



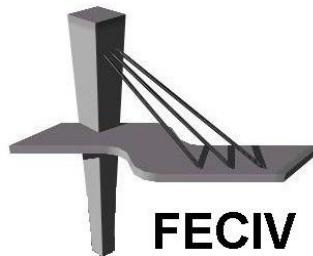
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**COMPARAÇÃO ENTRE FERRAMENTAS
COMPUTACIONAIS DE MODELAGEM DA
QUALIDADE DA ÁGUA EM AMBIENTE LÓTICO**

JULIANA CORRÊA RIQUIERI

UBERLÂNDIA, 28 DE SETEMBRO DE 2018



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



Juliana Corrêa Riquieri

**COMPARAÇÃO ENTRE FERRAMENTAS
COMPUTACIONAIS DE MODELAGEM DE QUALIDADE
DA ÁGUA EM AMBIENTE LÓTICO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eugenio Pereira

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R627	RIQUIERI, JULIANA CORREA, 1991-
2018	Comparação entre ferramentas computacionais de modelagem da qualidade da água em ambiente lótico [recurso eletrônico] / JULIANA CORREA RIQUIERI. - 2018.
<p>Orientador: Dr. Marcio Ricardo Salla. Coorientador: Dr. Carlos Eugênio Pereira. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.2110 Inclui bibliografia.</p>	
<p>1. Engenharia civil. I. Salla, Dr. Marcio Ricardo , 1976-, (Orient.). II. Pereira, Dr. Carlos Eugênio , 1974-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. IV. Título. CDU: 624</p>	

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

ATA N°: 227/2018

CANDIDATO: Juliana Corrêa Riquieri **Nº. Matrícula:** 11612ECV007

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla

TÍTULO: "Comparação entre ferramentas computacionais de modelagem da qualidade da água em ambiente lótico".

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Recursos hídricos e Saneamento Ambiental

PROJETO DE PESQUISA: Otimização do aproveitamento hidrico na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba

DATA DA DEFESA: 28 de setembro de 2018

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y.

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 09:00h/11:00h

Reuniu-se na Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEC, assim composta pelos professores doutores: **Paulo Fernando Soares** – PEU/UEM; **Ismarley Lage Horta Morais** – FECIV/UFU e **Marcio Ricardo Salla** – FECIV/UFU, orientador da discente. Ressalta-se que o Prof. Dr. Paulo Fernando Soares participou da banca via webconferência desde a cidade de Maringá/PR e a discente e os demais membros da banca participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla, apresentou a Comissão Examinadora e concedeu à discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata **APROVADA**. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Membros titulares:

Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla – FECIV/UFU

Prof. Dr. Paulo Fernando Soares – PEU/UEM

Prof. Dr. Ismarley Lage Horta Morais – FECIV/UFU

Uberlândia, 28 de setembro de 2018.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Ricardo Salla, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/09/2018, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ismarley Lage Horta Moraes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/09/2018, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Fernando Soares, Usuário Externo**, em 30/09/2018, às 23:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0692784** e o código CRC **2CA69433**.

Referência: Processo nº 23117.062777/2018-93
SEI nº 0692784

*Dedico a Deus e minha família.
“Todas as vitórias ocultam uma abdicação” (Simone de Beauvoir).*

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a Deus pelo dom da vida, sem Ele nada disso seria possível.

Aos meus pais que me incentivaram, me acolheram, rezaram por mim e me apoiaram em minhas decisões.

Ao meu marido Diego pela compreensão nos momentos de ausência, pelo apoio diário e pela forma como acredita nos meus desafios.

Ao professor Dr. Marcio Salla, pela orientação durante todo o período.

Ao professor Dr. Carlos Eugênio, pela co-orientação e pela paciência em ensinar sempre nos momentos de dificuldade. Obrigada pelas longas conversas e por acreditar que valeria a pena.

Ao professor Dr. Guilherme Lima por ter me recebido em São Paulo e me ajudado na compreensão da ferramenta HEC-RAS na parte hidráulica. E ao Willian por ter me ajudado tanto no modelo de qualidade e nos conselhos nesta etapa final. Vocês foram essenciais neste final do trabalho.

Aos meus amigos que me incentivaram a chegar até o fim, principalmente ao Túlio, meu parceiro de sempre, me apoiando e sendo meu braço direito nos trabalhos e nos momentos de fraqueza. E a minha amiga e sócia, Maria Gabriela, por ter assumido todas as responsabilidades da empresa para que eu pudesse me dedicar a reta final do mestrado, além de ter sido a maior incentivadora pelo ingresso no programa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de pesquisa e pelo apoio financeiro durante os 6 meses finais do curso. À Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia pelo suporte e estrutura para que os trabalhos de campo, ensaios e pesquisas fossem realizadas dentro dos parâmetros normatizados.

Muito obrigada a todos!

RESUMO

O aumento da carga poluidora lançada nos cursos de água ao longo de tempo leva à significativas mudanças nos padrões de qualidade da água. Essas mudanças têm impactos tanto na qualidade, quanto na diversidade da biota e nos diversos usos das águas. A modelagem da qualidade da água por meio de ferramentas computacionais tem se mostrado um importante instrumento no planejamento e gestão dos recursos hídricos. O emprego de modelos matemáticos permite que a gestão dos recursos hídricos seja realizada com eficiência, já que possibilita a análise conjunta da qualidade e quantidade de água. De modo geral, percebeu-se um desenvolvimento acelerado dos modelos de qualidade da água, ampliando suas aplicações quanto ao número de dimensões representadas, o número de constituintes modelados, interface com Sistema de Informações Geográficas (SIG) e sua interação com os ecossistemas aquáticos. Assim, a diversidade de modelos varia tanto em função do objetivo da aplicação, quanto da complexidade de sua utilização, representação do meio e dos seus constituintes analisados. Desta forma, neste estudo de mestrado foram comparadas três ferramentas computacionais de modelagem de qualidade da água em ambiente lótico, QUAL-UFMG, QUALI-TOOL e HEC-RAS, apontando as potencialidades e limitações com foco na criação da topologia do sistema hídrico, procedimentos para entrada dos dados (geométricos, hidráulicos, fluviométricos, de qualidade da água e coeficientes dos processos físicos e bioquímicos) e interpretação dos resultados das simulações dos parâmetros oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio orgânico, amônia, nitrato e fósforo total. Para isso, foi utilizado um curso de água de baixa capacidade hídrica (vazão média anual de $4,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) e com um lançamento pontual de alta carga poluidora ($528,8 \text{ kgDBO}\text{d}^{-1}$, $163,8 \text{ kgNO}\text{d}^{-1}$ e $6,2 \text{ kgP}\text{d}^{-1}$ no período de estiagem), especificamente o rio Jordão, bacia hidrográfica do rio Dourados, Triângulo Mineiro. As simulações foram realizadas nos períodos de estiagem e chuvoso, cujos dados de entrada foram extraídos de De Paula (2011) e Salla et al. (2013). Comparando as três ferramentas, observou-se que os perfis longitudinais dos parâmetros de qualidade mantiveram a mesma tendência, com exceção ao oxigênio dissolvido na ferramenta QUAL-UFMG para o período de estiagem e chuvoso e série de nitrogênio na ferramenta HEC-RAS

para o período chuvoso. Observou-se que os métodos de cálculo da profundidade líquida e velocidade do escoamento interferiram diretamente nos perfis longitudinais de oxigênio dissolvido e série de nitrogênio. Além disso, diante de uma análise operacional das ferramentas, QUAL-UFMG e QUALI-TOOL se mostraram parecidos pelo fato de terem sido desenvolvidos em formatos de planilha de Excel e utilizarem o mesmo equacionamento matemático. Para estudos mais simplificados, em escalas reduzidas, as ferramentas QUAL-UFMG e QUALI-TOOL trazem resultados satisfatórios, além de possuírem interface amigável, gratuita e de fácil acesso ao usuário. A ferramenta HEC-RAS se mostrou a mais complexa devido à maior quantidade de dados de entrada necessários na modelagem da parte hidráulica e de qualidade da água, além de ter uma conexão com SIG. Em contrapartida, a ferramenta HEC-RAS tem a limitação da não variação dos coeficientes das reações bioquímicas do modelo. Também, a necessidade da inclusão de seção transversal para alimentação das cargas poluentes no rio principal limita seu uso em estudos com limitação financeira para os trabalhos de campo.

Palavras chave: Qualidade da água, modelagem matemática, QUAL-UFMG, QUALI-TOOL, HEC-RAS.

RIQUIERI, J.C. *Comparison of computational tools for water quality modeling in lotic ambient.* Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2018

ABSTRACT

The increased pollutant load released into watercourses over time leads to significant changes in water quality standards. These changes impact the quality, the diversity of the biota and the various uses of the waters. Water quality modeling through computational tools has proved to be an important tool in planning and managing water resources. The use of mathematical models allows the efficient management of water resources, as it allows the joint analysis of the quality and quantity of water. In general, an accelerated development of water quality models was observed, increasing their applications regarding the number of dimensions represented, the number of modeled constituents, interface with GIS and its interaction with aquatic ecosystems. Thus, the models diversity varies both because of the application purpose, and the complexity of their use, representation of the medium and its constituents. This master's thesis compares three computational tools for water quality modeling in a lotic environment: QUAL-UFMG, QUALI-TOOL and HEC-RAS, pointing out potentialities and limitations with a focus on the creation of water topology, data input procedures (geometric, hydraulic, fluvimetric, water quality and coefficients of physical and biochemical processes). It also analyses the results in simulations of dissolved oxygen, biochemical demand for oxygen, organic nitrogen, ammonia, nitrate and total phosphorus. It has been used a watercourse with an average annual water capacity of 4.8 m³/s and punctual release of high pollutant load (528.8 kgDBO/day, 163.8 kgNO/day and 6.2 kgP/day during the dry season), specifically Jordão River, the hydrographic basin of Dourados River, Triângulo Mineiro, Brazil. The simulations were carried out in the dry and rainy season, data extracted from De Paula (2011) and Salla et al. (2013). Comparing all three tools, longitudinal profiles of the quality parameters kept the same trend, except for dissolved oxygen in the QUAL-UFMG tool during the dry and rainy season and nitrogen series in the HEC-RAS tool for the rainy season. Also, the methods for calculating the net depth and flow velocity directly interfered in longitudinal profiles of dissolved oxygen and nitrogen series. In addition, upon an operational analysis, QUAL-UFMG and QUALI-TOOL tools were similar because they were developed in Excel spreadsheet formats and used the same mathematical equation.

For more simplified studies, on a reduced scale, QUAL-UFMG and QUALI-TOOL tools provide sufficient results, and they also have an user-friendly interface, are of free distribution, and of an easy access to the user. The HEC-RAS tool proved to be more complex due to the greater amount of input data required in hydraulic and water quality modeling. HEC-RAS also has a connection with GIS. In contrast, HEC-RAS has the limitation of non-variation of the coefficients of the biochemical reactions model. Also, the need to include a cross section to feed the pollutant loads in the main river limits its use in studies with financial limitations for fieldwork.

Key words: Water quality. Mathematical modeling. QUAL-UFMG. QUALI-TOOL. HEC-RAS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de autodepuração de rios.....	7
Figura 2 - Fluxograma das reações em meio aquático.....	11
Figura 3 – Localização da bacia hidrográfica do rio Jordão	28
Figura 4 - Mapa de localização das hidrelétricas nos principais afluentes do rio Paranaíba	28
Figura 5 – Identificação dos pontos de monitoramento e seção transversal do rio Jordão	29
Figura 6 – Localização do Córrego Brejo Alegre e da futura ETE Araguari.....	30
Figura 7 - Diagrama unifilar do baixo curso do rio Jordão	31
Figura 8 - Interface gráfica inicial do QUAL-UFMG (período chuvoso).....	33
Figura 9 – Lançamento dos dados fluviométricos do QUAL-UFMG (exemplo período chuvoso)	34
Figura 10 - Lançamento dos dados de qualidade da água do QUAL-UFMG (período chuvoso)	35
Figura 11 - Lançamento dos coeficientes das reações bioquímicas e de sedimentação na ferramenta QUAL-UFMG: (a) coeficientes fixos; (b) coeficientes variáveis (período chuvoso)	36
Figura 12 - Resultados gráficos gerados na ferramenta QUAL-UFMG para o período chuvoso	38
Figura 13 - Interface gráfica da ferramenta QUALI-TOOL	39
Figura 14 - Interface da aba “Topologia” na ferramenta QUALI-TOOL	40
Figura 15 – Localização das seções transversais ao longo do rio Jordão	40
Figura 16 - Declividade de fundo assumida na ferramenta QUALI-TOOL	41
Figura 17 – Dados geométricos inseridos na ferramenta QUALI-TOOL.....	42

Figura 18 - Lançamento dos dados fluviométricos na ferramenta QUALI-TOOL (exemplo período chuvoso).....	43
Figura 19 - Aba “hidráulica” na ferramenta QUALI-TOOL.....	44
Figura 20 - Interface da aba “ $C_{pontuais}$ ” na ferramenta QUALI-TOOL.....	44
Figura 21 – Interface da aba “Coeficientes” na ferramenta QUALI-TOOL (período chuvoso)	45
Figura 22 - Interface da aba “Concentrações” na ferramenta QUALI-TOOL	46
Figura 23 – Interface inicial do HEC-RAS	47
Figura 24 - Topologia do sistema hídrico na ferramenta HEC-RAS	48
Figura 25 - Representação da seção transversal do HEC-RAS	49
Figura 26 - Lançamentos dos dados hidráulicos no HEC-RAS	51
Figura 27 - Lançamento dos dados fluviométricos no HEC-RAS	52
Figura 28 – Janela para lançamento dos dados de qualidade da água no HEC-RAS	53
Figura 29 – Lançamento dos coeficientes das reações bioquímicas e de sedimentação na ferramenta HEC-RAS	54
Figura 30 - Janela de lançamento da estação meteorológica na ferramenta HEC-RAS	55
Figura 31 - Radiação solar ao longo do ano na região do rio Jordão.....	56
Figura 32 - Janela de simulação da qualidade da água na ferramenta HEC-RAS	57
Figura 33 - Visualização dos resultados da modelagem da qualidade da água na ferramenta HEC-RAS	58
Figura 34 – Janela de opções para simulação da qualidade da água no HEC-RAS	58
Figura 35 - Perfis longitudinais hidráulicos gerados pelas ferramentas computacionais: (a) elevação; (b) profundidade líquida e velocidade média do escoamento em período de estiagem; (c) profundidade líquida e velocidade média do escoamento em período chuvoso	63
Figura 36 – Perfis longitudinais dos parâmetros de qualidade da água em período: (a) chuvoso; (b) estiagem	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites estabelecidos pelo CONAMA para parâmetros de qualidade da água...	6
Tabela 2 – Valores de referência de coeficientes para remoção de DBO	13
Tabela 3 - Valores de referência do coeficiente de decomposição da DBO (K _d).....	13
Tabela 4 – Valores de referência do coeficiente de reaeração (K ₂).....	14
Tabela 5 - Valores de referência dos coeficientes da modelagem do fósforo	14
Tabela 6 - Valores de referência dos coeficientes da modelagem do nitrogênio.....	15
Tabela 7 – Coordenadas geográficas dos pontos de monitoramento e dos tributários	31
Tabela 8 - Dados de entrada de vazão e qualidade de água	35
Tabela 9 - Coeficientes de reações bioquímicas e de sedimentação, símbolos e valores adotados.....	37
Tabela 10 – Dados climatológicos do rio Jordão utilizados na modelagem do HEC-RAS	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes de enquadramento das águas e seus respectivos usos.....	6
Quadro 2 - Resumo comparativo das ferramentas QUAL-UFMG, QUALI-TOOL e HEC-RAS	70

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 PROGRAMA NACIONAL DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA – (PNQA)	4
2.2 AUTODEPURAÇÃO DE RIO	7
2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DA QUALIDADE DA ÁGUA	8
2.3.1 Coeficientes das reações	13
2.4 PRINCIPAIS MODELOS DE QUALIDADE DA ÁGUA	15
2.4.1 Ferramenta QUAL-UFMG	20
2.4.2 Ferramenta QUALI-TOOL	22
2.4.3 Ferramenta HEC-RAS	24
METODOLOGIA	27
3.1 ÁREA DE ESTUDO	27
3.2 DIAGRAMA UNILIFAR	31
3.3 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	32
3.3.1. QUAL-UFMG	32
3.3.2 QUALI-TOOL	38
3.3.3 HEC-RAS	46
RESULTADOS	59
CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS	72

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico, que teve seu marco na Revolução Industrial no início do século XVIII, foi considerado a alavanca do progresso e bem-estar social, uma vez que proporcionou melhoria nos métodos de produção, além de gerar poder de compra à sociedade. Desse modo, o capitalismo se tornou realidade em boa parte do planeta. Em contrapartida, a intensificação da atividade industrial ocupou o território físico mundial, comprometendo o meio ambiente em grandes escala, provocando riscos aos seres vivos.

A Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, também conhecida como Conferência de Estocolmo, celebrada em 1972, definiu o meio ambiente como sendo: “o conjunto de componentes físicos, químicos, biológicos e sociais capazes de causar efeitos diretos ou indiretos, em um prazo curto ou longo, sobre os seres vivos e as atividades humanas.” (ONU, 1972).

O desenvolvimento acelerado da economia e da tecnologia, aliados às mudanças nos processos produtivos, faz com que a indústria explore o meio ambiente sem nenhum sentimento de gestão e preservação. Como consequência, as riquezas naturais são afetadas direta e indiretamente, causando impactos negativos irreversíveis ou de difícil recuperação.

Dentro deste contexto, a poluição dos recursos hídricos traz preocupações e tem se tornado cada vez mais fonte de estudos e pesquisas em todo o mundo. A poluição das águas superficiais é causada pelo lançamento pontual de cargas poluidoras domésticas ou industriais, sem nenhum tratamento ou com tratamento inadequado, e também pelo lançamento difuso da carga de agrotóxicos e fertilizantes agrícolas. Essas cargas poluidoras afetam negativamente o meio aquático, tornando a qualidade da água em desacordo com padrões exigidos por instituições ambientais regulamentadoras.

Assim, a fim de mitigar a situação da degradação dos recursos hídricos, um importante passo a ser dado é compreender a capacidade de autodepuração do sistema hídrico. Este fenômeno natural está vinculado ao estabelecimento de uma carga poluente que um rio é capaz de receber sem que suas características naturais sejam prejudicadas.

Para gestão e controle dos recursos hídricos em escala local e de bacia hidrográfica, vê-se com frequência a utilização de modelos matemáticos com módulos de qualidade da água. Seu uso se justifica na visualização das interações e dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem devido ao lançamento de uma carga poluidora. (VON SPERLING, 2007).

Ainda segundo Von Sperling (2007):

“Um modelo é composto por uma estrutura teórica, representada por equações matemáticas, valores numéricos dos parâmetros (coeficientes) das equações e dados de entrada e saída, normalmente compreendendo medições/observações de campo ou de laboratório.”

O marco inicial dos modelos matemáticos para análise da qualidade da água, utilizando o perfil de oxigênio dissolvido, foi o modelo clássico de Streeter-Phelps (1925), desenvolvido para o Rio Ohio, nos Estados Unidos. Seu objetivo foi prever a variação da concentração de oxigênio dissolvido no curso de água ocasionada pela degradação da matéria orgânica carbonácea e pela reaeração natural. Sua estrutura serviu de base para a maioria dos modelos mais avançados de simulação existentes no mundo (KANNEL et. al., 2011).

Inúmeras ferramentas computacionais de modelagem de qualidade da água em ambientes lêntico e lótico foram desenvolvidas em todo o mundo desde o modelo clássico de Streeter-Phelps (1925), impulsionado pelo incremento da capacidade computacional. A diferença entre as ferramentas se dá em vários aspectos, tais como: capacidade de processamento; processos físicos, químicos e biológicos considerados; parâmetros simulados e interações entre parâmetros; modo de alimentação dos dados de entrada; visualização dos resultados; integração com plataforma SIG etc.

Contudo, é normal que o usuário tenha dúvida sobre qual é a melhor ferramenta computacional a utilizar em um estudo ou projeto específico. Diante desta situação, é fundamental conhecer previamente as potencialidades e limitações das diversas ferramentas. É nesta vertente que o presente estudo de mestrado foi desenvolvido.

O estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade das ferramentas computacionais QUAL-UFMG, QUALI-TOOL e HEC-RAS, em um curso de água de pequeno porte, com múltiplos usos da água (irrigação, dessesentação e reserva para fins hidrelétricos) e que recebe lançamentos pontuais em seu curso de água principal. Foi escolhido o rio Jordão,

localizado na bacia hidrográfica do rio Dourados, Triângulo Mineiro, utilizando os dados provenientes das simulações prévias realizadas por De Paula (2011) e Salla et al. (2013).

Desta forma, os objetivos específicos deste trabalho de mestrado foram comparar as ferramentas QUAL-UFMG, QUALI-TOOL e HEC-RAS quanto à:

1. Criação da topologia do sistema hídrico;
2. Procedimentos para entrada dos dados (geométricos, hidráulicos, fluviométricos, de qualidade da água e coeficientes dos processos físicos e bioquímicos);
3. Interpretação dos resultados das simulações.

Com isso, esta dissertação foi dividida em cinco capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: Introdução que apresenta a justificativa e os objetivos deste trabalho;
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre o processo de autodepuração dos rios e os modelos de qualidade da água;
- Capítulo 3: Metodologia que inclui a descrição da área de estudo e os detalhes da operação de cada ferramenta, tal como características de funcionamento, metodologia de modelagem e dados de entrada;
- Capítulo 4: Resultados e discussões;
- Capítulo 5: Conclusão;
- Referências.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conhecer o universo da modelagem matemática para análise da qualidade da água em rios é primordial para o pesquisador e responsáveis da área na gestão do recurso hídrico, já que as consequências da poluição geram um custo à sociedade, seja pela indisponibilidade do recurso ou pelo impacto na redução da qualidade de vida das pessoas.

Assim, com intuito de atender o objetivo deste trabalho, foi necessário compreender o processo de autodepuração em rios e o processo de modelagem da qualidade da água, o qual envolve o equacionamento matemático, os parâmetros e coeficientes bioquímicos das reações empregados nas ferramentas computacionais de simulação. Além disso, esta revisão bibliográfica apresenta um sucinto histórico das ferramentas de modelagem de qualidade da água, seu desenvolvimento e abrangência, além de uma abordagem mais específica de algumas ferramentas.

2.1 PROGRAMA NACIONAL DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA – (PNQA)

A poluição dos recursos hídricos há décadas se tornou uma séria ameaça mundial à saúde humana. Isso se deve a fatores como crescimento populacional acelerado aliado ao desenvolvimento da economia, sem ideais sustentáveis. Com isso, corpos hídricos recebem águas residuais sem tratamento prévio, muitas vezes superando o potencial de autodepuração do sistema aquático.

