



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

PATRÍCIA DA SILVA BARBOSA

**MONITORAMENTO E MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA NO
SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO**

**JUAZEIRO-BA
2020**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

PATRÍCIA DA SILVA BARBOSA

**MONITORAMENTO E MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA NO
SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO**

Dissertação apresentada a Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, Campus Juazeiro, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. D. Sc. Marlon da Silva Garrido

Coorientador: Prof. D. Sc. Paulo Gustavo S. Carvalho

Coorientadora: Prof. D. Sc. Miriam C. C. de Amorim

JUAZEIRO – BA
2020

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

FOLHA DE APROVAÇÃO

PATRÍCIA DA SILVA BARBOSA

**MONITORAMENTO E MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA NO SUBMÉDIO
SÃO FRANCISCO**

Dissertação apresentada a Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, Campus Juazeiro, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Aprovada em: 27 de fevereiro de 2020

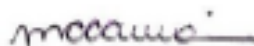
Banca Examinadora



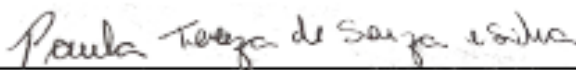
Marlon da Silva Garrido, Prof. D. Sc.
(UNIVASF/CPGEA)



Paulo Gustavo Serfim de Carvalho, Prof. D. Sc.
(UNIVASF/CENAMB)



Miriam Cleide Cavalcante de Amorim, Profa. D. Sc.
(UNIVASF/CENAMB)



Paula Tereza de Souza e Silva, D.Sc.
(EMBRAPA SEMIÁRIDO)

B228m Barbosa, Patrícia da Silva
 Monitoramento e modelagem da qualidade da água no Submédio São
Francisco / Patrícia da Silva Barbosa. – Juazeiro-BA, 2020.
 ix, 63 f. : il. ; 29 cm.

 Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal do
Vale do São Francisco, Campus Juazeiro, 2020.

 Orientador: Prof. D. Sc. Marlon da Silva Garrido.

 Inclui referências.

 1. Água - Qualidade. 2. Bacia Hidrográfica. 3. Rio. I. Título. II. Garrido,
Marlon da Silva. III. Universidade Federal do Vale do São Francisco.

 CCD 628.35

Dedico este trabalho a Deus, por me conceder saúde e sabedoria para seguir sempre em frente. A ti, Senhor, toda honra e toda a glória. Aos meus pais, Antônio e Geuzenilda, familiares e amigos pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela dádiva da vida e por me permitir realizar tantos sonhos nesta existência. Obrigado Senhor por sua eterna compreensão e infinito amor, e por sempre estar ao meu lado me tranquilizando e dando forças para seguir em frente com os meus objetivos.

Aos meus pais, Antônio Cerqueira e Geuzenilda e, aos irmãos Ana Paula, Cleiton e Jéssica, que sempre acreditaram na minha capacidade e me amarem incondicionalmente e entenderam as minhas faltas e momentos de afastamento para dedicar-me aos estudos.

Ao professor Paulo Gustavo, pela orientação, pela confiança depositada no meu trabalho e por me atender com paciência todas as vezes que foi solicitado. Agradeço por todos os ensinamentos compartilhados de forma admirável e por me guiar nos primeiros passos da pós-graduação.

À minha coorientadora, Miriam Cleide pela colaboração e conhecimentos compartilhados no desenvolvimento do trabalho, e pelo carinho, paciência e respeito que sempre teve por mim durante todos os anos que trabalhamos juntas.

A Damiana Rodrigues, técnica do laboratório, por compartilhar seus conhecimentos e auxiliar na realização das análises e, sobretudo pela amizade.

As amigas, desde a graduação, Edicélia, Amélia, Janielle e Ruanna, pela paciência e carinho durante todos esses anos de convivência e pelos momentos de descontração.

A Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade e infraestrutura oferecida para a realização deste trabalho, aos professores pelos conhecimentos adquiridos durante o mestrado e a secretária do CPGEA, Carolina Torres, por seu carinho e eficiência em todos os serviços solicitados.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pela concessão da bolsa.

Muito obrigada!!!

BARBOSA, P.S. **Monitoramento e modelagem da qualidade da água no Submédio São Francisco**. 2020. 63f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Vale do São Francisco, UNIVASF, Juazeiro-BA.

RESUMO

A intensificação da urbanização e o crescimento de áreas agrícolas tem contribuído de forma significativa para a degradação das bacias hidrográficas. Este trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade da água do Rio São Francisco, na região do Submédio, verificando o impacto do uso e ocupação do solo e da sazonalidade sobre este corpo hídrico, e realizar a modelagem matemática da qualidade da água deste rio com base no programa QUAL-UFMG. Para a verificação da qualidade da água foram realizadas quatro coletas entre setembro de 2018 a dezembro de 2019, contemplando os períodos seco e chuvoso. Os atributos físicos, químicos e microbiológicos analisados foram: oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), coliformes termotolerantes/*E.coli* (CT), nitrogênio total (NT), fósforo total (PT), clorofila a (CL), sólidos totais (ST), cor, pH, turbidez (Tu) e temperatura (T). Em seguida foram determinados o Índice de Qualidade da Água (IQA) e o Índice de Estado Trófico (IET). Para a análise da qualidade da água em função do uso do solo e sazonalidade, foram aplicados os testes estatísticos não paramétricos de Friedman, seguido pelo teste de comparações múltiplas, ao nível de significância de 5%, face ao comportamento assimétrico dos dados. Os componentes modelados pelo QUAL-UFMG foram: oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo total (PT) e coliformes termotolerantes (CT). Para a verificação da eficiência do programa foi aplicado o coeficiente Nash-Sutcliffe (CNS). A análise da sazonalidade apontou diferenças significativas nas variáveis, turbidez, sólidos totais, fósforo total, CT/*E.coli*, nitrogênio total, temperatura e o IET da água. Em relação ao atendimento à legislação e ao enquadramento, identificou-se que PT (0,03 a 0,55 mg.L⁻¹), CT/*E.Coli* (292,39 a 1600 NMP.100 mL⁻¹) e DBO (1,20 a 14,00 mgO₂.L⁻¹), estiveram em dissonância com o que preconiza a resolução CONAMA 357/2005. Analisando o efeito do uso e ocupação do solo sobre a qualidade da água foram encontradas diferenças significativas em função das áreas rural, urbana e lançamento de esgoto doméstico. Em relação a eficiência do modelo para estimar o comportamento das variáveis, para o PT, CT e DBO o modelo apresentou uma eficiência boa (CNS>0,75) e para o OD o modelo foi considerado aceitável (0,36<CNS<0,75), tanto para o período seco quanto chuvoso. Dessa forma, a utilização do programa QUAL-UFMG para a avaliação da qualidade da água do rio São Francisco para a região de estudo é viável, visto que, ocorreu uma similaridade entre os dados observados em campo e a curva simulada pelo programa. Espera-se que realização deste trabalho auxilie na compreensão das características do recurso hídrico estudado, gerando dados que possam ser uma ferramenta para facilitar os comitês de bacias, quanto à gestão deste recurso hídrico.

Palavras-chave: IQA, IET, Rio São Francisco, Sazonalidade

BARBOSA, P.S. **Water quality monitoring and modeling in the San Francisco Submedium**. 2020. 63f. Dissertation (Master in Agricultural Engineering), Federal University of Vale do São Francisco, UNIVASF, Juazeiro-BA.

ABSTRACT

The intensification of urbanization and the growth of agricultural areas has contributed significantly to the degradation of river basins. This work aims to evaluate the water quality of the São Francisco River, in the Submedium region, verifying the impact of land use and occupation and seasonality on this water body, and to perform the mathematical modeling of the water quality of this river based on the QUAL-UFMG program. Four water quality surveys were carried out between September 2018 and December 2019, covering the dry and rainy periods. The physical, chemical and microbiological attributes analyzed were: dissolved oxygen (OD), biochemical oxygen demand (BOD), thermotolerant coliforms/*E.coli* (CT), total nitrogen (NT), total phosphorus (PT), chlorophyll a (CL), total solids (ST), color, pH, turbidity (Tu) and temperature (T). Then the Water Quality Index (WQI) and the Trophic State Index (TEI) were determined. Friedman's non-parametric statistical tests were applied to the analysis of water quality according to land use and seasonality, followed by the multiple comparisons test, at a 5% significance level, against the asymmetric behavior of the data. The components modeled by QUAL-UFMG were: dissolved oxygen (OD), biochemical oxygen demand (BOD), total phosphorus (PT) and thermotolerant coliforms (CT). The Nash-Sutcliffe (CNS) coefficient was applied to check the efficiency of the programme. The analysis of seasonality showed significant differences in variables, turbidity, total solids, total phosphorus, CT/*E.coli*, total nitrogen, temperature and the TEI of water. Regarding compliance with legislation and framework, it was identified that PT (0,03 to 0,55 mg.L⁻¹), CT/*E.Coli* (292,39 to 1600 NMP.100 mL⁻¹) and DBO (1,20 to 14,00 mgO₂.L⁻¹), were in dissonance with the CONAMA resolution 357/2005. Analyzing the effect of land use and land cover on water quality, significant differences were found according to rural, urban and domestic sewerage areas. Regarding the efficiency of the model to estimate the behavior of variables, for PT, CT and DBO the model presented a good efficiency (CNS>0,75) and for OD the model was considered acceptable (0,36<CNS<0,75), both for the dry and rainy periods. Thus, the use of the QUAL-UFMG program for the evaluation of the water quality of the São Francisco River for the study region is feasible, since a similarity occurred between the data observed in the field and the curve simulated by the program. It is expected that this work will help in understanding the characteristics of the studied water resource, generating data that can be a tool to facilitate the basin committees, regarding the management of this water resource.

Keywords: WQI, TEI, São Francisco River, Seasonality

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	10
2. REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1 PANORAMA DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO	11
2.2. MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA	14
2.3. MODELAGEM AMBIENTAL.....	16
3. REFERÊNCIAS	17
4. ARTIGO 1: Qualidade da água em trecho da região do Submédio São Francisco em função da sazonalidade e uso e ocupação do solo	23
4.1. INTRODUÇÃO	24
4.2.METODOLOGIA	25
4.2.1.Caracterização da área de estudo	25
4.2.2. Monitoramento da qualidade da água	25
4.2.3. Dados Meteorológicos e Fluviométricos.....	28
4.2.4. Índice de Qualidade da Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET)	29
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.3.1. Análise Descritiva Geral	31
4.3.2. Efeito da Sazonalidade	34
4.3.3. Conformidade com a resolução CONAMA 357/2005.....	37
4.3.4. Influência do uso e ocupação do solo	38
4.4. CONCLUSÃO	40
4.5. REFERÊNCIAS	40
5. ARTIGO 2: Modelagem sazonal da qualidade da água no Submédio São Francisco utilizando o programa QUAL-UFMG	45
5.1. INTRODUÇÃO	46
5.2. METODOLOGIA	47
5.2.1. Caracterização da área de estudo	47
5.2.2. Variáveis de qualidade da água	48
5.2.3. Calibração/ Validação do Modelo.....	50
4.2.4. Índices estatísticos	54
5.3. RESULTADO E DISCUSSÃO	54
5.4. CONCLUSÃO	60
5.5. REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO GERAL

A água é um recurso de suma importância para a continuidade da existência de vida. Ao contrário do que muitos acreditam este é um recurso finito e necessita de cuidados, visto que o seu uso promove modificações em uma bacia hidrográfica. A disposição de efluentes de forma inadequada e sem tratamento nos mananciais aquáticos, a ocupação agrícola nas margens vem trazendo uma série de danos e resultando na poluição do meio ambiente (HABERLAND et al., 2012; SALLA et al., 2013).

Segundo Tonon (2014), a qualidade de um ambiente aquático pode ser determinada através de medidas qualitativas e quantitativas, em atividades de campo e em laboratório, fornecendo inúmeras informações e interpretações diferentes.

Entre os índices utilizados para o manejo sustentável dos recursos hídricos está o Índice de Qualidade de Água (IQA), que permite por meio de informações resumidas, prever as condições do manancial superficial ao longo do tempo, reduzindo custos e fornecendo resultados de fácil interpretação (Silveira et al., 2014; Cunha et al., 2013) e o Índice de Estado Trófico (IET), que tem por objetivo classificar corpos hídricos em diferentes graus de trofia, avaliando a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes (LAMPARELLI, 2004).

O uso de modelos ambientais também é uma alternativa de gerenciamento dos recursos hídricos, estes têm como objetivo representar a realidade da maneira como ela é observada, facilitando intervenções e estudos do comportamento dos cursos d'água, em locais onde sejam necessárias decisões e planejamentos, através de simulações de cenários (MOURÃO JR, 2010).

O programa QUAL-UFMG, utilizado para esta pesquisa, foi desenvolvido por Von Sperling (2014), a partir de uma adaptação do modelo QUAL2E desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – UESPA), saindo da condição da linguagem computacional para a plataforma em Excel. Isso proporcionou um modelo de melhor clareza em cada etapa da modelagem, ficando o processo mais simples (LIMA et al., 2018).

A expansão da produção agrícola na região do Submédio São Francisco, ocasionada principalmente pela instalação de perímetros irrigados localizados nas margens do Rio São Francisco, como o Projeto Nilo Coelho, Bebedouro, Maniçoba, Mandacaru e Pedra Branca e o desenvolvimento de um dinâmico pólo agroindustrial,

promoveram o crescimento econômico e populacional desta região (RODRIGUES et al., 2004).

De acordo com o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF) os impactos ambientais sofridos pelo rio São Francisco estão diretamente ligados à atividade econômica desenvolvida em cada região, sendo que o manejo inadequado na agricultura (CBHSF, 2015), o lançamento de esgotos domésticos e as atividades agropecuárias (Castro e Pereira, 2017) as principais fontes de poluição no Submédio São Francisco.

Em virtude da importância que o Rio São Francisco possui para a população e para a economia do Submédio São Francisco é essencial que sejam realizados estudos que verifiquem alterações na qualidade deste recurso hídrico. Sendo assim, a realização deste trabalho irá auxiliar na compreensão das características qualitativas deste recurso hídrico e identificação de possíveis fontes de poluição que poderá ser utilizado no gerenciamento do rio.

Dessa forma, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a qualidade da água do Rio São Francisco, na região do Submédio, verificando o impacto do uso e ocupação e da sazonalidade sobre este corpo hídrico, e realizar a modelagem matemática da qualidade da água deste rio com base no programa QUAL-UFMG.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PANORAMA DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO

A bacia hidrográfica do rio São Francisco tem grande importância para o país não apenas pelo volume de água transportado em uma região semiárida, mas, também, pelo potencial hídrico passível de aproveitamento e por sua contribuição histórica e econômica para a região (CASTRO e PEREIRA,2017).

A Bacia Hidrográfica do rio São Francisco abrange 639.219 km² de área de drenagem (7,5% do país) e vazão média de 2.850 m³/s (2% do total do país). O rio São Francisco tem 2.700 km de extensão e nasce na Serra da Canastra em Minas Gerais, escoando no sentido sul-norte pela Bahia e Pernambuco, quando altera seu curso para este, chegando ao Oceano Atlântico através da divisa entre Alagoas e Sergipe. A Bacia está presente em sete unidades da federação, sendo, 48,2% na

Bahia, 36,8% em Minas Gerais, 10,9% em Pernambuco, 2,2 % Alagoas, 1,2 % em Sergipe, 0,5% Goiás e 0,2 % no Distrito Federal (CBHSF,2020).

Devido à sua extensão e aos diferentes ambientes, divide-se em quatro regiões fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco, com uma área de aproximadamente, 155.637 Km², o Submédio São Francisco abrange uma totalidade de 17% do território desta bacia e 440 km de extensão. Sua população é de aproximadamente 1,944 milhões de habitantes (CBHSF, 2013).

No que se refere ao Submédio São Francisco, segundo a classificação de Köppen a região apresenta clima quente e semiárido, do tipo BSw_h, as precipitações pluviais são baixas e muito irregulares, variando entre 350 a 800 mm e a estação chuvosa estende-se de dezembro a abril e a seca de maio a novembro (INMET, 2010).

O rio São Francisco na região do Submédio é explorado para diferentes finalidades tanto sociais quanto econômicas, tais como: uso da água para o abastecimento público, depósito de efluentes, irrigação, pesca, e para implantação de projetos de aquicultura, navegação, comércio pluvial entre as cidades vizinhas e exploração da hidroeletricidade através da Usina de Sobradinho, pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco – CHESF (FONTES et al., 2002).

Atualmente, o Submédio São Francisco é uma das regiões mais dinâmicas do Nordeste. Os grandes projetos de irrigação dinamizaram a economia e cumpriram importante papel na geração de riqueza, de ocupação e de renda local (SILVA,2012; TODELO e SOUZA,2015).

Os principais produtos comercializados são uvas e mangas, juntas essas duas culturas movimentam a economia local integrando agricultura, indústria e comércio exterior, transformando as cidades de Juazeiro-BA e Petrolina-PE no principal pólo agroexportador do Vale do São Francisco (ARRUDA ,2017; TODELO e SOUZA,2015).

Na região do Submédio São Francisco estão inseridos os municípios de Salgueiro, Cabrobó, Floresta e Petrolândia, áreas de implantação de um empreendimento de grande magnitude em nível nacional, a transposição das águas da bacia do rio São Francisco (TOLEDO e SOUZA,2015).

