tanto no equilíbrio ecológico quanto nas concentrações de fósforo exportadas.

A diferença entre os resultados e os dados observados de PT são maiores que para os outros parâmetros, sugerindo que o método aplicado no HEC-RAS não seja eficiente em representar seus fenômenos de transporte e transformação (Brunner, 2016). Entretanto, os resultados foram bons para a estação 64326000, indicando que o método proposto de simulação integrada rio – reservatório pode replicar as concentrações observadas, mas limitados pela calibração baseada com coeficientes cinéticos constantes usada no modelo.

Um dos objetivos e diferenciais desse trabalho foi avaliar o comportamento de um modelo integrado rio – reservatório, com uma geometria e conjuntos de condições de contorno para dois rios extensos. Entretanto, a versão utilizada do modelo HEC-RAS não permite definir coeficientes de transformação (cinética de reações químicas) diferentes dentro da mesma simulação, implicando no uso de coeficientes de calibração únicos para toda a geometria (Brunner, 2016). É possível que essa característica limite a capacidade do modelo em representar o comportamento de qualidade da água, uma vez que esses coeficientes podem variar ao longo dos mais de 1.000 km de rio, limitação que outros autores contornam ao desenvolver simulações por trechos de rio. Tercini & Mélo Júnior (2016), por exemplo, analisaram o impacto de um reservatório na qualidade da água em trechos a jusante de rio, calibrando por trecho, obtendo resultados que indicam o efeito dos reservatórios em reduzir a concentração de poluentes.

Os resultados de OD também exibiram diferença significativa entre as concentrações simuladas e observadas, comportamento que pode ser atribuído a sua complexidade de modelagem (Mannina & Viviani, 2010). Além de estar diretamente relacionado com as reações bioquímicas que o HEC-RAS simula, é possível que o sistema seja mais sensível a alguma dessas variáveis, de forma que os dados disponíveis e o método aplicado limitem os resultados gerados (Brunner, 2016).

A modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água utilizando o modelo HEC-RAS apresenta um potencial de aplicação para problemas de Gestão de Recursos Hídricos muito desafiador. A representação da geometria dos reservatórios e aportes laterais de carga, além da correta representação dos processos de transporte e reações dos poluentes usando coeficientes cinéticos constantes, não limitaram a sua utilização, mas indicam a necessidade de aprimoramento dessas condições de contorno.

Considerando essa limitação e a metodologia aplicada que propõe avaliar o impacto de uma representação com geometria que integre trechos de rios e reservatórios, os resultados foram condizentes com o comportamento físico esperado. As simulações foram capazes de replicar a conformidade com os limites de classe dos rios Paranapanema e Itararé mas, para uma representação mais próxima das condições de qualidade da água indicadas pelo monitoramento, seria necessário aplicar um modelo que varie os coeficientes cinéticos, ou simular trechos mais curtos.

Análise para a Gestão de Recursos Hídricos

A partir da simulação apresentada e calibrada para o ano de 2012, denominada cenário base (B12), aplicou-se os cenários de crescimento de aporte de cargas aos rios de acordo com o desenvolvimento da bacia (Universidade Federal do Paraná, 2020b), dando origem às simulações para os cenários estagnado, tendencial e acelerado para 2025 (E25, T25 e A25) e 2035 (E25, T25 e A25), apresentados na Figura 10 para a estação 64326000. Os resultados completos para todos os cenários indicados na Tabela 1 são apresentados no item 3.3 do material suplementar.

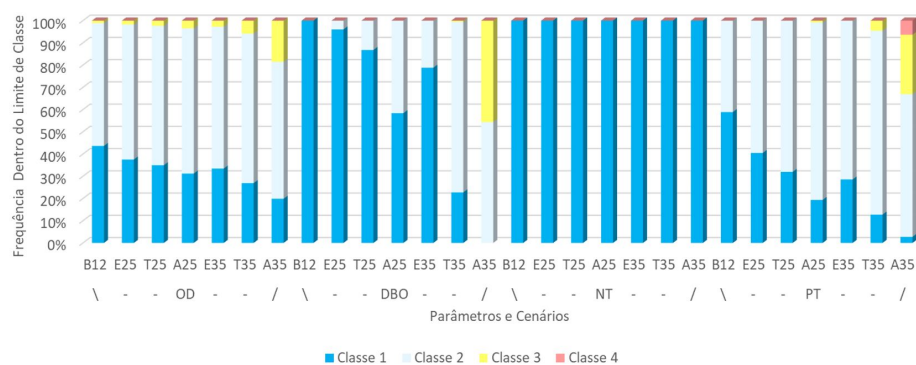


Figura 10 – Frequência em cada classe para a estação 64326000, para dados observados (OBS) e simulados para os cenários base (B12), estagnado, tendencial e acelerado para os anos de 2025 (E25, A25 e T25) e 2035 (E25, T25 e A35).

Os resultados apresentados na Figura 10 indicam a frequência que cada parâmetro atinge os limites de classe nos cenários propostos, para a estação 64326000. Essa visualização permite avaliar o impacto do aumento das concentrações de entrada de poluentes nos cenários futuros na conformidade com a classe proposta para o rio (1, 2, 3 ou 4), resultado apresentado no formato de curvas de permanência na Figura 11.

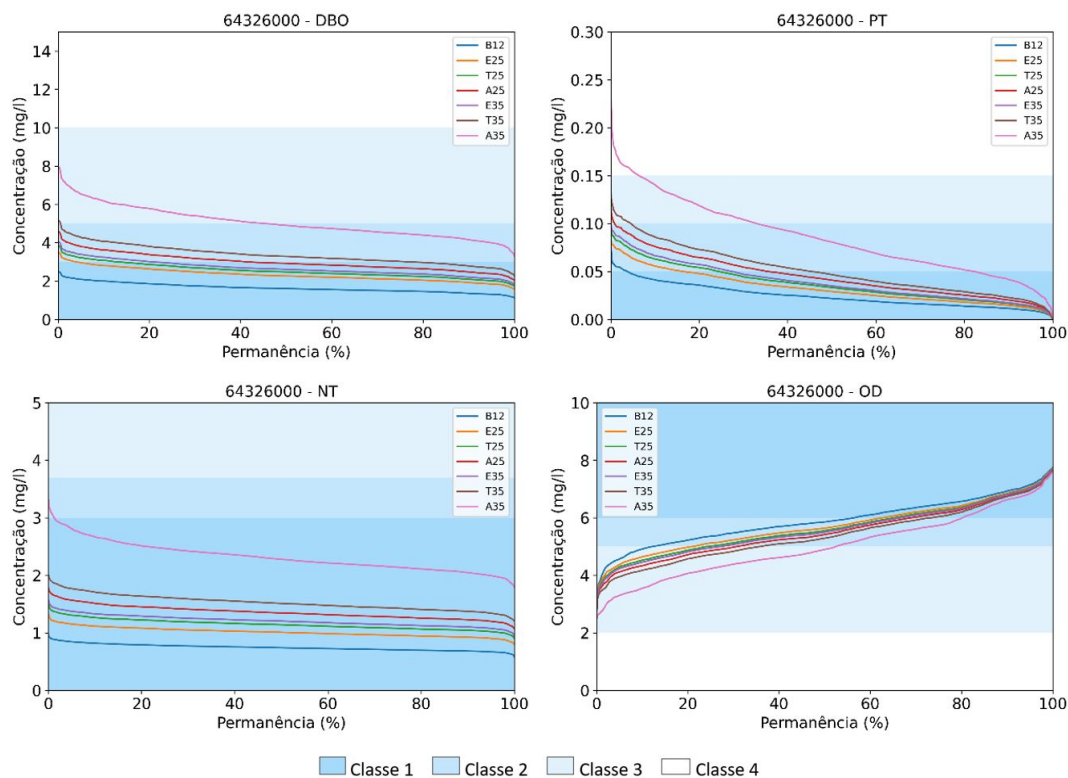


Figura 11 – Curvas de permanência de DBO, PT, NT e OD da estação 64326000, para os resultados dos cenários base (B12), estagnado, tendencial e acelerado para os anos de 2025 (E25, A25 e T25) e 2035 (E35, T35 e A35).

Os resultados apresentados nas Figuras 10 e 11 permitem entender o impacto do aumento de aporte de cargas na conformidade ao enquadramento do Rio Paranapanema. Para o trecho avaliado, nesse caso a região logo após a junção dos rios Paranapanema e Itararé, o aumento nas concentrações de entrada dos poluentes reduziria a frequência com que esse atingiria os limites de classe 1, mas se mantendo dentro dos limites da classe 2 para DBO, NT e PT para mais de 95% do tempo para todos os cenários, menos A35, que sugere frequência de 46% do tempo em classe 3 para DBO.

Adicionalmente, esta análise pode ser utilizada para auxiliar o Comitê de Bacia, indicando quais parâmetros são mais críticos e sensíveis, assim como a forma com que o desenvolvimento da bacia pode alterar em cenários futuros a conformidade com a classe estabelecida para o rio, permitindo quantificar as reduções de carga necessárias para atender as concentrações limite das classes no futuro. Tomando como exemplo o parâmetro DBO e a estação 64326000, pode-se notar pela Figura 10 que o ponto teve concentrações dentro dos limites de classe 1 para quase 100% do tempo; mas que caso o cenário avançado se concretize, essa frequência de permanência dentro do limite de classe 1 caiu para 55% no ano de 2025, e 0% no ano de 2035, se mantendo durante cerca de 50% do tempo dentro do limite de classe 2. Com essas informações, o comitê pode avaliar se esses 50% do tempo no ano de 2035, com concentrações de DBO acima do limite de classe 2, é uma condição satisfatória para atender os seus usos mais exigentes.

Tomando como base o trecho da estação 64326000, OD se mostrou menos sensível que os demais parâmetros, com menos diferença entre as curvas, sendo que as variações de DBO, NT e PT nos cenários analisados indicam qual variável deveria receber mais atenção para que o rio se mantivesse em conformidade com a classe proposta. As concentrações dos três poluentes indicam permanência em classe 1 para o cenário base, sendo que NT também se mantém dentro dos limites propostos pela classe 1 para os demais cenários, portanto não sendo a variável mais crítica. Por outro lado, as curvas

de permanência de PT e DBO assinalam possibilidade de não cumprimento das concentrações limite para classe 3 durante mais de 20% do tempo, caso o cenário A35 se concretize, indicando que o controle desses poluentes requer mais atenção.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A gestão integrada de recursos hídricos e a implementação dos instrumentos previstos em lei, requerem uma base técnica que permita integrar os efeitos de emissão de poluentes e os mecanismos de transporte em rios e reservatórios. Este trabalho compila estas questões com foco no enquadramento de corpos de água e a integração rio-reservatório, para melhor representação dos comportamentos hidrodinâmico e de qualidade da água em dois rios, Paranapanema e Itararé, totalizando mais de mil quilômetros de comprimento, em uma bacia de 100.800 km². A consideração dos efeitos hidrodinâmicos permitiu estabelecer um modelo integrado como ferramenta de subsídio ao enquadramento, complementando o trabalho de Ferreira et al. (2016). Os resultados avaliam a variação na concentração de poluentes no rio ao longo do tempo, comparando os resultados com as curvas de permanência históricas dos pontos observados. Essa avaliação foi ampliada para cenários futuros de aumento de cargas, quantificando os efeitos de alterações socioeconômicas e de uso do solo futuras e seus impactos na qualidade da água nos rios.