Desse modo, para manutenção de uma adequada gestão dos recursos hídricos, é necessário que quantidade e a qualidade da água sejam monitoradas frequentemente. Este monitoramento é essencial para ações de planejamento, licenciamento, outorga, fiscalização e enquadramento de corpos de água.

A Agência Nacional de Águas (ANA) criou o Programa Nacional de Avaliação da Qualidade da Água (PNQA), que tem como objetivo prover para sociedade um conhecimento necessário sobre a qualidade das águas superficiais do Brasil, promovendo ferramentas adequadas aos tomadores de decisão, no auxílio à definição de políticas públicas, a fim de

recuperar a água de qualidade, contribuindo com a gestão sustentável dos recursos hídricos. O programa tem os seguintes objetivos principais:

- Eliminar as lacunas geográficas e temporais no monitoramento de qualidade de água;
- Tornar as informações de qualidade de água comparáveis em âmbito nacional;
- Aumentar a confiabilidade das informações de qualidade de água;
- Avaliar, divulgar e disponibilizar à sociedade as informações de qualidade de água.

Como um dos componentes do PNQA, a padronização entra como uma ação estratégica para atendimento desses objetivos principais do programa. Esta padronização nada mais é do que acordar parâmetros mínimos de qualidade de água a serem monitorados pelas Unidades da Federação, de forma a normalizar procedimentos de coleta, preservação e análise das amostras de qualidade de água.

Sendo assim, o enquadramento do padrão de qualidade das águas, conforme critérios de imposição legal, é necessário e imprescindível para a conservação dos recursos hídricos (quantitativamente e qualitativamente) para a atual e futuras gerações, uma vez que o uso inconsequente do recurso gera riscos à população (ZUFFO, 2002).

No Brasil tem-se o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), responsável pela adoção de medidas de natureza consultiva e deliberativa acerca do Sistema Nacional do Meio Ambiente. Uma de suas responsabilidades é regulamentar classes de uso e de qualidade de água dos rios e outros corpos de água.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 357 de 2005, o enquadramento de corpos hídricos é o estabelecimento de metas ou objetivos de qualidade da água a serem alcançados ou mantidos ao longo do tempo, com obrigatoriedade, em um segmento de corpo de água, de acordo com seus usos preponderantes pretendidos.

Deste modo, esta resolução classifica o rio de acordo com os usos da água e define qualidade mínima da água para cada atividade. Sendo assim, classificou-se as águas do território brasileiro em águas doces (salinidade igual ou inferior a 0,5%), salobras (salinidade maior que 0,05% e menor que 3,0%) e salinas (salinidade igual ou superior a 3,0 %).

Com enfoque principal deste trabalho nas águas doces, a legislação a classifica em cinco classes: Classe Especial e Classes 1 a 4, descritas brevemente no Quadro 1.

Quadro 1 - Classes de enquadramento das águas e seus respectivos usos

Classe	Uso
Especial	Água ideal para abastecimento e consumo humano, após desinfecção simples. Também servem para a preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas e para a preservação dos ambientes aquáticos, em unidades de conservação de proteção integral. Proibido lançamento de águas residuais.
Tipo 1	Água adequada para banhistas, destinadas a proteção das comunidades aquáticas, aquicultura e a pesca. Também serve para abastecimento e consumo humano, após tratamento convencional ou avançado.
Tipo 2	Características da água desejada para pesca amadora, assim como para preservar um ecossistema saudável. Também serve para abastecimento e consumo humano, após tratamento convencional ou avançado
Tipo 3	Desejável para um contato recreativo, irrigação de culturas arbóreas ou cereais, e para servir à dessedentação de animais. Também serve para abastecimento e consumo humano, após tratamento convencional ou avançado
Tipo 4	Qualidade ideal apenas para navegação e harmonia paisagística.

Fonte: Adaptado CONAMA (2005)

A classificação prevê que os usos mais nobres são a partir das águas de Classe Especial, enquanto as Classe 4 apresenta os usos menos nobres. Nas de Classe Especial não é admitida nenhum tipo de lançamento de efluente (mesmo após tratamento) e nas de Classe 1 à Classe 4, são aceitos níveis crescentes de poluição. Esta Resolução, em 13 de maio de 2011, foi modificada pela Resolução nº 430 do CONAMA. A Resolução CONAMA Nº 357 (2005), também limita valores de alguns parâmetros de qualidade da água divididos para cada classe, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Limites estabelecidos pelo CONAMA para parâmetros de qualidade da água

Parâmetros	Classes			
	1	2	3	4
DBO _{5,20} (mg/l)	≤ 3	≤ 5	≤ 10	-
Oxigênio Dissolvido (mg/l)	≥ 6	≥ 5	≥ 4	≥ 2
Nitrogênio Ammoniacal (mg/l)	3,7 (pH<7,5) 2 (7,5<pH<8) 1 (8<pH<8,5) 0,5 (pH>8,5)	Idem Classe 1	13,3(pH<7,5) 5,6(7,5<pH<8) 2,2(8<pH<8,5) 1,0 (pH>8,5)	-
Fósforo total (ambiente lêntico) (mg/l)	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,05	-
Fósforo total (ambiente lótico) (mg/l)	≤ 0,1	≤ 0,10	≤ 0,15	-

Fonte: CONAMA (2005)

2.2 AUTODEPURAÇÃO DE RIO

Segundo a CETESB (1998), a poluição das águas pode ser entendida como:

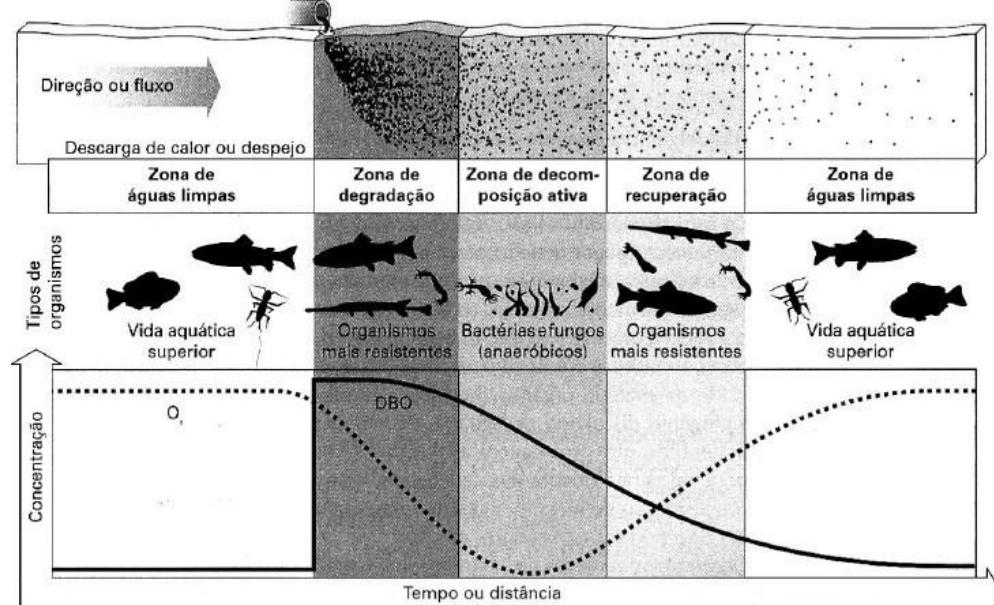
“...qualquer alteração das suas características físicas, químicas ou biológicas capaz de pôr em risco a saúde, a segurança e o bem-estar das populações ou que possa comprometer a fauna ictiológica e a utilização das águas para fins agrícolas, comerciais, industriais e recreativos.”

De acordo com Von Sperling (1996), a autodepuração é um processo de sucessão ecológica, em que o restabelecimento do equilíbrio no meio aquático é realizado por mecanismos físicos, físico-químicos e biológicos do próprio rio.

O ecossistema de um corpo d'água, antes do lançamento do poluente, encontra-se em estado de equilíbrio. Após a entrada da poluição, este equilíbrio entre as comunidades é quebrado, resultando em uma desorganização, seguida por uma tendência posterior à reorganização.

Este processo pode ser entendido na Figura 1.

Figura 1 – Processo de autodepuração de rios



Fonte: Braga et. al (2005)

A zona de degradação tem início logo após o lançamento das águas residuais no curso de água, tendo como principal característica a alta concentração de matéria orgânica. Após a fase inicial de perturbação do ecossistema, tem-se a zona de decomposição ativa, que é onde os microrganismos começam a desempenhar ativamente suas funções de decomposição da

matéria orgânica. A zona de recuperação é o local onde a matéria orgânica, já intensamente consumida nas zonas anteriores, se encontra grandemente estabilizada, ou seja, transformada em compostos inertes. A última etapa, denominada zona de águas limpas, como próprio nome já diz, apresenta-se novamente limpa, como encontrado em seu estado anterior a poluição (VON SPERLING, 2007).

2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DA QUALIDADE DA ÁGUA

Os modelos matemáticos de qualidade da água utilizam da equação de difusão-advecção (Equação 1) para cálculo da dispersão de nutrientes na água. Ela permite quantificar e acompanhar a evolução ao longo do tempo dos parâmetros de qualidade de água.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial C}{\partial z}) \pm \text{Fonte} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: C é a concentração do parâmetro no tempo t ; t é o tempo decorrido desde a zona de mistura entre o contaminante e o meio líquido (dias); D_x , D_y e D_z correspondem aos coeficientes de difusão turbulenta nas respectivas variáveis espaciais; u , v e w são as componentes do vetor velocidade nas direções x , y e z , respectivamente; Fonte é o termo fonte-sumidouro. O termo Fonte da equação é representado pelos constituintes analisados no estudo de qualidade da água.

Para solução da equação de difusão-advecção, o modelo QUAL-UFMG e o QUALI-TOOL, utilizam o Método de Diferenças Finitas. Ele consiste na divisão do domínio em um número finito de pequenas regiões ou trechos de curso de água. Já a versão 5.05 da ferramenta HEC-RAS, também utilizada neste trabalho, emprega um esquema numérico explícito denominado QUICKEST-ULTIMATE (*Quadratic Upstream Interpolation of Convective Kinematics with Estimated Streaming Terms*), proposto por Leonard (1979) para desenvolver a equação unidimensional de advecção-dispersão. Este algoritmo está baseado em uma formulação de volume de controle com valores das variáveis de inclinação escritas em termos de uma interpolação quadrática, usando os valores dos nós adjacentes juntamente com o valor do próximo nó a frente.

A concentração de cada parâmetro de qualidade da água logo após a confluência de um tributário ou de uma carga poluidora pontual com o curso de água principal é obtida pela equação de mistura (ver equação 2).

$$C_j = \frac{C_M Q_M + C_L Q_L}{Q_M + Q_L} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: C_j é a concentração de jusante ou da mistura (mg/L); C_M é a concentração de montante (mg/L); Q_M é a vazão de montante (m^3/s); C_L é a concentração do lançamento (mg/L); Q_L é a vazão do lançamento (m^3/s).

As representações matemáticas dos constituintes que os modelos matemáticos simulam, em específico os que são utilizados neste trabalho, são apresentadas nas Equações 3 a 9.

- Modelagem de OD

$$\sum F_{OD} = +k_2 \times 1,024^{T-20} \times (OD_{sat} - OD) - k_d \times 1,047^{T-20} \times DBO - R_{02-amônia} \times f_{nitr} \times k_{an} \times 1,080^{T-20} \times NH_3 - S_d/h \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: OD é a concentração de oxigênio dissolvido, em mg/L; OD_{sat} é a concentração de saturação de oxigênio dissolvido, em mg/L; S_d é a demanda de fundo de oxigênio dissolvido no rio, em $\text{gO}_2/\text{m}^2.\text{dia}$; T é a temperatura da água, em $^{\circ}\text{C}$; h é a profundidade líquida do rio, em metros; K_2 é o coeficiente de reaeração, em dia^{-1} ; k_d é o coeficiente de decomposição da matéria orgânica carbonácea no rio, em dia^{-1} ; k_{an} é o coeficiente de conversão de amônia em nitrito.

- Modelagem de DBO

$$\sum F_{DBO} = -k_d \times 1,047^{T-20} \times DBO - (VS_{MO}/h) \times DBO + L_{difuso}/h \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: DBO é a demanda bioquímica de oxigênio, em mg/L; VS_{MO} é a velocidade de sedimentação da matéria orgânica carbonácea; L_{difuso} é a carga difusa de DBO, em $\text{g/m}^2.\text{dia}$; k_d é o coeficiente de decomposição da matéria orgânica carbonácea no rio e h é a profundidade líquida do rio, em metros.

- Modelagem de nitrogênio orgânico (NO)

$$\sum F_{NO} = -k_{oa} \times 1,047^{T-20} \times N_{org} - (VS_{NO}/h) \times N_{org} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que: NO é a concentração de nitrogênio orgânico, em mg/L; VS_{NO} é a velocidade de sedimentação do nitrogênio orgânico, em m/dia; k_{oa} é o coeficiente de conversão de nitrogênio orgânico em amônia, em dia $^{-1}$ e h é a profundidade líquida do rio, em metros.

- Modelagem de nitrogênio amoniacial (NH₃)

$$\sum F_{NH_3} = +k_{oa} \times 1,047^{T-20} \times N_{org} - R_{O_2 - amônia} \times f_{nitr} \times k_{an} \times 1,080^{T-20} \times NH_3 + S_{amônia}/h \quad (\text{Equação 6})$$

Em que: NH_3 é a concentração de nitrogênio amoniacial, em mg/L; $S_{amônia}$ é o ressurgimento de fundo da amônia, em g/m².dia; $R_{O_2 - amônia}$ é o consumo de oxigênio para oxidação da amônia, em mgO₂cons/mg NH₃oxid; f_{nitr} é o fator de nitrificação; k_{an} é o coeficiente de conversão de amônia em nitrito, em dia $^{-1}$; k_{oa} é o coeficiente de conversão de nitrogênio orgânico em amônia, em dia $^{-1}$;

- Modelagem de nitrito (NO₂)

$$\sum F_{NO_2^-} = +R_{O_2 - amônia} \times f_{nitr} \times k_{an} \times 1,080^{T-20} \times NH_3 - k_{nn} \times 1,047^{T-20} \times NO_2^- \quad (\text{Equação 7})$$

Em que: NO_2^- é a concentração de nitrito, em mg/L; $R_{O_2 - amônia}$ é o consumo de oxigênio para oxidação da amônia, em mgO₂cons/mg NH₃oxid; f_{nitr} é o fator de nitrificação; k_{an} é o coeficiente de conversão de amônia em nitrito, em dia $^{-1}$ e k_{nn} é o coeficiente de conversão de nitrito em nitrato, em dia $^{-1}$.

- Modelagem de nitrato (NO₃)

$$\sum F_{NO_3^-} = +k_{nn} \times 1,047^{T-20} \times NO_2^- \quad (\text{Equação 8})$$

Em que: NO_3^- é a concentração de nitrato, em mg/L e k_{nn} é o coeficiente de conversão de nitrito em nitrato, em dia $^{-1}$.

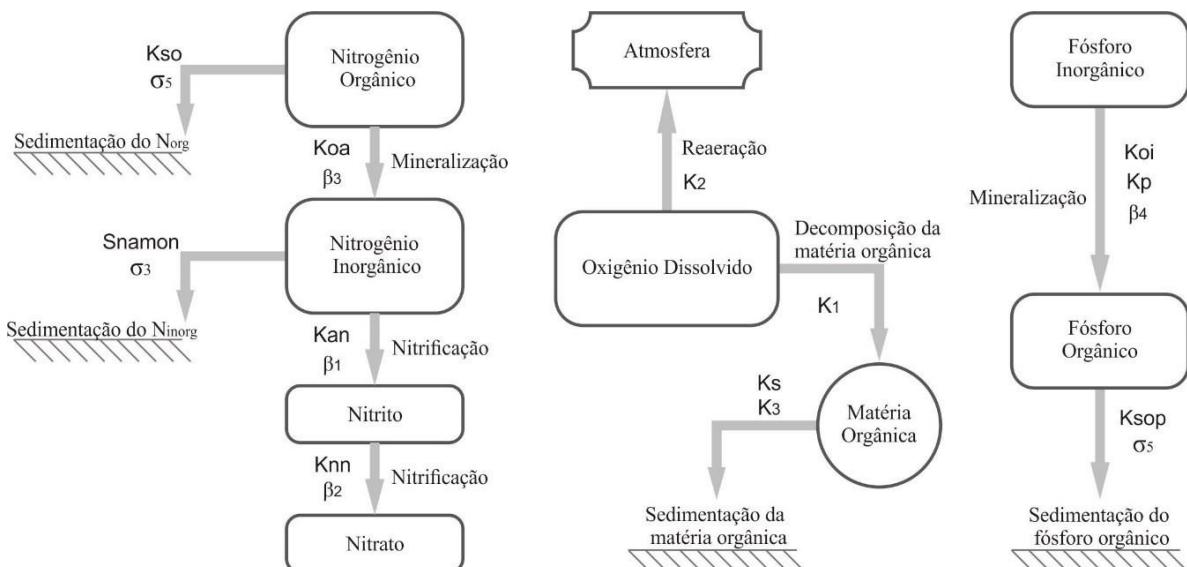
- Modelagem de P_{total}

$$\sum F_{P_{total}} = -k_p \times 1,047^{T-20} \times P_{total} - (VS_P/h) \times P_{total} \quad (\text{Equação 9})$$

Em que: P_{total} é a concentração de fósforo total (mg/L) /dia; VS_P é a velocidade de sedimentação do fósforo total (em m/dia); k_p representa a constante de degradação do fósforo total (dia $^{-1}$) e h é a profundidade líquida do rio, em metros.

A Figura 2 ilustra o fluxograma das reações consumidoras de oxigênio dissolvido no meio aquático e a integralização dos ciclos de nutrientes (fósforo e nitrogênio).

Figura 2- Fluxograma das reações em meio aquático



Fonte: Autora (2018)

A decomposição da matéria orgânica presente na água é o processo no qual se transforma poluentes em compostos menos desejáveis ao meio, sendo o principal fator de consumo de oxigênio. A taxa com que o fenômeno ocorre é conhecida como coeficiente de desoxigenação, expresso em d^{-1} . Na três ferramentas de interesse deste trabalho, esse coeficiente é representado por K_1 .

A sedimentação da matéria orgânica, entende-se como a transformação anaeróbia da matéria em suspensão em lodo de fundo. Essa camada de lodo é responsável pela demanda bentônica. A taxa de sedimentação é expressa em d^{-1} através do coeficiente K_s para ferramenta QUAL-UFMG, V_{smo} na ferramenta QUALI-TOOL e K_3 no HEC-RAS.

Com relação ao aumento da concentração de oxigênio, a reaeração atmosférica pode ser considerada como o principal processo responsável pela introdução de oxigênio no corpo hídrico. O aumento da concentração do oxigênio na fase líquida se dá através da transferência de gases, em que as moléculas de gases são trocadas entre o meio líquido e gasoso. Essa taxa com que o corpo hídrico absorve oxigênio da atmosfera através da interface ar-agua é chamada de coeficiente de reaeração ou reoxigenação (K_2 , expresso em dias⁻¹).

A mineralização ou amonificação é o processo pelo qual se transforma o nitrogênio orgânico em nitrogênio amoniacal, representado pelo coeficiente K_{oa} para as ferramentas QUAL-UFMG e QUALI-TOOL e β_3 para a ferramenta HEC-RAS, expressos em dias⁻¹. A nitrificação é o processo pelo qual as bactérias consomem o oxigênio dissolvido da água para transformar as formas nitrogenadas de matéria orgânica em nitritos e deste em nitratos. Este consumo é referido como demanda nitrogenada. A transformação em nitrito é representada pelo coeficiente K_{an} nas duas ferramentas brasileiras e β_1 para ferramenta HEC-RAS, expressos em dias⁻¹. O processo é considerado rápido em ambientes lóticos, o que justifica a exclusão da reação de nitrito de vários modelos de qualidade da água, representando a nitrificação como uma etapa única, passando de amônia para nitrato. (VON SPERLING, 2007).

A desnitrificação, processo que ocorre em condições de concentração nula de OD, resulta em efetiva remoção de nitrogênio da massa líquida, correspondendo ao nitrito que é convertido a nitrato e, posteriormente, a nitrogênio gasoso para atmosfera. Neste processo, emprega-se a taxa de desnitrificação representada pelo coeficiente K_{nn} para as duas primeiras ferramentas e o β_2 para a ferramenta HEC-RAS, expressos em dias⁻¹.

A transformação de fósforo orgânico a fósforo inorgânico é representada por uma reação de primeira ordem através do coeficiente K_{oi} para as ferramentas QUAL-UFMG e QUALI-TOOL, e β_4 para a ferramenta HEC-RAS. Já a sedimentação do fósforo orgânico é representada pelo coeficiente K_{spo} para as duas primeiras e σ_5 para o HEC-RAS, ambos expressos em dias⁻¹.

2.3.1 Coeficientes das reações

Em estudos em que não se tem um conjunto suficiente de dados para calcular os coeficientes das reações expressas na modelagem, comumente se utiliza os valores de referência da literatura, os quais variam conforme as diversas características da água.

Desta forma, o coeficiente de desoxigenação varia conforme as características da matéria orgânica, a temperatura da água e a presença de substâncias inibidoras. Sendo assim, os valores de referência encontrados na literatura para os coeficientes de remoção de DBO (K_1 , K_s , K_d e K_r), ajustados para temperatura de 20°, são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de referência de coeficientes para remoção de DBO

Origem	K_1	Rios rasos		K_r	Rios Profundo		
		K_d	K_s		K_d	K_s	K_r
Curso de água recebendo esgoto bruto concentrado	0,35 - 0,45	0,50 - 1,00	0,10 - 0,35	0,60 - 1,35	0,35 - 0,50	0,05 - 0,20	0,40 - 0,70
Curso de água recebendo esgoto bruto de baixa concentração	0,35 - 0,40	0,40 - 0,8	0,05 - 0,25	0,45 - 1,05	0,30 - 0,45	0,00 - 0,15	0,30 - 0,60
Curso de água recebendo afluente primário	0,35 - 0,40	0,40 - 0,8	0,05 - 0,10	0,45 - 0,90	0,30 - 0,45	0,00 - 0,05	0,30 - 0,50
Curso de água recebendo afluente secundário	0,12 - 0,24	0,12 - 0,24	-	0,12 - 0,24	0,12 - 0,24	-	0,12 - 0,24
Curso de água com águas limpas	0,08 - 0,20	0,08 - 0,20	-	0,08 - 0,20	-	-	0,08 - 0,20

Fonte: Manual do usuário QUALI-TOOL (2017)

Além disso, EPA (1985) e Thomann e Mueller (1987) sugerem equações para determinação do K_d , em função das características hidráulicas (profundidade e vazão), segundo a Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de referência do coeficiente de decomposição da DBO (K_d)

Fórmula	Faixa de aplicação aproximada
$K_d=0,3.(H/2,5)^{-0,434}$	$H \leq 2,5m$
$K_d=0,3$	$H > 2,5m$
$K_d=1,80.(Q)^{-0,49}$	$0,3m \leq H \leq 10m$ $0,15m \leq Q \leq 250m^3$

Nota: Vazões acima de $20m^3/s$, o coeficiente de K_d é consistente com determinação de DBO no laboratório.