O Projeto de Integração do rio São Francisco tem como objetivo central assegurar oferta adequada de água de boa qualidade para o consumo humano e suporte para atividade agrícola. A distribuição de água do rio São Francisco, é formado por dois eixos (TOLEDO e SOUZA, 2015; HENKES,2014):

- Eixo Norte: a captação está nas proximidades da cidade de Cabrobó (PE) e percorrerá cerca de 426 km conduzindo água aos rios Salgado e Jaguaribe, no Ceará; Apodi, no Rio Grande do Norte; Piranhas-Açu, na Paraíba e Rio Grande do Norte. Ao cruzar o Estado de Pernambuco, este eixo conduzirá água para suprir as demandas de municípios inseridos em três sub-bacias do rio São Francisco: Brígida, Terra Nova e Pajeú. Com extensão de 426 km, este trecho envolve 21 municípios e tem uma vazão de projeto que varia (ao longo do canal) entre 20m³/s e 99 m³/s, é composto por 10 lotes de obras, com a construção de 16 vilas produtivas rurais.
- Eixo Leste: a captação ocorre no lago da Barragem de Itaparica, no município de Floresta (PE) e percorrerá 220 km até o rio Paraíba (PB), após deixar parte da vazão nas bacias do Pajeú e do Moxotó. Para o atendimento da demanda da região Agreste de Pernambuco, o projeto prevê a construção de um ramal de 70 km que o interligará à Bacia do rio Ipojuca. Envolve cinco municípios e sua vazão varia ao longo do canal de 18 m³/s a 28m³/s. Esse eixo é composto por seis 6 lotes de obras, além da construção de duas 2 vilas produtivas rurais.

As obras do Eixo Leste foram concluídas em março de 2017, já o Eixo Norte está em 97% de execução física (ANA, 2020; FUNDAJ, 2020).

As inúmeras possibilidades de aproveitamento dos recursos do rio São Francisco, inegavelmente geram riqueza, no entanto, quando explorado de forma descontrolada e pouco sustentável pode acarretar em graves problemas ambientais, como degradação do solo, assoreamento dos leitos dos rios, poluição e escassez hídrica (TALLMAN E BENECTIDO, 2018). Devido a estes fatores é crescente a preocupação com a disponibilidade dos recursos hídricos em quantidade e qualidade compatíveis com seus usos, principalmente com o abastecimento público.

A contaminação hídrica do Rio São Francisco é um desafio que envolve relações complexas devido às múltiplas fontes de poluição (RODRIGUES et al., 2004). Entre os principais problemas ambientais que impactam o Submédio destacam-se, o lançamento de efluentes urbanos e industriais e a poluição difusa (TALLMAN e BENECTIDO, 2018; MELGAÇO, 2010).

Nesse sentido, a região exige um monitoramento contínuo da qualidade da água e do manejo do ecossistema fluvial, sendo de fundamental importância para a proposição de medidas para atenuar essas modificações (ISMERIM, 2005).

2.2. MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

A qualidade da água refere-se não apenas a um estado original de pureza, mas, também as características químicas, físicas e biológicas que os corpos d'água devem apresentar de acordo com os múltiplos usos a que se destinam (SILVA, 2006).

As características físicas, químicas e biológicas das águas naturais são consequências de uma série de processos que ocorrem no corpo hídrico uma vez que as substâncias presentes nas águas se relacionam com o tipo de uso e com atividades desenvolvidas na bacia hidrográfica, além do transporte superficial e subterrâneo (LIBÂNIO, 2016).

A contribuição dos poluentes agrícolas, urbanos e industriais para os rios em várias partes do mundo levou à deterioração dos recursos hídricos. O uso e ocupação do solo sem planejamento contribuem para ações antropogênicas que causam mudanças na qualidade da água local e induzem sua poluição a níveis inaceitáveis (SOUZA e GASTALDINI, 2014).

Para um gerenciamento adequado dos recursos hídricos, o primeiro passo é o monitoramento da qualidade da água, para caracterizar parâmetros físicos e químicos que permitem diagnosticar as mudanças causadas por atividades antrópicas ou naturais, no uso e ocupação do solo (BARRETO et al., 2014; BRITTO et al., 2018).

O monitoramento envolve um conjunto de procedimentos que objetivam analisar determinadas características de um sistema, sempre correlacionando-se com a meta estabelecida, que pode ser a manutenção ou recuperação da qualidade da água (BRITTO et al., 2018).

Ao avaliar a qualidade das águas superficiais, devem-se empregar métodos de fácil entendimento para que as informações possam ser transmitidas aos usuários desse recurso (FERREIRA et al., 2015; CUNHA et al., 2013). Por isso, adota-se como alternativa para acompanhar as alterações na qualidade de água ao longo de uma bacia hidrográfica ou do tempo, sejam elas de origem antrópica ou natural o uso de índices de qualidade de água (LOPES et al., 2008; VON SPERLING, 2014).

O Índice de Qualidade de Água (IQA) foi desenvolvido pela National Sanitation Foundation (NSF), nos Estados Unidos, para comparar a qualidade dos corpos hídricos e monitorar as alterações temporais ou espaciais na qualidade da água, refletindo a sua contaminação por ações antrópicas, tais como esgoto doméstico, resíduos industriais ou agropecuários (LOPES et al., 2008; TADEO et al., 2000).

Este índice foi adaptado pela Companhia Ambiental do estado de São Paulo (CETESB) e a partir daí, tem sido o principal índice de qualidade de água utilizado no Brasil, onde as variáveis consideradas são: coliformes termotolerantes, oxigênio dissolvido, fósforo total, turbidez, sólidos totais, temperatura, pH, demanda bioquímica de oxigênio e nitrogênio total (ANA, 2012; CETESB, 2008).

Outro índice que monitora a qualidade da água é o Índice de Estado Trófico (IET), que tem por finalidade classificar corpos d'água em diferentes graus de trofia, ou seja, avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo das algas ou ao aumento da infestação de macrófitas aquáticas (VON SPERLING, 2014).

Nesse índice, os resultados correspondentes ao fósforo, IET (P), devem ser entendidos como uma medida do potencial de eutrofização, já que este nutriente atua como o agente causador do processo. A avaliação correspondente à clorofila *a*, o IET (CL), por sua vez, deve ser considerada como uma medida da resposta do corpo hídrico ao agente causador, indicando de forma adequada o nível de crescimento de algas que tem lugar em suas águas. Assim, o índice médio engloba, de forma satisfatória, a causa e o efeito do processo (FERREIRA et al., 2005).

Outro objetivo do monitoramento é a avaliação do atendimento à legislação dos órgãos ambientais, no que diz respeito à qualidade da água nos corpos hídricos. Dentre as legislações, tem especial importância a Resolução 357/2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que regulamenta sobre as classes que correspondem à determinada qualidade a ser mantida no corpo d'água. Essa qualidade é expressa na forma de padrões, na referida resolução.

O enquadramento dos corpos d'água não se baseia necessariamente no seu estado atual, mas nos níveis de qualidade que um corpo d'água deveria possuir para atender às necessidades definidas pela sociedade. Trata-se de instrumento de proteção dos níveis de qualidade dos recursos hídricos, que considera que a saúde e o bem-estar humano, assim como o equilíbrio ecológico aquático, não devem ser afetados pela deterioração da qualidade das águas (SILVA et al., 2017).

Dentro do monitoramento aquático, o uso de modelos matemáticos tem adquirido grande importância, tornando-se ferramenta indispensável para tomada de decisões. Segundo Britto (2015), o uso de modelos matemáticos para monitoramento da qualidade da água pode ser compreendido como qualquer representação

simplificada do mundo real de acordo com o interesse do pesquisador, possibilitando a observação da realidade ou prever um comportamento.

2.3. MODELAGEM AMBIENTAL

Os modelos matemáticos são ferramentas que integram uma série de informações locais (solo, clima, topografia, cobertura vegetal, dentre outros) e possibilitam a simulação dos impactos oriundos do uso do solo, qualidade das águas e na contaminação do solo e da água por resíduos agroindustriais, domésticos e agrícolas (BLAINSKI et al.,2010).

Uma forma eficiente de avaliar os impactos do lançamento de cargas poluidoras, bem como de analisar cenários de intervenção e medidas de controles ambientais, é através da utilização de modelos de qualidade das águas, dentre os modelos que vem sendo aplicados em estudos de qualidade de água está o QUAL-UFMG.

Tomando por base o modelo QUAL2E, desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – UESPA), o pesquisador desenvolveu o modelo denominado de QUAL-UFMG, saindo da condição da linguagem computacional para a plataforma em Excel. Isso proporcionou um modelo de melhor clareza em cada etapa da modelagem, ficando o processo mais simples. O modelo simula os parâmetros: oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio e suas frações, fósforo e suas frações e coliformes termotolerantes (VON SPERLING,2014).

Pereira et al. (2019) em seu estudo relatam que o modelo QUAL-UFMG se mostrou uma importante ferramenta para analisar os efeitos da poluição por fontes pontual e não pontual e para avaliação de cenários, objetivando o cumprimento da legislação pertinente, corroborando com Teodoro et al. (2013) que também trabalharam com esse modelo para gerar cenários para o Rio Taquari e enalteceram sua simplicidade e eficácia.

O programa QUAL-UFMG apresenta quatro planilhas do Microsoft Office Excel, conforme descritas por VON SPERLING (2014):

- ✓ FórmulasCoefic: planilha contendo informações sobre as fórmulas utilizadas para os cálculos da modelagem e sobre valores usuais dos coeficientes;

- ✓ DiagramaUnifilar: planilha utilizada para a descrição e o detalhamento do diagrama unifilar do sistema a ser modelado;
- ✓ RioPrincipal: planilha incluindo a modelagem do rio principal, na qual os cálculos da simulação são efetuados e os resultados exibidos;
- ✓ Tributário 1: planilha de uso opcional, correspondente à simulação de algum tributário existente no sistema a ser modelado.

A literatura dispõe de diversos trabalhos científicos sobre o uso do QUAL-UFMG. Gomes et al. (2018) realizaram a modelagem da qualidade da água do Rio dos Sinos– RS por meio desse mesmo modelo, verificando o comportamento do oxigênio dissolvido para diferentes cenários hipotéticos, comparando a calibração do modelo entre as variações sazonais e verificando a aplicação do modelo ao corpo hídrico estudado. Dessa forma, confirmou-se a influência das variações sazonais nas curvas de calibração e a alteração do comportamento do oxigênio dissolvido frente a diferentes cenários de lançamentos pontuais e difusos.

Teodoro et al. (2013) aplicaram a plataforma QUAL-UFMG para o rio Taquarazinho - MS, objetivando a integração desse modelo com o gerenciamento de recursos hídricos. Para tanto, incorporaram-se às planilhas de simulação equações para a determinação das vazões de diluições e da cobrança pelos lançamentos de efluentes. Assim, pode-se contabilizar os custos para diferentes cenários e constatar que o rio possuía uma alta capacidade de autodepuração, podendo suportar empreendimentos de porte significativo.

Lima et al. (2018) simulando cenários na Bacia Hidrográfica do Açude Acarape do Meio, no semiárido brasileiro, inferiram que apenas com aumento da eficiência da capacidade de remoção das ETEs em 85%, sem qualquer intervenção nas outras atividades agropecuárias, diminuiria significativamente a concentração de fósforo. Simulando diferentes cenários de vazão (máximas e mínimas) inerentes ao semiárido para o Rio Poti, na cidade de Teresina, Oliveira Filho e Lima Neto (2018) encontraram resultados coerentes e que podem ser utilizados para a gestão dos recursos hídricos do estado do Piauí.

3. REFERÊNCIAS

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. 2014. **Indicadores de qualidade - índice de qualidade das águas (IQA)**. Disponível em: <<http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>>. Acesso em: fevereiro de 2020.

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Diretores da ANA sobrevoam canais da transposição do rio São Francisco**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/noticias/diretores-da-ana-sobrevoam-canais-da-transposicao-do-rio-sao-francisco>. Acessado em: 25 de abril de 2020.

ARRUDA, A.C. A fruticultura irrigada do Vale do Submédio do São Francisco e a modernização agrícola do Sertão. **Estudos & Pesquisas Unidade de Gestão Estratégica do Sebrae/PE**, 2017.

BARRETO, L. V.; FRAGA, M. S.; BARROS, F. M.; ROCHA, F. A.; AMORIM, J. S.; DE CARVALHO, S. R. et al. Relação entre vazão e qualidade da água em uma seção de rio. **Revista Ambiente & Água**, v. 9, p. 118-129, 2014.

BLAINSKI, E.; ARAUJO, I. S.; GOMES, P. Modelagem e simulação do uso do solo e as alterações no ambiente. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33. 2010, Uberlândia. **Anais [...]** Uberlândia: Minas Gerais, 2010.

BRITTO, F.B. **Monitoramento e modelagem da qualidade da água e agrotóxicos em corpos hídricos no Baixo São Francisco Sergipano**. 2015.165 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e meio ambiente). Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão-SE, 2015.

BRITTO, F. B.; VASCO, A. N.; NETTO, A.; OLIVEIRA, A.; GARCIA, C. A. L. BORGES, M.; OLIVEIRA, G.S.; SILVA, M. G. Surface water quality assessment of the main tributaries in the lower São Francisco River, Sergipe. **Revista Brasileira de Recursos Hídrico**, v. 23, p. 1-11, 2018.

CASTRO, C.N.; PEREIRA, C.N. Revitalização do Rio São Francisco. **IPEA- Boletim regional, urbano e ambiental**. p. 69-76, jul.-dez, 2017.

CBHSF. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. 2013. **O submédio São Francisco**. Disponível em: <http://cbhsaofrancisco.org.br/2017/o-submedio-sao-francisco-2/>. Acessado em 11 de março de 2018.

CBSHF. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. 2015. **Os impactos no Médio e Sub-Médio São Francisco**. Disponível em: https://cbhsaofrancisco.org.br/noticias/sustentabilidade_blog/os-impactos-no-medio-e-sub-medio-sao-francisco/. Acessado em 25 de março de 2019.

CBSHF. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. 2015. **Bacia Hidrográfica do rio São Francisco**. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/bacia/>. Acessado em 25 de abril de 2020.

CETESB. **Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB. 537 f, 2008.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução 357, de 17 de março de 2005. Brasília, 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, págs. 58-63, seção 053, 18 de março de 2005.

CUNHA, R.W.; GARCIA JR., M.D.N.; ALBERTONI, E.F.; SILVA, C.P. Qualidade de água de uma lagoa rasa em meio rural no sul do Brasil. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 17, n. 7, p. 770-779, 2013.

FERREIRA, R. M.; BARROS, N. O.; DUQUE-ESTRADA, C. H.; ROLAND, F. **Caminhos do fósforo em ecossistemas aquáticos continentais**. Lições de Limnologia. São Carlos: RiMa Editora. p. 229-242, 2005.

FERREIRA, K. C. D; LOPES, F. B, ANDRADE, E. M., MEIRELES, A. C. M; SILVA, G. S. Adaptação do índice de qualidade de água da National Sanitation Foundation ao semiárido brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v.46, n.2, p.277-286, 2015.

FONTES, L. C. S., HOLANDA, F. S. R., SILVA, C. M., CASADO, A. P., LATRUBESSE, E.; CUNHA, S. B. **Estudo do processo erosivo das margens do Baixo São Francisco e seus efeitos na dinâmica de sedimentação do Rio: Relatório Final**. Projeto GEF São Francisco (ANA/ GEF/PNUMA/OEA). Universidade Federal de Sergipe, 2002.

FUNDAJ. Fundação Joaquim Nabuco. **Águas da transposição do rio São Francisco chegam ao último reservatório antes do Ceará**. Disponível em: <https://www.fundaj.gov.br/index.php/transposicao-do-rio-sao-francisco/11763-aguas-da-transposicao-do-rio-sao-francisco-chegam-ao-ultimo-reservatorio-antes-do-ceara>. Acessado em: 25 de abril de 2020.

GOMES, S. H. R.; SIQUEIRA, T. M.; GUEDES, H.; ANDREAZZA, R.; HUFFNER, A. N.; CORRÊA, L. Modelagem sazonal da qualidade da água do Rio dos Sinos/RS utilizando o modelo QUAL-UFMG. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, p. 275-285, 2018.

HABERLAND, N. T.; SILVA, F. C. B.; OLIVEIRA-FILHO, P. C.; VIDAL; C. M S; CAVALLIN, G. S. Análise da influência antrópica na qualidade da água do trecho urbano do Rio das Antas na cidade de Irati, Paraná. **Revista Tecnológica**, v. 21, p. 53-67, 2012.

HENKES, S. L. A política, o direito e o desenvolvimento: um estudo sobre a transposição do rio São Francisco. **Revista Direito GV**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 497-534, 2014.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Balanço Hídrico Climatológico (2010)**. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/html/agro.html>>. Acesso em 02 de julho 2020.

ISMERIM, S. S. **As cheias no Baixo São Francisco: estudo de caso sobre a percepção dos ribeirinhos**.2005.109 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) -Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão- SE, 2005.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**.2004. 238 f. (Tese em Ciências na área de Ecossistemas Terrestres e Aquáticos) - Universidade de São Paulo, SP,2004.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 4. ed. Campinas: Átomo, 2005. 640 p.

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.

LOPES, N. H. Y.; KOBAYAMA, M. Análise do equilíbrio hidrossedimentológico em uma microbacia experimental com o modelo SWAT e as características geomorfológicas. In: VII Simpósio nacional de geomorfologia e II Encontro latino-americano de geomorfologia, 2008, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Porto Alegre: ABRH, 2008.

MELGAÇO, S. **Políticas Sociais do Programa Interáguas-Relatório de Avaliação Social do Programa Marco de Reassentamento Involuntário**. ANA-Agência Nacional das Águas. Agosto, 208 p.,2010.

MOURÃO JR, P. R. **Aplicação do modelo de autodepuração de qualidade das águas Qual-UFMG: estudo de caso sub-bacia do rio Piracicaba**. 2010. 144 f.

Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade Sócio-econômica e Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

OLIVEIRA FILHO, A. A. D.; LIMA NETO, I. E. Modelagem da qualidade da água do rio Poti em Teresina (PI). **Engenharia Sanitária & Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 3-14, 2018.

PEREIRA, R. A.; DA PAZ, D. H. F.; BARBOSA, I. M. B. R. Reduction Of Organic Loading Launched In A Specific Area In The Capibaribe River To Comply With Environmental Legislation. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, p. 837-847, 2019.

RODRIGUES, G. S; SILVA, A.S; BUSCHINELLI, C.C.A; ROSSO, C.R; CARBINATTO, M.L; WALDEMORE, T.S e PAIVA, M.W.F. **Diagnóstico ambiental das fontes pontuais de poluição das águas nas bacias hidrográficas do norte de Minas e do Submédio São Francisco**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 42 p., 2004.

SALLA, M.R.; PEREIRA, C.E.; ALAMY FILHO, J.E.; DE PAULA, L.M.; PINHEIRO, A.M. Estudo da autodepuração do Rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do Rio Dourados. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 105-114, 2013.

SILVEIRA, T.; REGO, N.A.C.; SANTOS, J.W.B.; ARAUJO, M.S.B. Qualidade da água e vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais na definição das fragilidades potencial e ambiental de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 4, p. 643-652, 2014.

SILVA, P. C. G. Projetos de irrigação e o desenvolvimento do Submédio [do Vale do São Francisco, Juazeiro- BA. In: I Semana de Ciências Sociais na UNIVASF- As Ciências Sociais no Nordeste: um Desafio. **Anais eletrônicos [...]**. Disponível em <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/950772/1/Pedro.pdf>. Acesso em: 02/04/2020.

SILVA, M. G. **Caracterização da qualidade da água na barragem do perímetro irrigado Jacarecica I**. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). Universidade Federal de Sergipe, Itabaiana-SE, 2006.

SILVA, D.F.; GALVÍNCIO, J. D.; ALMEIDA, H.R.R.; Variabilidade da Qualidade de Água na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Qualit@s Revista Eletrônica**, vol.9. n.3, p. 1-17, 2010.

SILVA, M. A. P. M.; FARIA, S. D.; MOURA, P. M. Modelagem da qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba (MG). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 133-143, 2017.

SOUZA, M.M.; GASTALDINI, M.C.C. Avaliação da qualidade da água nas bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 263-274, 2014.

TALLMAN, H E BENEDICTO, M. São Francisco o rio que resiste. **Retratos a Revista do IBGE**. n.13 ,p. 1-28. 2018.

TADEO, J. L.; SANCHEZ-BRUNETE, C.; PEREZ, R. A.; FERNÁNDEZ, M. D. Analysis of herbicide residues in cereals fruits and vegetables. **Journal of Chromatography A**, v. 882, n. 1-2, p. 175-191, 2000.

TEODORO, A.; IDE, C.N.; RIBEIRO, M.L.; BROCH, S.A.O.; SILVA, J.B. Implementação do conceito capacidade de diluição de efluentes no modelo de qualidade da água QUAL-UFMG: estudo de caso no Rio Taquarazinho (MS). **Engenharia de Saneamento Ambiental**, v. 18, n. 3, 275-288, 2013.

TOLEDO, L.M; SOUZA, E.R. **Transposição das águas do Rio São Francisco, situação de saúde e segurança pública: expedição científica da Fiocruz à área de abrangência das obras do empreendimento**. Rio de Janeiro: ENSP/ FIOCRUZ, 109 p ,2015.

TONON, K. **Modelagem da Qualidade da Água utilizando os Modelos Streeter-Phelps e QUAL-UFMG na Bacia do Rio Lambari**. 2014. 168 f. Universidade Federal de Alfenas. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental), Poços de Calda-MG 2014.

VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água dos rios**. Belo Horizonte: UFMG, 2014. 588p.

4. ARTIGO 1: Qualidade da água em trecho da região do Submédio São Francisco em função da sazonalidade e uso e ocupação do solo

Resumo: A manutenção da qualidade da água é uma crescente preocupação devido a intensificação da urbanização e o crescimento de áreas agrícolas em grande parte das bacias hidrográficas. Este trabalho propõe avaliar a qualidade da água do Rio São Francisco, em trecho da região do Submédio, verificando o impacto da urbanização e agricultura e da sazonalidade sobre este corpo hídrico, além do atendimento aos limites dos padrões preconizados pelo CONAMA 357/2005 para Classe 2. Foram coletadas amostras em dezesseis pontos durante o período seco e chuvoso, sendo analisados os nove parâmetros para a determinação do Índice de Qualidade da Água (IQA) e o Índice de estado trófico (IET). Primeiramente, foi calculada a estatística descritiva dos parâmetros. Em seguida, para a análise da qualidade da água em função do uso do solo e sazonalidade, foram aplicados os testes estatísticos não paramétricos de Friedman, seguido pelo teste de comparações múltiplas, ao nível de significância de 5%, devido o comportamento assimétrico dos dados. A análise da sazonalidade apontou diferenças significativas nas variáveis, turbidez, sólidos totais, fósforo total, CT/*E.coli*, nitrogênio total, temperatura e o IET da água. Em relação ao atendimento à legislação e ao enquadramento, identificou-se que PT, CT/*E.Coli* e DBO estiveram em dissonância com o que preconiza a resolução vigente. Por fim, foram detectadas diferenças significativas na qualidade da água analisada em função do uso e ocupação solo.

Palavra- chaves: Rio São Francisco; CONAMA 357/2005; IQA

Abstract: The maintenance of water quality is a growing concern due to intensified urbanisation and the growth of agricultural areas in much of the river basins. This work proposes to evaluate the water quality of the São Francisco River, in a stretch of the Submédio region, verifying the impact of urbanization and agriculture and seasonality on this water body, in addition to meeting the limits of the standards recommended by CONAMA 357/2005 for Class 2. Samples were collected at sixteen points during the dry and rainy period, and the nine parameters for determining the Water Quality Index (WQI) and Trophic State Index (TEI) were analyzed. First, the descriptive statistics of the parameters were calculated. Then, for the analysis of water quality according to land use and seasonality, the non-parametric statistical tests of Friedman were applied, followed by the multiple comparisons test, at a 5% significance level, due to the asymmetric behavior of the data. The analysis of seasonality showed significant differences in variables, turbidity, total solids, total phosphorus, CT/*E.coli*, total nitrogen, temperature and water TI. Regarding the compliance with the legislation and the framework, it was identified that PT, CT/*E.coli* and DBO were in dissonance with the current resolution. Finally, significant differences were detected in the quality of the water analyzed as a function of land use and occupation.

Keywords: São Francisco River; CONAMA 357/2005; WQI

4.1. INTRODUÇÃO

A qualidade da água de uma bacia hidrográfica está intimamente ligada as suas características físicas, químicas e biológicas, sendo estes, decorrentes das condições naturais do meio e do uso e ocupação do solo (ABREU e CUNHA,2015; VON SPERLING,2014).

Dentre os fatores que contribuem diretamente para a redução da qualidade da água dos corpos hídricos destaca-se a intensificação da urbanização e industrialização (Oliveira et al. 2019, Vialli et al. 2011), o lançamento de efluentes e do sistema adotado de uso e manejo do solo na agricultura (BRITTO,2015). As intervenções antrópicas no entorno da bacia realizada de forma desordenada, segundo Von Sperling (2014), contribuem para a introdução de compostos na água, que poderão alterar suas características físicas, químicas e biológicas. .

A poluição hídrica pode ocasionar problemas à saúde humana e a biota aquática (Ma et al., 2010), assim como a alteração do enquadramento do manancial à medida que esse apresente variáveis físico-químicas e biológicas com concentrações superiores ou inferiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, que estabelece, a classificação e o enquadramento dos corpos de água de acordo com seus usos (GUEDES et al., 2012; SOUZA, 2015).

Segundo Silva et. al. (2010), as principais ações que contribuem para a degradação da qualidade e quantidade hídrica na bacia hidrográfica do rio São Francisco são: o crescimento das áreas agrícolas e ocupações irregulares, o não cumprimento de leis ambientais e o descarte de esgoto doméstico.

A fruticultura irrigada do Vale do Submédio do São Francisco é um projeto de grande impacto no processo de modernização agrícola do Sertão nordestino. A atividade possibilitou ao longo dos últimos anos impactos na estrutura urbana e rural, dotando o território de capacidade produtiva, fato este que assegura ser esse um dos maiores espaços geográficos com potencial agroexportador do país (SEBRAE,2017).

Diante desse cenário, o monitoramento e a avaliação da qualidade das águas superficiais são de fundamental importância para a gestão sustentável dos recursos hídricos, pois permitem conhecer a atual situação dos corpos d'água e as principais alterações ocorridas, possibilitando identificar as tendências espaciais, e apoiar a elaboração de diagnósticos que podem subsidiar o enquadramento dos cursos de

água e formulação de políticas ambientais (ANA, 2019; STROBL; ROBILLARD, 2008; FINOTTI et al., 2009).

Para o Instituto Mineiro de Gestão de águas-IGAM (2010), as análises das tendências espaciais são úteis para a avaliação da qualidade da água, pois permite compreender a influência de fatores como o uso e a ocupação do solo e fontes de poluição na bacia exercem sobre o corpo hídrico, oportunizando a identificação dos trechos mais críticos.

Assim, este trabalho tem como objetivos: (i) caracterizar e comparar a qualidade da água no rio São Francisco na região do Submédio durante o período seco e chuvoso, (ii) avaliar o atendimento aos padrões estabelecidos pelo CONAMA 357/2005 e, (iii) avaliar e comparar o efeito do uso e ocupação do solo na qualidade da água do trecho em estudo.

4.2.METODOLOGIA

4.2.1.Caracterização da área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco está dividida em quatro regiões fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco. O Submédio São Francisco, região onde foi realizada a pesquisa, corresponde a 17% do território desta bacia apresentando aproximadamente 110.446 km² de área e 440 km de extensão. Abrange os estados da Bahia e Pernambuco, estendendo-se de Remanso-BA até a cidade de Paulo Afonso-BA (CBHSF, 2019), e inclui as sub-bacias dos rios Pontal, Garças, Brígida Pajeú, e Moxotó a margem esquerda e Salitre, Tourão e Vargem Grande a margem direita (MMA, 2019).

Segundo a classificação de Köppen a região do Submédio apresenta clima quente e semiárido, do tipo BSw_h, as precipitações pluviais são baixas e muito irregulares, variando entre 350 a 800 mm. A estação chuvosa estende-se de dezembro a abril e a seca de maio a novembro (INMET, 2010).

4.2.2. Monitoramento da qualidade da água

Com o intuito de caracterizar a qualidade da água em função do uso e ocupação do solo, os pontos para coleta de amostras foram selecionados contemplando áreas

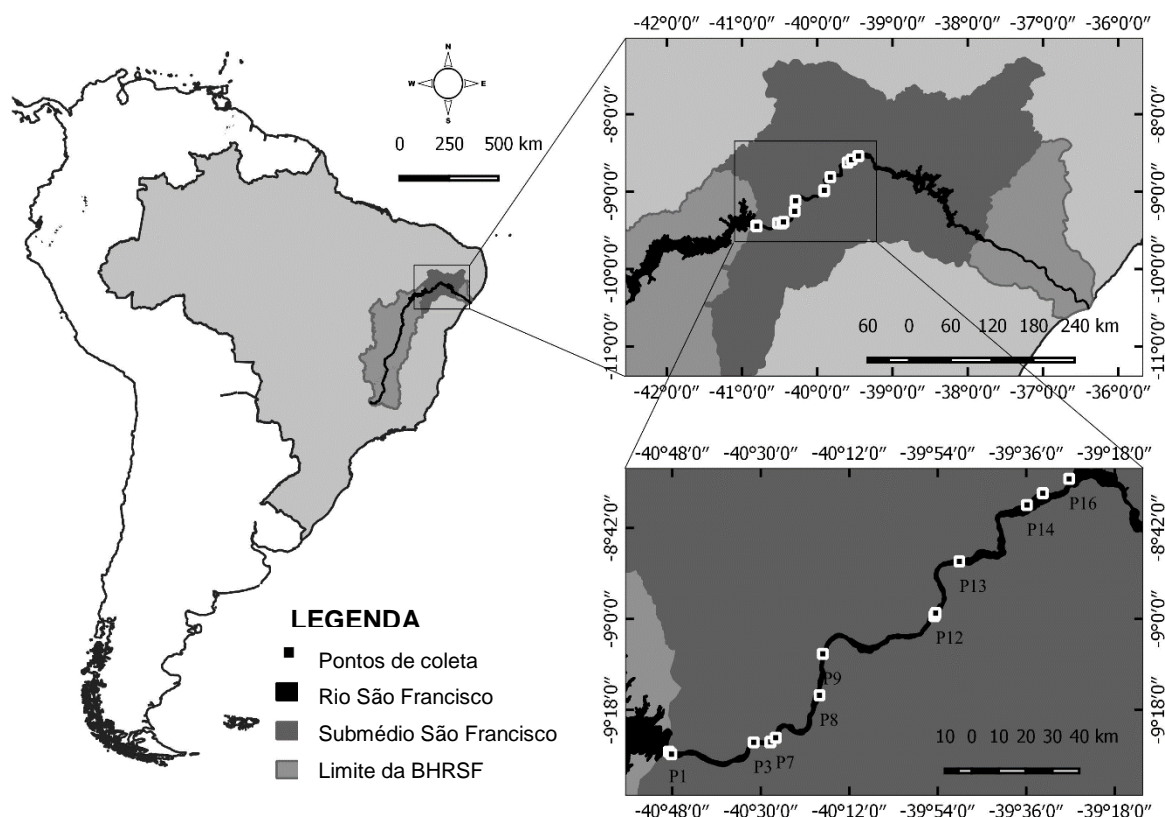
rurais (influência de perímetros irrigados), áreas com lançamentos de esgoto doméstico (ETE) e áreas urbanas. Na Tabela 1 e Figura 1, pode-se observar a distribuição e descrição dos pontos amostrados ao longo do trecho estudado.

Tabela 1: Descrição dos pontos de coleta de água monitorados no Rio São Francisco.

	Descrição	Latitude	Longitude	Área
P01	Sobradinho 1	-9.411992	-40.815887	urbana
P02	Sobradinho 2	-9.437424	-40.831392	urbana
P03	Confluência do Riacho Vitória com RSF	-9.405336	-40.524548	urbana
P04	Petrolina montante	-9.405439	-40.467843	lançamento
P05	Petrolina- Lançamento	-9.404969	-40.466994	lançamento
P06	Petrolina-Jusante	-9.405907	-40.468702	lançamento
P07	Confluência Riacho Tourão com RSF	-9.311878	-40.29043	rural
P08	Maniçoba	-9.251496	-40.300757	rural
P09	Bebedouro	-9.114845	-40.290384	rural
P10	Montante ETE-Curaçá	-8.986744	-39.908362	lançamento
P11	Lançamento ETE-Curaçá	-8.984605	-39.907437	lançamento
P12	Jusante ETE-Curaçá	-8.991901	344.817352	lançamento
P13	Santa Maria	-8.807355	-39.826225	urbano
P14	Orocó	-8.623004	-39.598358	urbano
P16	Confluência Riacho Brígida com o RSF	-8.561197	-39.563183	urbano
P17	Cabrobó-Eixo Norte	-8.546238	-39.456084	urbano

*RSF-Rio São Francisco

Figura 1: Distribuição dos pontos de coleta no trecho do Submédio São Francisco.



*BHRSF-Rio São Francisco

O monitoramento da qualidade da água deu-se em dezesseis pontos de amostragem (15 no Rio São Francisco e 1 no riacho Tourão), localizados entre a cidade de Sobradinho-BA e o Eixo norte da transposição do rio São Francisco situado na cidade de Cabrobó-PE, tendo este segmento 274 km extensão.

Devido a dificuldade de acesso para coletar a amostra no ponto de confluência do riacho Tourão com o Rio São Francisco foi aplicado a equação geral da zona de mistura para a determinação das concentrações dos parâmetros. Esta equação é uma média ponderada das concentrações e vazões dos meios que se misturam, ou seja, do rio e do efluente lançado ou do rio e do afluente.

$$C_o = \frac{Q_r \cdot C_r + Q_e \cdot C_e}{Q_r + Q_e}$$

Onde:

C_0 = concentração do constituinte na mistura (mg.L^{-1})

C_r = concentração do constituinte no rio (mg.L^{-1})

C_e = concentração do constituinte no efluente (mg.L^{-1})

Q_r = Vazão do rio (m^3/s);

Q_e = Vazão do efluente

Para a verificação da qualidade da água os atributos físicos, químicos e microbiológicos determinados foram: oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), coliformes termotolerantes/*E.coli* (CT), nitrogênio total (NT), fósforo total (PT), clorofila a (CL), sólidos totais (ST), cor, pH, turbidez (Tu) e temperatura (T).