Esses resultados viabilizam indicar a frequência com que os pontos avaliados atingem as concentrações limite para atender seus usos mais exigentes. Em termos práticos, a aplicação deste método permite definir as metas progressivas para atendimento aos cenários estabelecidos dentro do horizonte de planejamento de um plano de bacia. Nesse caso manter os rios Paranapanema e Itararé em classes compatíveis com seus usos mais exigentes, e associar esse objetivo com os resultados obtidos nos cenários futuros da modelagem em regime não-permanente. Esses dados possibilitam ao gestor planejar estratégias de controle nas emissões de poluentes na bacia, baseando-se em dados quantitativos vindos de uma abordagem de modelagem mais representativa que a tradicional baseada em vazões de referência.

Esse resultados corroboram estudos anteriores, como o proposto por Ferreira et al. (2019), que aplicam de permanência como ferramenta adicional para gestão, tendo como diferencial a simulação integrada rio-reservatório de um sistema com reservatórios em cascata, baseando-se na ferramenta HEC-RAS (Brunner, 2016; U.S. Army Corps of Engineers, 2016).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Águas – ANA. (2020). *Hidroweb*. Recuperado em 1 de julho de 2021, de <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>
- Benedini, M., & Tsakiris, G. (2013). *Water quality modelling for rivers and streams* (Vol. 70). Switzerland: Springer.
- Bitencourt, C., Fernandes, C., & Gallego, C. (2019). Panorama do enquadramento no Brasil: uma reflexão crítica. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 16(1), 9.
- Brasil. (1997). Lei nº 9.433/1997. Política Nacional de Recursos Hídricos. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.
- Brasil. (2005). Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS River analysis system user's manual*. Davis: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center [s.l: s.n.].
- Chapra, S. (1997). *Surface water-quality modeling* (1st ed., Vol. 1). McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- Che, D., & Mays, L. W. (2017). Application of an optimization/simulation model for real-time flood-control operation of river-reservoirs systems. *Water Resources Management*, 31(7), 2285-2297.
- Chen, X., Xu, B., Zheng, Y., & Zhang, C. (2019). Nexus of water, energy and ecosystems in the upper Mekong River: a system analysis of phosphorus transport through cascade reservoirs. *The Science of the Total Environment*, 671, 1179-1191.
- Correia, R. (2018). *Utilização de dados topo-batimétricos para a modelagem hidrodinâmica 1D com apoio de um sistema de informações geográficas: estudo de caso do Rio Paraguai* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

- Cunha-Santino, M. B., Fushita, Â. T., & Bianchini Junior, I. (2017). A modeling approach for a cascade of reservoirs in the Jiquiá-Guaçu River (Atlantic Forest, Brazil). *Ecological Modelling*, 356, 48-58.
- Ferreira, A. H. R. (2021). *Integração rio-reservatório: estratégia para enquadramento dinâmico utilizando o modelo HEC-RAS* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Ferreira, D. M. (2019). *Integrated analysis for modeling of flow and transport of contaminants in rivers* (Tese de doutorado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Ferreira, D. M., Fernandes, C. V. S., & Kaviski, E. (2016). Curvas de permanência de qualidade da água como subsídio para o enquadramento de corpos d'água a partir de modelagem matemática em regime não permanente. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(3), 479-492.
- Ferreira, D. M., Fernandes, C. V. S., Kaviski, E., & Fontane, D. (2020). Transformation rates of pollutants in rivers for water quality modelling under unsteady state: A calibration method. *Journal of Hydrology*, 585, 124769.
- Ferreira, D., Fernandes, C. V. S., Kaviski, E., & Fontane, D. (2019). Water quality modelling under unsteady state analysis: strategies for planning and management. *Journal of Environmental Management*, 239, 150-158.
- Fleischmann, A., Paiva, R., & Collischonn, W. (2019). Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison. *Journal of Hydrology X*, 3, 100027.
- Goodell, C. R. (2005). Dam break modeling for tandem reservoirs: a case study using HEC-RAS and HEC-HMS. In *World Water Congress 2005: Impacts of Global Climate Change - Proceedings of the 2005 World Water and Environmental Resources Congress* (pp. 402).
- Guo, X., Zhu, X., Yang, Z., Ma, J., Xiao, S., Ji, D., & Liu, D. (2020). Impacts of cascade reservoirs on the longitudinal variability of fine sediment characteristics: a case study of the Lancang and Nu Rivers. *Journal of Hydrology*, 581, 124343.
- Jeppson, R. (2010). *Open channel flow: numerical methods and computer applications* (1st ed.). Routledge.
- Luo, Z., Shao, Q., Zuo, Q., & Cui, Y. (2020). Impact of land use and urbanization on river water quality and ecology in a dam dominated basin. *Journal of Hydrology*, 584, 124655.
- Mannina, G., & Viviani, G. (2010). A hydrodynamic water quality model for propagation of pollutants in rivers. *Water Science and Technology*, 62(2), 288-299.
- Moura, A., Severiano, J. S., Tavares, N. K. A., & Dantas, E. W. (2013). The role of a cascade of reservoirs and seasonal variation in the phytoplankton structure in a tropical river. *Brazilian Journal of Biology = Revista Brasileira de Biologia*, 73(2), 291-298.
- Poff, N. L. R., Olden, J. D., Merritt, D. M., & Pepin, D. M. (2007). Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(14), 5732-5737.
- Silva, A. C. C., Fantin-Cruz, I., Lima, Z. M., & Figueiredo, D. M. (2019). Cumulative changes in water quality caused by six cascading hydroelectric dams on the Jauru river, tributary of the pantanal floodplain. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 24, e18.
- Tercini, J. R. B., & Mélo Júnior, A. V. (2016). Modelo de simulação de OD e DBO integrando rio e reservatório aplicado ao rio Tietê. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(2), 338-346.
- U.S. Army Corps of Engineers – USACE. (2016). *HEC-RAS river analysis system hydraulic reference manual version 5.0*. Washington.
- Universidade Federal do Paraná – UFPR. (2019). *Relatório consolidado de modelagem hidrodinâmica e de qualidade das águas superficiais em rios de domínio da união e seus reservatórios na UGRH Paranapanema* (Nota Técnica, No. 2). Curitiba. Recuperado em 1 de julho de 2021, de <https://sites.google.com/view/paranapanema-openmodels/home?authuser=1>
- Universidade Federal do Paraná – UFPR. (2020a). *Relatório consolidado de modelagem hidrodinâmica e de qualidade das águas superficiais em rios de domínio da união e seus reservatórios na UGRH Paranapanema* (Nota Técnica, No. 3). Curitiba. Recuperado em 1 de julho de 2021, de <https://sites.google.com/view/paranapanema-openmodels/home?authuser=1>
- Universidade Federal do Paraná – UFPR. (2020b). *Relatório consolidado de modelagem hidrodinâmica e de qualidade das águas superficiais em rios de domínio da união e seus reservatórios na UGRH Paranapanema* (Nota Técnica, No. 4). Curitiba. Recuperado em 1 de julho de 2021, de <https://sites.google.com/view/paranapanema-openmodels/home?authuser=1>

- Vijay, R., Gupta, R., & Dash, S. (2018). Modelling approach for water quality assessment of Pili River using HEC-RAS. *Journal of Indian Water Works Association*, 44(1), 24-30.
- Wang, H., Lei, X., Yan, D., Wang, X., Wu, S., Yin, Z., & Wan, W. (2018). An ecologically oriented operation strategy for a multi-reservoir system: a case study of the Middle and Lower Han River Basin, China. *Engineering*, 4(5), 627-634.
- Wang, Y., Zhang, W., Zhao, Y., Peng, H., & Shi, Y. (2016). Modelling water quality and quantity with the influence of inter-basin water diversion projects and cascade reservoirs in the Middle-lower Hanjiang River. *Journal of Hydrology*, 541, 1348-1362.

Contribuições dos autores:

Arthur Humberto Rocha Ferreira: análise dos dados, desenvolvimento das simulações, criação dos mapas, discussões conceituais, redação do artigo.

Danieli Mara Ferreira: orientação do projeto, discussões conceituais, redação do artigo, revisão do artigo.

Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes: elaboração do projeto, discussões conceituais, orientação do projeto, revisão do artigo.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Apresenta-se nesse anexo o Material Suplementar do artigo Modelagem Hidrodinâmica e de Qualidade da Água como Ferramenta para avaliação de Enquadramento de Corpos d'água. Esse documento é segmentado de forma a apresentar as seguintes informações:

Sumário

1. Equações e coeficientes cinéticos das simulações de qualidade da água no HEC-RAS	2
1. Nitrogênio	4
2. Fósforo	5
3. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	6
4. Oxigênio Dissolvido (OD).....	6
2. Detalhes dos Coeficientes de Cenuarização.....	8
3. Resultados Completos das Modelagens Hidrodinâmicas e de Qualidade da Água	11
1. Modelo Hidrodinâmico	11
1. Rio Paranapanema	11
2. Rio Itararé.....	13
2. Modelo de Qualidade da Água.....	14
3. Rio Paranapanema	15
4. Rio Itararé.....	18
3. Cenários Futuros	18
4. Tabela de Revisão Bibliográfica	22
.....	30

1. Equações e coeficientes cinéticos das simulações de qualidade da água no HEC-RAS

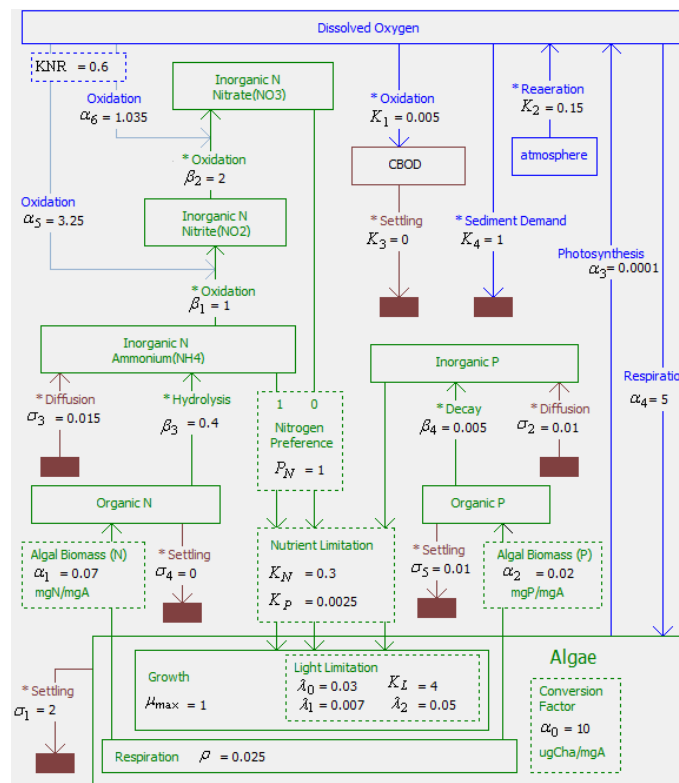
Entre os termos da equação ADR (equação 1), o termo “S” representa a taxa de variação na concentração da variável, causada por sedimentação e fenômenos de reação. Enquanto os demais termos a direita da equação são relativos a advecção e dispersão, ambos em função de escoamento, o termo “S” é função das reações químicas dos elementos, assim como taxas de entrada, saída e sedimentação. Como cada elemento se relaciona de forma única com os demais, conforme apresentado na Figura 1, tem-se uma equação para elemento, apresentadas entre as equações 2 e 8 para OD, DBO, frações de nitrogênio e fósforo.

$$\frac{\partial}{\partial t} V\phi = -\frac{\partial}{\partial x} (Q\phi)\Delta x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \Delta x \pm S \quad (1)$$

Onde:

V = Volume da célula computacional [m³]; ϕ = Concentração [kg/m³]; Q = Vazão [m³/s]; Γ = Coeficiente de dispersão [m²/s]; A = Área da seção transversal [m²]; S = Fontes e sumidouros - [kg/s].

Figura 1- Relação entre os parâmetros de qualidade da água simulados no HEC-RAS, coeficientes cinéticos e de transporte após calibração. FONTE: O Autor (2021).