Fonte: Von Sperling (2007)

O coeficiente de reaeração (K_2) envolve fórmulas conceituais e empíricas, relacionando-se com profundidade e velocidade do curso de água. Neste caso, na literatura encontram-se três principais pesquisadores que criaram fórmulas com faixas de atuação que se complementam e com dados de entrada facilmente obteníveis, segundo Von Sperling (2007). A Tabela 4 apresenta as equações de referência para determinação do coeficiente K_2 .

Tabela 4 – Valores de referência do coeficiente de reaeração (K_2)

Pesquisador	Fórmula	Faixa de aplicação aproximada
O'Connor & Dobbins (1958)	$3,73 \cdot v^{0,5} \cdot H^{1,5}$	$0,6m \leq H \leq 4m$ $0,05m/s \leq v \leq 0,8m/s$
Churchill et. al (1962)	$5 \cdot v^{0,97} \cdot H^{1,67}$	$0,6m \leq H \leq 4m$ $0,08m/s \leq v \leq 1,5m/s$
Owens et. al (apud Branco, 1978)	$5,3 \cdot v^{0,67} \cdot H^{1,85}$	$0,1m \leq H \leq 0,6m$ $0,05m/s < v < 1,5m/s$

Notas:

V: velocidade do curso de água (m/s)

H: altura da lâmina de água (m)

Faixa de aplicabilidade adaptadas e ligeiramente modificadas de Covar (apud EPA, 1985), para efeito de simplicidade

Tributários ($Q < 10m^3/s$ - equação de Owens et. al): $K_2 = 15,98 \cdot Q^{-0,60}$

Rios principais ($Q > 10m^3/s$ - equação do O'Connor): $K_2 = 20,74 \cdot Q^{-42}$

Fonte: Manual do usuário QUALI-TOOL (2017)

Para os coeficientes da modelagem do fósforo, referentes aos processos de sedimentação do fósforo orgânico (K_{spo}), conversão do fósforo orgânico a inorgânico (K_{oi}) e liberação do fósforo inorgânico para sedimento de fundo (S_{Pinorg}), estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de referência dos coeficientes da modelagem do fósforo

Símbolo	Descrição	Unidade	Valores intermediários do coef.	Coef. de temperatura
K_{spo}	Coef. De sedimentação do P orgânico	d^{-1}	0,02 a 0,05	1,024
K_{oi}	Coef. De conversão do P orgânico a P inorgânico	d^{-1}	0,2 a 0,3	1,047
S_{Pinorg}	Fluxo de liberação do P inorgânico pelo sedimento de fundo	$g/m^2.d$	0,0 a 0,2	1,074

Fonte: Manual do usuário QUALI-TOOL (2017)

Para os coeficientes do modelo de nitrogênio (K_{sno} , K_{oa} , K_{an} , K_{nn} , S_{amon}), a Tabela 6 apresenta um resumo dos valores típicos dos coeficientes de reação, para uma temperatura de 20°C, do ciclo de nitrogênio em cursos de água.

Tabela 6 - Valores de referência dos coeficientes da modelagem do nitrogênio

Coef.	Descrição	Unida de	Valores Usuais de Coef. (20°C)	Coef. De Temp.
K_{so}	Coef. de sedimentação do N	d^{-1}	Remanso: 0,10 Rios lentos com águas naturais a moderadamente poluídas: 0,05 Rios lentos com águas fortemente poluídas: 0,10 Rio rápidos com águas naturais: 0,020 Rios rápidos com águas moderadamente poluídas: 0,05 Rios rápidos com águas fortemente poluídas: 0,10 Corredeiras: 0,0	1,024
K_{oa}	Coef. de conversão do N orgânico a amônia	d^{-1}	0,20 - 0,25	1,047
K_{an}	Coef. de conversão da amônia a nitrito	d^{-1}	0,15 - 0,25	1,08
K_{nn}	Coef. de conversão de nitrito a nitrato	d^{-1}	Cursos de água profundos: 0,10 - 0,50 Cursos de água rasos: 0,20 - 1	1,047
S_{amon}	Fluxo de liberação de amônia pelo sedimento de fundo	$\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$	0,00 - 0,50 (menores valores para rios limpos e rápidos)	1,047
F_{nitr}	Fator de correção do coef. De nitrificação em função do OD	—	$f_{nitr} = 1 - e^{knitrood.od}$	—
K_{nitrOD}	Coef. de Inibição da nitrificação por baixo OD	L/mg	0,6	—
RO_{2Amon}	Relação entre o O consumido por unidade de amônia oxidada a nitrito	$\text{mgO}_2/\text{mgN}_{amo}$	3,3	—
RO_{2nitr}	Relação entre o O consumido por unid. de nitrito oxidado a nitrato	$\text{mgO}_2/\text{mgN}_{nitr}$	1,1	—

Fonte: Manual do usuário QUALI-TOOL (2017)

2.4 PRINCIPAIS MODELOS DE QUALIDADE DA ÁGUA

Diante da importância dos estudos de autodepuração para o planejamento dos recursos hídricos, os modelos matemáticos vêm sendo empregados na simulação dos fenômenos reais que ocorrem nos cursos de água, constituindo-se de valiosas ferramentas para análises das condições atuais e futuras da qualidade das águas.

O pioneiro no estudo de qualidade da água foi o modelo de Streeter Phelps (1925), concebido para o rio Ohio nos Estados Unidos, com o objetivo de estudar o comportamento do oxigênio

dissolvido após um corpo receptor ser atingido por uma carga poluente, e como consequência colaborar para aumentar a eficiência das ações a serem tomadas no controle da poluição. O modelo matemático é constituído por uma equação de desoxigenação (parte biodegradável da matéria orgânica) e uma de reaeração atmosférica (solubilização do oxigênio na água), dois principais fenômenos integrantes do balanço de oxigênio. Para aplicação correta do modelo, faz-se necessário o conhecimento de alguns parâmetros importantes, como a vazão do sistema e da carga pontual poluidora, temperatura da água, a DBO e o OD do sistema e os coeficientes de desoxigenação e reaeração.

No Brasil, a maioria dos estudos de simulação de oxigênio dissolvido é feita utilizando o clássico modelo de Streeter Phelps, pelo fato de ser uma ferramenta simples conceitualmente e de não exigir grande quantidade de dados de entrada e parâmetros para modelagem (VON SPERLING, 2007). Desta forma, a estrutura do modelo serviu de base para maioria dos modelos mais avançados disponíveis atualmente para estudos de qualidade da água.

A partir da década de 60, iniciou-se o desenvolvimento de novos modelos, partindo da preocupação de disponibilidade limitada de recursos naturais, considerando então os problemas causados pela eutrofização dos rios e na sequência, a preocupação passou a ser quanto aos impactos causados por substâncias tóxicas, no meio ambiente aquático (FLECK, TAVARES, EYNG, 2013).

Wang et. al. (2003), classificaram em três importantes etapas a evolução dos modelos:

- Estágio primário (1925 a 1965): fase de utilização do modelo simples de OD e DBO, aplicando o modelo unidimensional de Streeter-Phelps para resolver problemas de poluição em rios e estuários. A partir daí, houveram modificações neste modelo, como a inclusão de coeficientes, por exemplo o de floculação, e novos efeitos a serem analisados, como a dispersão.
- Estágio de melhoria (1965 a 1995): fase de atualização do modelo unidimensional para um modelo bidimensional, além da criação de modelos não lineares.
- Estágio de aprofundamento (após 1995 até 2018): fase de integração dos modelos de qualidade da água com modelos de simulação da poluição do ar.

Mais de 100 modelos de qualidade de água foram desenvolvidos até hoje. Cao e Zhang (2006), classificaram esses modelos baseados nos tipos de corpos de água, em coeficientes

de qualidade da água, em componentes da qualidade da água, na propriedade do modelo, dimensão espacial e cinética da reação.

Já Guimarães (2017), levantou os principais modelos criados no mundo em ordem cronológica, desde o precursor Streeter-Phelps até modelos mais recentes.

Partindo da linha de evolução dos modelos matemáticos, percebe-se um grande espaço de tempo entre o modelo precursor de Streeter Phepls e os demais desenvolvidos para análise da qualidade da água. É notório a gama de trabalhos publicados que partiram da utilização do modelo clássico e ainda hoje é bastante utilizado em trabalhos de qualidade da água.

Rinaldi e Soncini (1977) mostram a simplicidade deste modelo no cálculo de variações de OD e DBO quando variados alguns parâmetros que caracterizam o sistema fluvial (carga poluidora, vazão, temperatura, etc.) e sua eficiência no entendimento de fenômenos relativamente complexos.

Scavia et. al (2006) utilizaram o modelo de Streeter Phelps para calcular os perfis de concentração de oxigênio no período de verão ao longo do corpo de água principal da Baía de Chesapeake, o maior estuário nos Estados Unidos. A baía têm sido foco de diversas pesquisas com objetivo de redução das cargas poluidoras na água, para atingir um padrão de qualidade aceitável. Desta forma, utilizando um modelo menos complexo, os pesquisadores objetivaram resultados significativos da sua aplicação.

Ainda, Fan, Wang e Liu (2012) estudaram a qualidade da água no rio Tan-Sui e seus afluentes, afetada significativamente pelas marés. Sendo o rio a principal fonte de abastecimento do norte de Taiwan, os estudiosos combinaram o modelo de Streeter Phelps, utilizado para calcular a degradação de contaminantes e a reoxigenação da água, associando o modelo hidráulico HEC-RAS para avaliar o impacto das marés na qualidade do rio. Apesar de dados limitados para o estudo, os autores obtiveram resultados positivos na combinação dos dois modelos.

No Brasil, Mendes (2014), fez uma adaptação do modelo clássico para modelagem de OD e DBO na bacia do Alto Jaguaribe no Estado do Ceará, considerando o efeito de vazões incrementais e lançamentos de esgoto ao longo do corpo hídrico, assim como a variabilidade das seções dos rios e tributários. A evolução da complexidade dos modelos foi expressiva conforme o aumento dos problemas ambientais e os avanços da tecnologia no decorrer dos

anos. Sendo assim, os modelos evoluíram-se, passando a abranger mais variáveis de estado, como nutrientes do ciclos de nitrogênio (N), fósforo (P) e carbono (C).

Com isso, a partir da década de 70 vieram os modelos da série QUAL, desenvolvidos pela *US Environmental Protection Agency* (USEPA), são eles: QUAL I, QUAL II, QUAL2E (Fischer, 1995), QUAL2E-UNCAS e QUAL 2K (Chapra et al, 2006). Eles evidenciaram o salto da evolução histórica dos modelos trazendo análises de poluição dendrítica de fontes difusas e não pontuais, incluindo modelos unidimensionais de estado estacionário ou dinâmicos. Estes modelos têm sido largamente utilizados até hoje, não só no controle da qualidade das águas, mas também, para prognosticar danos decorrentes da implantação de empreendimentos (BEZERRA, MENDONÇA e FRISCHKORN, 2008).

A utilização dos modelos da família QUAL é notada em diversos estudos na literatura, como Drolc e Koncan (1995) que fizeram uso do modelo de qualidade da água superficial QUAL2E para estimar o impacto das descargas de águas residuais na qualidade água do rio Sava, na Eslovênia, já que este recebe afluente de dois rios próximos. Com os resultados da análise de sensibilidade das concentrações de OD do rio utilizando a ferramenta, foi possível estimar um tratamento das águas residuais para períodos de vazão crítica, a fim de enquadrar os níveis de DBO do rio nas normas eslovenas.

Paliwal, Sharma e Kansal (2006) aplicaram o modelo QUAL2E para determinar as cargas poluidoras do rio Yamuna, dentro do território de Delhi na Índia. Com os resultados do modelo, utilizaram de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para produzir mapas com demarcação de zonas poluídas ao longo do trecho do rio, que serviram de eficientes ferramentas para gestão e controle da bacia.

A evolução do modelo QUAL 2E em QUAL 2k foi gerada a partir da introdução de alguns parâmetros adicionais como hidráulica, elevação, conversão da mortandade de algas em DBO, desnitrificação e alteração no OD causada por plantas fixas. Além disso, QUAL2E-UNCAS é o módulo de análise de incertezas do QUAL 2E, em que os resultados produzidos pelo modelo são médias, percentis e intervalos de confiança para os trechos de rios simulados e permitem a análise de incertezas sobre os dados de entrada e suas previsões.

Fan, Ko e Wang (2009) utilizaram uma combinação de dois modelos para avaliar a qualidade da água do rio Keelung River, o maior rio da capital Taiwan, Taipei. Os autores usaram o modelo QUAL 2k para simulação de DBO, nitrogênio amoniacal e fósforo total, e o HEC-

RAS para estimar as constantes hidráulicas. A combinação dos dois modelos resultou em índices de qualidade da água concordantes com os dados de monitoramento do rio.

Além dos modelos da família QUAL, a EPA desenvolveu o modelo WASP em 1983, considerado um dos modelos mais utilizados nos Estados Unidos. O modelo é adequado para simulação da qualidade da água em rios, lagos, estuários, zonas costeiras e reservatórios. A ferramenta proporciona uma simulação em uma, duas ou três dimensões, incluindo uma série de poluentes. Além disso, pode-se vincular o modelo a outras ferramentas hidrodinâmicas e de transporte de sedimentos.

Em se tratando de ferramentas mais atuais, vê-se o modelo de apoio e suporte a decisão AQUATOOL, que foi desenvolvido e continua sendo aprimorado pela Universidade Politécnica de Valencia (UPV), em Valência, na Espanha. Tem por objetivo servir de ferramenta para gestão operacional e para planejamento de etapas de tomada de decisão em bacias complexas, as quais compreendem múltiplos reservatórios, aquíferos e centros de demanda (ANDREU; CAPILLA; SANCHIS, 1995).

Percebe-se o crescimento na demanda de estudos utilizando o modelo espanhol como, por exemplo, Paredes-Arquiola et al. (2010) que aplicaram o módulo de quantidade (SIMGES) e qualidade (GESCAL) na bacia no Júcar, no leste da Espanha, examinando diferentes cenários futuros do recurso, possibilidades de tratamento e ações para melhoria da qualidade da água em parte do rio.

Já Salla, et. al (2014a) integraram o módulo de quantidade e qualidade na análise de três cursos de água da bacia do Rio Araguari (Araguari, Quebra Anzol e rio Uberabinha), obtendo resultados satisfatórios na maioria dos parâmetros modelados na pesquisa.

Salla et. al (2014b) utilizaram o AQUATOOL na avaliação da capacidade de autodepuração do rio Uberaba, obtendo perfis longitudinais de oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrato e fósforo total.

Outros modelos também são utilizados em pesquisas de qualidade da água, como por exemplo o modelo físico-matemático computacional de autodepuração de rios desenvolvido por Yu & Salvador (2004), que possibilita a determinação do perfil do OD e da DBO de rios. Cunha e Ferreira (2006), utilizaram o modelo de qualidade pertencente ao Sistema de Base Hidrodinâmica Ambiental, denominado SisBAHIA®, o qual considera os ciclos do nitrogênio, fósforo e o balanço de oxigênio. Já Gonçalves e Giorgetti (2013), utilizaram o

software gratuito Versim PLE ®, na modelagem de um escoamento não permanente, obtendo resultados satisfatórios quando comparados aos famosos modelos da família QUAL.

Neste trabalho de mestrado foram utilizados os modelos QUAL-UFMG, QUALI-TOOL e HEC-RAS para análise da qualidade da água do rio Jordão – MG. Desta forma, serão abordados com mais detalhes separadamente nos próximos tópicos.

2.4.1 Ferramenta QUAL-UFMG

Também derivado do QUAL 2E, o modelo brasileiro em formato de planilha de Excel, QUAL-UFMG foi criado pela Universidade Federal de Minas Gerais. Tem interface amigável, trabalha com simulações em uma dimensão e é amplamente utilizado no Brasil para simulações de rios com vazões relativamente baixas e escoamentos em regime permanente. Seus resultados são em formatos de gráfico e de fácil interpretação. As informações de auxílio ao usuário são encontradas no livro de Von Sperling (2007), onde se tem os direcionamentos para operação do modelo e exemplo de aplicação.

A ferramenta em formato de planilha é composta por quatro abas, sendo:

-FórmulasCoefic: contém as equações que serão utilizadas, além dos valores de referência dos coeficientes das equações da modelagem;

-DiagramaUnifilar: é uma planilha utilizada para a descrição e o detalhamento do diagrama unifilar do recurso hídrico que está sendo modelado;

-RioPrincipal: é uma planilha que contém as características da modelagem do rio principal. Nessa planilha, são feitos os cálculos e os resultados são obtidos;

-Tributário1: esta planilha é opcional, caso o usuário deseja realizar a modelagem de algum tributário do rio principal. Assim, caso essa planilha seja utilizada, os resultados obtidos na mesma devem ser transferidos para a planilha RioPrincipal. Podem existir tantas planilhas Tributário1 quanto forem necessárias, variando conforme o número de tributários que se deseja modelar.

Segundo Von Sperling (2007), sua estrutura é bastante similar ao seu precursor, porém com a não inclusão das algas nas suas inter-relações com os demais constituintes, devido a maior dificuldade na representação confiável do seu balanço de crescimento, decaimento e sedimentação. Deste modo, os mecanismos de conversão de fósforo inorgânico em biomassa

algal, acréscimo de teores de fósforo orgânico devido às algas, interação do nitrogênio amoniacal e do nitrato com algas não são computados. Justifica-se esta exclusão das algas do modelo pelo fato de ser importante apenas em simulações de ambientes lênticos.

Segundo Salla (2013), o QUAL-UFMG modela seus constituintes em condições de anaerobiose com fenômenos, mecanismos e processos integrantes do balanço de oxigênio dissolvido. Ele considera a sedimentação da matéria orgânica, o consumo de oxigênio dissolvido pela nitrificação (oxidação da amônia a nitrito e depois a nitrato) e as cargas difusas externas e internas sem vazão (demanda do sedimento, fotossíntese e respiração).

A ferramenta QUAL-UFMG já foi utilizada nas simulações de diversos cenários para os cursos de água componentes do Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal (VON SPERLING, 2007).

No Brasil, Calmon et. al (2016) aplicou o modelo QUAL-UFMG para avaliação da capacidade de autodepuração dos cursos de água da bacia hidrográfica do rio Pardo, no estado do Espírito Santo, simulando os parâmetros DBO e OD. Os resultados do estudo serviram de apoio ao processo de tomada de decisão, acerca do planejamento das metas a serem estabelecidas para efetivação do enquadramento do rio, dentro dos limites estabelecidos em lei.

Já Mourão Júnior (2010) aplicou o modelo QUAL-UFMG na simulação de OD, DBO, série nitrogenada, fósforo (orgânico e inorgânico) e coliformes termotolerantes para o rio Piracicaba/MG. Os dados de qualidade foram retirados de 12 estações monitoradas e serviram para calibração e validação do modelo. Além disso, a autora realizou simulações de cenários de lançamento de esgoto doméstico, com variação de eficiência de tratamento dos parâmetros e obteve resultados positivos na modelagem.

De Paula (2011) e Salla et al. (2013) optaram por utilizar o modelo QUAL-UFMG no estudo de autodepuração da bacia hidrográfica do rio Jordão, trecho localizado no município de Araguari no Triângulo Mineiro/MG. Foram coletados dados de geometria da seção do rio e de qualidade da água tanto no rio principal quanto em dois tributários, realizando assim a calibração e validação do modelo. Com isso, simularam cenários críticos de pré tratamento do esgoto lançado no corpo hídrico, obtendo resultados satisfatórios, na validação do modelo e simulação dos nutrientes da água.

No Nordeste brasileiro, Oliveira Filho e Lima Neto (2018) utilizaram o modelo QUAL-UFMG na modelagem matemática da qualidade da água de um trecho de 36,8 km de extensão do rio Poti em Teresina (PI). Sendo os primeiros a utilizarem o modelo neste rio, os autores avaliaram o oxigênio dissolvido, a demanda bioquímica de oxigênio e coliformes termotolerantes, tanto para calibração quanto para simulação de cenários de vazão mínima e máxima, apresentando resultados coerentes aos medidos. De acordo com a pesquisa, os resultados da modelagem servem para serem utilizados como ferramenta de gestão dos recursos hídricos do estado do Piauí.

2.4.2 Ferramenta QUALI-TOOL

A ferramenta computacional QUALI-TOOL foi desenvolvida em formato de planilha eletrônica, pelo grupo de pesquisa da área de recursos hídricos e saneamento ambiental do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Permite simular a qualidade da água em ambiente lótico em escala local (apenas trechos de rios) e em escala de bacia hidrográfica, limitando-se a quinze tributários no rio principal. Ela possui um manual de usuário com as diretrizes para operação do modelo e um exemplo de aplicação.

De acordo com Magalhães, Salla e Alamy Filho (2017), a ferramenta tem como objetivo principal auxiliar alunos e pesquisadores das diversas áreas de conhecimento, no entendimento dos processos físicos, químicos e biológicos dos parâmetros de qualidade de água em ambiente natural lótico. Considera-se como dado de entrada da ferramenta cargas poluidoras pontuais e difusas e retiradas pontuais consuntivas e não consuntivas. Nesta primeira versão, foi desconsiderada a interação das águas superficiais com as subterrâneas.

Os processos que o modelo QUALI-TOOL simula são: decomposição, decaimento, sedimentação, ressurgimento de fundo, reaeração e conversões (nitrificação e amonificação).