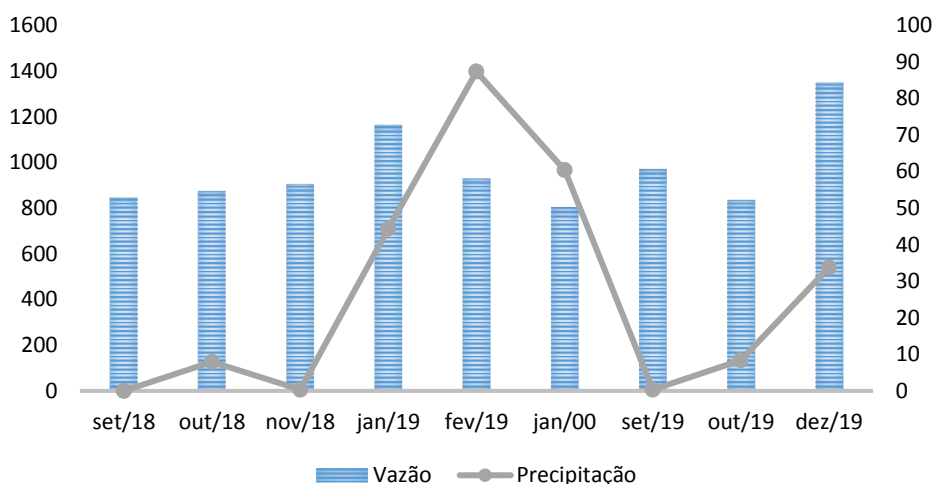
As análises do estudo foram realizadas no Laboratório de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Vale do São Francisco-Campus Juazeiro-BA, seguindo os métodos de coleta, conservação e analíticos do Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012). As amostras foram coletadas a 30 cm de profundidade da camada superficial.

Para verificar o efeito da sazonalidade na qualidade da água superficial foram realizadas duas campanhas sendo a primeira realizada entre os meses de setembro a novembro de 2018 (período seco) e janeiro a março de 2019 (período chuvoso) e a segunda campanha realizada entre setembro e outubro de 2019 (período seco) e dezembro de 2019 (período chuvoso), totalizando quatro coletas.

4.2.3. Dados Meteorológicos e Fluviométricos

O comportamento da precipitação e da vazão do rio na região do Submédio São Francisco durante os meses de estudo (setembro 2018 a dezembro de 2019) estão dispostas na Figura 2.

Os dados foram obtidos respectivamente no Laboratório de Meteorologia (Labmet) da UNIVASF para a estação meteorológica ($09^{\circ}26'56''\text{S};40^{\circ}31'27''\text{W}$) e na rede de postos da Agência Nacional de Águas (ANA), através da plataforma Hidroweb (estação 48020000), ambos situados na cidade de Juazeiro-BA.

Figura 2: Descrição dos valores de precipitação e vazão.

Fontes: Labmet (2019); Programa HidroWeb (ANA,2019).

4.2.4. Índice de Qualidade da Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET)

Para avaliar os indicadores físico-químicos e microbiológicos foi utilizado o Índice de Qualidade da Água (IQA), seguindo a metodologia adotada pela CETESB (2008), que se refere a uma adaptação do índice de qualidade de água da National Sanitation Foundation (NSF), e abrange os seguintes parâmetros: OD, DBO, CT, NT, PT, ST, pH, Tu e T.

A cada parâmetro é atribuído um peso, de acordo com sua importância relativa no cálculo do IQA conforme Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de Qualidade da Água do IQA e respectivo peso

Parâmetro	Peso
Oxigênio Dissolvido	0,17
Coliformes Termotolerantes	0,15
pH	0,12
DBO, Temperatura, Nitrogênio total, Fósforo total	0,10
Turbidez e Sólidos Total	0,08

Fonte: CETESB (2008).

O IQA foi determinado pelo produtório ponderado dos valores obtidos para os parâmetros mencionados (Equação 2):

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (2)$$

Onde:

n: número de parâmetros que entram no cálculo do IQA.

q_i : qualidade do i -ésimo parâmetro, um número entre 0 e 100, obtido da respectiva curva média de variação de qualidade, em função de sua concentração ou medida;

w_i : peso correspondente ao i -ésimo parâmetro, um número entre 0 e 1, atribuído em função da sua importância para a conformação global de qualidade

Visando garantir a confiabilidade dos resultados do IQA, as respectivas notas individuais q_i (q_1 a q_9) foram determinadas a partir da equação mais adequada dentro da faixa de valores para cada parâmetro, conforme descrito em Von Sperling (2014).

A classificação, segundo valores do IQA, foi feita de acordo com as faixas estabelecidas pela CETESB (2008), em valores que variam numa escala entre 0 e 100. Sendo considerado, ótima ($79 < IQA \leq 100$), boa ($51 < IQA \leq 79$), regular ($36 < IQA \leq 51$), ruim ($19 < IQA \leq 36$) e péssima ($IQA \leq 19$).

O Índice de Estado Trófico (IET) avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento de nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo de algas. O IET foi determinado com os resultados de clorofila a (CL) e fósforo total (PT), seguindo o método descrito por Lamparelli (2004) para ambientes lóticos, as equações estão descritas a seguir:

$$IET(CL) = 10 \cdot \left[6 - \left(\frac{-0.7 - 0.60 \ln(CL)}{\ln 2} \right) \right] - 20 \quad (3)$$

$$IET(PT) = 10 \cdot \left[6 - \left(\frac{0.42 - 0.36 \ln(PT)}{\ln 2} \right) \right] - 20 \quad (4)$$

$$IET = \frac{IET(PT) + IET(CL)}{2} \quad (5)$$

Onde:

IET (PT): índice de estado trófico determinado para o fósforo;

IET (CL): índice de estado trófico determinado para a clorofila;

PT: concentração de fósforo total medida à superfície da água, em $\mu\text{g L}^{-1}$;

CL: concentração de clorofila a medida à superfície da água, em $\mu\text{g L}^{-1}$.

A classificação do ambiente aquático quanto ao IET é dada em seis graus de trofia. Segundo a CETESB (2008) para rios tem-se: ultraoligotrófico ($\text{IET} \leq 47$), oligotrófico ($47 < \text{IET} \leq 52$), mesotrófico ($52 < \text{IET} \leq 59$), eutrófico ($59 < \text{IET} \leq 63$), supereutrófico ($63 < \text{IET} \leq 67$) e hipereutrófico ($\text{IET} > 67$).

4.2.5. Análise dos dados

A conformidade legal para os parâmetros avaliados foi verificada comparando os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para os corpos hídricos de Classe 2. Com isso, foi possível identificar dentro da área de estudo quais as principais variáveis que estão sofrendo alterações e as principais causas de degradação ambiental.

Os dados relativos as variáveis físico, químicas e microbiológicas foram submetidas a análise estatística descritiva. O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado para definir as análises estatísticas a serem realizadas. Como não foi verificada aderência à distribuição normal, utilizou-se testes não paramétricos para a análise estatística.

Para detectar diferenças significativas das variáveis em relação a área (rural, urbana e de lançamento), assim como para a análise da sazonalidade foi aplicado o teste não-paramétrico de Friedman, seguido do teste de comparação múltipla. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o software SPSS[®] versão 23. O nível de significância adotados nos testes foi de 5%.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1. Análise Descritiva Geral

Na Tabela 3 encontra-se a análise descritiva geral obtida durante o estudo das variáveis analisadas. O OD e a DBO constituem alguns dos principais parâmetros utilizados para avaliar possíveis impactos ambientais no meio aquático causado pela poluição orgânica. Conforme mostra a Tabela 3, a concentração do oxigênio dissolvido variou entre 6,95 a 9,20 mg.L⁻¹.

Tabela 3: Estatística descritiva geral das variáveis analisadas

	Mínimo	Máximo	Média	CV
Temperatura (°C)	23,00	28,00	26,10	0,04
OD (mgO₂.L⁻¹)	6,45	9,20	7,79	0,09
CT (NMP.100 mL⁻¹)	292,35	1600	292,35	1,78
pH	7,00	7,96	7,47	0,03
DBO (mgO₂.L⁻¹)	1,20	14,00	3,73	0,68
NT (mg.L⁻¹)	2,00	8,40	4,06	0,44
PT (mg.L⁻¹)	0,03	0,55	0,10	0,88
Turbidez (uT)	1,37	7,89	2,53	0,45
ST (mg.L⁻¹)	28,00	1140,67	227,49	1,18
Clorofila a (µg.L⁻¹)	ND	6,74	1,06	1,51
Cor (uC)	1,30	36,60	12,39	0,64
IQA	51,00	79,00	67,22	0,09
IET	30,53	61,88	53,68	0,11

ND- Não detectado pelo método analítico utilizado.

A DBO obteve uma concentração média de 3,73 mg.L⁻¹, e valores máximo e mínimo de, respectivamente 14 e 1,20 mg.L⁻¹. Segundo a CETESB (2008), águas com DBO inferior a 4 mg.L⁻¹ são classificadas como águas limpas, e águas com valores de DBO superiores 10 mg.L⁻¹ como poluídas. Foram detectados valores de DBO acima 10 mg.L⁻¹ nos pontos monitorados com lançamento de esgoto doméstico, corroborando com o citado pela ANA (2019), que os altos valores de DBO geralmente são provocadas pelo lançamento de carga orgânica de origem doméstica.

Foi detectada elevada quantidade de CT/*E.coli*, conforme pode ser observado na Tabela 3, visto que o valor máximo foi de 1600 NMP.100 mL⁻¹. Estudos realizados por Costa et al. (2017) e Oliveira et al. (2017) em corpos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco também mostraram altas concentrações de CT/*E.Coli*. Observa-se que o valor médio de coliformes termotolerantes na área em estudo foi

relativamente baixo ($292,35 \text{ NMP} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$), sendo os maiores valores encontrados nos pontos de lançamento, P11 (Curaçá) e P05 (Petrolina), com respectivamente 1600 e $900 \text{ NMP} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$.

Conforme demonstrado na Tabela 3, a concentração de fósforo variou entre 0,03 a $0,55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e para o nitrogênio os valores máximo e mínimo foi de 8,40 e $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. A clorofila teve com concentração máxima de $6,74 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ e média de $1,06 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

O pH apresentou um valor médio de 7,47 sendo seus valores máximo e mínimo de respectivamente 7,96 e 7,00. Valores semelhantes foram encontrados por Britto (2015) e Peres (2012) para o Rio São Francisco.

A temperatura é o parâmetro que faz a medição da intensidade de calor, refletindo o grau de aquecimento das águas e da radiação solar, e depende de fatores como clima, composição geológica, dentre outros (MATIC et al., 2013). O teor médio neste estudo para a temperatura foi de $26,10 \text{ }^\circ\text{C}$, alternando entre 23 a $28 \text{ }^\circ\text{C}$.

Analisando as variáveis físicas, para a turbidez verificou-se valor máximo e mínimo de 7,89 uT e 1,37 uT e média de 2,53 uT. Quanto às concentrações de sólidos totais, essas apresentaram uma marcante oscilação ao longo do período amostral, com valor mínimo de $28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e máximo de $1140,67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. A cor também apresentou grande variação, ficando entre 1,30 uC e 36,60 uC.

O índice de qualidade da água determinado apresentou valores que caracteriza a qualidade do corpo d'água estudado, como bom ($51 \leq \text{IQA} < 79$), como pode ser observado na Tabela 1. Para o índice de estado trófico os resultados variaram entre 30,53 a 61,88, ou seja, o trecho apresenta áreas ultraoligotrófico a eutrófico.

A partir dos dados coletados foram determinados o grau de dispersão das variáveis. Segundo França (2009), o grau de dispersão é considerado baixo para o coeficiente de variação ($\text{CV} < 0,50$), médio ($0,50 \leq \text{CV} < 1$), alto ($1 \leq \text{CV} < 1,20$) e elevado ($\text{CV} > 1,20$). Conforme mostra a Tabela 2, as variáveis temperatura, OD, pH, nitrogênio total, turbidez, IQA e IET apresentaram baixa variabilidade, fósforo, DBO e cor média variabilidade e ST, CT/*E.coli* e clorofila alta variabilidade.

O grau de dispersão encontrado neste estudo para o OD, pH, temperatura e CT/*E.coli*, corrobora com os valores encontrado por Britto (2015) avaliando a qualidade da água da região do Baixo São Francisco. Souza e Gastaldini (2014) também encontraram alta variabilidade para CT/*E.coli* em bacias hidrográficas do Rio Vacacaí-Mirim, segundo os autores a variação desse parâmetro pode ser explicado

pela variabilidade temporal das coletas e o ciclo de entrada de poluentes, principalmente efluente doméstico.

4.3.2. Efeito da Sazonalidade

Após a aplicação do teste não-paramétrico de Friedman ($p < 0,05$), foi possível identificar o comportamento das variáveis analisadas nas estações seca e chuvosa. Os resultados podem ser observados nos gráficos box-plot dispostos na Figura 3. Verifica-se que houve diferença significativa em função da sazonalidade para os parâmetros analisados, com exceção do OD, DBO, clorofila e o IQA.

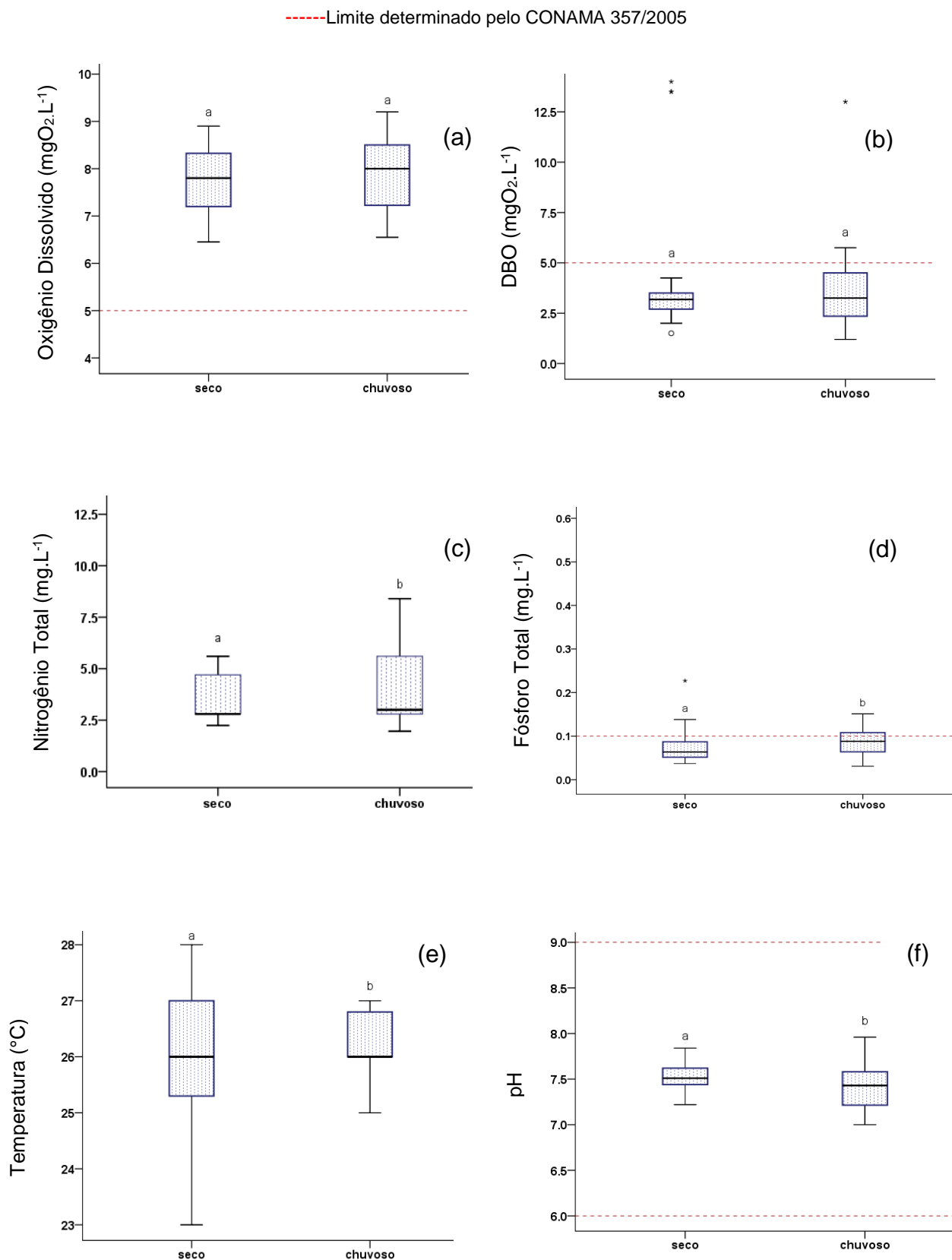
Esses resultados corroboram com os resultados encontrados por Oliveira et al (2019) que avaliando a qualidade das águas das sub-bacias da Bacia do Rio Pará, encontraram diferenças significativas para turbidez, ST e temperatura. Britto et al. (2018) também encontraram diferença significativa para o PT em afluentes na região do Baixo São Francisco e Andrietti et al. (2016) no rio Caiabi-MT para coliformes, turbidez, temperatura e sólidos totais.

Analisando a Figura 3, (c) nitrogênio total, (d) fósforo, (g) sólidos totais, (h) turbidez e (i) coliformes termotolerantes, observa-se que ocorreu um acréscimo nas concentrações desses parâmetros durante o período chuvoso. A variação média provocada pela sazonalidade para o NT foi de 3,5 a 4,66 mg.L⁻¹, para o PT foi de 0,087 a 0,12 mg.L⁻¹, para a turbidez foi de 2,34 a 2,71, para ST foi de 172,24 para 342,75 mg.L⁻¹, para CT/*E.coli*, foi de 147,82 a 436,88 e para cor foi de 11,64 a 13,13.

Maiores concentrações de poluentes devido à sazonalidade são descritas na literatura por Aguiar et al. (2015), Britto et al. (2018) e Oliveira et al. (2019). Segundo os autores este comportamento é reflexo, principalmente, da ação do escoamento superficial que se intensifica durante o período chuvoso aumentando a quantidade de partículas que chegam ao corpo receptor.