Os valores de referência indicados pelo software, baseados na literatura, e os usados nas simulações após a calibração são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes cinéticos usados nas simulações e valores de referência sugeridos.

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE	SUGERIDO QUAL2E	USADO NA SIMULAÇÃO
ρ	Taxa de respiração das algas	d^{-1}	0,05 – 0,5	0,025
α_1	Fração da biomassa de algas que é nitrogênio	-	0,07 – 0,09	0,07
α_2	Fração da biomassa de algas que é fósforo	mgP mgA ⁻¹	0,01 – 0,02	0,02
α_3	Produção de O ₂ por unidade de alga	mgO mgAL d ⁻¹	1,4 – 1,8	0,0001
α_4	Consumo de O ₂ por unidade de alga	mgO mgAL d ⁻¹	1,6 – 2,3	5
α_5	Produção de O ₂ por unidade de NH ₄ oxidada	mgO mgN d ⁻¹	3 – 4	3,25
α_6	Consumo de O ₂ por unidade de NO ₂ oxidada	mgO mgN d ⁻¹	1,00 – 1,14	1,035
β_1	Conversão de amônia para nitrito	d^{-1}	0,1 – 1,0	1
β_2	Conversão de nitrito para nitrato	d^{-1}	0,2 – 2,0	2
β_3	Conversão de OrgN para amônia	-	0,02 – 0,4	0,4
μ	Taxa de crescimento local das algas	d^{-1}	1 – 3	1
ρ	Taxa de respiração das algas	d^{-1}	0,05 – 0,50	0,025
σ_1	Taxa de sedimentação - algas	M d ⁻¹	0,10 – 2,0	2
σ_2	Fonte bentônica de ortofosfato	mgP m ⁻² d ⁻¹	0,001 – 0,100	0,01
σ_3	Fonte bentônica de amônia	mgN m ⁻² d ⁻¹	-	0,015
σ_4	Sedimentação de OrgN	-	0,001 – 0,100	0
KNR	Coeficiente de inibição de nitrificação de primeira ordem	mgO L ⁻¹	0,6 – 0,7	0,6
K ₁	Taxa de desoxigenação de DBO	d^{-1}	0,02 – 3,40	0,005
K ₂	Taxa de reaeração diária	d^{-1}	0 – 100	0,15
K ₃	Taxa de perda de DBO por sedimentação	d^{-1}	-0,36 - 0,36	0
K ₄	Taxa de consumo de oxigênio pelo sedimento	mg O m ² d ⁻¹	➤ 0	1

Apresenta-se a seguir as equações que definem as taxas de variação nas concentrações das frações de nitrogênio, fósforo, oxigênio e DBO (BRUNNER; CEIWR-HEC, 2016).

1. Nitrogênio

Nitrogênio Orgânico Dissolvido – OrgN

A equação 2 simula a taxa de variação de concentração de OrgN, sendo que os termos a direita representam, respectivamente: respiração das algas, hidrólise (OrgN para NH₄) e sedimentação.

$$OrgN_{fontes/sumidouros} = \alpha_1 \rho A L - \beta_3 OrgN - \sigma_4 OrgN \quad (2)$$

Onde:

OrgN = Taxa de conversão do nitrogênio orgânico [kg s⁻¹];

α_1 = Fração da biomassa de algas que é nitrogênio [mgN mgA⁻¹];

ρ = Taxa de respiração das algas - [d⁻¹];

β_3 = Conversão de OrgN para amônia [-];

σ_4 = Sedimentação de OrgN [-];

AL = Concentração de algas [kg m⁻³];

Nitrogênio Amoniacal – NH₄

A equação 3 simula a taxa de variação de concentração de NH₄, sendo que os termos a direita representam, respectivamente: hidrólise (OrgN para NH₄), difusão dos organismos bentônicos, oxidação (NH₄ para NO₂) e consumo das algas.

$$NH4_{fontes/sumidouros} = \beta_3 OrgN + \frac{\sigma_3}{d} - \beta_1 (1 - \exp^{-KNR.DOX}) NH4 - F_1 \alpha_1 \mu AL \quad (3)$$

Onde:

β_3 = Conversão de OrgN para amônia [-];

β_1 = Conversão de amônia para nitrito [d⁻¹];

σ_3 = Fonte bentônica de amônia [mgN m⁻² d⁻¹];

d = profundidade média do canal [m];

μ = taxa de crescimento local das algas [d⁻¹];

α_1 = Fração da biomassa de algas que é nitrogênio [mgN mgA⁻¹];

KNR = Coeficiente de inibição de nitrificação de primeira ordem [mgO L⁻¹];

DOX = Concentração de oxigênio dissolvido [mgO L⁻¹];

F1 = Fração de absorção pelas Algas [-];

AL = Concentração de algas [kg m⁻³].

Nitrito – NO₂

A equação 4 simula a taxa de variação de concentração de NO_2 , sendo que os termos a direita representam a oxidação dos poluentes (NH_4 para NO_2 e NO_2 para NO_3).

$$NO2_{fontes/sumidouros} = \beta_1 (1 - \exp^{-KNR.DOX})NH4 - \beta_2 (1 - \exp^{-KNR.DOX}) \quad (4)$$

Onde:

β_1 = Conversão de amônia para nitrito [d^{-1}];

β_2 = Conversão de nitrito para nitrato [d^{-1}];

KNR = Coeficiente de inibição de nitrificação de primeira ordem [$mgOL^{-1}$];

DOX = Concentração de oxigênio dissolvido [$mgO L^{-1}$].

Nitrato – NO_3

A equação 5 simula a taxa de variação de concentração de NO_3 , sendo que os termos a direita representam, respectivamente, oxidação (NO_2 para NO_3) e consumo das algas.

$$NO3_{fontes/sumidouros} = \beta_2 (1 - \exp^{-KNR.DOX})NH2 - (1 - F_1) \alpha_1 \mu AL \quad (5)$$

Onde:

β_2 = Conversão de nitrito para nitrato [d^{-1}];

KNR = Coeficiente de inibição de nitrificação de primeira ordem [$mgOL^{-1}$];

DOX = Concentração de oxigênio dissolvido [$mgO L^{-1}$];

F_1 = Fração de absorção pelas Algas [-];

α_1 = Fração da biomassa de algas que é nitrogênio [$mgN mgA^{-1}$];

μ = taxa de crescimento local das algas [d^{-1}];

AL = Concentração de algas [$kg m^{-3}$].

Nitrogênio Total - NT

O nitrogênio total é a soma das frações apresentadas (OrgN, NH_4 , NO_2 , NO_3) e é a forma base para análise dos dados, incluindo obtenção e análise dos resultados das simulações.

2. Fósforo

A simulação de fósforo no HEC-RAS utilizada as frações fósforo orgânico dissolvido (OrgP) e ortofosfato inorgânico dissolvido (PO_4), ambas formas dissolvidas do material, sendo que sua principal forma de entrada de fósforo em rios é a particulada. Considera-se que as frações de ortofosfato inorgânico (PO_4) são representativas da concentração de fósforo total, parâmetro cujas taxas de variações de concentrações o

HEC-RAS simula segundo a equação 6 (FERNANDES et al., 2020;KNAPIK, 2014;KOZAK, 2016). Os termos a direita da equação representam, respectivamente: decaimento (OrgP para PO4), difusão dos organismos bentônicos e consumo das algas.

$$PO4_{fontes/sumidouros} = \beta_4 OrgP + \frac{\sigma_2}{d} - \alpha_2 \mu AL \quad (6)$$

Onde:

σ_2 = Fonte bentônica de ortofosfato [$mgP m^{-2} d^{-1}$];

α_2 = Fração da biomassa de algas que é fósforo [$mgP mgA^{-1}$];

d = profundidade média do canal [m];

μ = taxa de crescimento local das algas [d^{-1}];

AL = Concentração de algas [$kg m^{-3}$].

3. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A simulação de DBO é descrita no HEC-RAS por um decaimento de primeira ordem (equação 7).

$$DBO_{fontes/sumidouros} = K_1 DBO - K_3 DBO \quad (7)$$

Onde:

DBO = Concentração de DBO [$mgDBO L^{-1}$];

K_1 = taxa de desoxigenação de DBO [d^{-1}];

K_3 = Taxa de perda de DBO por sedimentação [d^{-1}].

4. Oxigênio Dissolvido (OD)

A taxa de variação de concentração de OD é simulada pelo HEC-RAS usando a equação 7, sendo que os termos da direita representam, respectivamente: reaeração, fotossíntese e respiração, demanda de oxigênio de DBO, demanda de oxigênio do sedimento, oxidação da amônia e oxidação do nitrito.

$$\begin{aligned}
OD_{fontes/sumidouros} &= K_2(O_{sat} - OD) + AL(\alpha_3 \mu - \alpha_4 \rho) - K_1 \cdot DBO - \frac{K_4}{d} \quad (8) \\
&- \alpha_5 \beta_1 NH_4 - \alpha_6 \beta_2 NO_2
\end{aligned}$$

Onde:

O_{sat} = Concentração de saturação do oxigênio dissolvido - [mgOLd⁻¹];

α_3 = Produção de O₂ por unidade de alga - [mgO mgAL d⁻¹];

α_4 = Consumo de O₂ por unidade de alga - [mgO mgAL d⁻¹];

α_5 = Produção de O₂ por unidade de NH₄ oxidada - [mgO mgN d⁻¹];

α_6 = Consumo de O₂ por unidade de NO₂ oxidada - [mgO mgN d⁻¹];

DBO = Concentração de DBO [mgDBO L⁻¹];

K_1 = taxa de desoxigenação de DBO [d⁻¹];

K_2 = Taxa de reaeração diária [d⁻¹];

K_4 = Taxa de consumo de oxigênio pelo sedimento [mg O m² d⁻¹];

β_1 = Taxa de oxidação da amônia [d⁻¹];

β_2 = Conversão de amônia para nitrito [d⁻¹];

d = Profundidade média do canal [m].

2. Detalhes dos Coeficientes de Cenarização

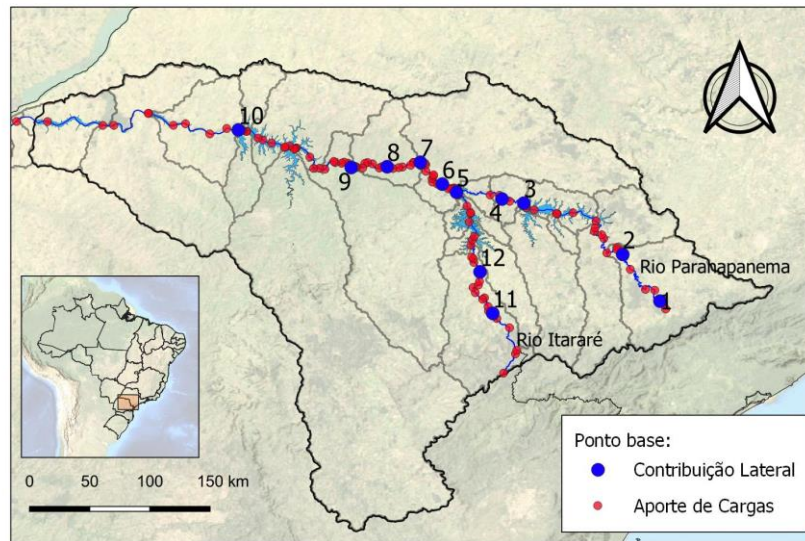
A função dos coeficientes de cenarização é simular o aumento no aporte de poluentes, tanto na forma de cargas pontuais quanto difusas, conforme cenários futuros que representam o crescimento econômico da bacia, apresentados na Tabela 2. Esses coeficientes foram estimados para cada uma das Unidade de Gestão (UGHs) da bacia, conforme descrito por (FERNANDES et al., 2020)

Tabela 2 - Coeficientes de aumento no aporte de cargas de acordo com cenários de crescimento econômico para os anos de 2025 e 2035

UGRH/UPH	Cenário Tendencial		Cenário Acelerado		Cenário Estagnado	
	2025	2035	2025	2035	2025	2035
Alto Paranapanema	1,53	1,99	1,77	2,75	1,37	1,62
Médio Paranapanema	1,63	2,27	1,97	3,63	1,43	1,74
Pontal do Paranapanema	1,57	2,17	1,90	3,53	1,37	1,63
Norte Pioneiro	1,55	2,18	1,93	3,83	1,35	1,61
Tibagi	1,34	1,83	1,63	3,17	1,21	1,40
Piraponema	1,47	1,94	1,74	3,09	1,33	1,54

A conversão do aumento de carga dos cenários para as concentrações que efetivamente são inseridas como condição de contorno no HEC-RAS foi feita convertendo os trechos de rio para os quais as cargas foram geradas para trechos coincidentes com aqueles usados como condição de contorno nas simulações hidrodinâmicas (contribuição lateral) conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Relação dos pontos base usados na estimativa de carga e pontos base para estimativa da contribuição Lateral, onde: 1 – 64005000; 2 – 64080000; 3 = 64215080; 4 = 64220050; 5 = 64270080; 6 = 64278080; 7 = 64332080; 8 = 64345075; 9 = 64345080; 10 = 64516080; 11 = 64231000; 12 = 64247000. Fonte: O Autor (2021), Fernandes et al. (2020).