A ferramenta em formato de planilha também é dividida em abas em que cada uma é referente a uma etapa do processo de modelagem:

- Topologia: local de inserção das coordenadas geográficas do rio principal e seus tributários que serão analisados;
- Seções Transversais: local de inserção de dados hidráulicos e geométricos da seção transversal;

- Discretização: local que se obtém as células discretizadas mediante a escolha da quantidade de nós que fará parte da malha. Esta etapa otimiza a solução numérica da ferramenta;
- Vazões Pontuais e Vazões Difusas: local que se relaciona os lançamentos ou retiradas pontuais ou difusas no curso de água principal e em seus tributários;
- Hidráulica: aba que gera valores hidráulicos como vazão, ângulos de talude esquerdo e direito em radianos em função do comprimento do rio (m);
- Concentrações Pontuais e Concentrações Difusas: local onde se informa os valores de concentrações pontuais e difusas dos diversos parâmetros de qualidade da água, em mg/L;
- Coeficientes: local onde o usuário cadastra os coeficientes, velocidades de sedimentação e cargas por área pertencentes as equações matemáticas que representam o termo fonte na equação de difusão-advecção;
- Concentrações (resultados): aba onde se obtém os resultados qualitativos do estudo em formato de tabelas e gráficos, como os coeficientes discretizados, concentrações dos parâmetros de qualidade da água no rio principal e em seus afluentes;
- Anexos: aba para consulta dos coeficientes da literatura.

Por ainda ser uma ferramenta recente, até a data da defesa deste mestrado, apenas o pesquisador Guimarães (2017) a utilizou para análise da qualidade da água. No estudo, ele avaliou a interferência do uso e ocupação do solo, na qualidade da água da bacia hidrográfica do Ribeirão do Salitre, pertencente a bacia hidrográfica do rio Araguari, em Minas Gerais. O autor partiu da premissa de que a região sofre com indisponibilidade hídrica crítica, tendo a vazão superficial máxima outorgada ultrapassada do seu valor máximo permitido pela legislação vigente. E ainda, possui na cabeceira do principal tributário uma cava de mina de fosfato e grande quantidade de outorgas de irrigação, tornando de grande preocupação a qualidade da água desta região. Deste modo, o balanço hídrico e posterior modelagem de qualidade da água superficial foi realizado por meio da ferramenta computacional QUALITOOL. O autor realizou a calibração do modelo por meio de dados de cinco postos de monitoramento, para período de estiagem e chuvoso. Com o modelo calibrado, pôde analisar cenários de interferência do uso e ocupação do solo, na bacia sobre a qualidade da água.

2.4.3 Ferramenta HEC-RAS

HEC-RAS, abreviação de “*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*”, é uma ferramenta computacional gratuita desenvolvida pela *Corp's Civil Works Hydrologic Engineering Research and Development Program of the U.S.*, da divisão do Instituto de Recursos Hídricos, que tem como função modelar fluxos de água em rios naturais e canais artificiais unidimensionais para escoamento permanente, não permanente e misto. A ferramenta foi concebida com objetivo de servir de instrumento de gestão para rios, portos e outras obras públicas sob jurisdição do órgão, mas encontrou ampla aceitação de outros departamentos desde seu lançamento público em 1995. Junto com a instalação da ferramenta, estão os seguintes documentos: manual do usuário, manual de referência e guia de aplicação contendo exemplos de projetos.

A ferramenta contém quatro componentes unidimensionais de análises: cálculo de perfil de superfície de água em fluxo contínuo, simulação de fluxo instável, cálculos de transporte de sedimentos móveis e análise de qualidade de água.

A ferramenta HEC-RAS, caracterizada como um sistema integrado, foi concebida para uso interativo em um ambiente de rede de multitarefas e multiusuários. O modelo analisa o sistema delimitado por meio de seções transversais, em que calcula a elevação da superfície da água, na seção de montante a jusante. Deste modo, tem-se a modelagem restrita à área demarcada pelas seções e parâmetros construtivos (junções, pontes e estruturas).

A vantagem desta ferramenta é que os quatro componentes do sistema usam a mesma representação geométrica e mesma rotina hidráulica computacional. Com o módulo de qualidade da água, a ferramenta permite adicionar dados de temperatura e simular constituintes da água como algas, OD, DBO e famílias de fósforo e nitrogênio. O HEC-RAS também modela seus constituintes de acordo com processos integrantes do balanço de oxigênio dissolvido, com o incremento da modelagem da temperatura e das algas.

Percebe-se uma complexidade maior na ferramenta pelo fato de incorporar na sua modelagem os parâmetros meteorológicos do ambiente, por meio de dados de radiação solar, incidência de nuvens, velocidade do vento, umidade do ar e pressão atmosférica. Esses dados são importantes na modelagem da qualidade da água uma vez que os processos dos constituintes são interferidos por esses parâmetros externos, como por exemplo a reaeração atmosférica.

Zhang e Johnson (2014) defendem que a ferramenta HEC-RAS tem a vantagem de conter uma interface gráfica de fácil entendimento, uma vez que padroniza dados de entrada e facilita a exibição dos resultados, sendo eficiente na comunicação entre os subcomponentes do modelo.

HEC-RAS tem a tarefa principal inicial de calcular as alturas de lâmina de água a partir das seções transversais do rio predeterminadas no traçado da geometria. Deste modo, percebe-se que os dados de entrada da ferramenta são dados geométricos e dados de fluxos. Com eles, é possível partir para a modelagem da qualidade da água com introdução das cargas poluidoras, coeficientes para cada parâmetros e dados de meteorológicos.

Zhang e Johnson (2014), utilizando a ferramenta HEC-RAS, modelaram os parâmetros OD, DBO, algas, ciclos de nitrogênio e fósforo, em aproximadamente 531 km do baixo rio Minnesota, nos Estados Unidos. Traçaram o rio e suas seções transversais, totalizando 90 segmentos longitudinais, os quais serviram de dados de entrada do modelo. Os dados meteorológicos foram coletados de uma estação de monitoramento no aeroporto de Minneapolis- St. Para as simulações, foram utilizados dados de quatro tributários conhecidos e mais sete outros estimados, em um período de seis anos. Após calibração dos coeficientes, os autores concluíram que a ferramenta traz resultados positivos da simulação de nutrientes, ideal para estudos rápidos ou projetos em que não há muitos dados disponíveis.

Ainda segundo Zhang e Johnson (2014), o módulo de qualidade da água da ferramenta HEC-RAS permite ao usuário realizar previsões realistas baseadas nos efeitos hidráulicos combinados dos processos biológicos e químicos em variações longitudinais da qualidade da água.

Já Arntsen (2016) teve como foco de estudo o rio Hoffselva, um dos principais rios de Oslo na Noruega. Aplicou-se o modelo hidrodinâmico e de qualidade da água unidimensional HEC-RAS, com objetivo de colaborar com projetos do município de Oslo que visam atingir uma meta de bom estado químico e ecológico do rio até 2021, investigando e discutindo o potencial influenciador da melhora da qualidade da água da região. Na modelagem o autor simulou diferentes cenários, sob diferentes condições do rio.

Suliman (1985) utilizou a combinação do HEC-RAS e QUAL2E no rio Johor, no Estado de Johor, Malásia. As estimativas de mudanças hidráulicas do rio causadas pelas descargas de esgoto e o cálculo da capacidade de transporte de sedimentos ficou por conta do HEC-RAS, enquanto que a simulação de OD e DBO foi modelada pelo QUAL2E.

Já Halaj et. al (2014) compararam resultados da análise da qualidade da água do rio Ondava, na Eslováquia, simulando a propagação da poluição que chega no rio principal a partir do seu afluente, rio Ladomirka. Foram utilizados dois modelos para análise, o unidimensional HEC-RAS e o bidimensional MODI, em uma modelagem da dispersão de poluentes ao longo do rio. Os resultados obtidos da mesma simulação foram divergentes, concluindo que o modelo MODI tem potencial para simulação de rios de maiores comprimentos, enquanto que o HEC-RAS fornece resultados de curto alcance. Isso porque o modelo 1D resultou em concentrações médias de 3 a 7 vezes menores que a concentração máxima no mesmo tempo e distância do perfil simulado pelo MODI. No caso específico do rio Ondava, os autores concluíram que a melhor escolha seria o modelo 2D, o qual mostra a estrutura espacial detalhada quanto a distribuição de contaminantes no tempo, bem como a posição exata da saída da fonte poluidora e seus reflexos a jusante.

Diante desta revisão bibliográfica, percebeu-se autores utilizando a combinação de duas ferramentas para análise do comportamento em rios, sendo um modelo para cálculo das características hidrológicas e outro para o cálculo da qualidade da água. A ferramenta HEC-RAS foi utilizada em diversos estudos pelo mundo para cálculo hidráulico, mas também se destaca em alguns estudos por seu módulo de qualidade.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Para a avaliação da capacidade de autodepuração de um corpo hídrico é necessário conhecer as principais características físicas e hidráulicas da região em estudo, compreender o equacionamento matemático, assim como organizar os dados fluviométricos e de qualidade da água do rio escolhido. Além disso, é crucial saber manusear a ferramenta computacional.

O foco deste trabalho de mestrado foi avaliar a aplicabilidade das ferramentas computacionais QUAL-UFMG, QUALI-TOOL e HEC-RAS em um curso de água de baixa capacidade hídrica (vazão média anual de 4,8 m³/s). Para isso, foi escolhido um trecho de 46,5 km no baixo curso do rio Jordão, bacia hidrográfica do rio Dourados, Triângulo Mineiro. Os dados de entrada necessários para as simulações matemáticas de autodepuração no rio Jordão (hidráulicos, fluviométricos e de qualidade da água) foram extraídos de trabalhos prévios realizados por Salla et al. (2013) e De Paula (2011).

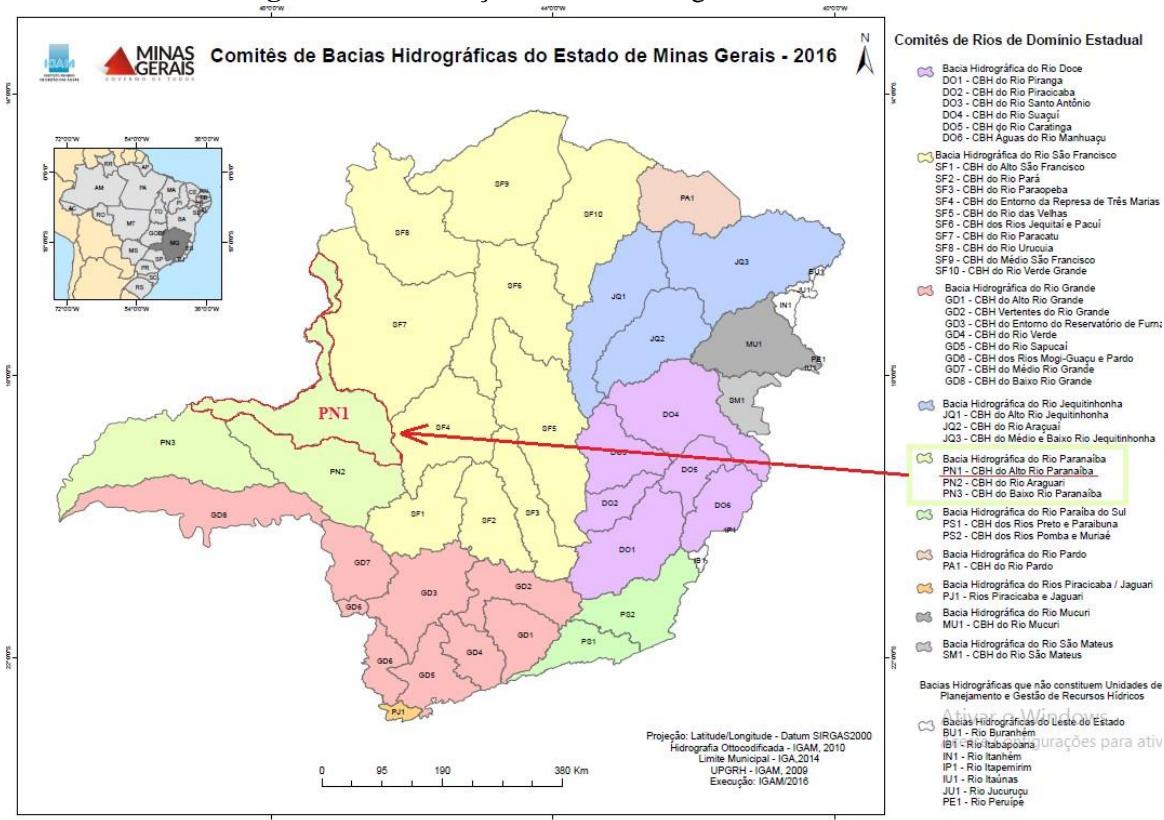
Este capítulo traz a caracterização da área de estudo e os dados de entrada para as simulações, além das descrições das três ferramentas computacionais avaliadas.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Jordão faz parte da sub bacia hidrográfica do rio Dourados, inserida na grande bacia do rio Paranaíba, domínio da União o qual delimita os Estados de Minas Gerais e Goiás, nomeado como PN1, conforme Figura 3. Ambas se inserem numa terceira e maior bacia hidrográfica, a do Paraná, que possui importância significativa na rede hidrográfica do Brasil.

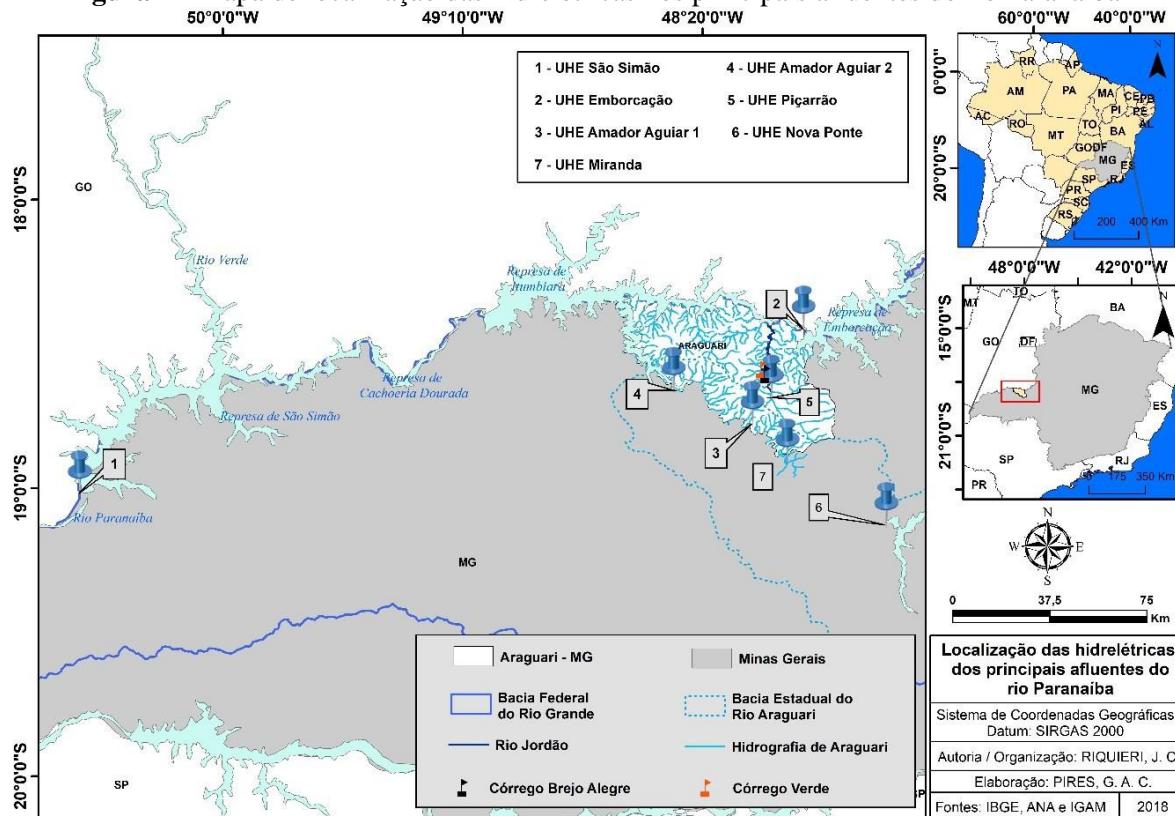
Os rios Araguari, São Marcos, Corumbá e rio Jordão são os principais afluentes do rio Paranaíba. Existem diversas usinas hidrelétricas na região, como a Usina de Emborcação, de São Simão, Amador Aguiar I e II (antigas Capim Branco I e II), Piçarrão Nova Ponte e Miranda, que comprovam o elevado potencial hidrelétrico da região, justificado pela elevada capacidade hídrica e pelas várias quedas de água existentes (Figura 4).

Figura 3 – Localização da bacia hidrográfica do rio Jordão



Fonte: IGAM (2010)

Figura 4 - Mapa de localização das hidrelétricas nos principais afluentes do rio Paranaíba

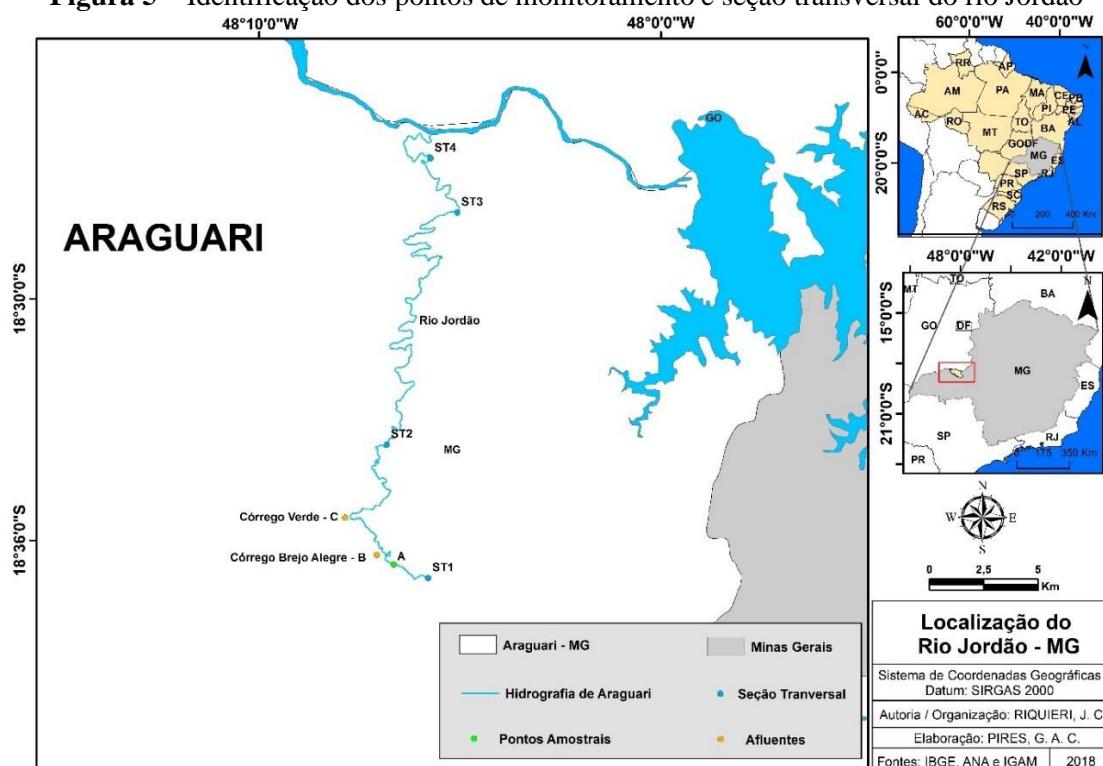


Fonte: Autora (2018)

A sub-bacia hidrográfica do rio Jordão localiza-se a Oeste do Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas $18^{\circ}25'41''$ e $18^{\circ}50'51''$ de latitude Sul e $47^{\circ}49'47''$ e $48^{\circ}12'51''$ de longitude Oeste.

De acordo com a Figura 5, o rio Jordão tem como principal afluente o córrego Brejo Alegre, que recebe afluente bruto gerado pelo município de Araguari-MG. Esta cidade, localizada na porção nordeste do Triângulo Mineiro, entre as coordenadas geográficas $18^{\circ}16'$ e $18^{\circ}56'$ de latitude Sul e $47^{\circ}50'$ e $48^{\circ}41'$ de longitude Oeste, possui uma área de aproximadamente $2.729,508 \text{ km}^2$ e população estimada em 117.445 habitantes, de acordo com IBGE (2017).

Figura 5 – Identificação dos pontos de monitoramento e seção transversal do rio Jordão



Fonte: Autora (2018)

Segundo Pereira e Lima (2015), o córrego Brejo Alegre apresenta um alto grau de degradação ocasionado por inúmeros fatores como: retirada da vegetação nativa, ocupação humana inadequada e desordenada, alteração por meio de aterramento, canalização, impermeabilização do solo etc.

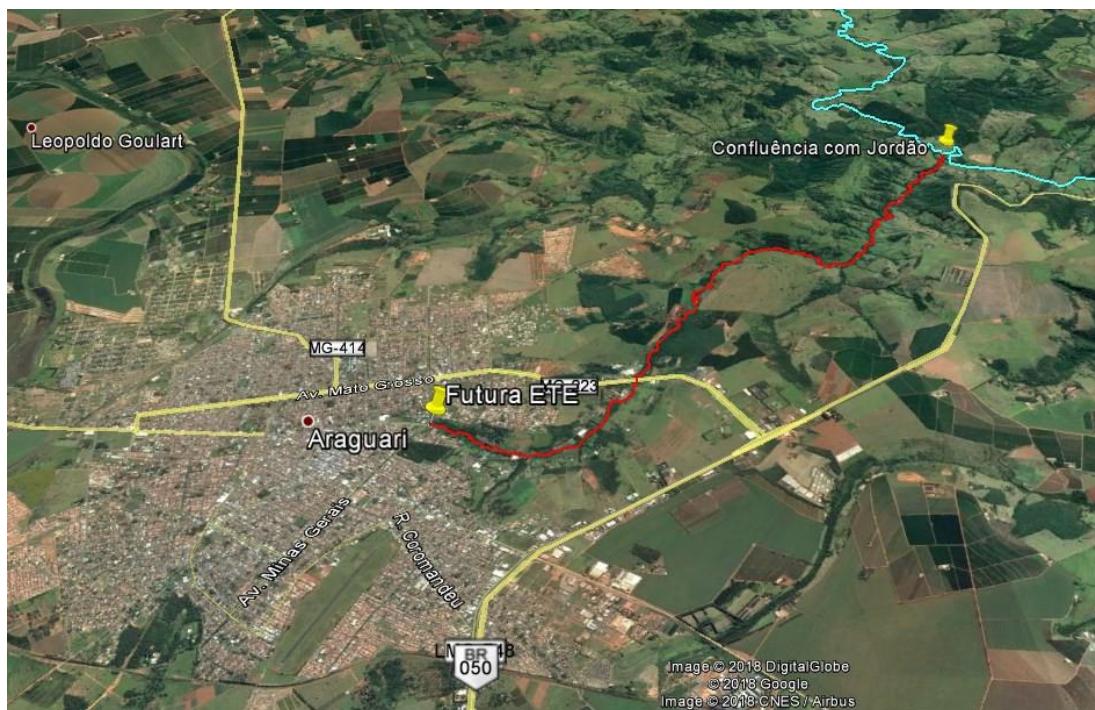
As obras para construção da futura Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Central da cidade de Araguari estão em andamento, após terem sido paralisadas por necessidade de adequações, porém já foram retomadas no começo do ano de 2017, com previsão de término ano final do ano de 2018. A promessa do empreendimento é que pelo menos 90% do esgoto

bruto da cidade seja tratado pela ETE Central Araguari antes de ser lançado do rio. (PREFEITURA DE ARAGUARI, 2018).