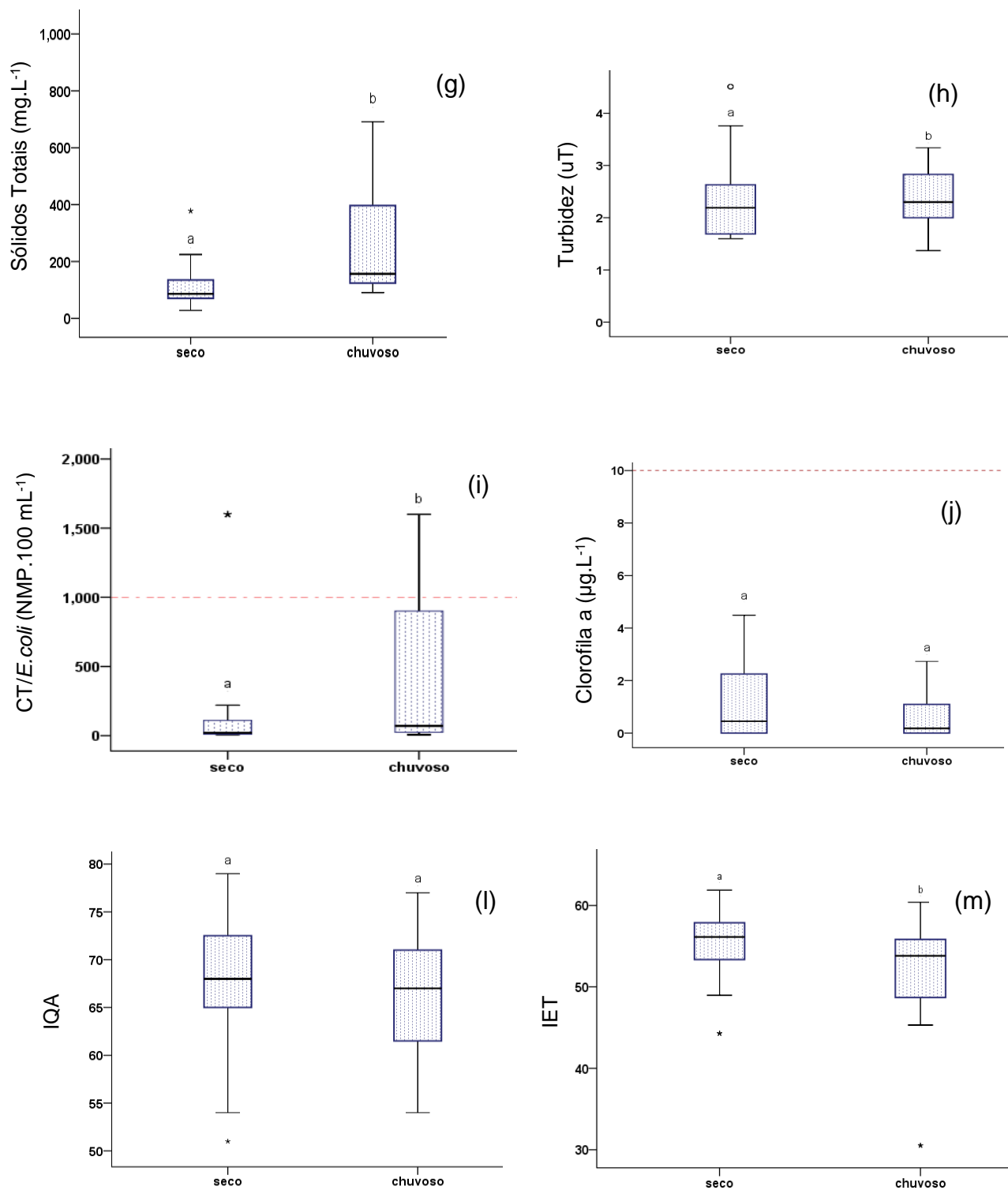
Na Figura 3(l) está exposto o resultado do IQA, observa-se que não houve diferença significativa em relação ao período seco e chuvoso, onde os valores médios foram respectivamente 67,55 e 66,88, faixa classificada como boa. Logo, o aumento das concentrações dos parâmetros supracitados não foi suficiente para provocar alterações no IQA. Esse resultado corrobora ao encontrado por Adrietti et al. (2016) para o rio Caibi-MT.

Figura 3: Distribuição sazonal dos parâmetros: (a) oxigênio dissolvido, (b) demanda bioquímica de oxigênio (c) nitrogênio total, (d) fósforo total, (e) temperatura, (f) pH. Diferentes letras minúsculas indicam diferença significativa entre os períodos seco e chuvoso pelo Teste de Friedman ($p < 0,05$).



Continuação Figura 3: Distribuição sazonal dos parâmetros: (g) sólidos totais, (h) turbidez, (i) CT/*E.coli*, (j) clorofila a. (l) índice de qualidade de água e (m) índice de estado trófico. Diferentes letras minúsculas indicam diferença significativa entre os períodos seco e chuvoso pelo Teste de Friedman ($p < 0,05$)

----- Limite determinado pelo CONAMA 357/2005



O comportamento do índice de estado trófico pode ser verificado na Figura 3(m). Os valores médios para o período seco e chuvoso foi de 51,88 (oligotrófico) e 55,47 (mesotrófico), como não foi detectada diferença significativa para a clorofila a, pode-se inferir que a mudança no IET foi ocasionada pelo aumento do fósforo.

Em relação a temperatura pode-se observar uma variação maior no período seco (23 a 28 °C) em relação ao chuvoso (25 a 27 °C). As variações de temperatura nos corpos d'água naturais podem ser sazonais e diurnas de acordo com estudos de Sá Filho (2010) e estão associadas com as estações do ano (BUCCI et al. 2015). Este fato vem de encontro, com os dados encontrados no trabalho, visto que estatisticamente foi verificado efeito significativo da sazonalidade sobre a temperatura.

4.3.3. Conformidade com a resolução CONAMA 357/2005

Avaliando a conformidade legal dos parâmetros, o CONAMA 357/2005 determina um valor mínimo de 5 mg O₂.L⁻¹ para OD, nota-se que os valores encontrados estão dentro do limite estabelecido pela lei como pode ser verificado na Figura 3 (a). Em relação a DBO tanto no período seco quanto no chuvoso houveram pontos que ultrapassaram o valor de DBO exigido pela norma (até 5 mg.L⁻¹).

Os valores encontrados nas análises de CT/*E.coli* (Figura 3 (i)) na estação seca e chuvosa estiveram acima do limite permitido pela Resolução CONAMA 357/2005 (até 1000 NMP.100 mL⁻¹).

O limite de turbidez e clorofila a estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para rios de Classe 2 é de respectivamente 100 NTU e 30 µg.L⁻¹. Pode-se observar na Figura 3 (h) e (j) que os valores estão de acordo com o que preconiza a resolução.

Os valores máximo e mínimo para o potencial hidrogênionico (pH) exposto na Figura 3 (f) se mantiveram entre os níveis de 6 a 9, recomendado pela resolução CONAMA 357/2005.

No monitoramento do fósforo total, foi possível verificar a ocorrência de amostras do período seco e chuvoso que ultrapassaram o limite de 0,1 mg.L⁻¹, valor este estipulado pela Resolução nº 357/2005 do CONAMA para corpos d'água Classe 2 (Figura 3(d)). Neste estudo fica evidente a influência da concentração de fosforo e CT /*E.coli* na deterioração da qualidade da água, visto que não obedeceram aos padrões determinados pela legislação supracitada.

Costa et al. (2017) em seu estudo também encontraram valores para o PT, CT/*E.coli* acima do estabelecido pela resolução supracitada no Rio São Francisco em seu alto curso, e, em seus afluentes Rio das Velhas e Paraopeba e Oliveira et al. (2017) na região do médio São Francisco. Oliveira et al. (2019) verificando o impacto das sub-bacias do Bacia do Rio Pará observaram que os parâmetros PT, CT/ *E.coli* era um dos responsáveis pela alteração da qualidade do mesmo, resultados que corroboram com o encontrado no presente estudo.

4.3.4. Influência do uso e ocupação do solo

Para a verificação das ações antrópicas sobre a qualidade da água na região do Submédio São Francisco aplicou-se o Teste de Friedman, seguido do teste de comparação múltipla. Na Tabela 4 encontram-se os valores médios das variáveis obtidas durante o estudo e o resultado do teste estatístico.

Pode-se verificar que não houve diferença significativa para o IET, IQA, nitrogênio total, clorofila a e pH em função das áreas monitoradas rural, urbana e lançamento de esgoto

Observa-se que o ambiente mais suscetível a alterações qualitativas são as áreas com lançamento de esgoto doméstico, visto que, os parâmetros de DBO, CT/*E.coli* e PT foram superiores as demais áreas, ocasionando um menor IQA. No entanto, vale ressaltar que nesses ambientes houve redução do IQA, mas não chegou a níveis críticos que pudessem oferecer riscos ao meio ambiente ou a sociedade.

Rodrigues et al. (2016) realizaram um estudo com o objetivo de diagnosticar as principais degradações ambientais sofridas pelo Rio Colônia no trecho urbano do município de Itororó, Bahia. Corroborando os resultados do presente estudo, os autores constataram que o maior agente impactante do Rio Colônia no trecho avaliado foram os esgotos domésticos.

Schneider et al. (2011) avaliando o efeito do uso e ocupação do solo de dois afluentes sobre a qualidade da água do Rio Pirapó, detectou que no afluente com lançamento de esgoto doméstico a degradação foi mais significativa do que no afluente com áreas agrícolas.

Conforme mostra a Tabela 4 as concentrações dos parâmetros de DBO, sólidos totais, Cor, CT/*E.coli* e fosforo total na área de lançamento de esgoto doméstico foram estaticamente iguais ao ambiente rural, diferenciando-se apenas da área urbana. No

entanto, mesmo sendo a área com lançamento de esgoto detectada com valores mais críticos o seu IQA ficou dentro da faixa classificada como boa ($51 < \text{IQA} \leq 79$), faixa também encontrada para a área rural e urbana.

Tabela 4: Comparação múltipla das variáveis analisadas em função da área.

	Área		
	Rural	Urbano	LED
OD (mgO₂.L⁻¹)	8,37 ^b	7,81 ^a	7,38 ^a
DBO (mgO₂.L⁻¹)	3,40 ^a	3,04 ^a	6,03 ^b
CT/E.coli (NMP.100 mL⁻¹)	282,50 ^{ab}	107,71 ^a	513,33 ^b
pH	7,40 ^a	7,52 ^a	7,45 ^a
Turbidez (uT)	2,48 ^{ab}	2,23 ^a	2,46 ^b
ST (mg.L⁻¹)	143,26 ^{ab}	220,81 ^a	291,44 ^b
Cor (uC)	15,95 ^b	7,51 ^a	15,70 ^b
Nitrogênio Total (mg.L⁻¹)	4,28 ^a	3,99 ^a	4,00 ^a
Fósforo Total (mg.L⁻¹)	0,09 ^b	0,06 ^a	0,14 ^b
Clorofila a (µ.L⁻¹)	0,81 ^a	0,98 ^a	1,57 ^a
IET	52,38 ^a	53,89 ^a	54,29 ^a
IQA	67,54 ^a	69,48 ^a	64,36 ^a

Diferentes letras minúsculas indicam diferença significativa entre as áreas estudadas de acordo com Teste de Friedman, seguido do teste de comparação múltipla ($p < 0,05$).

Em relação ao estado trófico independente da área o valor do IET ficou dentro da faixa considerado mesotrófico ($52 < \text{IET} \leq 59$). Segundo Mansor (2005), ambientes mesotróficos apresentam produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis na maioria dos casos.

Considerando os resultados reportados, observa-se que dentro da área estudada o impacto na qualidade da água foi superior em áreas com lançamento de esgoto doméstico. Sendo assim, espera-se que realização deste trabalho auxilie na compreensão das características do recurso hídrico estudado, gerando dados que possam ser uma ferramenta para facilitar os comitês de bacias, quanto à gestão deste recurso hídrico.

4.4. CONCLUSÃO

Foi identificado diferenças significativas em função da sazonalidade para as variáveis analisadas: CT/*E.coli*, nitrogênio, fósforo, sólidos totais, turbidez, pH temperatura e o IET. Verificou-se um aumento concentrações de coliformes, ST e PT durante o período chuvoso, no entanto, esses valores não interferiram no IQA. O acréscimo do fósforo no período chuvoso influenciou o IET, pois este, também aumentou.

Quanto ao cumprimento da legislação, constatou-se que os parâmetros DBO, fósforo total e CT/*E.coli* apresentaram pontos com águas em dissonância com o estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para Classe 2.

Analisando a interferência do uso e ocupação do solo sobre a qualidade da água, observou-se que as áreas com lançamento de esgoto doméstico são mais suscetíveis a degradação da qualidade da água, devido à contribuição de matéria orgânica, agentes patógenos e nutrientes.

4.5. REFERÊNCIAS

ABREU, C. H. M.; CUNHA, A. C. Qualidade da Água em Ecossistemas Aquáticos Tropicais Sob Impactos Ambientais no Baixo Rio Jari-AP: Revisão Descritiva. **Biota Amazônia**, v. 5, n. 2, p. 119–131, 2015.

AGUIAR, C; PELEJA, J.; SOUSA, K; GOCH, Y. GUIMARÃES, A. Nível de pesquisa em microbacias hidrográficas sob diferentes usos de solo, na região amazônica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 20, n. 4, p. 1093-1102, 2015.

ANA. Agência nacional de águas. 2019. **Avaliação de qualidade**. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/avaliacao.aspx> . Acesso em: 13 julho de 2019.

ANA. Agência Nacional das águas. **HIDROWEB- Séries Históricas de Estações**. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf .Acessado_em: 12 de julho de 2019.

ANDRIETTI, G.; FREIRE, R . AMARAL, AG; ALMEIDA, FT; BONGIOVANI, MC; SCHNEIDER, RM Índices de qualidade da água e do estado trófico do rio Caiabi, MT. **Revista Ambiente & Água** , v. 11, n. 1, p. 162-175, 2016.

APHA. American Public Health Association. **Standard methods for examination of water and wastewater**. 20. ed. Denver: APHA, 2012.

ANA Agência Nacional de Águas. **Panorama da qualidade das águas superficiais do Brasil**. Brasília-D, p. 264, 2012.

BRASIL.CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução 357, de 17 de março de 2005. Brasília, 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, págs. 58-63, seção 053, 18 de março de 2005.

BRITTO, F. B.; VASCO, A. N.; NETTO, A.; OLIVEIRA, A.; GARCIA, C. A. L. BORGES, M.; OLIVEIRA, G.S.; SILVA, M. G. Surface water quality assessment of the main tributaries in the lower São Francisco River, Sergipe. **Revista Brasileira de Recursos Hídrico**, v. 23, p. 1-11, 2018.

BRITTO, F.B. **Monitoramento e modelagem da qualidade da água e agrotóxicos em corpos hídricos no Baixo São Francisco Sergipano**. 2015.165 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e meio ambiente). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão-SE,2015.

BUCCI, M. H. S.; OLIVEIRA, L. F. C. Índices de qualidade da água e de estado trófico na represa Dr. João Penido (Juiz de Fora, MG). **Revista Ambiente & Água**, v. 9, n. 1, p. 130-148, 2014.

CBHSF. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Módulo 1 Resumo executivo. Proposta para apreciação do Plenário do CBHSF. Salvador, 28 de junho 2004.

CBSHF. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. 2019. **O submédio São Francisco**. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>. Acessado em 11 de julho de 2019.

CETESB. **Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2008. 537p.

CETESB_ Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2008) **Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB. Disponível em:

<<http://cetesb.sp.gov.br/aguasinteriores/wpcontent/uploads/sites/32/2013/11/variaveis.pdf>>. Acesso em: 04 de março 2019.

COSTA, E.P.; PINTO, C.C.; SOARES, A. L. C.; MELO, L. D V.; OLIVEIRA, S.C. Avaliação de violações nos padrões de qualidade da água na rede de monitoramento da bacia do rio São Francisco, a terceira maior do Brasil. **Monitoramento e avaliação ambiental**, v. 189, p. 1-16, 2017.

FINOTTI, A.R.; FINKLER, R.; SILVA, M.D.A; CEMIN, G. **Monitoramento de Recursos Hídricos em Áreas Urbanas**. Caxias do Sul: Ed. Educ. 2009. 272p.

FRANÇA, M. S.; **Análise Estatística Multivariada dos Dados de Monitoramento de Qualidade de Água da Bacia do Alto Iguaçu: Uma Ferramenta para a Gestão de Recursos Hídricos**. 2009. 121 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Ambiental) -Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR,2009.

GUEDES, H. A. S. et al. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água do Rio Pomba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 558-563, 2012.

IGAM. Instituto mineiro de gestão das águas. **Monitoramento da qualidade das águas superficiais da bacia do Rio São Francisco e seus afluentes em 2009**. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2010. 287p.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Balanço Hídrico Climatológico (2010)** . Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/html/agro.html>>. Acesso em 02 de julho 2020.

LABMET. Laboratório de Meteorologia. **Dados Climáticos Diários observados nas Estações Meteorológicas da UNIVASF de Petrolina e Juazeiro**. Disponível em em:< <http://labmet.univasf.edu.br/>>. Acessado em: 18 de agosto de 2019.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. São Paulo, SP, Universidade de São Paulo. Tese (Doutorado em Ciências). 2004. 207p.

MA, H.; TSAI, T. F.; LIU, C. C. Real-time monitoring of water quality using temporal trajectory of live fish. **Expert Systems whit Applications**, v. 37, n.7, p. 5158-5171, 2010.