Essa abordagem possibilitou gerar o aporte de cargas no rio, de acordo com as UGHs e cenários apresentados na Tabela 2. O aporte total das cargas poluentes por trecho para o cenário base (2012) é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Aporte de cargas de DBO, PT e NT por trecho.

Trecho	Carga DBO (kg/dia)	Carga PT (kg/dia)	Carga NT (kg/dia)
- 1	1.120,16	35,84	508,14
1 - 2	16.384,21	851,52	5.841,00
2 - 3	31.185,87	1.827,21	12.084,12
3 - 4	1.833,74	72,69	727,35
4 - 5	23.561,06	1.348,42	9.616,71
5 - 6	835,73	28,52	339,94
6 - 7	23.311,04	871,04	10.032,52
7 - 8	4.902,74	447,31	1.589,11
8 - 9	32.573,84	1.763,59	12.215,31
9 - 10	116.919,05	7.918,17	44.523,62
10 -	55.244,67	2.025,76	18.414,51

As cargas de poluentes foram diluídas na mediana da série de vazões referente a contribuição lateral no trecho, resultado portanto em uma concentração constante de entrada de DBO, NT e PT para cada trecho. Os valores da Q50 e concentrações de entrada do cenário base (2012) de cada trecho são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4- Concentrações de entrada de DBO, NT e PT

	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-
Concentração de DBO (mg/L)	4,30	1,69	2,15	2,72	1,21	2,49	4,05	8,57	2,10	1,32
Concentração de NT (mg/L)	1,53	0,65	0,85	1,11	0,49	1,07	1,31	3,21	0,80	0,44
Concentração de PT (mg/L)	0,22	0,10	0,09	0,16	0,04	0,09	0,37	0,46	0,14	0,05
Q50 (m ³ /s)	44,06	213,56	9,88	100,31	8,00	108,50	14,00	44,00	644,00	482,70

3. Resultados Completos das Modelagens Hidrodinâmicas e de Qualidade da Água

Apresenta-se os resultados dos modelos hidrodinâmico e de qualidade da água, visando melhor contextualizar a capacidade do modelo em replicar as séries de vazões e concentrações de poluentes.

1. Modelo Hidrodinâmico

Os resultados do modelo hidrodinâmico são apresentados na forma de curva de permanência para todas as estações com séries de vazões disponíveis para o ano de 2012, apresentadas na Figura 2, menos as estações de montante pois seus hidrogramas foram usados como condição de contorno.

1. Rio Paranapanema

Figura 3 - Comparação dos resultados do modelo hidrodinâmico com a série de vazões observadas na 64080000.

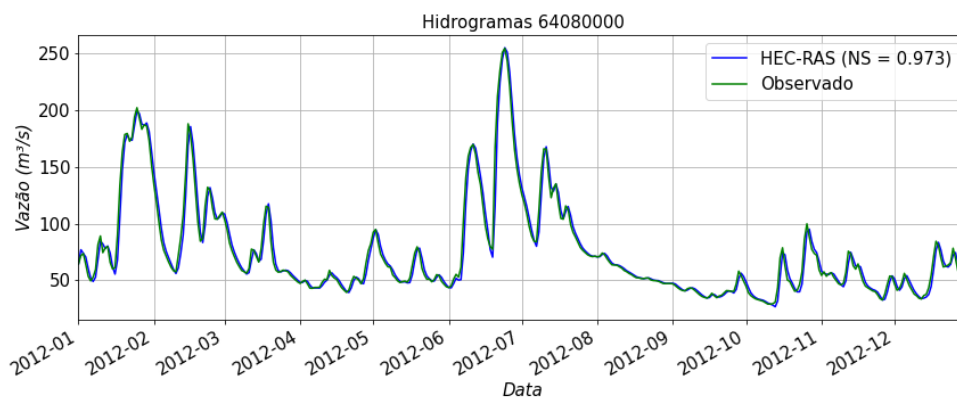


Figura 4 - Comparação dos resultados do modelo hidrodinâmico com a série de vazões observadas na 64215080.

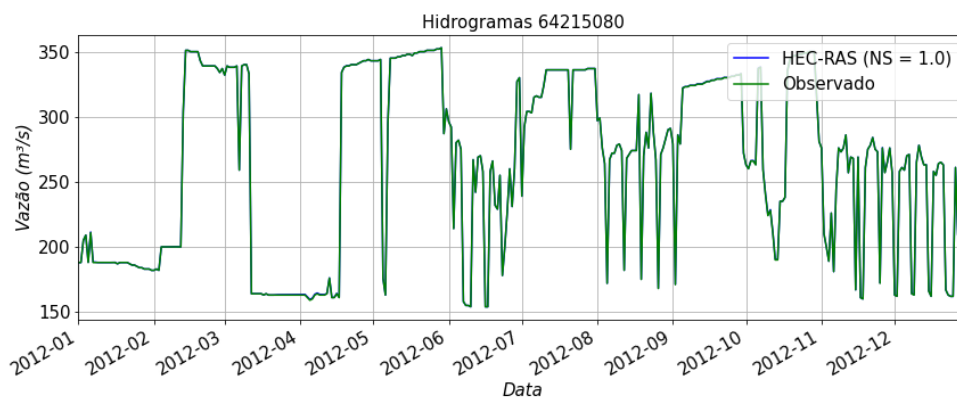


Figura 5 - Comparação dos resultados do modelo hidrodinâmico com a série de vazões observadas na 64220050.

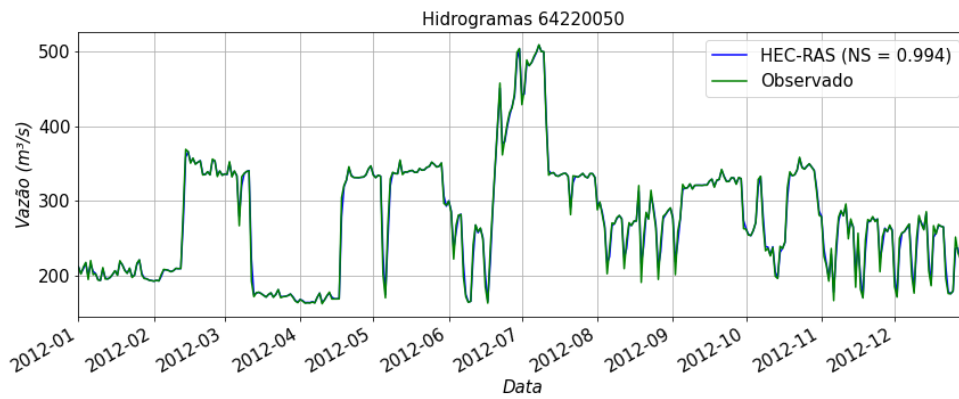


Figura 6 - Comparação dos resultados do modelo hidrodinâmico com a série de vazões observadas na 64278080.

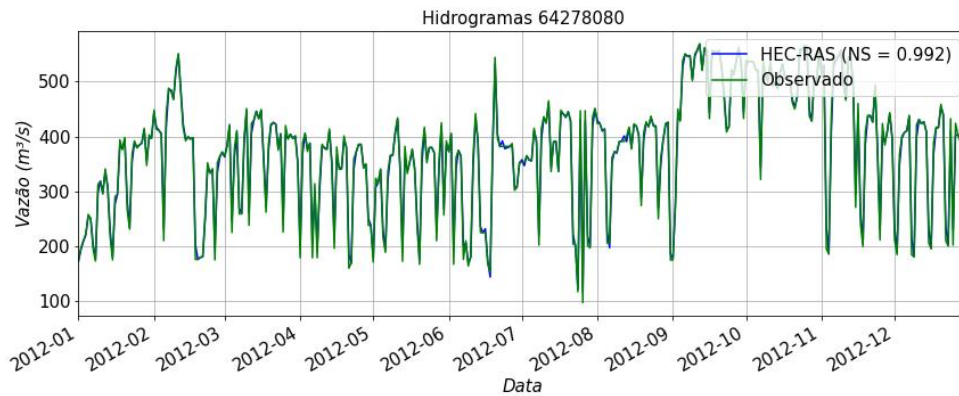


Figura 7 - Comparação dos resultados do modelo hidrodinâmico com a série de vazões observadas na 64332080.

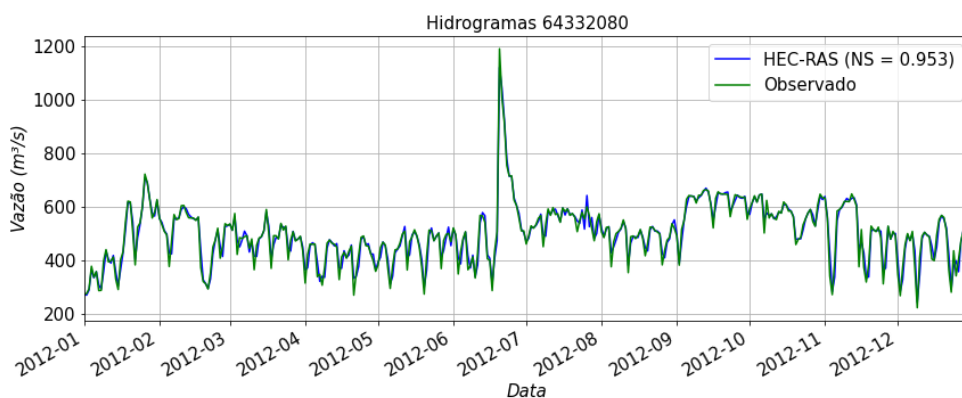


Figura 8 - Comparação dos resultados do modelo hidrodinâmico com a série de vazões observadas na 64345075.