A região tem como característica um clima predominantemente tropical de altitude, com uma estação chuvosa (de outubro a abril) e outra seca (de maio a setembro). Durante o verão, percebe-se temperaturas elevadas, com abundâncias de chuva, sendo dezembro o mês mais chuvoso da região de Araguari, verificando uma precipitação de 330mm. No inverno, as precipitações raramente ocorrem, sendo agosto o mês mais seco do ano, com precipitação de 10mm. A temperatura média anual da cidade de Araguari é de 21,2°C (CLIMATE-DATA.ORG, 2018).

Na Figura 6 pode-se localizar o córrego percorrendo a cidade, com desague no rio Jordão, bem como a indicação da futura ETE Central na cidade.

Figura 6 – Localização do Córrego Brejo Alegre e da futura ETE Araguari



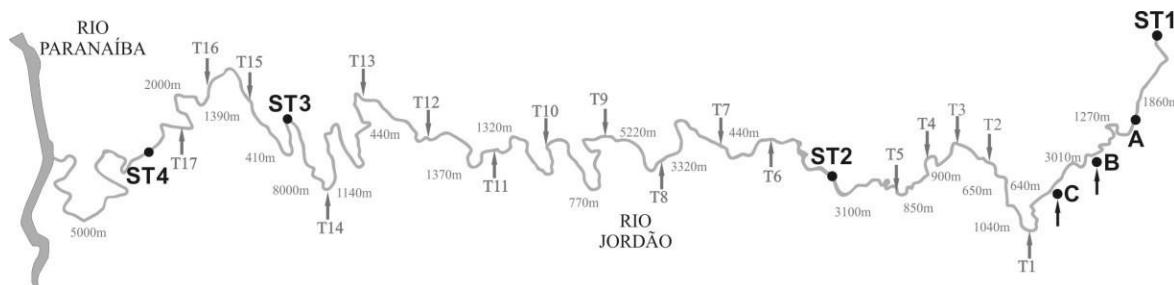
Fonte: Adaptado Google Earth (2018)

De acordo com Pereira e Lima (2015) constataram uma grande concentração urbana na área da sua bacia e nas margens do córrego Brejo Alegre, além de várias indústrias. Ademais, existem áreas na região destinadas à agricultura, como lavouras de café, eucalipto, plantações de frutos e leguminosas

3.2 DIAGRAMA UNILIFAR

A Figura 7 traz o diagrama unifilar no baixo curso do rio Jordão. Foram utilizados três pontos de monitoramento fluviométrico e de qualidade da água utilizados como dados de entrada, sendo o ponto A no rio Jordão (início das simulações) e os outros dois pontos em seus principais tributários, um na foz do córrego Brejo Alegre (ponto B) e outro na foz do córrego Verde (ponto C).

Figura 7 - Diagrama unifilar do baixo curso do rio Jordão



Fonte: Adaptado de De Paula (2011).

Além dos pontos de monitoramento, foram considerados os tributários menores ao longo do trecho do rio Jordão (tributários identificados como T1 até T17 na Figura 7), cujos valores de vazão e qualidade da água foram estimados, considerando água de boa qualidade.

O ponto A corresponde a primeira seção do rio Jordão, antes do ponto de confluência com o córrego Brejo Alegre. Após este primeiro córrego, tem-se a confluência do Jordão com o córrego Verde. A Tabela 7 – Coordenadas geográficas dos pontos de monitoramento e dos tributários traz as coordenadas geográficas dos pontos de monitoramento e dos tributários.

Tabela 7 – Coordenadas geográficas dos pontos de monitoramento e dos tributários

Ponto de estudo		Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)
Rio Jordão	A	18°36.721	048°06.711	647
Córrego Brejo Alegre	B	18°36.471	048°06.929	645
Córrego Verde	C	18°35.507	048°07.837	631
Seções transversais	1ST	18°36'55.98"S	48° 5'47.44"O	689
	2ST	18°33'37.01"S	48° 6'49.00"O	613
	3ST	18°28.019	048°05.378	526
	4ST	18°26'30.04"S	48° 5'44.03"O	523

Fonte: Salla (2013).

As estações de monitoramento ST1, ST2, ST3 e ST4 foram utilizadas para levantamento das seções transversais necessárias nas simulações em ferramenta HEC-RAS, as quais também foram utilizadas no QUALI-TOOL e no QUAL-UFMG.

3.3 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

As simulações de autodepuração foram realizadas nas ferramentas QUAL-UFMG, QUALI-TOOL e HEC-RAS. Foi analisada a operacionalização de cada ferramenta quanto a topologia do sistema hídrico, ao lançamento dos dados hidráulicos, lançamento dos dados fluviométricos e de qualidade de água, lançamento dos coeficientes de reações bioquímicas e de sedimentação e geração e visualização dos resultados. Também foram comparados os perfis longitudinais gerados para os parâmetros de qualidade: oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio orgânico, amônia, nitrato e fósforo total.

3.3.1. QUAL-UFMG

-Informações gerais

A planilha do modelo QUAL-UFMG diferencia as células utilizando cores, sendo que as amarelas são células nas quais o usuário deverá inserir os dados de entrada do rio a ser modelado. Já as de cor cinza contêm valores usuais de coeficientes do modelo, os quais convêm ser verificados.

Existe uma planilha principal nomeada “RioPrincial” e uma outra planilha nomeada “Tributário”. Os dados de entrada são incluídos de forma independente em cada curso de água. As simulações realizadas nos tributários não são reconhecidas no rio principal, o que traz um trabalho extra ao usuário para associar a concentração dos parâmetros simulada na foz dos tributários como dados de entrada no rio principal.

Para a solução da equação de advecção-difusão por diferenças finitas, é necessário informar o passo de discretização (em km). Na ferramenta QUAL-UFMG, o passo de discretização adotado foi de 0,1km.

A ferramenta possibilita ao usuário avaliar a porcentagem de trecho de rio que está em acordo com limites definidos pelo órgão ambiental.

- Topologia do sistema hídrico

A ferramenta QUAL-UFMG não requer obrigatoriamente a criação de uma topologia específica para o funcionamento do programa, uma vez que os dados são inseridos na planilha de cálculo Excel. É recomendado, somente para a boa compreensão do usuário, a criação de um diagrama unifilar que identifica as entradas e saídas pontuais e difusas ao longo do curso de água. Sendo assim, o diagrama unifilar utilizado neste estudo de mestrado foi adaptado de De Paula (2011), conforme ilustra a Figura 7.

- Lançamento dos dados hidráulicos

As características hidráulicas e os dados físicos foram introduzidos como dados de entrada: distância do trecho (em km), altitude do local (em metro), coeficientes a e b da equação potencial $V = a*Q^b$ e coeficientes c e d da equação potencial $H = c*Q^d$. Os valores dos dados físicos estão ilustrados na Figura 8.

Figura 8 - Interface gráfica inicial do QUAL-UFMG (período chuvoso)

1	MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA DE RIOS - QUAL-UFMG		
2	OD, DBO, N, P, COLIFORMES		
3	Marcos von Sperling - UFMG		
4	Referência: Livro: Von Sperling, M. (2007). <i>Estudos e modelagem da qualidade da água de rios</i> . DESA-UFMG.		
5	Versão com vários pontos de entrada pontual e difusa. Preencher os dados de entrada nas linhas e colunas respectivas		
6	Preencher células em amarelo (dados físicos e variáveis do modelo)		
7	Verificar valores nas células cinza (coeficientes do modelo); se necessário, alterá-los		
8	DADOS DE ENTRADA INICIAIS	Símbolo	Valor
9	DADOS DO RIO A MONTANTE (CABECEIRA OU HEADWATER)		
10	Vazão do rio (m ³ /s)	Q _r	15.570
11	OD do rio (mg/l)	OD _r	6.81
12	DBO ₅ do rio (mg/l)	DBO _r	6.71
13	Nitrogênio orgânico do rio (mg/l)	Norg _r	0.30
14	Amônia-N do rio (mg/l)	Namonn _r	0.38
15	Nitrito-N do rio (mg/l)	Nnitritor _r	0.09
16	Nitrito-N do rio (mg/l)	Nnitrat _r	1.26
17	Orgânico do rio (mg/l)	Porg _r	0.02
18	Pinorgânico do rio (mg/l)	Pinorg _r	0.01
19	Coliformes no rio (NMP/100ml)	Colir _r	0.00E+00
20	Temperatura	T	25.63
21	OD saturação (mg/l)	ODsat _r	7.52
22	DADOS FÍSICOS DO RIO		
23	Distância do trecho (km)	d	45.681
24	Altitude acima do nível do mar (m)	Altit	647
25	Velocidade - coeficientes da equação $V = a \cdot Q^b$	a	0.212
26		b	0.558
27	Profundidade - coeficientes da equação $H = c \cdot Q^d$	c	0.568
28		d	0.248

◀ ▶ ... | DiagramaUnifilar | RioPrincipal | +

Fonte: Autora (2018)

A altitude do local é incluída na ferramenta apenas para o cálculo da concentração de saturação de oxigênio dissolvido. A declividade longitudinal do curso de água não é solicitada visto que as grandezas hidráulicas não são obtidas pela equação de Manning.

Como alternativa, a ferramenta QUAL-UFMG permite ao usuário inserir os valores de velocidade média do escoamento, altura da lâmina de água e largura do canal de forma manual.

-Lançamento dos dados fluviométricos e de qualidade da água

Os dados de entrada de vazão e qualidade da água são introduzidos, de forma independente, no rio principal e nos tributários. Tendo em vista o rio principal, inicialmente são inseridos os dados de entrada a montante (ponto A), conforme ilustra Figura 9. Na sequência são introduzidos os dados de entrada pontuais de vazão (tributários e esgoto), dados de entrada difusos de vazão (incremental e esgoto) e captação pontual de água (ver Figura 9). Ainda na Figura 9, a planilha informa ao usuário as diretrizes para percorrer o processo de modelagem por meio de comentários nas células iniciais.

Figura 9 – Lançamento dos dados fluviométricos do QUAL-UFMG (exemplo período chuvoso)

Fonte: Autora (2018)

Os dados de qualidade de água são inseridos da mesma forma, preenchendo com valores de concentrações apenas nos trechos onde houver vazão, deixando em branco as demais células. A Figura 10 traz o lançamento dos dados de DBO5, OD e nitrogênio orgânico na ferramenta QUAL-UFMG para o período chuvoso.

A Tabela 8 traz os dados de entrada de vazão e de qualidade da água adotados para o período de estiagem e chuvoso (SALLA et al., 2013). Obviamente estes dados também foram utilizados para as simulações nas ferramentas OUALI-TOOL e HEC-RAS.

Figura 10 - Lançamento dos dados de qualidade da água do QUAL-UFMG (período chuvoso)

R	S	T	U	V	X	Y	Z	AA	AB	AD	AE	
CONCENTRAÇÕES AFLUENTES E NO TRECHO INICIAL (MISTURA) DO SEGMENTO												
92	Col15	Col16	Col17	Col18	Col19	Col20	Col21					
93												
94												
95												
96	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÉNIO (DBO5)				OXIGÉNIO DISSOLVIDO				NITROGÉNIO ORGÂNICO			
97	PONTUAL	DISTRIBUÍDA	Esgotos	Incremental	Mistura	PONTUAL	DISTRIBUÍDA	Esgotos	Mistura	PONTUAL	Esgoto	Ir
98	Tributário	Esgoto	Incremental	Esgotos	(início segi	Tributário	Esgoto	(início segi	Tributário	Esgoto	(início segi	
99	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	
100												
L01				0.0	6.71			0.00		6.81		
L02				0.0	6.71			0.00		6.81		
L03				0.0	6.71			0.00		6.81		
L29				0.0	6.68			0.00		6.82		
L30				0.0	6.67			0.00		6.82		
L31				0.0	6.67			0.00		6.82		
L32	23,4	0,0			8,25	5,48		0,00		6,69	1,13	
L33				0.0	8,25			0.00		6,69		
L34				0.0	8,25			0.00		6,69		
L35				0.0	8,24			0.00		6,69		
L36				0.0	8,24			0.00		6,69		
L37				0.0	8,24			0.00		6,69		
L38				0.0	8,24			0.00		6,69		

Fonte: Autora (2018)**Tabela 8** - Dados de entrada de vazão e qualidade de água

	Ponto A	Ponto B	Ponto C	T1 a T17
	Estiagem	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso
Vazão (m ³ /s)	5,66	15,57	0,4	1,62
	Estiagem	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso
OD (mg/L)	6,95	6,81	5,55	5,48
	Estiagem	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso
DBO (mg/L)	7,18	6,71	15,3	23,4
	Estiagem	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso
N _{total} (mg/L)	2,01	2,01	4,74	6,84
	Estiagem	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso
Amônia (mg/L)	0,48	0,36	1,27	2,18
	Estiagem	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso
Nitrito (mg/L)	0,03	0,09	0,4	0,55
	Estiagem	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso
Nitrito (mg/L)	1,17	1,26	2,4	2,98
	Estiagem	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso
P _{org.} (mg/L)	0,03	0,015	0,09	0,14
	Estiagem	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso
P _{inorg.} (mg/L)	0,03	0,015	0,09	0,14
	Estiagem	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso

Fonte: Adaptado de De Paula (2011)

- Coeficientes de reações bioquímicas e de sedimentação

A inclusão dos coeficientes na planilha é realizada logo após a inserção dos dados a montante e físicos do rio. Com exceção aos coeficientes de reaeração natural, todos os outros

coeficientes são mantidos fixos para todos os trechos de rio discretizados. A Figura 11 traz a interface gráfica para alimentação dos coeficientes na ferramenta QUAL-UFMG.

Figura 11 - Lançamento dos coeficientes das reações bioquímicas e de sedimentação na ferramenta QUAL-UFMG: (a) coeficientes fixos; (b) coeficientes variáveis (período chuvoso)

		A	B	C	D	E
29						
30						
31	COEFICIENTES DO MODELO					
32					Coeficientes de reação	Coefic. temperatura teta
33						
34						
35	Desoxigenação					
36	Coef. desoxigenação (1/d)		K1		0.12	1.047
37	Coef. decomposição DBO (1/d)		Kd		0.12	1.047
38	Coef. sedimentação DBO (1/d) (0 p/ nenhuma sediment)		Ks		0	1.024
40	Reaeração		K2		variável em f(H e V)	1.024
41	Coef. reaeração K2 - Equações em função de H e V					
42	Nitrogênio					
43	Coef. sedimentação Norg (1/d)		Kso		0.05	1.024
44	Coef. conversão Norg-Namon (1/d)		Koa		0.20	1.047
45	Coef. conversão Namon-Nnitrito (1/d)		Kan		0.15	1.080
46	Coef. conversão Nnitrito-Nnitrito (1/d)		Knn		0.20	1.047
47	Coef. liberação Namon pelo sedimento de fundo (g/m2.d)		Snamon		0.10	1.074
48	O2 equiv. conversão Namon-Nnitrito (mgO2/mgNamon oxid)		O2Namon		3.20	
49	O2 equiv. conversão Nnitrito-Nnitrito (mgO2/mgNnitrito oxid)		O2Nnitri		1.10	
50	Coef. inibição da nitrificação por baixo OD		knitr		0.60	
51	pH (para cálculo NH3 livre)		pH		7.0	
52	Fração de amônia livre		fNH3		0.006	
54	Fósforo					
55	Coef. sedimentação Porg (1/d)		Kspo		0.02	1.024
56	Coef. conversão Porg-Pinorg (1/d)		Koi		0.2	1.047
57	Coef. liberação Pinorg pelo sedimento de fundo (g/m2.d)		Spinorg		0.10	1.074
58						
		...	DiagramaUnifilar	RioPrincipal	+	

(a)

	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD
76												
77												
78												
79												
80												
81												
82												
83												
84												
85												
86												
87												
88	COEFICIENTES DO MODELO QUE PODEM VARIAR AO LONGO DO RIO	Col60	Col61	Col62	Col63	Col64	Col65	Col66	Col67			
89												
90												
91												
92												
93												
94												
95												
96												
97												
98												
99												

(b)

Fonte: Autora (2018)

A Tabela 9 relaciona os coeficientes de reação bioquímica e de sedimentação, os símbolos para cada ferramenta e os valores adotados de Salla et al. (2013). O coeficiente de reaeração k_2 foi calculado a partir de equações da literatura, onde $k_2 = f(h, v, Q)$ (VON SPERLING, 2007).

Tabela 9 - Coeficientes de reações bioquímicas e de sedimentação, símbolos e valores adotados

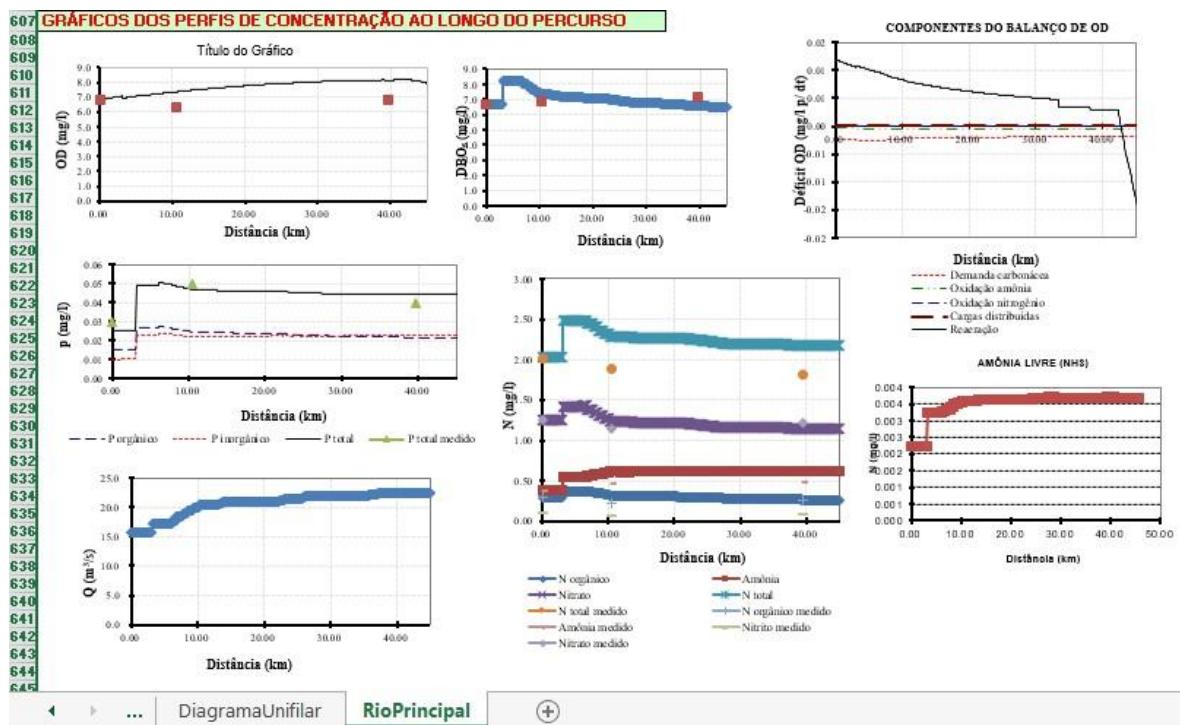
Coeficientes	QUAL-UFMG	QUALI-TOOL	HEC-RAS	Período	
	Símbolo			Chuvoso	Estiagem
Reaeração natural (dia ⁻¹)	k_2			Equações da literatura	
Decomposição DBO (dia ⁻¹)	k_d	k_d	k_1	0,12	0,24
Sedimentação DBO (dia ⁻¹ ou m/d)	k_s	$V_{S_{mo}}$ (m/d)	k_3	0	0
Conversão N _{org} -N _{amon} (dia ⁻¹)	K_{oa}	K_{oa}	β_3	0,20	0,25
Sedimentação N _{org} (dia-1)	K_{so}	$V_{S_{no}}$	σ_4	0,05	0,05
Conversão N _{amon} -N _{nitrito} (dia ⁻¹)	K_{an}	K_{an}	β_1	0,15	0,25
Conversão N _{nitrito} -N _{nitrito} (dia ⁻¹)	K_{nn}	K_{nn}	β_2	0,20	1,00
Liberação N _{amon} por sedimento de fundo (g/m ² .dia)	$S_{n_{amon}}$	$S_{n_{amon}}$	σ_3	0,10	0,50
O ₂ equiv, conversão N _{amon} -N _{nitrito} (mgO ₂ /mgN _{amon} oxid)	O ₂ N _{amon}	RO ₂ Amon	α_5	3,20	3,20
O ₂ equiv, conversão N _{nitrito} -N _{nitrito} (mgO ₂ /mgN _{nitrito} oxid)	O ₂ N _{nitri}	RO ₂ nitr	α_6	1,10	1,10
Inibição da nitrificação por baixo OD	K_{nitr}	$K_{nitr}OD$	KNR	0,60	0,60
Sedimentação P _{org} (dia ⁻¹)	K_{spo}	V_{sp}	σ_5	0,02	0,05
Conversão P _{org} em P _{inorg} (dia ⁻¹)	K_{oi}	K_p	B_4	0,20	0,30
Liberação P _{inorg} por sedimento de fundo (g/m ² .dia)	$S_{p_{inorg}}$		σ_1	0,10	0,10

Fonte: Autora (2018)

- Geração e visualização dos resultados

Os resultados das simulações na ferramenta QUAL-UFMG são apresentados em forma de tabelas e gráficos dos perfis de concentração ao longo do curso de água para os parâmetros OD, DBO, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrato, fósforo total e e-coli. Além disso, a ferramenta fornece as concentrações mínimas e máximas para cada parâmetro e o percentual da extensão do trecho de rio em atendimento à legislação ambiental. A Figura 12 traz alguns resultados gráficos gerados na ferramenta QUAL-UFMG para o período chuvoso.