MANSOR, M. T. C. **Potencial de poluição de águas superficiais por fontes não pontuais de fósforo na bacia hidrográfica do ribeirão do Pinhal, Limeira-SP.** Campinas, SP, Universidade Estadual de Campinas. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), 2005. 17 p.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. 2019. **Programa de revitalização da bacia hidrográfica do Rio São Francisco.** Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/PRSF/_arquivos/diag.pdf. Acessado em: 22 de agosto de 2019.

OLIVEIRA, J. C.; MAIA, K. P.; CASTRO, N. L. B; OLIVEIRA, S. M.A. Spatial-temporal analysis of the surface water quality of the Pará River Basin through statistical techniques. **Revista Ambiente. & Água**, v. 14, n. 1, e2322, 2019. .

OLIVEIRA, S. C.; AMARAL, R. C.; ALMEIDA, K. C. B.; PINTO, C. C. Qualidade das águas superficiais do Médio São Francisco após a implantação dos perímetros irrigados de Gorutuba/Lagoa Grande e Jaíba. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, p. 711-721, 2017.

RODRIGUES, I.S.; MACIEL, C.M.R.R.; MACIEL JÚNIOR, A.; DINIZ, A.A.; MACIEL, F.S.S. (2016) Degradações ambientais no Rio Colônia no trecho urbano do município de Itororó, Bahia. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, p. 1174-1188.

SÁ FILHO, J. A. R. de. **Avaliação qualitativa das águas no sistema da macrodrenagem da Bacia do Tabuleiro do Martins** – Maceió, AL, Universidade Federal de Alagoas. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento), 2010. 139p.

SCHNEIDER, R. M.; FREIRE, R.; COSSICH, E. S.; SOARES, P. F.; DE FREITAS, F. H.; TAVARES, C. R. G. Estudo da influência do uso e ocupação de solo na qualidade da água de dois córregos da Bacia hidrográfica do rio Pirapó. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 33, n. 3, p. 295-303, 2011.

SILVA, D.F.; GALVÍNCIO, J. D.; ALMEIDA, H.R.R.; Variabilidade da Qualidade de Água na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Qualit@s Revista Eletrônica**, 2010.

SOUZA, M. F. **Qualidade da água do canal São Gonçalo-RS/Brasil - uma avaliação hidroquímica considerando seus usos múltiplos.** Pelotas, RS, Universidade Federal de Pelotas. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). 2015. 105p.

SOUZA, M. M; GASTALDINI, M. C. C. Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. **Engenharia Sanitária e Ambiental** , v. 19, n. 3, p. 263-274, 2014.

STROBL, R.O.; ROBILLARD, P.D. Network design for water quality monitoring of surface freshwaters: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 87, n. 4, p. 639-648, 2008.

VIALLE, C. *et al.* Monitoring of water quality from roof runoff: Interpretation using multivariate analysis. **Water Research**, v. 45, n. 12, p. 3765-3775, 2011.

VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água dos rios**. Belo Horizonte: UFMG ,588 p, 2014.

5. ARTIGO 2: Modelagem sazonal da qualidade da água no Submédio São Francisco utilizando o programa QUAL-UFMG

Resumo: O crescimento na região do Submédio São Francisco, é marcado, sobretudo pelo aumento de perímetros irrigados e pela falta de tratamento de esgoto doméstico, fatores estes que podem contribuir para a degradação da qualidade desse recurso hídrico. A presente pesquisa tem como objetivo realizar a modelagem matemática da qualidade da água do Rio São Francisco, na região do Submédio, durante os períodos seco e chuvoso, no trecho compreendido entre as cidades de Sobradinho-BA e Cabrobó-PE, utilizando o programa QUAL-UFMG. Os componentes modelados foram: oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), coliformes termotolerantes (CT) e fósforo total (PT). Inicialmente, foi realizado a calibração dos parâmetros cinéticos do modelo K_1 , K_2 , K_d , K_b , K_{spo} , K_{oi} , onde os valores obtidos foram de respectivamente, $0,08 \text{ d}^{-1}$; $6,0 \text{ d}^{-1}$; $0,44 \text{ d}^{-1}$; $0,8 \text{ d}^{-1}$; $0,52 \text{ d}^{-1}$ e $0,01 \text{ d}^{-1}$. Com os coeficientes calibrados foi realizado a validação do modelo em função da sazonalidade. Foi aplicado o coeficiente Nash-Sutcliffe (CNS) para observar a eficiência do programa. Para as variáveis PT, CT e DBO, o modelo apresentou uma eficiência boa ($\text{CNS} > 0,75$) e para o OD o modelo foi considerado aceitável ($0,36 < \text{CNS} < 0,75$), tanto para o período seco quanto chuvoso. Dessa forma, a utilização do programa QUAL-UFMG para a avaliação da qualidade da água do rio São Francisco para a região de estudo é viável, visto que, ocorreu uma similaridade entre os dados observados em campo e a curva simulada pelo programa.

Palavras-chave: Perímetros irrigados; Rio São Francisco; Esgoto doméstico.

Abstract: The growth in the Submedium São Francisco region is marked, above all the increase in irrigated perimeters and the lack of domestic sewage treatment, factors that can contribute to the degradation of this water resource. The present research aims to perform the mathematical modeling of the water quality of the São Francisco River, in the Submediate region, during the dry and rainy periods, in the stretch between the cities of Sobradinho-BA and Cabrobó-PE using the QUAL- UFMG. The modeled components were: dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD), thermotolerant coliforms (CT) and total phosphorus (PT). Initially, the calibration of the kinetic parameters of the model K_1 , K_2 , K_d , K_b , K_{spo} , K_{oi} was carried out, where the values obtained were, respectively, $0,08 \text{ d}^{-1}$; $6,0 \text{ d}^{-1}$; $0,44 \text{ d}^{-1}$; $0,8 \text{ d}^{-1}$; $0,52 \text{ d}^{-1}$ and $0,01 \text{ d}^{-1}$. With the calibrated coefficients, the model was validated according to seasonality. The Nash-Sutcliffe coefficient (CNS) was applied to observe the efficiency of the program. For the variables PT, CT and BOD the model showed good efficiency ($\text{CNS} > 0,75$) and for the DO the model was considered acceptable ($0,36 < \text{CNS} < 0,75$), both for the dry and rainy periods. Thus, the use of the QUAL-UFMG program to assess the water quality of the São Francisco River for the study region is feasible, since there was a similarity between the data observed in the field and the curve simulated by the program.

Keywords: Irrigated perimeters; São Francisco River; Domestic sewage.

5.1. INTRODUÇÃO

A disposição de efluentes de forma inadequada e sem tratamento tem provocado a deterioração dos corpos hídricos (Salla et al., 2013), tornando a poluição aquática um problema mundial com importantes consequências socioeconômicas (PUJOL-VILA et al. 2015).

Dessa forma, conhecer as atividades que impactam a qualidade de água de uma bacia hidrográfica, e mais especificamente na região semiárida que apresenta variações na vazão, é um mecanismo imprescindível para os gestores e tomadores de decisão em recursos hídricos (LIMA, MAMADE e LIMA NETO, 2018).

A região do Submédio São Francisco ocupa 17% da área da Bacia do Rio São Francisco (CBHSF, 2019), e está localizada no semiárido brasileiro (Lima et al., 2009). Nos últimos anos, esta região vivenciou uma significativa transformação no seu espaço agrário após receber investimentos públicos para o aprimoramento da sua atividade agrícola, tornando-se um centro de atração populacional consolidado (Araújo e Silva, 2013), o que provocou diversas transformações no meio urbano e rural (ARAÚJO, 2011).

Entre os principais problemas ambientais que impactam o Submédio destaca-se, o lançamento de efluentes urbanos e industrial e a poluição difusa (TALLMAN e BENECTIDO, 2018; MELGAÇO, 2010).

Dentro desse contexto, faz-se necessário realizar estudos voltados para a avaliação da qualidade da água deste corpo hídrico que é de extrema importância tanto para o abastecimento público quanto para a economia da região.

Para auxiliar na gestão, controle e proteção dos recursos hídricos é importante a utilização de ferramentas que possibilitem a análise e o prognóstico da qualidade da água. Os modelos matemáticos de qualidade da água são utilizados para esses fins, possibilitando a simulação do processo de autodepuração, e por consequência, auxiliando na tomada de decisões referente ao gerenciamento dos recursos hídricos (OPPA, 2007).

O modelo QUAL-UFMG desenvolvido por Von Sperling (2014), vem sendo utilizado em diversos estudos para análise da qualidade de água em corpos hídricos. Sendo originado através do modelo QUAL2E, o modelo possui equações implementadas no software Microsoft Excel, e considera a modelagem unidimensional do corpo hídrico (TEODORO et al., 2013).

Dentre os estudos existentes na literatura utilizando o modelo matemático QUAL-UFMG, encontra-se o trabalho de Costa e Teixeira (2010) que utilizaram esse modelo para avaliar o Ribeirão do Ouro, em Araraquara, no estado de São Paulo. Como resultado, foi obtido um bom ajuste entre o modelo e os dados experimentais, devido aos parâmetros de calibração.

Gomes et al. (2016), utilizando este programa para modelar sazonalmente a qualidade da água do Rio dos Sinos, no estado do Rio Grande do Sul, encontrou similaridade entre os dados observados e a curva simulada pelo modelo. Logo, o modelo QUAL-UFMG vem se mostrando uma ferramenta precisa e viável para a composição de qualquer sistema de monitoramento da qualidade de água.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi modelar sazonalmente a qualidade da água do Submédio São Francisco, utilizando como suporte o modelo matemático QUAL-UFMG.

5.2. METODOLOGIA

5.2.1. Caracterização da área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco está dividida em quatro regiões fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco, com uma área de aproximadamente 155.637 Km². O Submédio São Francisco, percorre os estados da Bahia e Pernambuco, estendendo-se de Remanso-BA até a cidade de Paulo Afonso-BA (CBHSF, 2019), e inclui as sub-bacias dos rios Pontal, Garças, Brígida Pajeú, e Moxotó a margem esquerda e Salitre, Tourão e Vargem Grande a margem direita (MMA, 2019).

Segundo a classificação de Köppen, a região do Submédio apresenta clima quente e semiárido, do tipo BSw_h, as precipitações pluviais são baixas e muito irregulares, variando entre 350 a 800 mm. A estação chuvosa estende-se de dezembro a abril e a seca de maio a novembro (INMET, 2010).

O presente estudo foi realizado na região fisiográfica do Submédio São Francisco. Os pontos de amostragem foram distribuídos entre o eixo norte da transposição do Rio São Francisco situado na cidade de Cabrobó-PE e a cidade de Sobradinho-BA, sendo estes, dispostos em ambientes rurais e urbanos ao longo do

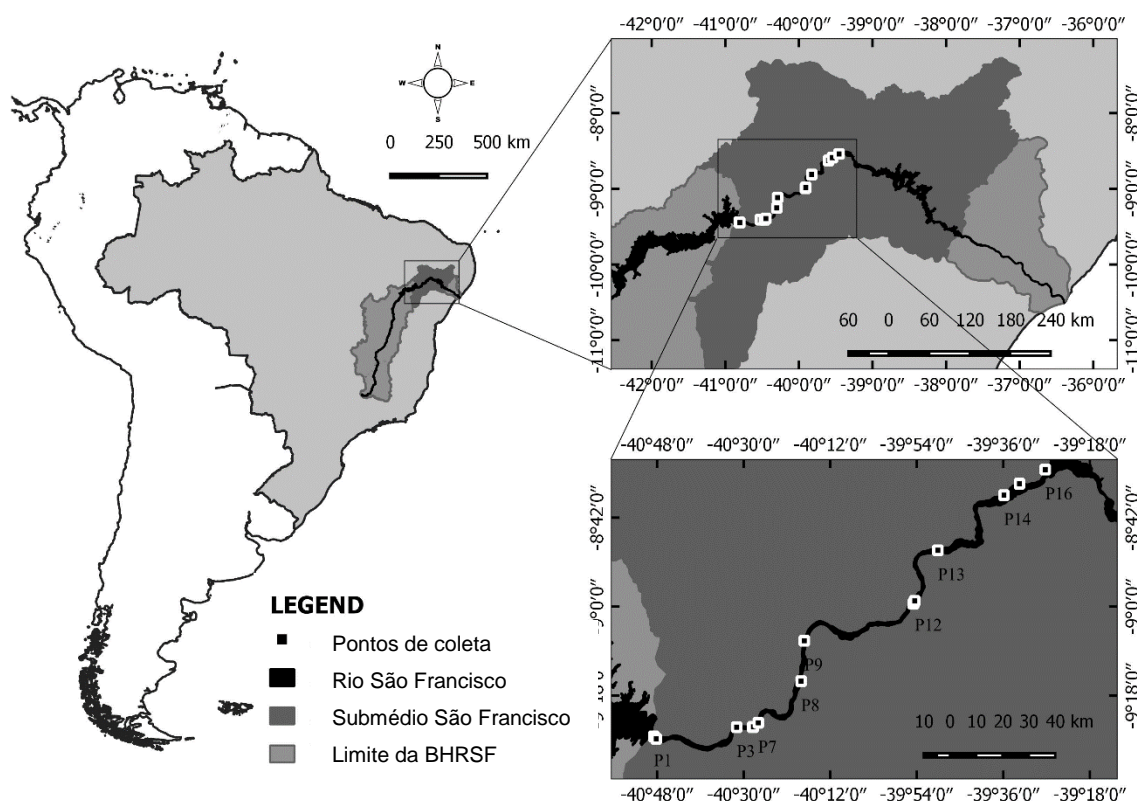
trecho estudado, que totalizou aproximadamente 274 km de extensão. A descrição dos pontos e a sua disposição na região estudada podem ser observados respectivamente na Tabela 1 e Figura 1.

Tabela 1: Descrição dos pontos de coleta de água monitorados no Rio São Francisco.

	Descrição	Latitude	Longitude	Área
P01	Sobradinho 1	-9.411992	-40.815887	urbana
P02	Sobradinho 2	-9.437424	-40.831392	urbana
P03	Confluência do Riacho Vitória com RSF	-9.405336	-40.524548	urbana
P04	Petrolina montante	-9.405439	-40.467843	lançamento
P05	Petrolina- Lançamento	-9.404969	-40.466994	lançamento
P06	Petrolina-Jusante	-9.405907	-40.468702	lançamento
P07	Confluência Riacho Tourão com RSF	-9.311878	-40.29043	rural
P08	Maniçoba	-9.251496	-40.300757	rural
P09	Bebedouro	-9.114845	-40.290384	rural
P10	Montante ETE-Curaçá	-8.986744	-39.908362	lançamento
P11	Lançamento ETE-Curaçá	-8.984605	-39.907437	lançamento
P12	Jusante ETE-Curaçá	-8.991901	344.817352	lançamento
P13	Santa Maria	-8.807355	-39.826225	urbano
P14	Orocó	-8.623004	-39.598358	urbano
P16	Confluência Riacho Brígida com o RSF	-8.561197	-39.563183	urbano
P17	Cabrobó-Eixo Norte	-8.546238	-39.456084	urbano

RSF-Rio São Francisco

Figura 1: Disposição dos pontos coletados no trecho do Submédio São Francisco



5.2.2. Variáveis de qualidade da água

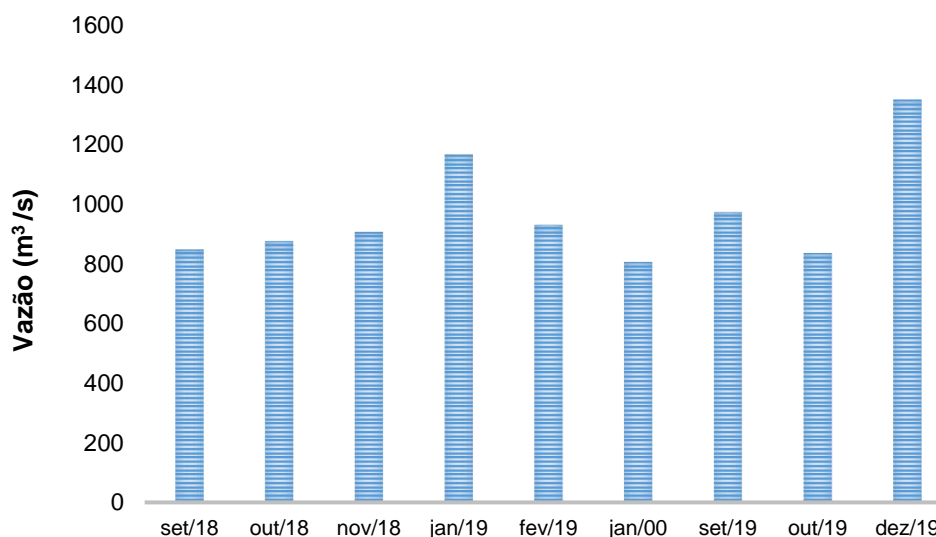
Para a verificação da qualidade da água foram analisadas as seguintes variáveis: oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), coliformes termotolerantes/*E.coli* (CT) e fósforo total (PT). As análises foram realizadas no Laboratório de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Vale do São Francisco-Campus Juazeiro-BA, seguindo os métodos de coleta, conservação e analíticos do Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012). As amostras foram coletadas a 30 cm de profundidade da camada superficial.

Foram realizadas duas campanhas sendo a primeira entre os meses de setembro a novembro de 2018 (período seco) e janeiro a março de 2019 (período chuvoso), e a segunda campanha realizado entre setembro a outubro de 2019 (período seco) e dezembro de 2019 (período chuvoso), totalizando quatro coletas.

Os dados de vazão foram obtidos através do portal HidroWeb, da Agência Nacional de Águas (ANA), sendo utilizados dados da estação fluviométrica situado em

Juazeiro-BA (Código 48020000). Para a calibração e validação do modelo foram utilizadas informações de vazão do período de monitoramento dispostos na Figura 2

Figura 2: Descrição dos valores vazão do período de monitoramento.