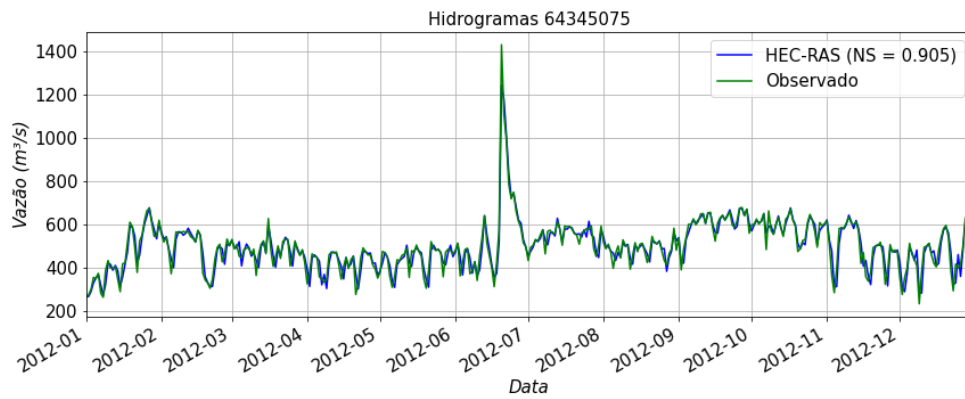


Figura 9 - Comparação dos resultados do modelo hidrodinâmico com a série de vazões observadas na 64345080.

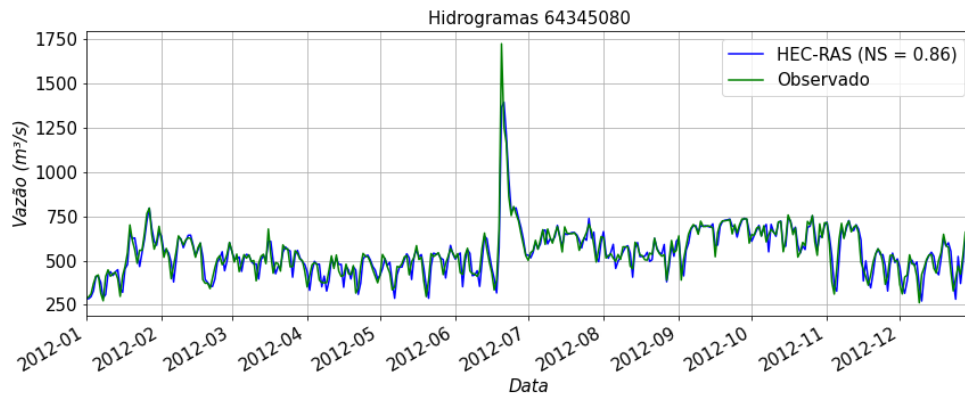
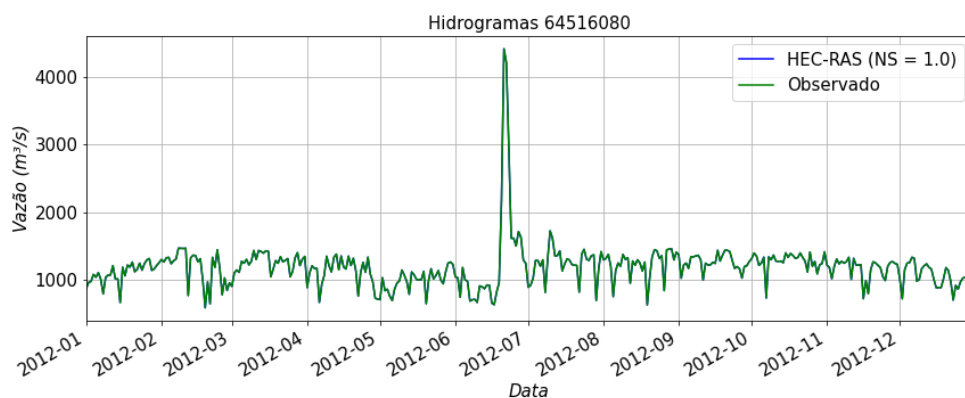
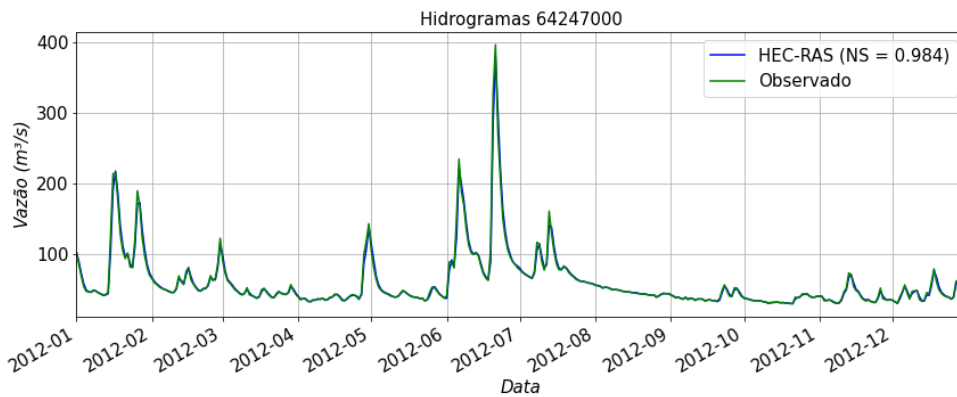


Figura 10 - Comparação dos resultados do modelo hidrodinâmico com a série de vazões observadas na 64516080.



2. Rio Itararé

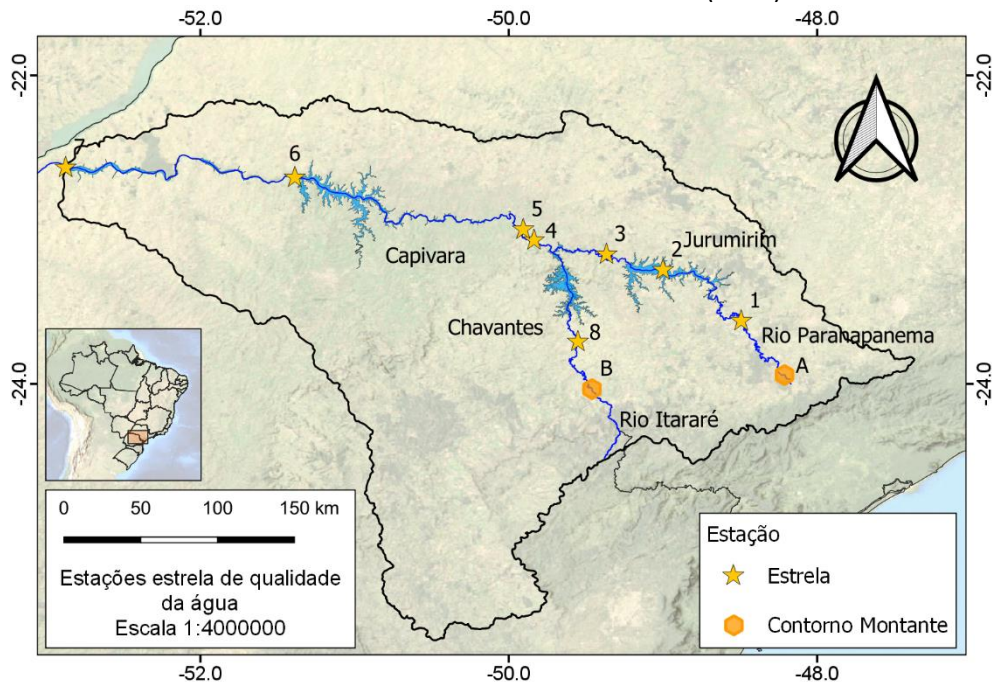
Figura 11 - Comparação dos resultados do modelo hidrodinâmico com a série de vazões observadas na 64247000.



2. Modelo de Qualidade da Água

Os resultados das simulações de qualidade da água são apresentados para cenário base nas estações de referência, indicadas na Figura 12, no formato de boxplots.

Figura 12 - Posição das estações de referência de qualidade da água, onde os números correspondem aos códigos HIDROWEB e CETESB: 1 = 64081000 / PARP 02100; 2 = 64214000 / JURU 02500; 3 = 64219000; 4 = 64278080; 5 = 64326000 / PARP02500; 6 = 64516900 / PARP 02750; 7 = 64571100 / PARP02900; 8 = 64245200 / ITAR 02500. A = 64081000 e B = 64231000. Fonte: O Autor (2021).



3. Rio Paranapanema

Figura 13 - Resultados das simulações de qualidade da água comparados com os dados observados para a estação 64081000, em azul as concentrações limites por classe.

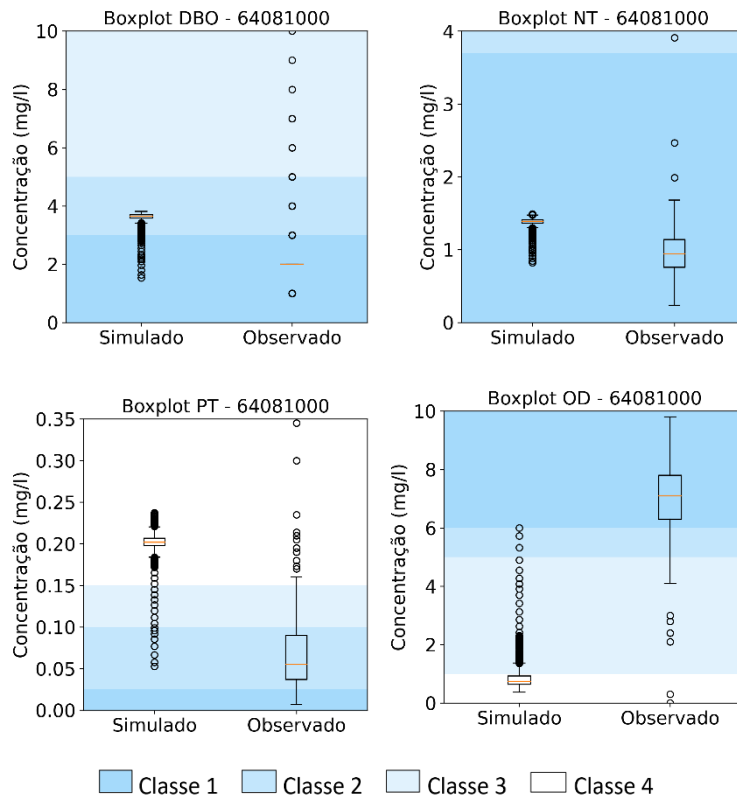


Figura 14- Resultados das simulações de qualidade da água comparados com os dados observados para a estação 64214000, em azul as concentrações limites por classe.

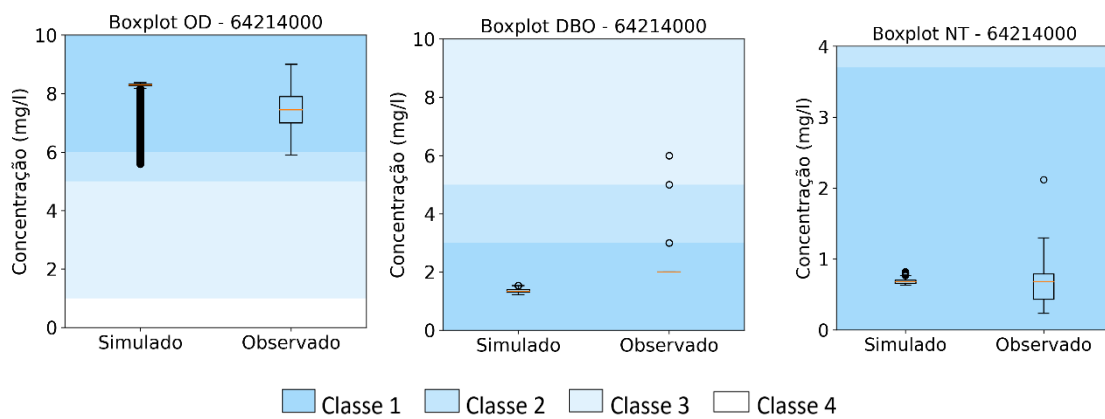


Figura 15 - Resultados das simulações de qualidade da água comparados com os dados observados para a estação 64219000, em azul as concentrações limites por classe.