Figura 12 - Resultados gráficos gerados na ferramenta QUALI-UFMG para o período chuvoso



Fonte: Autora (2018)

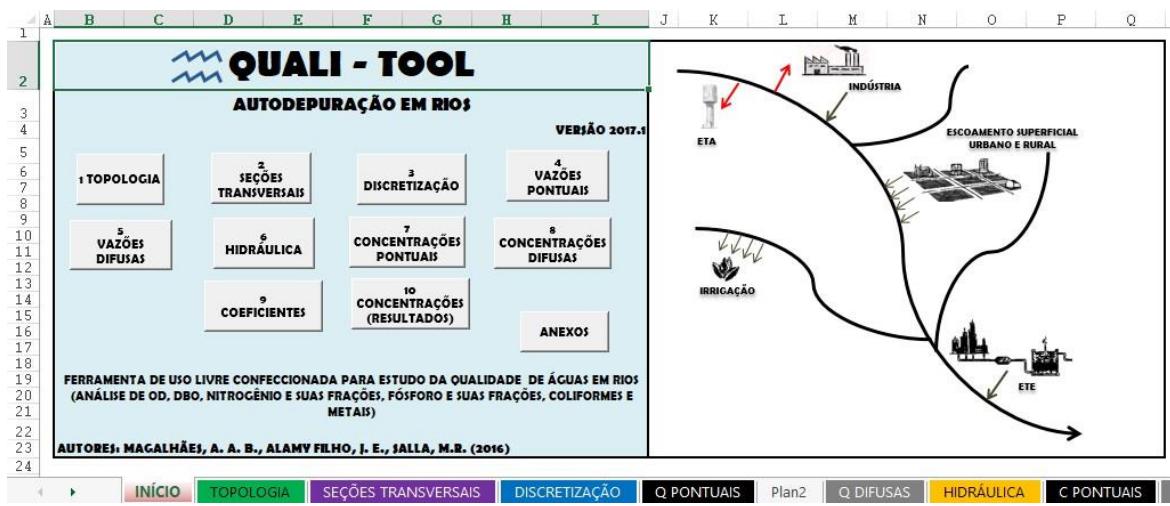
3.3.2 QUALI-TOOL

Informações gerais

A interface gráfica da ferramenta QUALI-TOOL é dividida em planilhas de cálculo e planilhas de cadastro. Conforme Figura 13, as abas denominadas Topologia, Discretização, Hidráulica e Concentrações (resultados) obtêm os cálculos realizados pela ferramenta. Já nas abas denominadas Seções Transversais, Vazões Pontuais, Vazões Difusas, Concentrações Pontuais, Concentrações Difusas e Coeficientes são inseridos os dados de entrada no modelo (cadastro) (MAGALHÃES; SALLA E ALAMY FILHO, 2017). Os dados de entrada são inseridos nas células de cor preta, enquanto que os cálculos realizados pela ferramenta são formatados na cor azul.

Para a solução da equação de advecção-difusão por diferenças finitas, é necessário informar o passo de discretização. Na ferramenta QUALI-TOOL, o passo de discretização adotado foi de 26,5 m, que corresponde a uma discretização em 1600 nós.

Figura 13 - Interface gráfica da ferramenta QUALI-TOOL

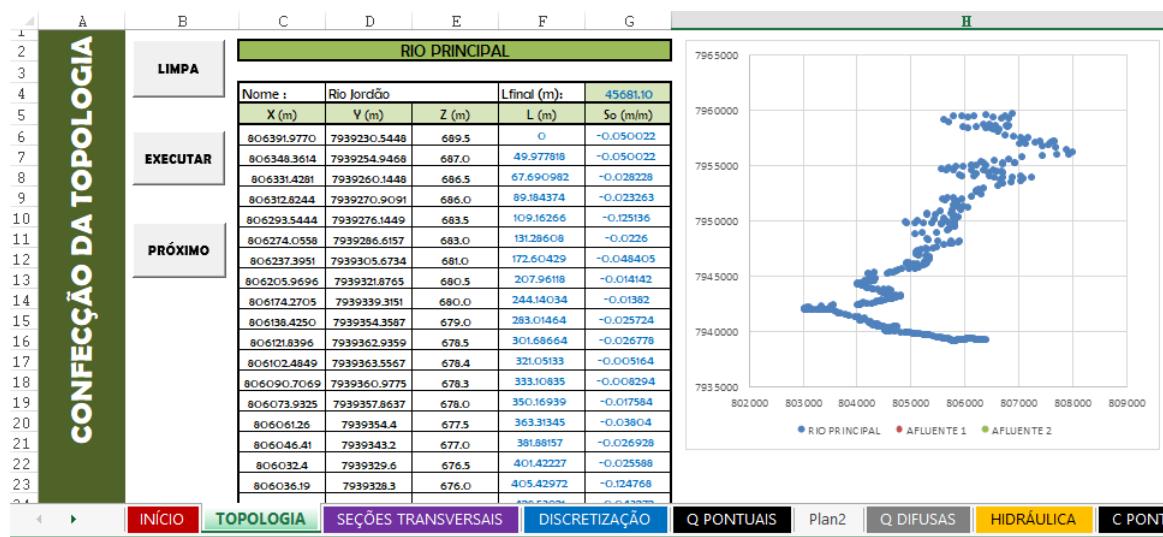


Fonte: Autora (2018)

- Topologia do sistema hídrico

Na ferramenta QUALI-TOOL, a criação de uma topologia do sistema é necessária para o início da modelagem em ambiente lótico. A ferramenta opera com dados de elevação do terreno (Z; em metros) e coordenadas geográficas (X e Y, em UTM) ao longo do curso de água. Para que a ferramenta consiga calcular a declividade do trecho e o comprimento total, é preciso inserir, pelo menos, dois pontos de coordenadas (inicial e final). Quanto mais pontos amostrais ao longo do rio o usuário obtiver, melhor e mais fiel à realidade será a simulação de qualidade da água.

Para a modelagem do rio Jordão foram obtidos 392 pontos com coordenadas UTM ao longo do curso d'água analisado. Para isso, foi utilizado o programa de uso livre, Google Earth. Os pontos foram transformados de graus decimais para metros, utilizando Datum de entrada WGS84. Por meio do lançamento dos pontos geográficos associados aos dados planaltimétricos, a ferramenta calcula a declividade de fundo do rio, em mm, por meio da diferença de altitudes, o comprimento total do rio. A Figura 14 ilustra a interface da aba “Topologia” na ferramenta QUALI-TOOL, na qual estão inseridos os pontos georeferenciados no rio Jordão, os comprimentos e declividades de fundo calculados para trecho e o traçado gráfico da topologia do sistema hídrico

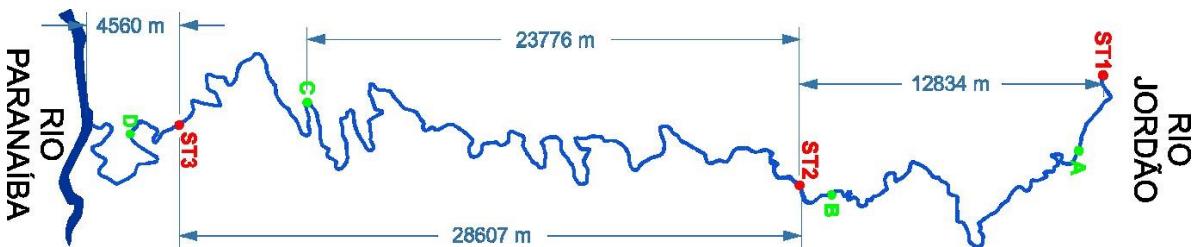
Figura 14 - Interface da aba “Topologia” na ferramenta QUALI-TOOL

Fonte: Autora (2018)

- Inclusão dos dados hidráulicos

Os valores de declividade de fundo do canal, geometria transversal do canal e coeficiente de rugosidade de Manning são fundamentais na obtenção das grandezas hidráulicas por meio da equação de Manning.

As seções transversais ST1, ST2, ST3 e ST4 (identificadas na Figura 15) foram obtidas pelo método acústico de efeito *doppler*, conhecido como ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). Foram consideradas seções transversais fixas entre as estações ST1 e ST2 (adotou a seção ST1 com 12834 m), entre ST2 e ST3 (adotou a seção ST2 com 23776m), entre ST3 e ST4 (adotou a seção ST3 com 4560m) e entre ST4 e a foz do rio Jordão (adotou ST4 com 5,08 km).

Figura 15 – Localização das seções transversais ao longo do rio Jordão

Fonte: Autora (2018)

Conforme já mencionado anteriormente, cada trecho discretizado trouxe informações das coordenadas UTM, comprimento linear de cada trecho (em metros) e declividade de fundo (m/m) (Figura 16). A ferramenta QUALI-TOOL adota uma declividade para cada subtrecho formado entre dois pontos georeferenciados ao longo do curso de água. Com isso, o maior número de pontos georeferenciados propicia declividade de fundo mais realista. A Figura 16 traz a declividade de fundo assumida na ferramenta QUALI-TOOL.

Figura 16 - Declividade de fundo assumida na ferramenta QUALI-TOOL

Fonte: Autora (2018)

Os dados geométricos inseridos na ferramenta QUALI-TOOL para cada trecho estão ilustrados na aba “seções transversais” (Figura 17).

O coeficiente de rugosidade de Manning foi considerado fixo e igual a $0,04 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ (CHOW, 1959).

Figura 17 – Dados geométricos inseridos na ferramenta QUALI-TOOL

RIO PRINCIPAL					
	Lx(m)	b (m)	α_{sq} (°)	n calha	α_{dq} (°)
1	0.00	10.00	27.55	0.04	22.42
2	12834.76	15.00	21.88	0.04	90.00
3	36611.56	21.00	45.00	0.04	90.00
4	41422.52	7.50	7.41	0.04	9.63
5	45681.10	7.50	7.41	0.04	9.63
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					

Fonte: Autora (2018)

- Lançamento dos dados fluviométricos e de qualidade da água

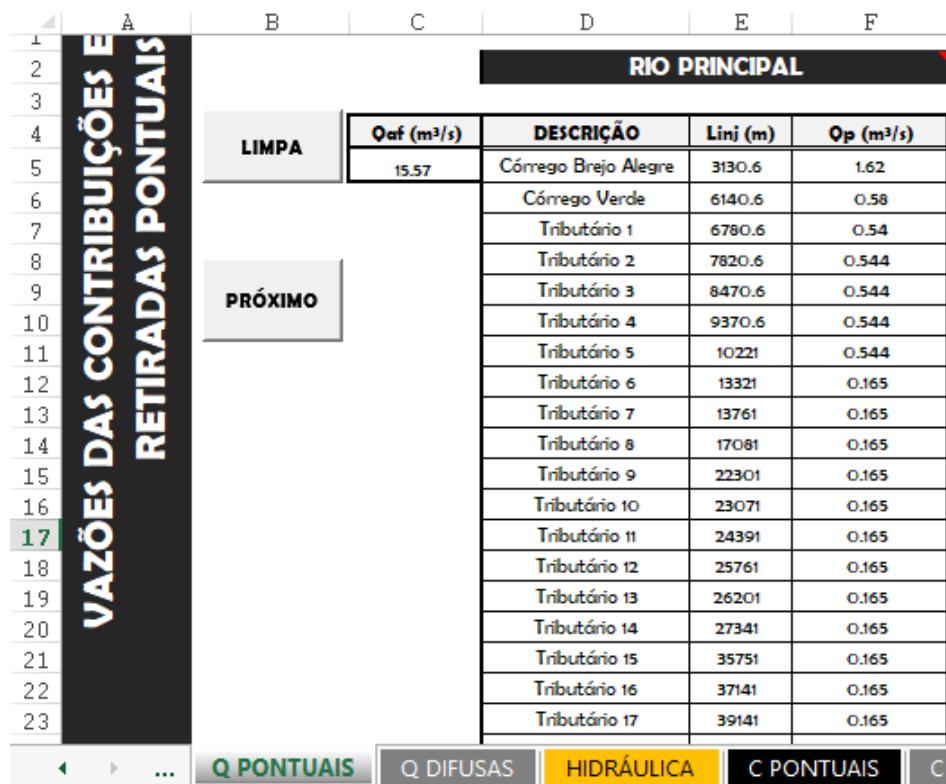
Na ferramenta QUALI-TOOL, a etapa de lançamento dos dados fluviométricos é representada pelas abas: “QPontuais” e “QDifusas”, “Hidráulica” (Figura 18). A aba QPontuais representa o lançamento das contribuições e retiradas pontuais, em m^3/s , em que os valores de vazão inicial Q_{af} (ponto A – rio Jordão) e dos afluentes Q_p (ponto B – córrego Brejo Alegre, ponto C – Córrego Verde e os 17 tributários T1 a T17) foram inseridos de acordo com suas respectivas posições ao longo do rio, obedecendo o ponto A como o início da simulação (distância zero).

Já as vazões difusas não foram consideradas neste trabalho, portanto a planilha “QDifusas” ficou vazia. Após alimentar as abas “Topologia”, “Seções Transversais”, “QPontuais” e “QDifusas”, as grandezas hidráulicas foram calculadas na aba Hidráulica, conforme ilustra a Figura 19.

Na aba “hidráulica”, os resultados hidráulicos foram obtidos por meio de uma sequência de operação, em que a “1º Parte Vazões” gerou os dados hidráulicos como vazão e ângulo de taludes em função do comprimento do rio. A “2º Parte Solver” executou a macro do

programador Solver para calcular a profundidade do rio, em metros. E por fim, a “3º Parte Dinâmica” da hidráulica realizou os cálculos hidráulicos, como a velocidade de escoamento (em m/s), a tensão cisalhante (kPa), o nível de água (em metros) e o número de Froude por meio do balanço hídrico em cada trecho discretizados. O resultado foi obtido em formato de tabelas e gráficos, gerando os perfis de vazão (m^3/s) para os dois períodos modelados e de elevação ao longo da distância do trecho.

Figura 18 - Lançamento dos dados fluviométricos na ferramenta QUALI-TOOL (exemplo período chuvoso)



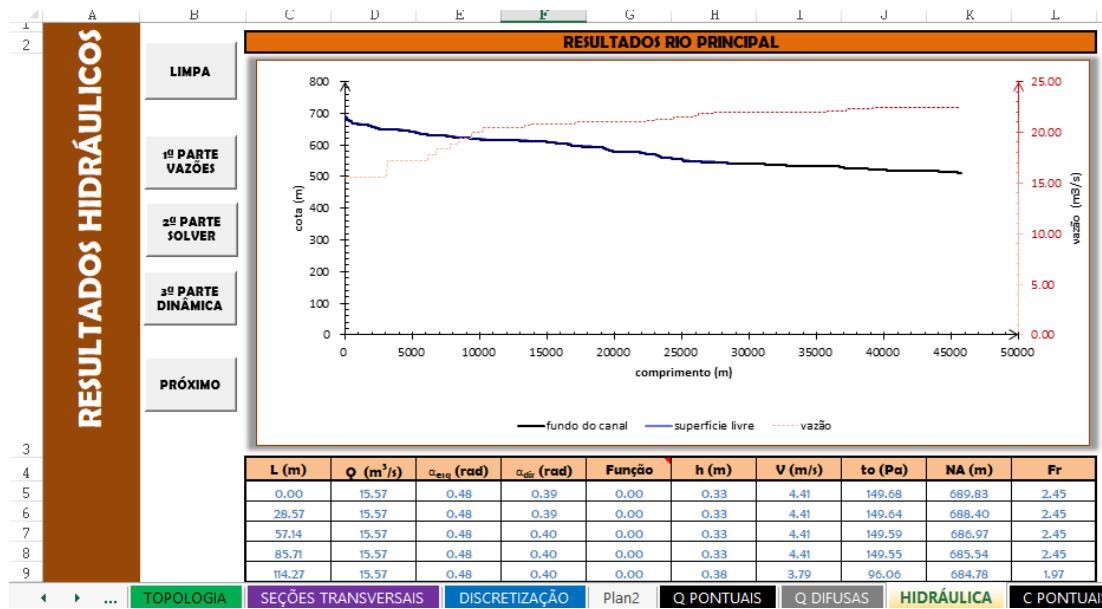
The screenshot shows a software interface for the QUALI-TOOL tool. On the left, a vertical sidebar has the text "VAZÕES DAS CONTRIBUIÇÕES E RETIRADAS PONTUAIS" and a green button labeled "17". The main area is titled "RIO PRINCIPAL" and contains a table with the following data:

LIMPA	Qaf (m^3/s)	Descrição	Linj (m)	Op (m^3/s)
	15.57	Córrego Brejo Alegre	3130.6	1.62
		Córrego Verde	6140.6	0.58
		Tributário 1	6780.6	0.54
		Tributário 2	7820.6	0.544
		Tributário 3	8470.6	0.544
		Tributário 4	9370.6	0.544
		Tributário 5	10221	0.544
		Tributário 6	13321	0.165
		Tributário 7	13761	0.165
		Tributário 8	17081	0.165
		Tributário 9	22301	0.165
		Tributário 10	23071	0.165
		Tributário 11	24391	0.165
		Tributário 12	25761	0.165
		Tributário 13	26201	0.165
		Tributário 14	27341	0.165
		Tributário 15	35751	0.165
		Tributário 16	37141	0.165
		Tributário 17	39141	0.165

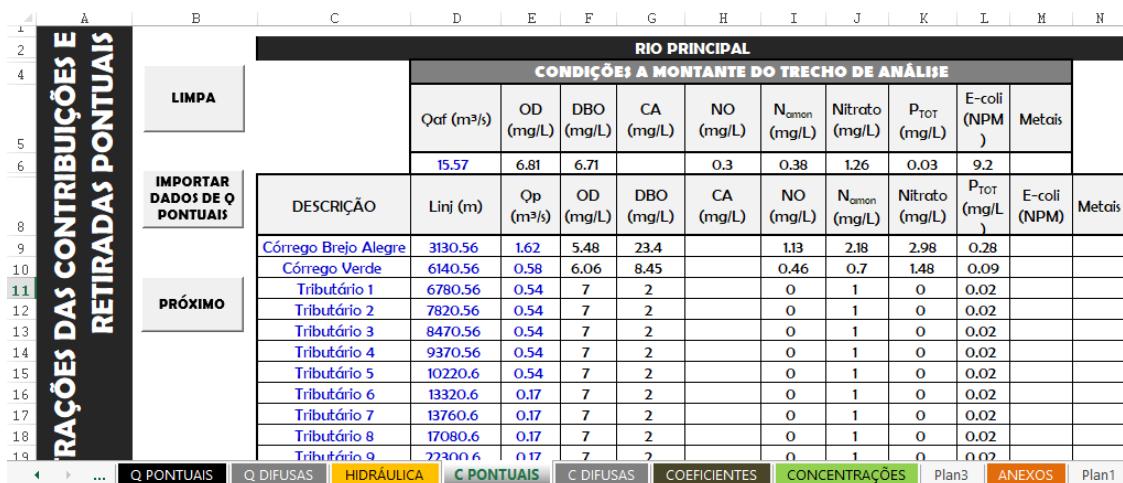
Below the table, there are several tabs: "Q PONTUAIS" (highlighted in green), "Q DIFUSAS", "HIDRÁULICA" (highlighted in yellow), "C PONTUAIS", and "C".

Fonte: Autora (2018)

As abas “Cpontuais” e “Cdifusas” são utilizadas para alimentar os dados de entrada de concentração dos parâmetros de qualidade da água. Na aba “Cpontuais” inicialmente importa-se os dados de vazão de cada trecho analisado. Na sequência introduz-se as cargas pontuais para os pontos A, B e C e os 17 tributários. A Figura 20 traz a interface da aba “Cpontuais” na ferramenta QUALI-TOOL (período chuvoso). Como não foram consideradas vazões difusas na modelagem, a aba “Cdifusas” ficou vazia. Os dados de entrada de vazão e de qualidade da água adotados para o período de estiagem e chuvoso na ferramenta QUALI-TOOL já foram ilustrados na Tabela 8

Figura 19 - Aba “hidráulica” na ferramenta QUALI-TOOL

Fonte: Autora (2018)

Figura 20 - Interface da aba “Cpontuais” na ferramenta QUALI-TOOL

Fonte: Autora (2018)

- Lançamento dos coeficientes de reações bioquímicas e de sedimentação

O lançamento dos coeficientes é realizado após inserção dos dados de qualidade, sendo a última etapa do processo de cadastro (ou dados de entrada). A ferramenta QUALI-TOOL permite utilizar um valor fixo em todo o trecho de rio e também permite discretizar por trechos, devendo apenas informar a distância de início e final em que os valores são mantidos fixos. A Figura 21 traz a interface da aba “Coeficientes” na ferramenta QUALI-TOOL (período chuvoso).

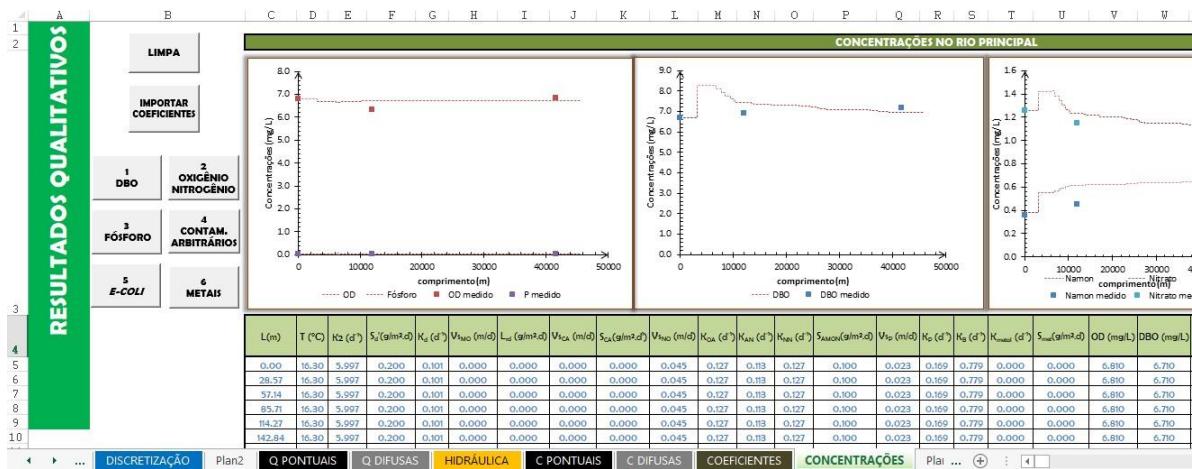
Figura 21 – Interface da aba “Coeficientes” na ferramenta QUALI-TOOL (período chuvoso).

Fonte: Autora (2018)

Os coeficientes foram considerados fixos ao longo dos trechos, com exceção do coeficiente k_2 . A ferramenta calcula automaticamente o coeficiente k_2 por meio das equações da literatura em função dos valores de velocidade e profundidade. Desta forma, foi necessário deixar as células vazias a fim de obter o cálculo automático. O equacionamento dos parâmetros, assim como os valores de referência dos coeficientes das reações bioquímicas podem ser encontrados no item 2.3 desta dissertação. Os valores dos coeficientes de reação bioquímica e de sedimentação inseridos na ferramenta QUALI-TOOL estão também representados na Tabela 9.