Fonte: Programa HidroWeb (ANA,2019)

5.2.3. Calibração/ Validação do Modelo

Para calibração do modelo QUAL-UFMG, foi utilizado a ferramenta SOLVER do Excel, para os respectivos coeficientes de cinética do oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo total (PT) e coliformes termotolerantes (*CT/E.coli*). Após a calibração do modelo, foi realizado a validação dos resultados obtidos em campo em função da variação da vazão (período seco e chuvoso). A seguir está descrito as equações inerentes ao modelo QUAL-UFMG.

Como o modelo QUAL-UFMG é oriundo do QUAL2E, ele utiliza equações matemáticas para qualidade de água de rios, conforme a equação unidimensional de transporte de massa, que é dada pela Equação 1.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - KC$$

(1)

Em que:

C = concentração do constituinte (mg.L^{-1});

U = velocidade média da água (m.s^{-1});

ε = difusividade do constituinte na água ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$);

X = coordenada longitudinal (m);

k = coeficiente de reação de primeira ordem (d^{-1})

No entanto, o QUAL-UFMG considera a aproximação de fluxo em pistão, na qual são desprezados os termos transiente e de difusão na Equação 1, sendo $t = X/U$ definido como o tempo de translado. Logo, para o parâmetro DBO, pode-se descrever o processo de decomposição da matéria orgânica no rio por meio de uma reação de primeira ordem (Equação 2):

$$\frac{dL}{dt} = -k_d \cdot L \quad (2)$$

Em que:

L = concentração da DBO (mg.L^{-1});

K_d = coeficiente de decomposição da matéria orgânica no rio (d^{-1});

t = tempo (dias).

A cinética do OD, denominada de cinética da reaeração, pode ser descrita pela Equação 3:

$$\frac{dD}{dt} = -K_d \cdot L - k_2 \cdot (C_s - C) \quad (3)$$

$$C_t = C_s - \left\{ \frac{K_1 \cdot L_0}{(K_2 - K_1)} \cdot (e^{k_1 \cdot t} - e^{-k_2 \cdot t}) + (C_s - C_o) \cdot e^{-k_2 \cdot t} \right\}$$

Em que:

D = déficit de oxigênio dissolvido (mg.L^{-1});

T = tempo (dia);

K_d = coeficiente de decomposição da matéria orgânica (dia^{-1});

K_2 = coeficiente de reaeração (dia^{-1});
 K_1 = coeficiente de desoxigenação (dia^{-1});
 L = concentração de DBO remanescente (mg.L^{-1});
 L_0 = demanda última de oxigênio (mg.L^{-1});
 C_t = concentração ao longo do percurso (mg.L^{-1});
 C_s = concentração de saturação de OD (mg.L^{-1});
 C_0 = concentração de OD na mistura (mg.L^{-1});
 C = concentração de OD em um tempo t (mg.L^{-1}).

As cinéticas de fósforo orgânico e inorgânico representam o modelo do fósforo, conforme descrito pelas Equações 4 e 5. A Equação 6 foi utilizada para simular as concentrações de P_{total} .

- Fósforo orgânico

$$\frac{dP_{org}}{dt} = -k_{oi} \cdot P_{org} - k_{spo} \cdot P_{org} \quad (4)$$

- Fósforo inorgânico

$$\frac{dP_{inor}}{dt} = -k_{oi} \cdot P_{org} - \frac{S_{inor}}{H} \quad (5)$$

$$P_t = P_{org} + P_{inor} \quad (6)$$

Em que:

P_{org} = concentração de fósforo orgânico (mg.L^{-1});
 P_{inor} = concentração de fósforo inorgânico (mg.L^{-1});
 K_{spo} = coeficiente de remoção de fósforo orgânico por sedimentação (d^{-1});
 K_{oi} = coeficiente de conversão do fósforo orgânico a fósforo inorgânico (d^{-1});
 $S_{P_{inor}}$ = coeficiente de liberação do fósforo pelo sedimento de fundo ($\text{gO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$);
 H = profundidade do rio (m).

A cinética do decaimento bacteriano retrata a taxa de mortalidade bacteriana e é avaliada por meio da Equação 7:

$$\frac{dN}{dt} = -k_b \cdot N \quad (7)$$

Em que:

N = número de coliformes (NMP.100mL⁻¹);

K_b = coeficiente de decaimento bacteriano (d⁻¹);

t = tempo (dias).

Os coeficientes hidráulicos solicitados pelo programa QUAL-UFMG (Figura 3) foram obtidos a partir de um valor médio, pela correlação da vazão com a velocidade do escoamento e da vazão com a profundidade do escoamento na seção (Equações 7 e 8).

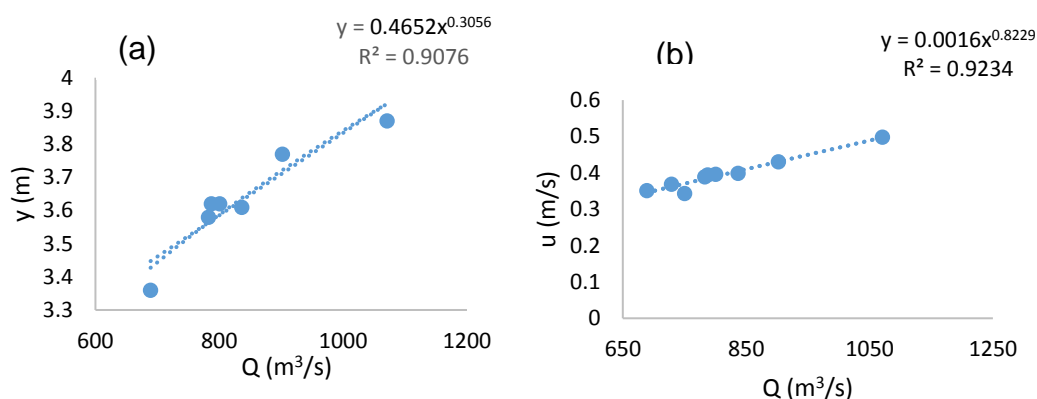
$$u = a \cdot Q_b \quad (7) \quad y = c \cdot Q_d \quad (8)$$

Em que:

y = profundidade da água (m);

“a”, “b”, “c”, “d”, constantes empíricas a serem ajustadas.

Figura 3 – Ajuste de relações empíricas do modelo: (a) altura x vazão, (b) velocidade x vazão



Com isso, pode-se dizer que a equação da velocidade é $u = 0.0016Q^{0,823}$, e para a profundidade $y = 0,4652Q^{0,3056}$.

5.2.4. Índices estatísticos

Para a verificação do desempenho do modelo foi determinado o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (CNS), medida de ajustamento do modelo de forma a indicar quanto esse modelo explica os valores observados (Equação 9).

$$CNS = 1 - \frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum(Y_{obs} - Y_{obsmed})^2} \quad (9)$$

Em que:

Y_{obs} = parâmetro de qualidade da água observado em campo;

Y_{est} = dado estimado pelo modelo; e

Y_{obsmed} = média dos valores observados.

De acordo com Silva et al. (2008) quando o valor do CNS for maior que 0,75, o desempenho do modelo é considerado bom. Para valores de CNS entre 0,36 e 0,75, o desempenho é considerado aceitável. Valores de CNS inferiores a 0,36 fazem com que o modelo seja julgado como inaceitável.

5.3. RESULTADO E DISCUSSÃO

Com a calibração do modelo, foi possível alcançar os devidos ajustes dos coeficientes para OD, DBO, fósforo e coliformes termotolerantes (Tabela 2). Para o coeficiente de desoxigenação (K_1), o valor foi 0,08 d^{-1} , valor próximo ao encontrado por Salla et al. (2013) onde K_1 de 0,03 d^{-1} .

Segundo Von Sperling (2014) valores de K_1 dentro da faixa de 0,08 e 0,20 d^{-1} , são características de cursos d'água com águas limpas. No caso do coeficiente K_2 , esta pesquisa calculou um valor 6,00 d^{-1} , valor semelhante ao determinado por Lima, Mamede e Neto (2018) em uma bacia hidrográfica semiárida.

Quanto ao valor K_d , esta pesquisa encontrou 0,44 d^{-1} , resultado semelhante obtido por Gomes et al. (2018) 0,45 d^{-1} , para o Rio dos Sinos situado no Rio Grande do Sul. Segundo, Von Sperling (2014) K_d dentro da faixa de 0,35 a 0,50 d^{-1} são valores típicos encontrados em cursos d'água profundos que recebem esgoto bruto concentrado. Para o coeficiente bacteriano (K_b) encontrou-se um valor ajustado de 0,8

d^{-1} , resultado considerado satisfatório, visto que, está dentro da faixa (0,5 a 1,5 d^{-1}) considera como típicas para água doce por Von Sperling (2014).

Para o coeficiente de remoção do fósforo orgânico (K_{spo}) e conversão de orgânico a inorgânico (K_{oi}), os valores encontrados foram de respectivamente 0,52 e 0,01 d^{-1} . Esses valores foram próximos ao encontrado por Tonon (2014) para o rio Lambari localizado em Minas Gerais, sendo os valores de K_{spo} de 0,70 d^{-1} e K_{oi} de 0,02 d^{-1} .

Tabela 2: Parâmetros cinéticos calibrados no estudo.

Descrição	Parâmetros cinéticos (dia⁻¹)
Coef. de desoxigenação (K_1)	0,08
Coef. de reaeração (K_2)	6,00
Coef. de decomposição (K_d)	0,44
Coef. de decaimento bacteriano (K_b)	0,8
Coef. de remoção de fósforo orgânico (K_{spo})	0,52
Coef. de conversão orgânico a inorgânico (K_{oi})	0,01

De forma geral, a calibração do modelo foi satisfatória, visto que, os coeficientes se mantiveram dentro da faixa encontrada na literatura. Após, a calibração dos parâmetros cinéticos (K_1 , K_2 , K_d , K_b , K_{spo} , K_{oi}), foi realizado a validação do modelo, para verificar se o programa QUAL-UFMG consegue realizar a modelagem da qualidade da água do Rio São Francisco, na região do Submédio em função da sazonalidade.

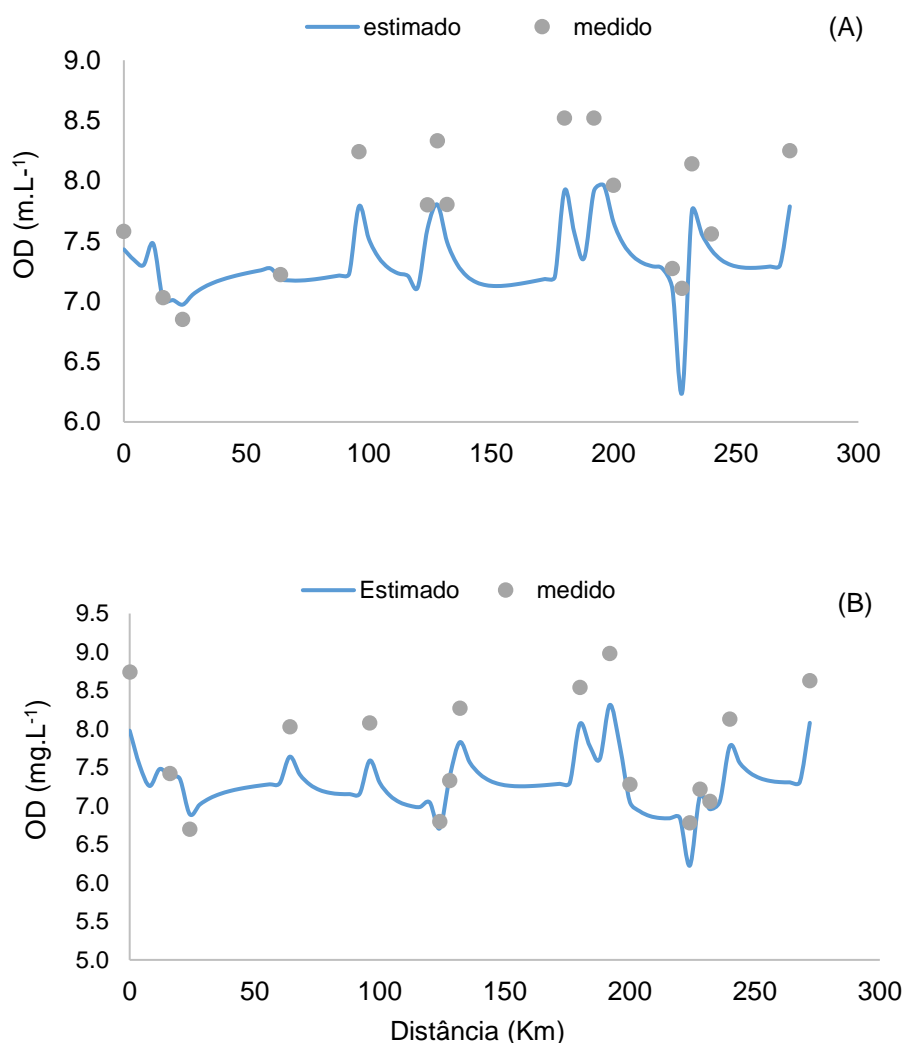
Este processo foi realizado com os dados médios de OD, DBO, PT e CT/*E.coli* do período seco e chuvoso. As Figuras 3, 4, 5 e 6 mostram as simulações do modelo validado em comparação com dados obtidos em campo.

Foi empregado o índice estatístico Nash-Sutcliffe (CNS) para avaliar a eficiência do modelo QUAL-UFMG. Na Tabela 3 pode ser observado os resultados obtidos para as variáveis consideradas neste estudo, e de acordo, com o CNS obtido para o OD (0,56 e 0,63) o modelo foi considerado aceitável para simular esta variável para ambos os períodos sazonais.

Tabela 3 - Índices estatísticos de eficiência do modelo QUAL-UFMG.

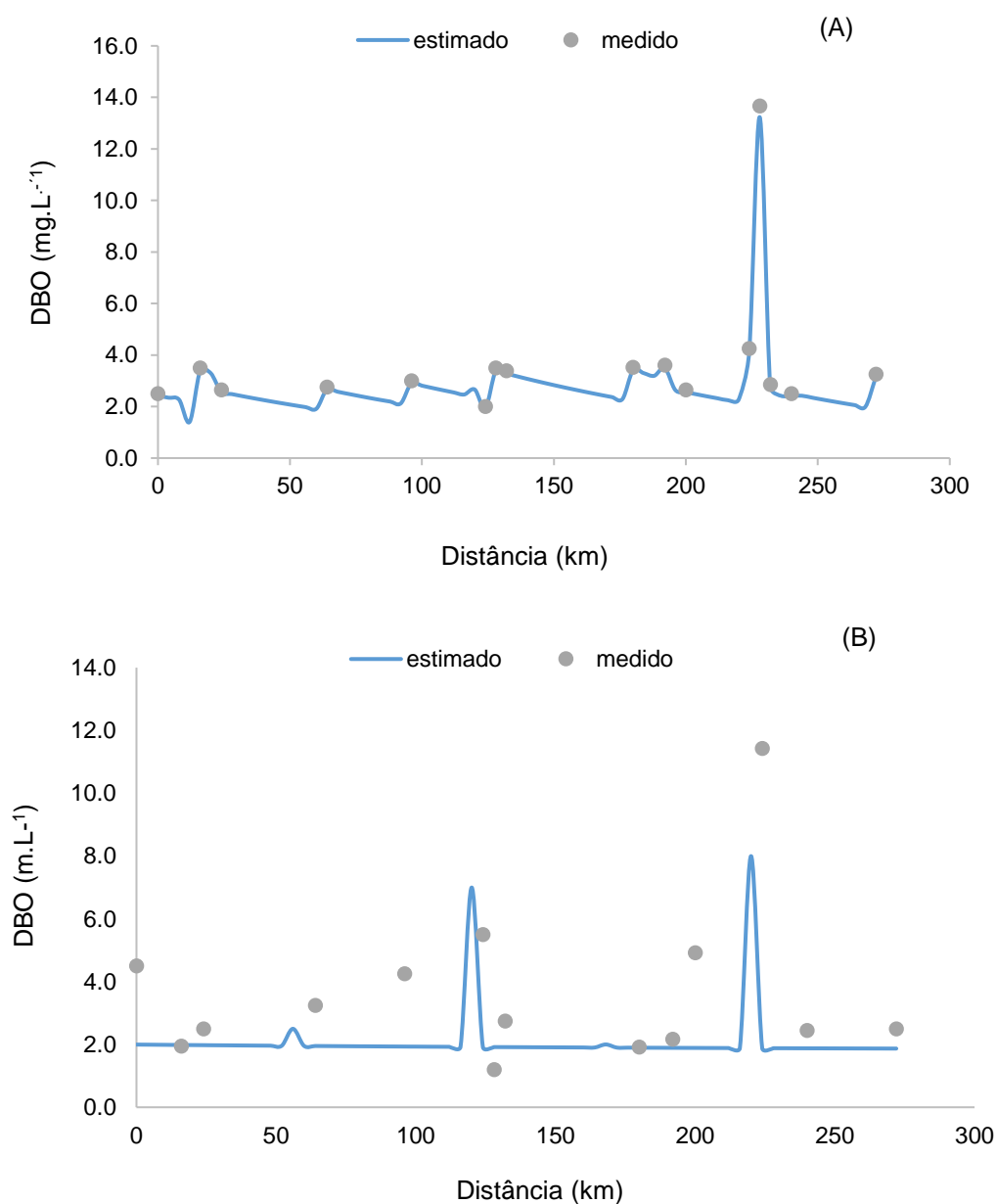
	Coeficiente Nash-Sutcliffe (CNS)	
	Seco	Chuvoso
DBO	0,90	0,77
Oxigênio Dissolvido	0,56	0,63
Fósforo Total	0,67	0,90
CT/E.coli	0,78	0,85

Na Figura 4 (A) e (B) estão apresentados os resultados da validação da variável OD para os períodos seco e chuvoso. Observando a curva gerada pelo modelo, percebe-se que houve alguns pontos discrepantes na qual o modelo não conseguiu acompanhar, o que acabou resultando no coeficiente de nash-sutcliffe em valores aceitáveis.