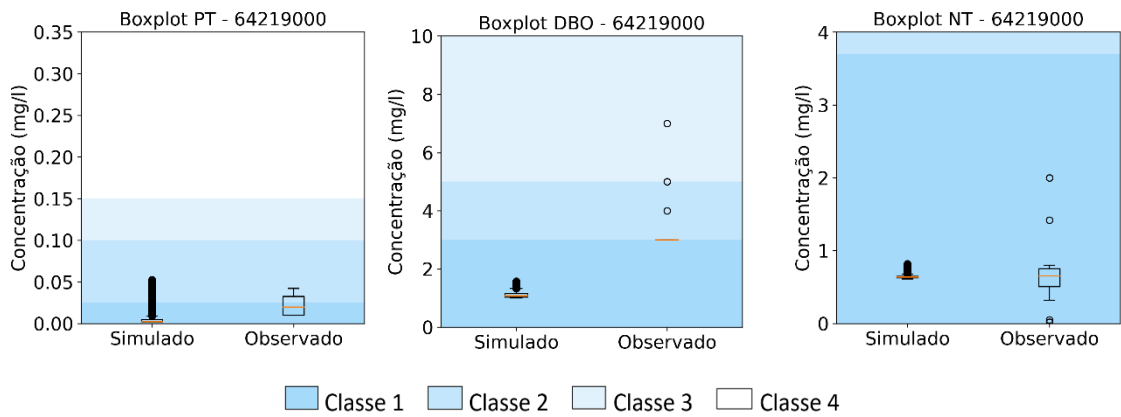


Figura 16 - Resultados das simulações de qualidade da água comparados com os dados observados para a estação 64278080, em azul as concentrações limites por classe.

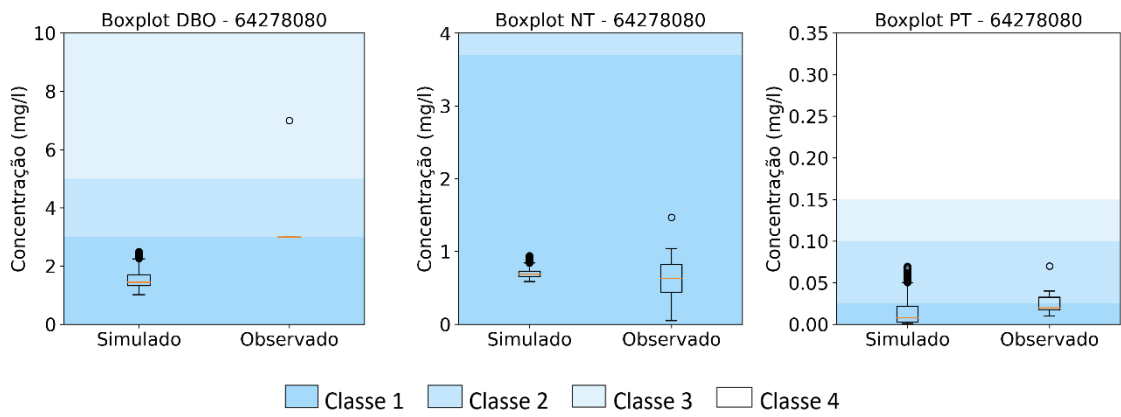


Figura 17 - Resultados das simulações de qualidade da água comparados com os dados observados para a estação 64326000, em azul as concentrações limites por classe.

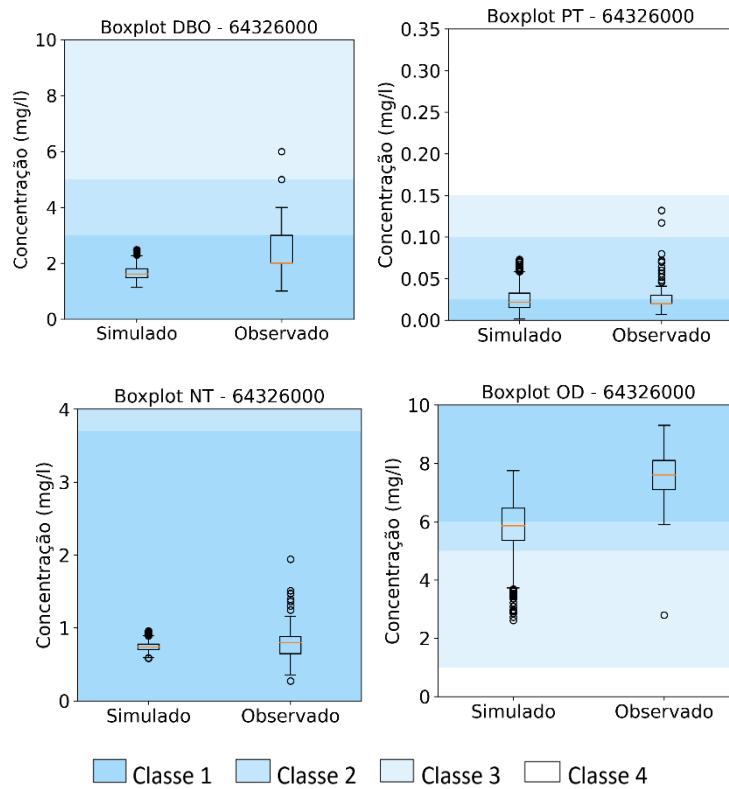
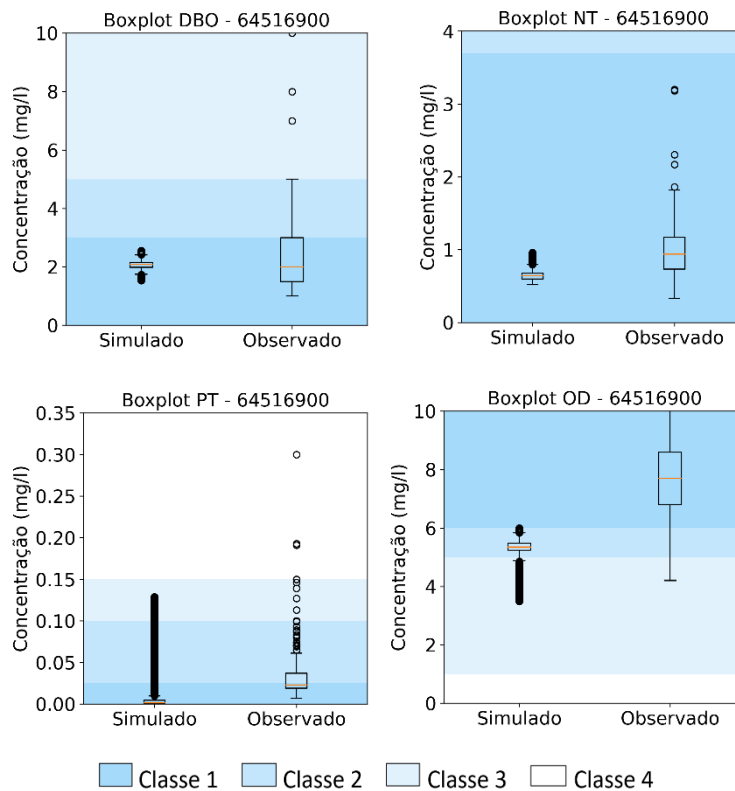
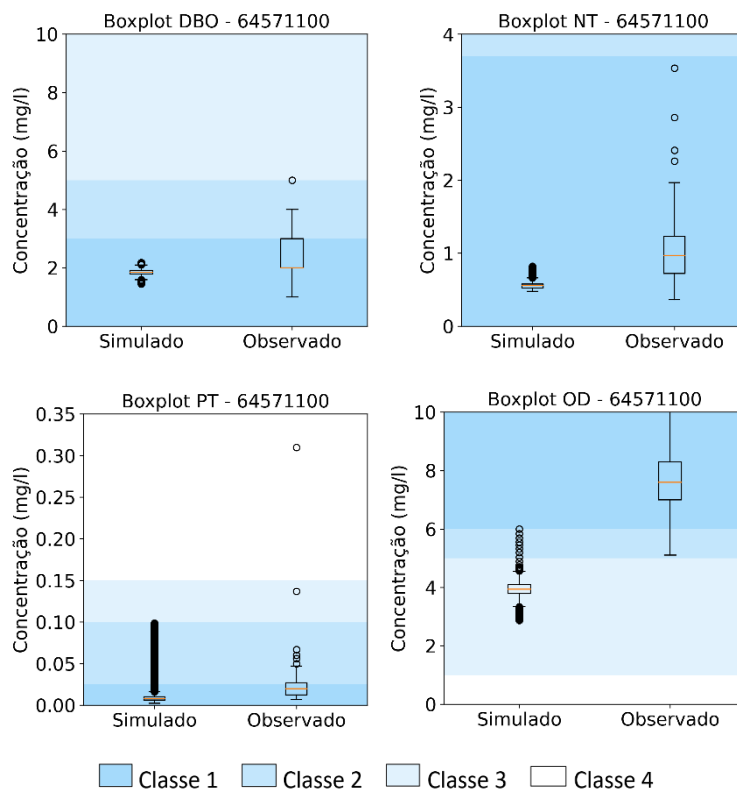


Figura 18 - Resultados das simulações de qualidade da água comparados com os dados observados para a estação 64516900, em azul as concentrações limites por classe.



4. Rio Itararé

Figura 19 - Resultados das simulações de qualidade da água comparados com os dados observados para a estação 64571100, em azul as concentrações limites por classe.



3. Cenários Futuros

Os cenários futuros representam o aumento no aporte de cargas no rio por conta do desenvolvimento na bacia hidrográfica. Tendo o aumento na emissão de poluentes apresentado no item 2, apresenta-se a seguir os resultados das simulações de qualidade da água para cada cenário, em cada uma das estações com dados de qualidade da água (Figura 12).

Figura 20 - Resultados das simulações de qualidade da água para os cenários futuros de aumento no aporte de cargas apresentados na forma de frequência de permanência dentro dos limites de classe para a estação 64081000.

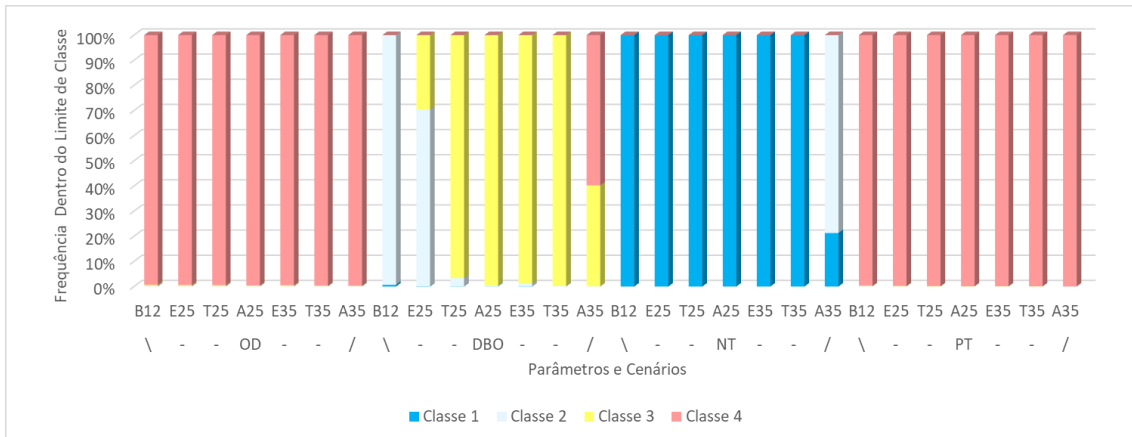


Figura 21 - Resultados das simulações de qualidade da água para os cenários futuros de aumento no aporte de cargas apresentados na forma de frequência de permanência dentro dos limites de classe para a estação 64214000.