- Geração e visualização dos resultados

Na aba “Concentrações” se realiza as simulações por meio de comandos dados pelo usuário, sendo cada parâmetro calculado separadamente, seguindo a ordem: 1º- DBO, 2º Oxigênio, 3º Fósforo, 4º Contaminantes Arbitrários, 5º E-Coli e 6º Metais. Assim, são gerados os resultados em forma de gráficos e tabelas dos perfis longitudinais de concentrações dos parâmetros ao longo do comprimento do curso de água. A Figura 22 traz a interface da aba “Concentrações” na ferramenta QUALI-TOOL.

Figura 22 - Interface da aba “Concentrações” na ferramenta QUALI-TOOL**Fonte:** Autora (2018)

3.3.3 HEC-RAS

Informações gerais

A ferramenta HEC-RAS conta com uma interface com SIG que auxilia na obtenção da topologia do rio que se está estudando. Desta forma é possível importar para a ferramenta informações como o comprimento do rio, declividade e sentido de escoamento de cada trecho, além das seções transversais obtidas diretamente das imagens de satélite. Neste trabalho, como essas seções foram medidas com o equipamento ADCP, optou-se em utilizar as respostas deste equipamento.

As simulações realizadas pela ferramenta são basicamente as variações de temperatura, constituintes não conservativos e conservativos arbitrários, nitrogênio, fósforo, algas, DBO e OD ao longo de determinado trecho do escoamento, tanto em regime permanente ou não permanente.

A interface inicial da ferramenta computacional HEC-RAS é complexa, sendo dividida nas seguintes etapas: inserção de dados, simulação e resultados. A Figura 23 apresenta essa interface inicial da ferramenta onde observam-se os seis primeiros botões, nos quais se introduz os dados de entrada das simulações de acordo com a seguinte sequência: Geometria completa do rio estudado, simulação em escoamento permanente, quasi-permanente e não permanente e dados para transporte de sedimentos e qualidade de água.

Figura 23 – Interface inicial do HEC-RAS



Fonte: Autora (2018)

Os cinco próximos botões são aqueles utilizados para que a simulação ocorra, que são: simulação em regime permanente, não permanente, transporte de sedimentos, qualidade de água e o estudo hidráulico em singularidades desenhadas no trecho do rio, como por exemplo, uma ponte.

Os onze botões assinalados à direita são utilizados para a visualização dos resultados, como por exemplo, perfil da linha de água, nível de água em cada seção transversal, hidrogramas, etc.

-Topologia do sistema hídrico

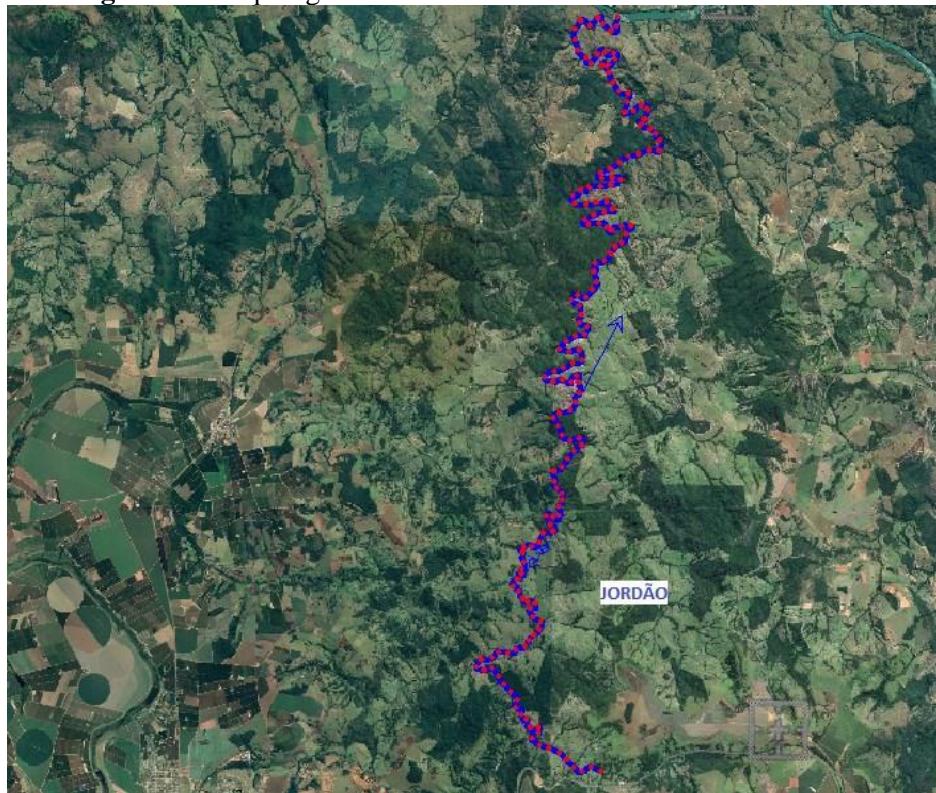
Na ferramenta HEC-RAS também foi primordial, para início da modelagem, a criação da topologia do trecho em análise. O módulo RAS Mapper faz a integração do SIG para entrada de dados da geometria da área de estudo. Essa capacidade geoespacial do modelo está disponível para auxiliar o usuário a criar e refinar mais eficientemente a geometria do modelo hidráulico. Segundo o Manual do Usuário HEC-RAS (HEC, 2016), o RAS Mapper proporciona ao usuário analisar rapidamente os resultados do modelo através da visualização geoespacial do escoamento, a fim de identificar mais prontamente as deficiências do modelo e fazer melhorias. Apesar da integração com SIG, o modelo também aceita a criação da geometria do rio sem escala, realizando os traçados manualmente tanto do trecho do rio quanto das seções transversais.

Para o caso de uma bacia com vários afluentes, é necessário indicar o escoamento de montante para jusante, colocando “junções” de dois ou mais rios. Estas “junções” mostram o lugar da confluência entre rios e são responsáveis por transmitir o escoamento de um rio ao outro. No caso deste trabalho, a análise envolveu apenas o rio principal, sendo assim não

foi necessário a indicação de junções, já que o aporte de vazão de cada tributário foi realizado através das seções transversais.

A topologia do sistema no HEC-RAS (Figura 24) foi criada a partir da importação das imagens georeferenciadas do rio Jordão pelo software ArcMap. Com isso, o trecho do rio principal foi traçado em escala georeferenciada e criadas 24 seções transversais ao longo dos 45,6 km de extensão do rio.

Figura 24 - Topologia do sistema hídrico na ferramenta HEC-RAS



Fonte: Autora (2018)

-Lançamento dos dados hidráulicos

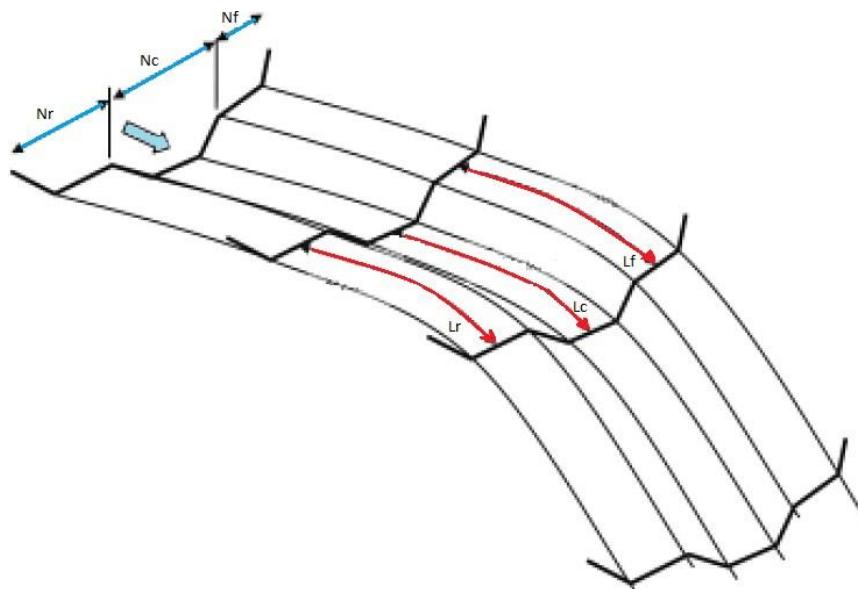
Na ferramenta HEC-RAS, a geometria para a análise do escoamento do rio é especificada em termos de perfis de superfície do solo (seções transversais) e as distâncias medidas entre elas são nomeadas de comprimentos entre os trechos. As seções transversais são localizadas, perpendiculares a linha de fluxo, em intervalos pré-estabelecidos pelo usuário ao longo de um escoamento para caracterizar a capacidade de transporte do escoamento do rio.

As seções transversais demandam valores de coeficiente de rugosidade de Manning para margem direita, leito principal e margem esquerda e a distância da seção imediatamente a jusante, denominado de Lr, Lc e Lf, conforme representado na Figura 25. O lançamento das

seções é realizado uma a uma, alimentando as células manualmente, sempre obedecendo a sequência do processo de criar nova seção → nomear → lançar as coordenadas X e Y → lançar distâncias → lançar rugosidade.

De acordo com o Manual do Usuário HEC-RAS (2016), deve existir pelo menos uma seção transversal toda vez que houver descarga, mudança de inclinação, forma ou rugosidade, ou em locais onde se tem grande turbulência como cachoeiras, ou início/fim de barragens, reservatórios, lagos, pontes ou estruturas de controle, como açudes. As seções devem representar com precisão a geometria do escoamento e, quando há mudanças repentinas, deve-se usar várias seções para descrever esta alteração, independente da distância adotada entre as seções. Um exemplo disso, é a presença de cachoeiras ao longo do percurso analisado, já que há uma grande injeção de ar entre a queda e o retorno do escoamento, o que afeta na reaeração da água, influenciando nos parâmetros de qualidade analisados.

Figura 25 - Representação da seção transversal do HEC-RAS



Fonte: Manual do usuário HEC-RAS (2016)

O espaçamento entre seções é função do tamanho do rio, declive, uniformidade, percursos e também do objetivo do estudo. Na prática, empresas do ramo de soluções científicas e de engenharia avançada em recursos hídricos trabalham com medições em campo de seções transversais com distâncias entre si, em 1 a 3 vezes a largura do rio, o que demanda mais recursos, a depender do tipo de projeto. Trabalhos mais complexos requerem um maior número de informações, consequentemente maior detalhamento da calha do rio através de seções transversais medidas.

A ferramenta HEC-RAS adota declividade fixa para cada subtrecho formado entre duas seções transversais alimentadas na topologia. A dificuldade operacional e financeira para o traçado de seções transversais acarreta em declividades de fundo simplificadas. Esta simplificação pode prejudicar as simulações, uma vez HEC-RAS assume quedas bruscas para trechos com declividade longitudinal superior a 10°.

Os dados hidráulicos foram lançados através das seções transversais. As 24 seções foram representadas da seguinte maneira: foram medidas no curso de água 4 seções conhecidas (ST1, ST2, ST3 e ST4), os 17 tributários menores, os córregos Verde e Brejo Alegre, que apresentam contribuição de vazão e matéria orgânica significativas e a seção final, na confluência do rio Jordão com o rio Paranaíba. No caso deste trabalho, como se tem apenas quatro seções medidas ao longo do rio principal, foi utilizado na modelagem do HEC-RAS o método de área de influência de cada seção ao longo do rio. Diferentemente das outras duas ferramentas, que foi utilizado os valores das seções a montante para representação da seção a jusante.

Cada seção transversal foi alocada a uma distância específica do trecho inicial, correspondendo a distância de entrada do tributário no rio. As seções de tributários foram criadas para realizar o aporte de vazão lateral no rio principal, o que corresponde a vazão de entrada dos afluentes. Na entrada dos dados de seção transversal na ferramenta HEC-RAS, foi preciso conhecer os valores dos comprimentos dos taludes direito e esquerdo, além da posição do eixo central, conforme ilustra a Figura 26, os chamados “bank” delimitam a região central e mostram as distâncias entre margens e o início dos taludes.

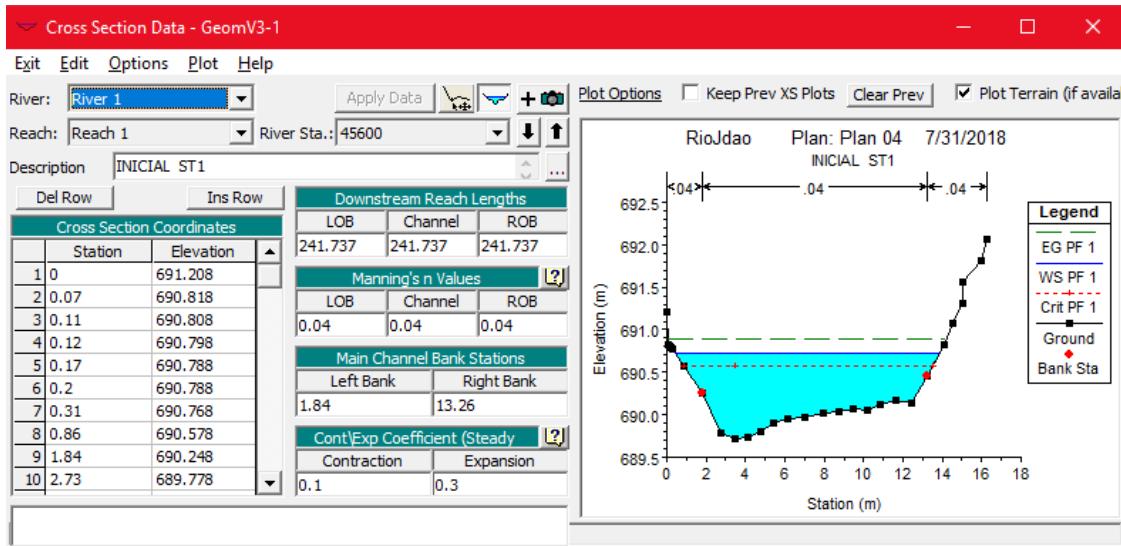
Além disso, o coeficiente de rugosidade de Manning foi considerado fixo e igual a $0,04 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ (CHOW, 1959) para as seções transversais, tanto para o fundo do canal quanto para os taludes laterais.

Após lançadas, a ferramenta interpolou as seções em intervalos aproximados de 260 metros, sendo o valor real mostrado na Figura 26 em *Downstream Reach Lengths*.

A atenção no lançamento das seções transversais no HEC-RAS é primordial para representação correta da simulação hidráulica do rio, uma vez que é nesta etapa do processo que se representa a declividade da calha através da diferença de altitudes de uma seção para

outra. Para este trabalho, não foi possível medição em campo das 24 seções para execução desta análise, uma vez que não houve recursos financeiros e tempo hábil para tal atividade.

Figura 26 - Lançamentos dos dados hidráulicos no HEC-RAS



Fonte: Autora (2018)

Recomenda-se que nas simulações do modelo hidráulico é necessário verificar a faixa de trabalho permitido para os números de Courant e Plecet, os quais são aconselháveis para dar equilíbrio ao escoamento em simulações com grandes oscilações.

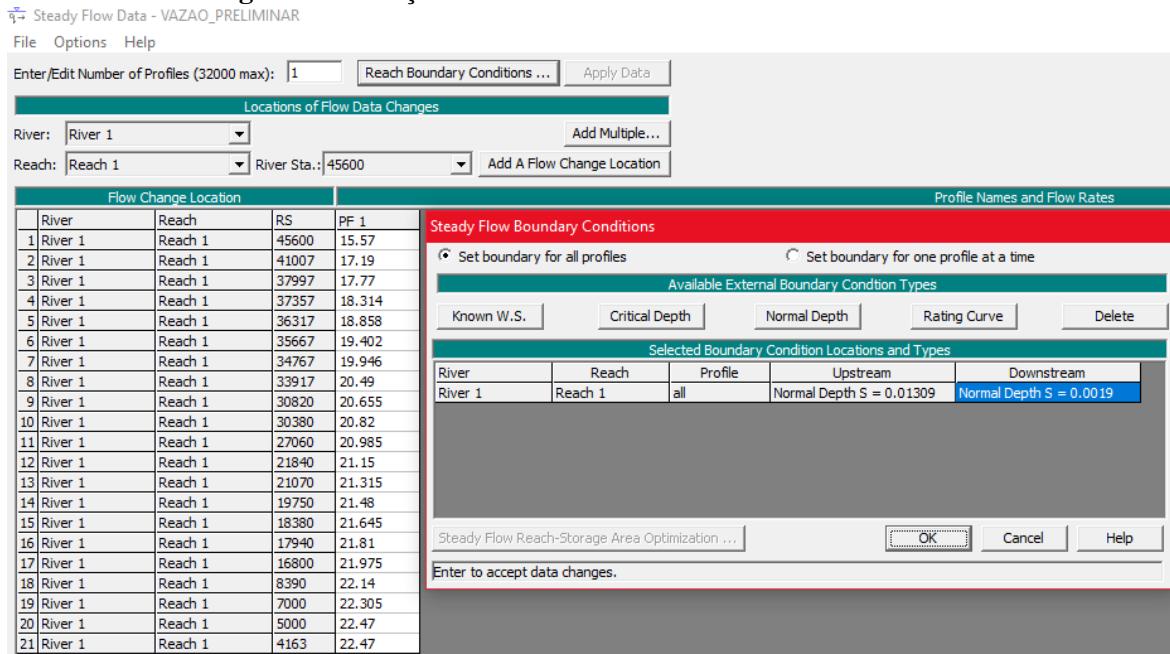
-Lançamento dos dados fluviométricos e de qualidade da água

No HEC-RAS, foi necessário definir um modelo hidráulico previamente calibrado para se iniciar as demais simulações. Assim, foram realizadas simulações dos dois períodos no escoamento de regime permanente (*steady flow*), inserindo as vazões em cada seção transversal, de forma acumulativa a cada trecho. No período chuvoso, a vazão no início do trecho do rio estudado, ou seja, nas proximidades da seção ST1, foi de 15,57 m³/s e a final, próximo ao seu exutório foi de 22,47 m³/s e no período de estiagem, nas mesmas seções foi de 5,66 m³/s e a final de 7,37 m³/s. Além das vazões, foi inserida a declividade inicial e final como sendo 0,0103 m/m e 0,0019 m/m respectivamente, partindo da diferença de altitudes de montante para jusante dividido pela distância do trecho. (Figura 27).

A modelagem da qualidade da água no HEC-RAS foi realizada após calibração do modelo hidráulico. Esta etapa requer uma maior quantidade de dados para que a simulação represente de maneira confiável o modelo. O módulo de qualidade da ferramenta demanda dados

iniciais, de contorno, dados observados, dados meteorológicos, dados de sombreamento e coeficientes das reações (Figura 28).

Figura 27 - Lançamento dos dados fluviométricos no HEC-RAS

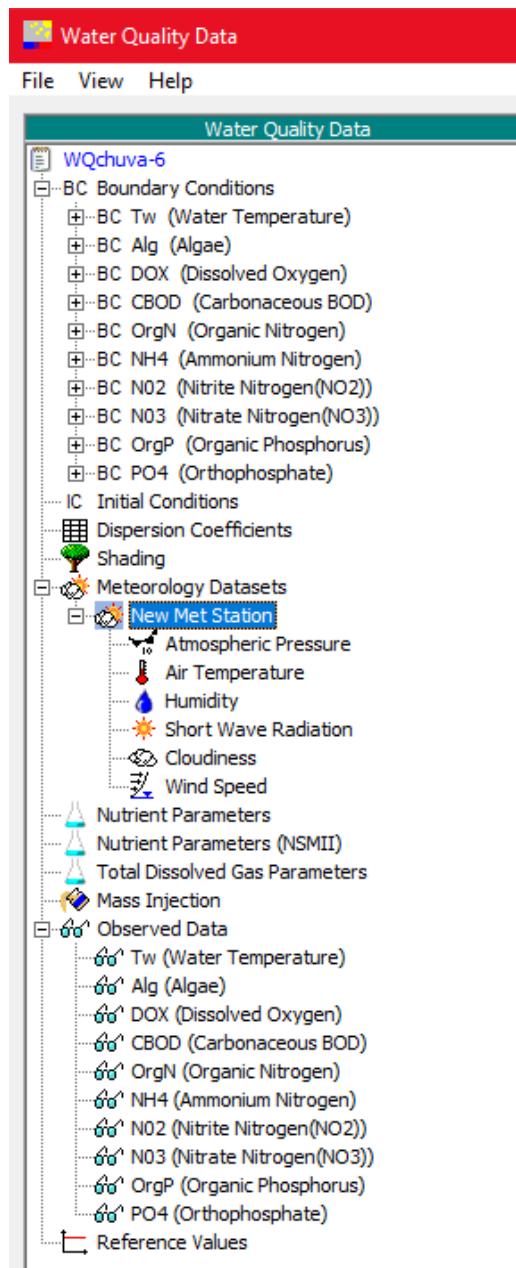


Fonte: Autora (2018)

A Figura 28 mostra a janela para entrada de dados de qualidade de água, inicialmente observa-se *BC Boundary Conditions*, onde se insere as condições limites para a modelação de cada constituinte. Dentro desta aba pode-se inserir as condições iniciais, sendo requerido no mínimo uma condição inicial para cada constituinte em cada trecho. Por último pode-se entrar com os valores do coeficiente de dispersão. A ferramenta HEC-RAS utiliza a equação de Fisher (1979) para a estimativa do coeficiente de difusão turbulenta. Este estudo assumiu valores de 50 a 200 m²/s para o coeficiente de difusão turbulenta.

Ainda dentro da seção de entrada de dados, sabe-se que no HEC-RAS, a temperatura da água é uma das características físicas mais importantes no desenvolvimento dos diversos fenômenos que ocorrem nos sistemas aquáticos, já que sua variação afeta diretamente a maioria dos parâmetros da qualidade da água. Desse modo, os demais constituintes físicos e químicos do modelo não foram trabalhados, sem que antes ocorresse a simulação da temperatura da água.

Antes de continuar descrevendo a etapa de entrada de dados é interessante descrever as informações sobre os coeficientes de reações bioquímicas e de sedimentação.