Figura 4- Validação do oxigênio dissolvido (OD), durante (A) seco e (B) chuvoso.

A Figura 5 (A) e (B) mostra a validação da demanda bioquímica de oxigênio. Os resultados foram considerados satisfatórios, uma vez que, o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe foi de 0,90 para o período seco e 0,77 para o chuvoso. Esse resultado era esperado, pois, como pode ser observado ocorreu discrepâncias entre as concentrações medida em campo e as estimadas pelo modelo durante o período chuvoso.

Figura 5- Validação da DBO, durante (A) seco e (B) chuvoso.

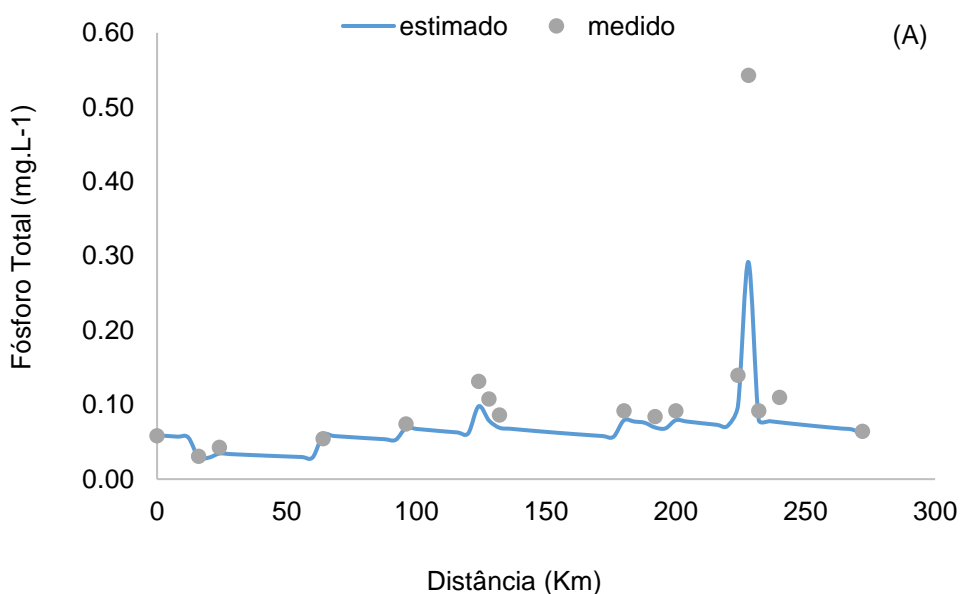


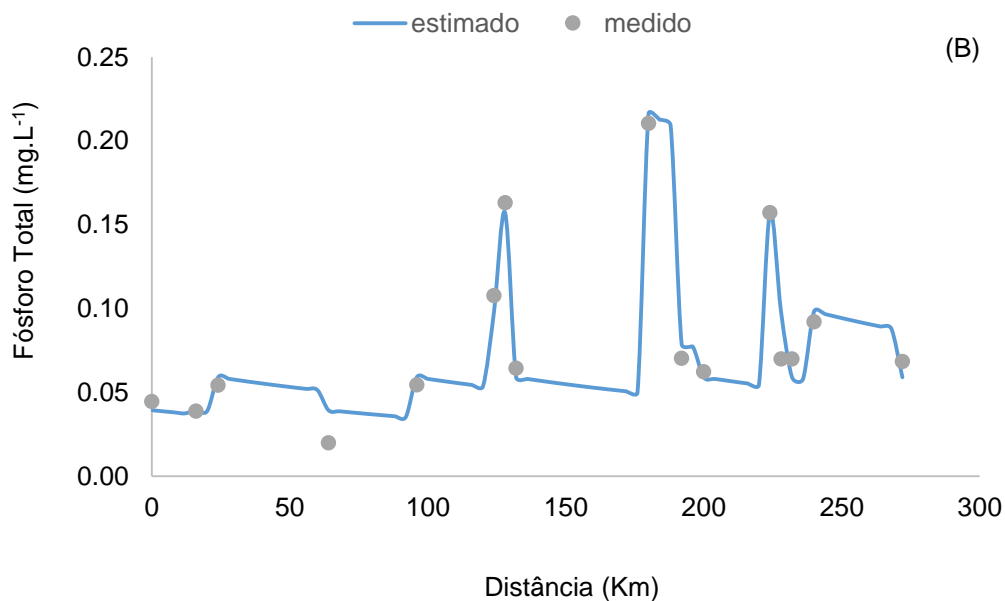
Analisando a Figura 5 (A) e (B), observa-se, que a medida que se aproxima das cidades de Petrolina e Juazeiro, são encontrados picos de carga orgânica. Segundo Rodrigues et al. (2004), Petrolina/ PE e Juazeiro/BA concentram, aproximadamente 42% da carga poluente da região do Submédio São Francisco, com destaque para o importante parque industrial de Petrolina, em especial as indústrias alimentícias, cujas cargas poluentes potenciais são de reduzidas a moderadas, por constituírem-se principalmente de nutrientes e carga orgânica.

Observa-se nas Figura 4 (A) e (B), Figura 5 (B) que, quando há uma alta variabilidade das concentrações das variáveis de qualidade, o modelo QUAL-UFMG não consegue representar de forma satisfatória a qualidade da água no curso d'água. Resultados semelhantes foram encontrado por Salla et al. (2013) e Gomes et. al. (2018), mostrando que quando há elevadas variações dos parâmetros qualitativos analisados o modelo apresenta dificuldades para simular as alterações existentes no corpo hídrico.

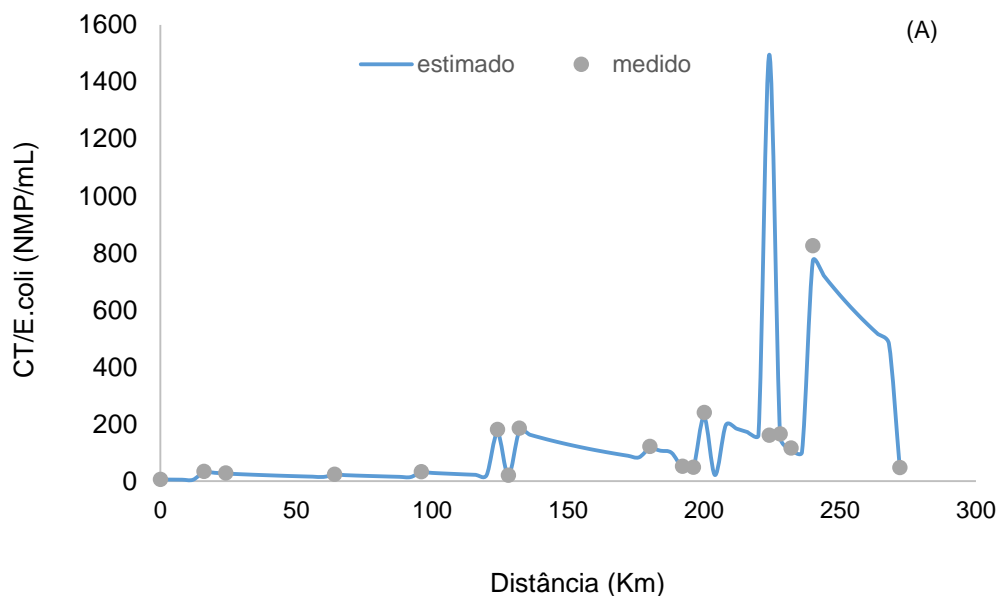
Na Figura 6 (A) e (B) é apresentado o comportamento do fósforo total para as diferentes variações sazonais. Observa-se que houve um aumento da sua concentração durante o período chuvoso. Para Blaas e Kroeze (2016), as áreas agrícolas, através da lixiviação, configura uma das principais fontes de fósforo em corpos d'água.

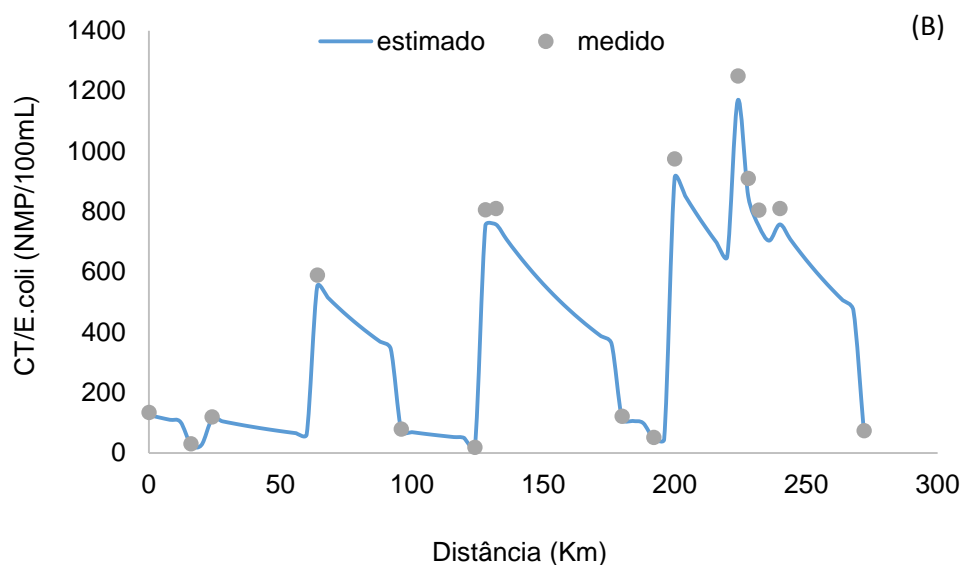
Figura 6- Validação do fósforo total, durante (A) seco e (B) chuvoso



Cont. Figura 6- Validação do fósforo total, durante (A) seco e (B) chuvoso

Observa-se na Tabela 3 que, de acordo com o CNS, o modelo QUAL-UFMG foi considerado aceitável (CNS =0,67) para simular a variável fósforo total no período seco e boa (CNS=0,90) para o período chuvoso. Na Figura 7 (A) e (B) apresenta a validação do modelo com relação a variável coliformes termotolerantes, os resultados podem ser considerados positivos, pois o CNS foi de respectivamente 0,78 para o período seco e 0,85 para o chuvoso.

Figura 7- Validação do CT/*E.Coli*, durante (A) seco e (B) chuvoso

Cont. **Figura 7-** Validação do CT/*E.Coli*, durante (A) seco e (B) chuvoso

Conforme pode ser observado no Figura 7 (B) houve um aumento na concentração de coliformes durante o período chuvoso. Isso indica que a qualidade da água em rios semiáridos é bastante vulnerável a variações de vazão entre os períodos secos e chuvosos. Resultado semelhante foi encontrado por Oliveira Filho e Lima Netto (2018) para o Rio Poti no estado do Piauí.

Na literatura podem ser encontrados pesquisas como a de Oliveira Filho e Lima Netto (2018) para uma bacia situada o Rio Poti no estado do Piauí e Gomes et al. (2018) para o Rio Sinos no Rio Grande Sul, que demonstram que o modelo QUAL-UFMG apresenta boa eficiência para estimar os parâmetros de OD, DBO, CT e PT, corroborando com os resultados encontrados no presente trabalho.

Logo, este programa pode ser aplicado a diferentes rios sendo uma importante ferramenta de gestão e manutenção da qualidade de corpos d'água.

5.4. CONCLUSÃO

Diante do exposto, pode-se afirmar, que os coeficientes calibrados podem ser utilizados como referência para avaliar o comportamento do oxigênio dissolvido, DBO, fósforo total e coliformes termotolerantes, na região do Submédio São Francisco.

A utilização do modelo matemático QUAL-UFMG para a avaliação da qualidade da água do Submédio São Francisco se mostrou adequada, visto que ocorreu uma

similaridade entre os dados observados e a curva simulada pelo processo de validação.

Para as variáveis PT, CT e DBO o modelo apresentou uma eficiência boa ($CNS > 0,75$) e para o OD o modelo foi considerado aceitável ($0,36 < CNS < 0,75$), o que mostra que o programa consegue reproduzir o comportamento desses parâmetros para o referido rio, podendo ser utilizados por órgãos ambientais para ações de controle e gestão do mesmo.

5.5. REFERÊNCIAS

ANA. Agência Nacional das águas. 2019. **HIDROWEB- Séries Históricas de Estações**. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf>. Acessado em: 12 de julho de 2019.

APHA. American Public Health Association. **Standard methods for examination of water and wastewater**. 20. ed. Denver: APHA, 2012.

ARAÚJO, G. J. F. **Análise das certificações agrícolas no Pólo Frutícola Petrolina (PE) / Juazeiro (BA) – Brasil**. Recife, PE, Universidade Federal de Pernambuco. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), 2011. 153p.

ARAÚJO, G.J.F; SILVA, M. M.S. Crescimento Econômico no Semiárido Brasileiro: O Caso do Polo Frutícola Petrolina/Juazeiro. **Caminhos de Geografia**, v. 14, n. 46 p 246–264, 2013.

BLAAS, H.; KROEZE, C. (2016) Excessive nitrogen and phosphorus in European rivers: 2000–2050. *Ecological Indicators*, v. 67, p. 328-337.

CBSHF. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **O submédio São Francisco**. Disponível em: <<http://cbhsaofrancisco.org.br/2017/o-submedio-sao-francisco-2/>>. Acessado em 28 novembro de 2019.

COSTA, D.J.L.; TEIXEIRA, D. Aplicação de modelo de autodepuração para avaliação da qualidade da água Ribeirão do Ouro, Araraquara-SP. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 13, n. 1, p. 49-62, 2010.

GOMES, S.H.P; GUEDES, H.A.S; SIQUEIRA, T.H; CORRÊA, L.B; ANDREAZZA, R E HÜFFNER, N.N. Modelagem sazonal da qualidade da água do Rio dos Sinos/RS utilizando o modelo QUAL-UFMG. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, p. 275-285, 2018.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Balço Hídrico Climatológico (2010)**. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/html/agro.html>>. Acesso em 02 de julho 2020.

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.

LIMA, M. A. C. de; SA, I. B.; KIILL, L. H. P.; ARAUJO, J. L. P.; BORGES, R. M. E.; LIMA NETO, F. P.; SOARES, J. M.; LEAO, P. C. de S.; SILVA, P. C. G. CORREIA, R. C.; SILVA, A. de S.; SÁ, I. I. S.; SILVA, D. F. da. **Subsídios técnicos para a indicação geográfica de procedência do Vale do Submédio São Francisco: uva de mesa e manga**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2009.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. 2019. **Programa de revitalização da bacia hidrográfica do Rio São Francisco**. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/PRSF/_arquivos/diag.pdf. Acessado em: 22 de agosto de 2019.

MELGAÇO, S. **Políticas Sociais do Programa Interáguas-Relatório de Avaliação Social do Programa Marco de Reassentamento Involuntário**. ANA-Agência Nacional das Águas. 208p, 2010.

Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v 10, p. 282-290, 1970.

OLIVEIRA FILHO, A. A.; LIMA NETO, I. E.. Modelagem da qualidade da água do rio Poti em Teresina (PI). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 3-14, 2018

OPPA, L. F. **Utilização de modelo matemático de qualidade da água para análise de alternativas de enquadramento do rio Vacacaí Mirim**. 2007. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria., Santa Maria, RS.

PUJOL-VILA, F.; GIMÉNEZ-GÓMEZ, P.; SANTAMARIA, N.; ANTÚNEZ, B.; VIGUÉS, N.; DÍAZ-GONZÁLES, M.; JIMÉNEZ-JORQUERA, C.; MAS, J.; SACRISTÁN, J.; MUÑOZ-BERBEL, X. Portable and miniaturized optofluidic analysis system with ambient light correction for fast in situ determination of environmental pollution. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 222, p. 55-62, 2016.

RODRIGUES, G. S; SILVA, A.S; BUSCHINELLI, C.C.A; ROSSO, C.R; CARBINATTO, M.L; WALDEMORE, T.S e PAIVA, M.W.F. **Diagnóstico ambiental das fontes pontuais de poluição das águas nas bacias hidrográficas do norte**

de Minas e do submédio São Francisco. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 42p.

SALLA, M.R.; PEREIRA, C.E.; ALAMY FILHO, J.E.; DE PAULA, L.M.; PINHEIRO, A.M. Estudo da autodepuração do Rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do Rio Dourados. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 105-114, 2013.

SILVA, P.M.O.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; COELHO, G. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 258-265, 2008.

TALLMAN, H E BENEDICTO, M. São Francisco o rio que resiste. **Retratos a Revista do IBGE**. n.13 ,p. 1-28. 2018

TEODORO, A.; IDE, C.N.; RIBEIRO, M.L.; BROCH, S.A.O.; SILVA, J.B. Implementação do conceito capacidade de diluição de efluentes no modelo de qualidade da água QUAL-UFMG: estudo de caso no Rio Taquarazinho (MS). **Engenharia de Saneamento Ambiental**, v. 18, n. 3, 275-288, 2013.

TONON, K. **Modelagem da Qualidade da Água utilizando os Modelos Streeter-Phelps e QUAL-UFMG na Bacia do Rio Lambari** 2014. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Calda, MG.

VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água dos rios.** Belo Horizonte: UFMG. 2014. 588p.