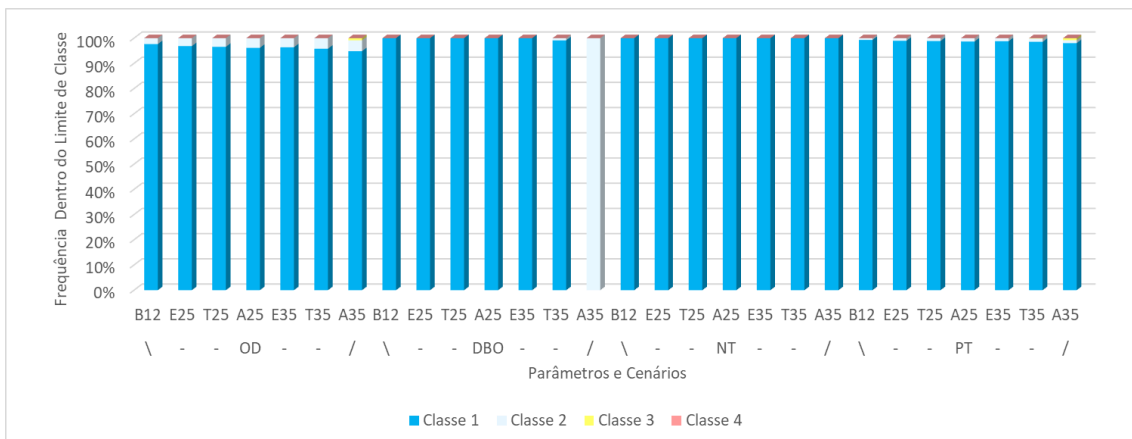


Figura 22 - Resultados das simulações de qualidade da água para os cenários futuros de aumento no aporte de cargas apresentados na forma de frequência de permanência dentro dos limites de classe para a estação 64219000.

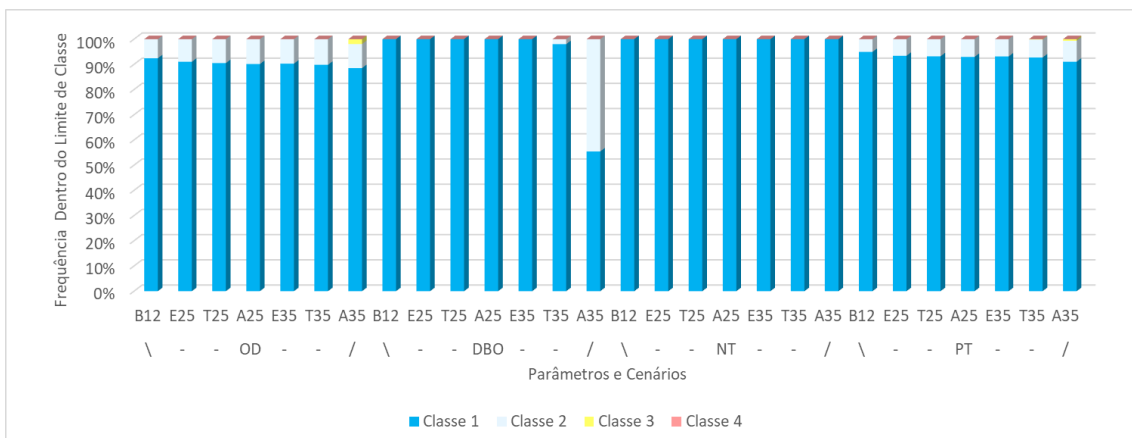


Figura 23 - Resultados das simulações de qualidade da água para os cenários futuros de aumento no aporte de cargas apresentados na forma de frequência de permanência dentro dos limites de classe para a estação 64245200.

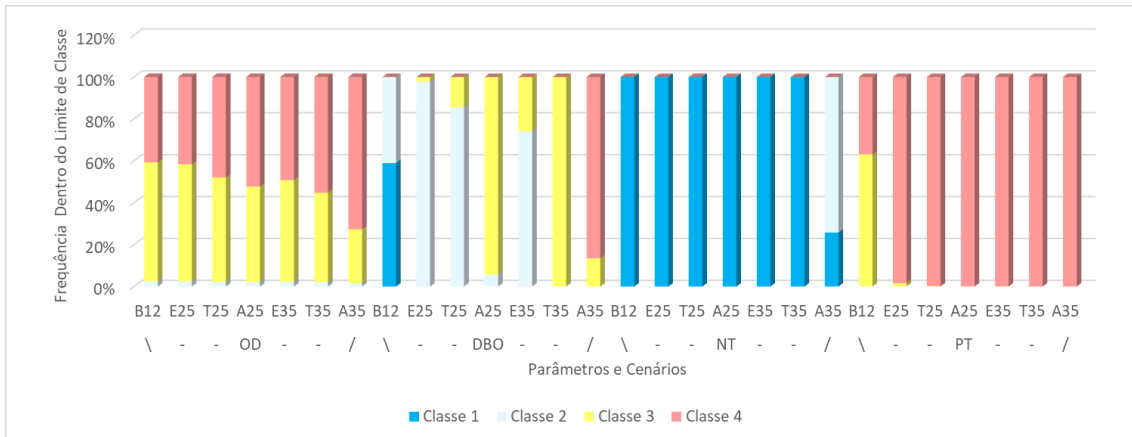


Figura 24 - Resultados das simulações de qualidade da água para os cenários futuros de aumento no aporte de cargas apresentados na forma de frequência de permanência dentro dos limites de classe para a estação 642478080.

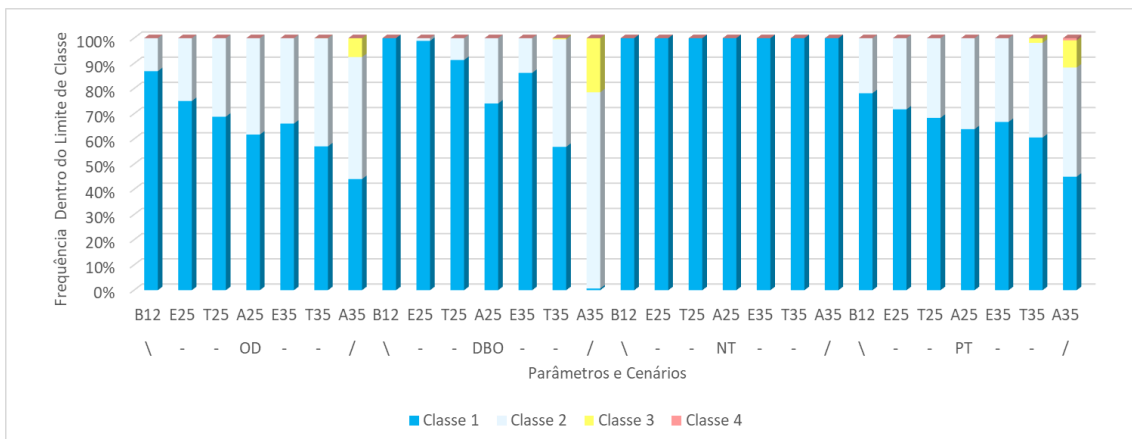
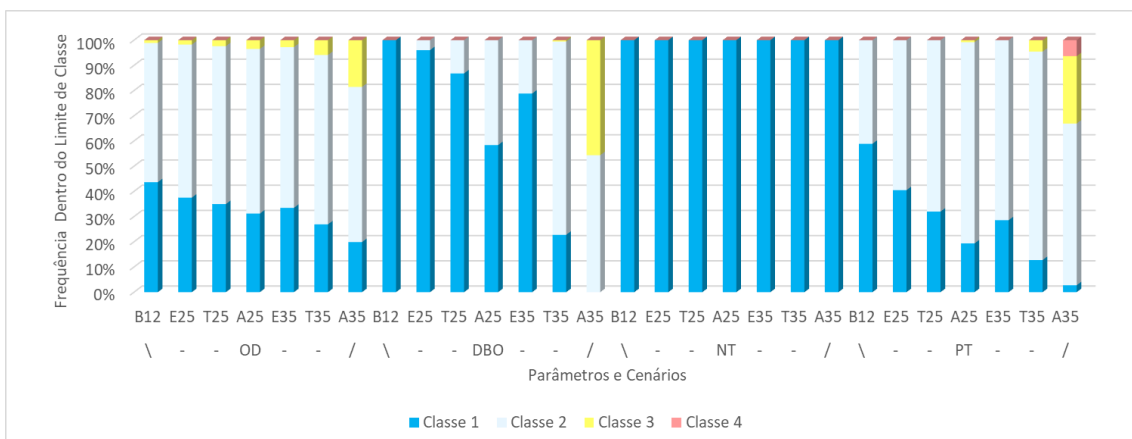


Figura 25 - Resultados das simulações de qualidade da água para os cenários futuros de aumento no aporte de cargas apresentados na forma de frequência de permanência dentro dos limites de classe para a estação 64326200.



No.	Tema	Autores	Título	Ano	Tipo publicação	Meio	Nome Publicação	Área de estudo	Metodologia e objetivo	Detalhes Modelagem																
										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
27	3	Karina Thomé Ramalho ; Candice Schaufert Garcia; Laertes Munhoz da Cunha; Guilherme Rocha Peplau & Wesley Leonel de Souza	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA BASE TOPOGRÁFICA NA PROPAGAÇÃO DA CHEIA INDUZIDA PELA RUPTURA DE BARRAGENS	2013	Artigo	-	Congresso ABRH	UHE Sobradinho	Modela o alagamento de área após comprimento de barragem usando HEC-RAS	-	S	-		HEC-RAS	N	N	S	-	3600	256	hidrograma a montante e curva de descarga a jusante	-	-	-	-	
28	6	USACE	Users Manual	2016	Manual	-	-	EUA	Manual do usuário do HEC-RAS	-	N	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
29	1	ANA	Plano Integrado de Recursos Hídricos da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema	2016	Relatório	-	-	Brasil - Bacia do Paranapanema	Estudo de Enquadramento da Bacia	-	N	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
30	4	David R Boyd	Water we Drink	2006	Relatório	-	-	Canada	Discute tópicos gerais de qualidade da água para consumo humano	-	N	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
31	6	Leon, Arturo S., Goodell, Christopher	Controlling HEC-RAS using MATLAB	2016	Manual	-	Environmental Modelling and Software	Geral	Propões códigos para automatização do Hec Ras usando Matlab	-	N	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
32	3	Wang, Baiwei; Tian, Fuqiang; Hu, Heping	Analysis of the effect of regional lateral inflow on the flood peak of the Three Gorges Reservoir	2011	Artigo	Revista	Science China Technological Sciences	Bacia de Três Gargantas	Estudar o impacto da contribuição lateral na simulação hidrodinâmica	3	S	-		-	N	S	N	-	56000	658	Hidrograma a montante e curva de descarga a jusante, dcontribuição lateral como condição interna	-	-	-	-	
33	3	Che, Daniel; Mays, Larry W	Development of an Optimization/Simulation Model for Real-Time Flood-Control Operation of River-Reservoirs Systems	2015	Artigo	Revista	Water Resources Management	Fantasia	Simula uma área fictícia em regime não permanente, usa matlab para integrar hidrológico e hidrodinâmico	3	S	-		HEC-RAS, HEC-HMS	S	S	N	-	56	2.5	-	-	-	-	-	
34	3	Wei-Bo Chen 1 and Wen-Cheng Liu 2	Modeling the Influence of River Cross-Section Data on a River Stage Using a Two-Dimensional/ Three-Dimensional Hydrodynamic Model	2017	Artigo	Revista	Water 2017	Taiwan	Impacto da mudança de forma da seção transversal na simulação, simulações em 2D e 3D	-	S	-		-	N	S	N	-	1177	-	Hidrograma a montante e nível a jusante	-	-	-	-	
35	4	Yonggui Wang, Wanshun Zhang, Yanxin Zhao, Hong Peng, Yingyuan Shi	Modelling water quality and quantity with the influence of inter-basin water diversion projects and cascade reservoirs in the Middle-lower Hanjiang River	2016	Artigo	Revista	Journal of Hidrology	China - Rio Hianjiang	Modelagem de reservatórios em cascata (CRS) associando quantidade com a qualidade.	2	S	-		-	Saint-Venant, ADR	N	S	S	S	63800	400	-	-	-	15 seções	Vazão, Nível, PT
36	3	Renata Corrêa	UTILIZAÇÃO DE DADOS TOPO-BATIMÉTRICOS PARA A MODELAGEM HIDRODINÂMICA 1D COM APOIO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – ESTUDO DE CASO DO RIO PARAGUAI	2018	Dissertação	-	PPGERHA	Rio Paraguai	Uso de SIG para estimativa de seção transversal e simulação	-	S	-		SIG, HEC-RAS	N	S	N	-	362000	1270	Vazão a montante e nível a jusante	-	-	-	-	
37	3	Christopher R. Goodell,	Dam Break Modeling for Tandem Reservoirs-a Case Study using HEC-RAS and HEC-HMS	2005	Livro	-	Special Collection on Advances in Hydraulic Structures Engineering	Oregon	Simula o impacto de rompimento de barragem na próxima em sequencia, numa bacia pequena	-	S	-		HEC-RAS, HEC-HMS	S	S	N	-	0.52	0.62	-	-	-	-	-	
38	3	Thomas Adams, Sherry Chen, Raymond Davis, Trent Schade, Deborah Lee	The Ohio River Community HEC-RAS model	2010	Artigo	Congresso	Congresso - World Environmental and Water Resources	Ohio	Grande cooperação para modelagem de rio, aparenta estar em estágio embrionário	4	S	-		HEC-RAS	N	S	N	-	-	2080	-	-	-	-	-	
39	3	Luay Kadhim Hameed, Salah Tawfeek Ali	Estimating of Manning's Roughness Coefficient for Hilla River through Calibration Using HEC-RAS Model	2013	Artigo	Revista	Jordan Journal of Civil Engineering	Jordania - Rio Hilla		-	S	-		HEC-RAS	N	S	N	-	-	29	Vazão a montante e nível a jusante	-	-	-	-	
40	3	Jennifer Kay Sharkey	Investigating Instabilities with HEC-RAS Unsteady Flow Modeling for Regulated Rivers at Low Flow Stages	2014	Livro	-	-	Geral	Investiga instabilidades no HEC-RAS na solução não-permanente em rios regulados	-	N	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
41	3	Prabeer Kumar Parhi	HEC-RAS Model for Mannig's Roughness: A Case Study	2012	Artigo	-	Open Journal of Modern Hydrology	Índia - Rio Mahanadi	Interessante por citar Nash and Sutcliffe	-	S	-		HEC-RAS	N	S	N	-	132.1	106	Hidrograma a montante e jusante	-	-	-	-	

No.	Tema	Autores	Título	Ano	Tipo publicação	Meio	Nome Publicação	Área de estudo	Metodologia e objetivo	Detalhes Modelagem															
										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
53	3	João Paulo Lyra Fialho Brêda, Juan Martín Bravo and Rodrigo Cauduro Dias de Paiva	Efficient number of calibrated cross sections bottom levels on a hydrodynamic model using the SCE-UA algorithm. Case study: Madeira River	2017	Artigo	Revista	RBRH	Brasil - Rio Madeira	Estuda a calibração de simulação hidrodinâmica pela seção transversal	-	5	SCE-UA, Saint-Venant simplificada "inertial model"	-	N	S	N	N	-	1100	Hidrograma a montante, cotograma a jusante	-	5	-	-	Nível
54	4	Antônio Carlos Coelho da Silva, Ibraim Fantin-Cruz, Zoraidy Marques de Lima, Daniela Maimoni de Figueiredo	Cumulative changes in water quality caused by six cascading hydroelectric dams on the Jauru River, tributary of the Pantanal floodplain	2019	Artigo	Revista	RBRH	Brasil - Rio Jauru	Estuda os efeitos de seis reservatórios em cascata na bacia do Rio Paraguai. Resultados indicam variação no gradiente longitudinal e a importância da modelagem integrada de bacia/entre reservatórios	2	N	Distribuição estatística	7	N	N	S	N	362259	412	-	-	-	23 anos de dados	-	Temperatura, pH, cor, turbidez, condutividade e elétrica, DCO, DBO, OD, PT, NT, sólidos suspensos e sólidos totais
55	3	Lianghong Long, Daobin Ji, Defu Liu, Zhengjian Yang, Andreas Lorke	Effect of Cascading Reservoirs on the Flow Variation and Thermal Regime in the Lower Reaches of the Jinsha River	2019	Artigo	Revista	Water	China - Rio Jinsha	Modela dois reservatórios em sequência e seus impactos no hidrograma e temperatura mais a jusante. Conclui que o efeito em cascata dos reservatórios não é de grande relevância. As alterações no hidrograma a jusante se relacionam com o tamanho dos reservatórios	2	S	-	CE-QUAL-W2	N	S	S	N	-	235	-	-	-	15 anos de qualidade, 20 de vazão/nível	-	Nível, temperatura
56	5	Wenqing Shi, Qiuwen Chen, Qitao Yi, Juhua Yu, Yuyu Ji, Liuming Hu, Yuchen Chen	Carbon Emission from Cascade Reservoirs: Spatial Heterogeneity and Mechanisms	2017	Artigo	Revista	Environmental Science & Technology	China - Rio Mekong	Usaram dados medidos para avaliar o impacto dos reservatórios na emissão dos GEEs nos reservatórios em cascata. Não notaram grande impacto entre eles	2	N	-	-	N	N	N	N	760000	4900	-	-	-	-	T, pH, Condutividade, Turbidez, COD, Sedimento	-
57	3	N. LeRoy Poff, Julian D. Olden, David M. Merritt, David M. Pepin	Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications	2007	Artigo	Revista	PNAS - Proceedings of the National Academy of Sciences	Estados Unidos	Analisa dados de estações americanas para mostrar que o represamento tende a homogeneizar o escoamento da água, possivelmente desestabilizando o equilíbrio biológico da região	2	N	-	-	N	N	N	N	-	-	-	-	-	-	Vazão	-
58	5	H. Lauri, H. de Moel, P. J. Ward, T. A. Räsänen, M. Keskinen, M. Kumm	Future changes in Mekong River hydrology: impact of climate change and reservoir operation on discharge	2012	Artigo	Revista	Hydrology and Earth System Sciences	China - Rio Mekong	Desenvolve modelo hidrológico e simula em cenários diferentes, incluindo mudanças climáticas e operação de reservatórios. Reservatórios afetam muito mais que as mudanças climáticas	2	S	-	Vmod	S	N	N	N	795000	-	-	3 - 12 h	5 km	151 Estações de chuva, 61 de temperatura. 14 anos de dados	-	Vazão
59	3	Wei Ouyang, Fanghua Hao, Kaiyu Song, Xuan Zhang	Cascade Dam-Induced Hydrological Disturbance and Environmental Impact in the Upper Stream of the Yellow River	2010	Artigo	Revista	Water Resources Management	China - Rio Amarelo	Usa modelo SWAT para modelar sequência de reservatórios e alterações nos hidrogramas, transporte de areia e nutrientes. Conclui que o represamento afeta bastante o corpo hídrico, amortizando vazões e reduzindo concentrações de nutrientes e sedimentos	2	S	-	SWAT	S	N	N	N	-	438	-	-	-	5 anos de dados	-	Vazão
60	3	Weixin Duan, Shenglian Guo, Jun Wang, Dedi Liu	Impact of Cascaded Reservoirs Group on Flow Regime in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	2016	Artigo	Revista	Water	China - Rio Yangtze	Compara dados observados de vazão e utiliza métricas para avaliar seu grau de alteração. Propaga vazão por Muskingum	2	N	-	IHA, DHRA	N	N	N	N	1800000	6300	-	-	-	65 anos de dados, 24 reservatórios	-	-

No.	Tema	Autores	Título	Ano	Tipo publicação	Meio	Nome Publicação	Área de estudo	Metodologia e objetivo	Detalhes Modelagem														
										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
97	3	Fleischmann, Ayan Paiva, Rodrigo Collischonn, Walter	Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison	2019	Artigo	Revista	Journey of Hydrology X	Brasil - Rio Itajaí Açul	Desenvolve modelos em escala local, regional e global para solução de modelo bacia - rio, comparando com resultados de um modelo no HEC-RAS. Concluem que o modelo global gera resultados satisfatórios, mas menos precisos que os locais - em especial por conta do intervalo entre seções	-	S	Saint-Venant, rianfall	HEC-RAS, MGB	S	S	N	N	15000	-	-	-	-	-	Vazão, nível
98	4	Vijay, Ritesh Gupta, Rajesh Dash, Siddhant	Modelling approach for water quality assessment of Pili River using HEC-RAS	2017	Artigo	Revista	Journal of Indian Water Works Association	India - Rio Pili	Desenvolve modelo hidrodinâmico e de qualidade da água para o Rio Pili, na Índia.	-	S	Saint-Venant, ADR	HEC-RAS	N	S	S	N	217,56	17,9	-	-	-	-	Vazão, nível, DBO, OD
99	4	Landscape Ecology for Sustainable Environment and Culture	Evaluating the Transport and Fate of Nutrients in Large Scale River Basins Using an Integrated Modeling System	2013	Artigo	Revista	Landscape Ecology for Sustainable Environment and Culture	EUA - Rio Mississippi	Desenvolve um modelo integrados bacia - rio (SWAT - HEC-RAS) aplicado à bacia do alto do Rio Mississippi.	-	S	SWAT, Saint-Venant	SWAT, HEC-RAS	S	S	S	N	490000	2011	Vem do SWAT	-	-	-	Vazão, sedimento, fósforo total
100	1	CNRH	Resolução n°91 - Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos	2009	Lei	-	-	Brasil	Disposições sobre enquadramento	-	N	-	-	-	N	N	N	N	-	-	-	-	-	-
101	1	Brasil	Lei N° 9.433 / 1997 - Política Nacional de Recursos Hídricos	1997	Lei	-	-	Brasil	Cria a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e define o Enquadramento	-	N	-	-	-	N	N	N	N	-	-	-	-	-	-
102	4	Mannina, Giorgio Viviani, Gaspare	A hydrodynamic water quality model for propagation of pollutants in rivers	2010	Artigo	Revista	Water Science & Technology	Itália - Rio Savena	Desenvolve modelo hidrodinâmico e de qualidade da água como foco na solução numérica, focando no método de geração de cargas a jusante visando reduzir oscilações na solução numérica, com objetivo geral de entender melhor a relação entre cargas na bacia - alterações na qualidade da água.	-	S	Saint-Venant, ADR	-	-	N	S	S	-	-	-	-	-	-	-
103	4	Ferreira, Danieli Mara Fernandes, Cristovão Vicente Scapulatempo Kaviski, Eloy Fontane, Darrell	Transformation rates of pollutants in rivers for water quality modelling under unsteady state A calibration method	2020	Artigo	Revista	Journal of Hydrology	Brasil - Alto do Rio Iguaçu	Desenvolve metodologia para calibração baseado em coeficientes diários, chamado de TRATS	-	S	Saint-Venant	SIQUAL	N	S	S	S	-	-	-	-	-	-	Vazão, DBO, Norg, OD
104	3	Ferreira, Danieli Mara Fernandes, Cristovão Vicente Scapulatempo Gomes, Julio	Verification of Saint-Venant equations solution based on the lax diffusive method for flow routing in natural channels	2017	Artigo	Revista	RBRH			-	-	Saint-Venant	-	-	N	S	N	S	-	-	-	-	-	Vazão