Figura 28 – Janela para lançamento dos dados de qualidade da água no HEC-RAS

Fonte: Autora (2018)

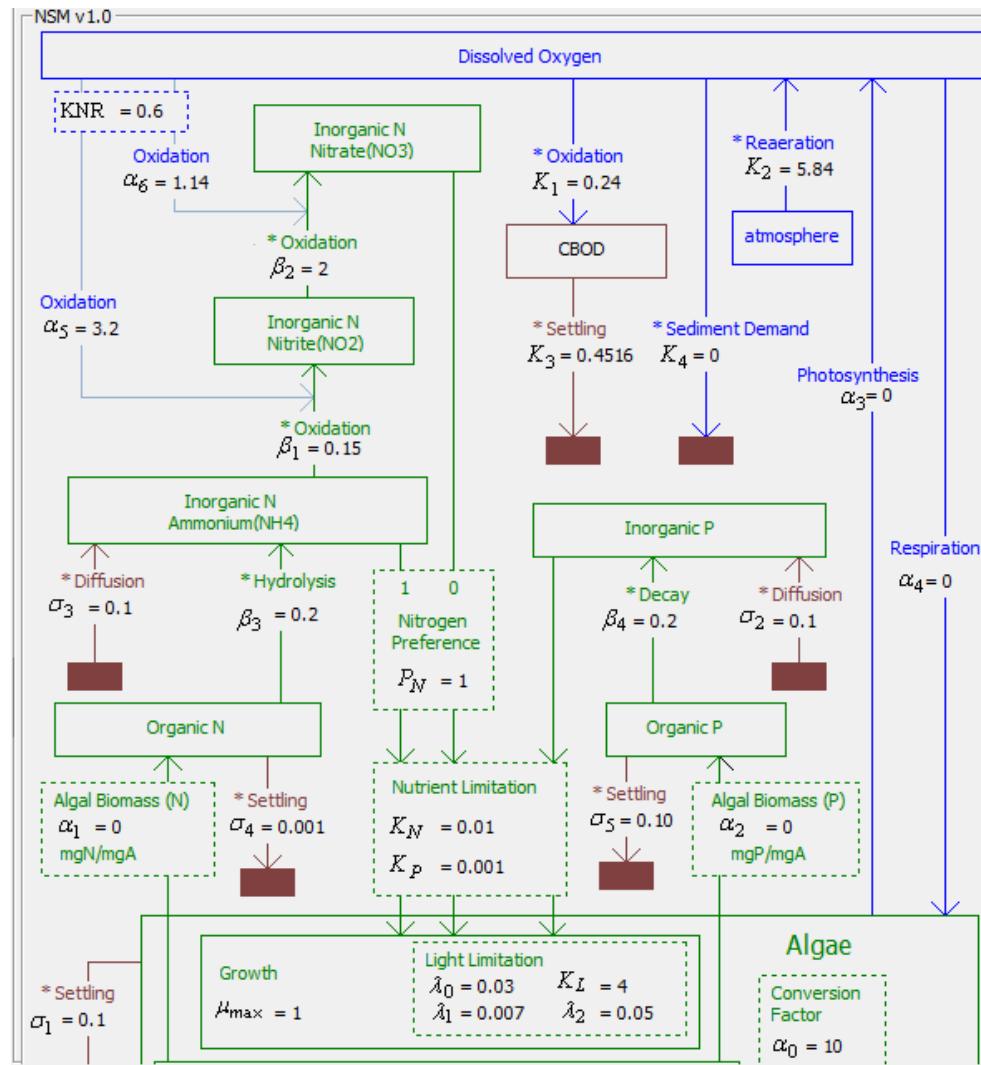
-Lançamento dos coeficientes de reações bioquímicas e de sedimentação

A ferramenta HEC-RAS limita a utilização de coeficiente fixo para cada trecho de rio formado entre duas seções transversais.

Os coeficientes do HEC-RAS se mantiveram nos mesmos parâmetros das demais ferramentas, assumindo valores zero para contribuição de algas no sistema. Na Figura 29 são apresentados o fluxograma e seus respectivos coeficientes para cada constituinte

simulado. O coeficiente K_2 , o qual foi variado ao longo dos trechos nas outras duas ferramentas em função das características hidráulicas do rio, no HEC-RAS eles foram mantidos com valores únicos e fixos, já que a ferramenta não possibilita variação dos coeficientes.

Figura 29 – Lançamento dos coeficientes das reações bioquímicas e de sedimentação na ferramenta HEC-RAS



Fonte: Autora (2018)

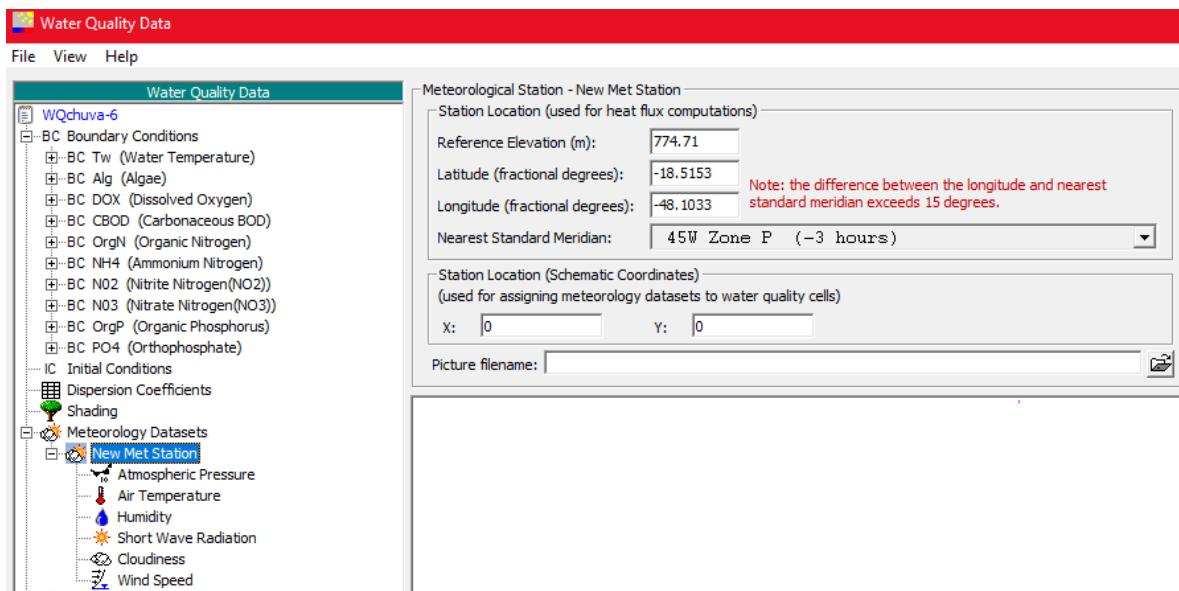
A simulação da qualidade da água foi realizada por partes, a fim de testar o comportamento de cada parâmetro. Primeiro simulou-se a temperatura, e depois OD e DBO juntos. Com isso, alguns problemas foram surgindo no decorrer das simulações e foram feitos testes de sensibilidade com os coeficientes descritos acima para entender o tipo de erro ocorrido. Após a verificação dos erros e estes receberem os devidos ajustes, foram introduzidos um a um os

demais nutrientes, tais como nitrogênio amoniacal, nitrogênio orgânico, nitrato e fósforo total.

Os dados observados a princípio foram considerados nulos, já que não se tem uma série de dados (apenas dois períodos – chuvoso e estiagem) e também não houve calibração para ajuste dos coeficientes dos parâmetros modelados. Os valores de referência, no caso limites estabelecidos por órgãos reguladores, por exemplo CONAMA, também não foram utilizados nesta simulação. Os dados de “shadding”, que inclui alimentação dos dados de área de sombreamento ao longo do rio também não foram considerados na simulação.

Os dados meteorológicos da região (pressão atmosférica, temperatura do ar e umidade relativa a 2 m da superfície, radiação solar, velocidade do vento e nuvens) são requeridos apenas na ferramenta HEC-RAS. A Figura 30, ilustra a janela para lançamento da estação meteorológica, que inclui as coordenadas geométricas do local.

Figura 30 - Janela de lançamento da estação meteorológica na ferramenta HEC-RAS



Fonte: Autora (2018)

Os dados meteorológicos foram obtidos do banco de dados da NASA (PREDICTION, 2018), escolhendo-se uma estação próxima ao rio Jordão. Para cada período modelado, calculou-se as médias dos valores mensais de cada parâmetro, sendo período de estiagem correspondente aos meses de abril a setembro e o período chuvoso de outubro a março (Tabela 10).

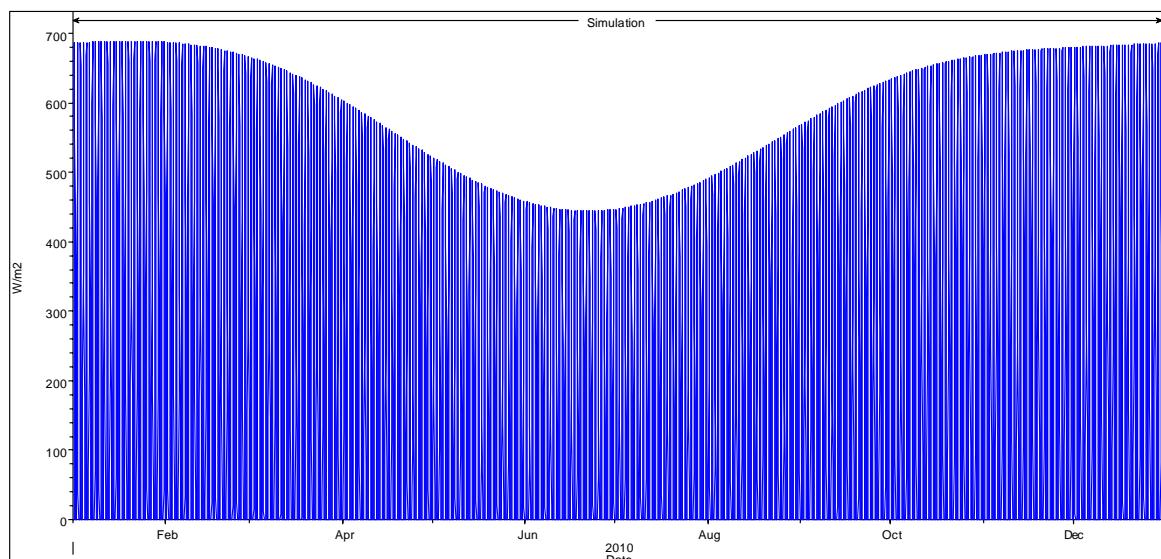
Tabela 10 – Dados climatológicos do rio Jordão utilizados na modelagem do HEC-RAS

Dados climatológicos	Estiagem	Chuvoso
	(Média de abril a setembro)	(Média de outubro a março)
Pressão atmosférica (mb)	92,8700	92,4917
Temperatura do Ar a 2m da superfície (°C)	20,5917	23,6050
Umidade relativa do ar a 2m da superfície (mb)	67,8850	76,2767
Nuvens (%)	38,2833	70,9500
Velocidade do vento (m/s)	3,5800	3,6300

Fonte: Adaptado Prediction (2018)

A radiação solar também faz parte da simulação e foi calculada pelo modelo conforme as equações astronômicas, em função da posição geográfica da estação meteorológica no globo terrestre em relação ao sol. A Figura 31 representa a variação da radiação solar ao longo do ano calculada pela ferramenta HEC-RAS.

Além disso, os valores de $DBO_{5,20}$ utilizados nas outras ferramentas foram transformados para $DBO_{carbonácea}$, já que é o HEC-RAS emprega a carbonácea na sua metodologia de cálculo. De acordo com a curva normal para oxidação da matéria orgânica de Jordão e Pessoa (1982), para lançamento de uma carga poluidora o consumo de O_2 pela decomposição da matéria orgânica varia entre 40 a 70%. Dessa forma, foi adotado para este trabalho a $DBO_{carbonácea}$ equivalente 60% da $DBO_{5,20}$.

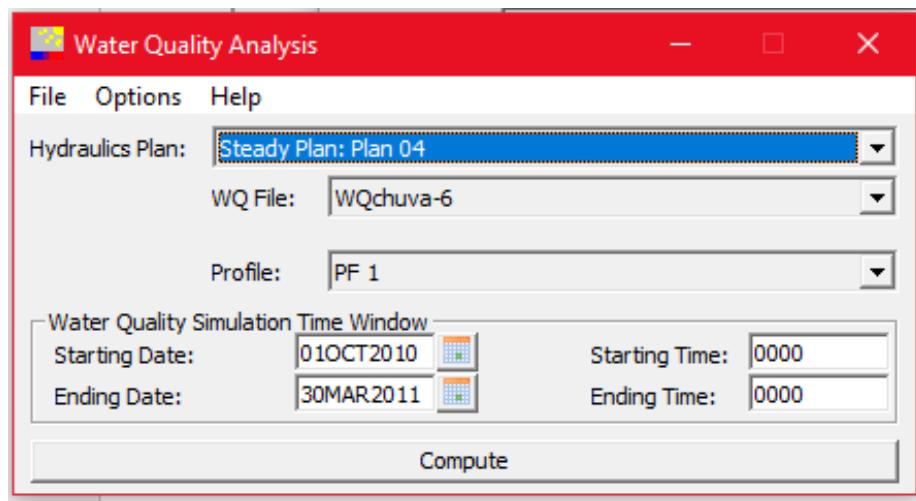
Figura 31 - Radiação solar ao longo do ano na região do rio Jordão

Fonte: Autora (2018)

-Geração e visualização dos resultados

Os resultados gerados da modelagem do HEC-RAS são visualizados em formato de gráficos ou tabelas, de forma que o modelo realiza a simulação em um período de tempo pré-determinado pelo usuário. Neste caso, para o modelo chuvoso a simulação foi feita de 01 de outubro 2010 a 30 de março de 2011, e para período de estiagem de 01 abril 2011 a 30 setembro de 2011 (Figura 32).

Figura 32 - Janela de simulação da qualidade da água na ferramenta HEC-RAS

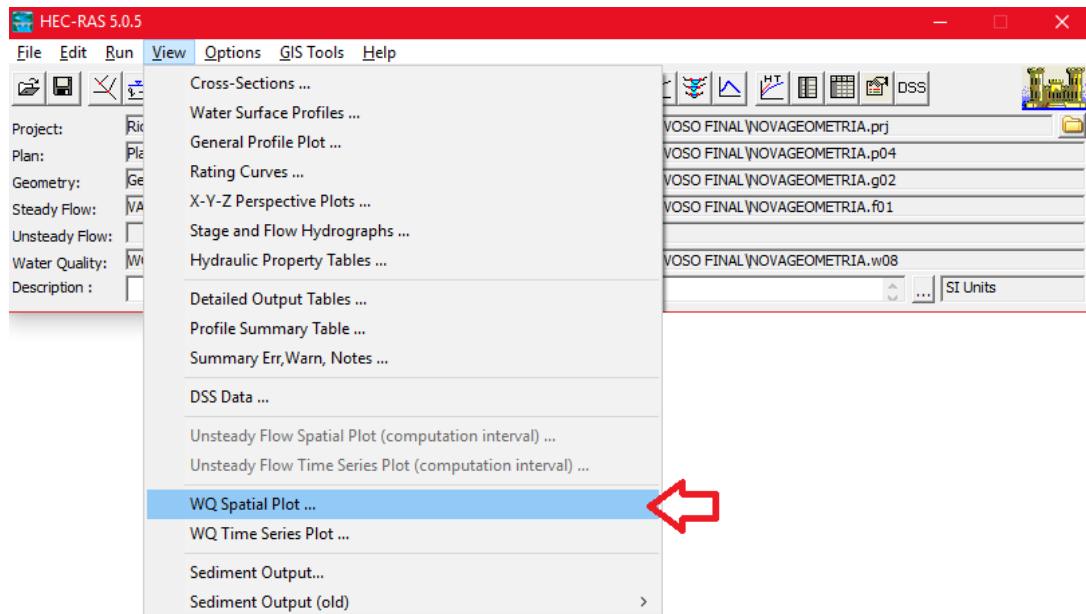


Fonte: Autora (2018)

Os dados de saída do modelo são em formato de gráficos e tabelas. O modelo disponibiliza dois arquivos de saída - o arquivo padrão que contém dados de saída nas células de qualidade de água no intervalo de tempo especificado e o arquivo secundário que contém valores máximos, mínimos e médias diárias calculadas. Os gráficos que resultam da modelagem da qualidade da água mostram os perfis longitudinais do nutriente modelado ao longo do espaço e do tempo, conforme pode ser visualizado na Figura 33.

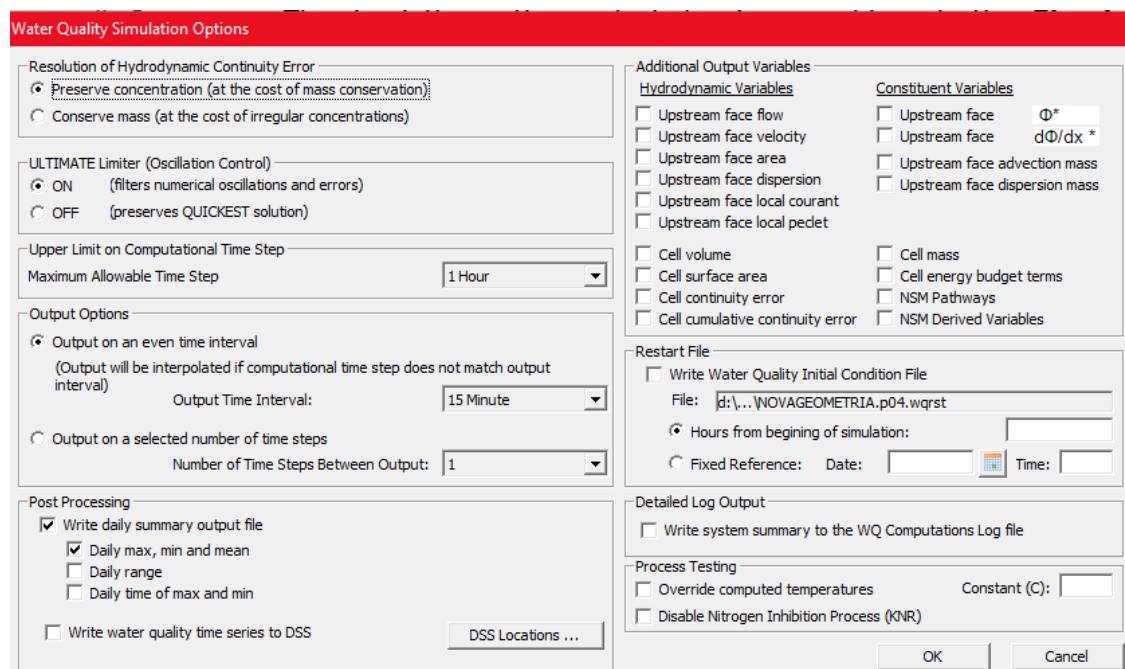
A Figura 34 mostra a janela de opções para esta simulação, onde pode-se definir as opções de apresentação dos resultados, como por exemplo, o intervalo de tempo em que se deseja que os resultados sejam apresentados.

Figura 33 - Visualização dos resultados da modelagem da qualidade da água na ferramenta HEC-RAS



Fonte: Autora (2018)

Figura 34 – Janela de opções para simulação da qualidade da água no HEC-RAS



Fonte: Autora (2018)

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações da qualidade da água em um trecho no baixo curso do rio Jordão, para os períodos de estiagem e chuvoso, com foco na comparação entre as ferramentas QUAL-UFMG, QUALI-TOOL e HEC-RAS. Para cada etapa no processo de modelagem, este item compara as ferramentas computacionais, mostrando as potencialidades e limitações. A sequência das discussões segue a organização do item 3.3 ferramentas computacionais.

4.1 Topologia do sistema hídrico

A topologia do sistema hídrico foi gerada apenas nas ferramentas computacionais QUALI-TOOL e HEC-RAS. Como já mencionado, a ferramenta QUAL-UFMG não gera uma topologia, apenas possibilita a criação de um diagrama unifilar para entendimento do sistema.

A criação da topologia na ferramenta QUALI-TOOL foi considerada a mais trabalhosa pelo fato de demandar o lançamento manual de coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude) ao longo de todo o trecho de rio estudado. Os 392 pontos para cobrimento de toda extensão de rio foram levantados manualmente, um a um, em graus e então transformados em UTM para alimentar a planilha, o que tornou esta etapa mais complexa e demorada. Outro ponto considerado negativo nesta etapa é que, quanto maior a quantidade de trechos discretizados, mais lento é o processamento na planilha de Excel. Isso ocorre pois, na linguagem de programação *Visual Basic*, o processo de leitura e armazenamento dos dados de entrada incluídos na planilha pelos vetores no código computacional é lento. Da mesma forma, é lenta a resposta do código à planilha de cálculo. Igual problema foi enfrentado por Guimarães (2018), no ribeirão do Salitre, Triângulo Mineiro, o qual levantou 77 pontos em um trecho de 7,29 km no ribeirão do Salitre, com discretização do curso de água em 240 nós.

Quanto ao HEC-RAS, desde o princípio do processo de modelagem, apresentou-se como uma ferramenta complexa para entendimento de todo o processo de lançamento da topologia do sistema. Durante sua utilização, percebe-se o quanto o modelo é altamente hermético e

abrangente, já que inclui elementos de edição geométrica capazes de simular pontes, áreas de inundação, estruturas laterais e inclinadas, além de simulações em 2D.

Uma vantagem do HEC-RAS, em comparação às demais ferramentas, é sua interface com o SIG (HEC_GeoRas), que possibilita a apresentação e interpretação visual das informações de entrada e saída do modelo. Esse processo demanda um conhecimento prévio tanto do modelo quanto do sistema SIG, de forma que o usuário precisa compreender o passo a passo para utilização correta das imagens e dados georeferenciados.

Essa interação dinâmica entre o SIG e os dados de entrada facilita a compreensão da área de interesse e do problema. O SIG aliado a um modelo matemático, é capaz de gerar bancos de dados espaciais e o geoprocessamento das informações, facilitando a descrição detalhada da região de estudo, gerando dados de entrada em modelos hidrológicos e de qualidade da água, como seções transversais. Outro ponto positivo desta interface com SIG é que os resultados gerados pelo modelo podem ser enviados de volta à plataforma GeoRas, a fim de mapear outros parâmetros como, por exemplo, profundidade e velocidade do escoamento. Apesar desta interação com o SIG, a ferramenta também permite o usuário realizar o lançamento da geometria do rio (rio principal, tributários, junções, elementos físicos e seções transversais) manualmente, sem utilizar dados georeferenciados.

Jensen e Lowney (2004) também avaliaram a ferramenta HEC-RAS positivamente quanto à sua interface com a plataforma SIG. Os autores destacaram a facilidade de exibição dos dados de saída por meio de mapas georeferenciados, já que é possível visualizar outras variáveis cruciais do habitat como, cobertura vegetal, qualidade do substrato e barreiras de migração física. Consideraram o modelo robusto e abrangente, de modo que a interface gráfica é simples e de fácil interpretação.

4.2 Grandezas hidráulicas

Como já mencionado anteriormente, nas simulações de autodepuração em curso de água, as grandezas hidráulicas (profundidade média, velocidade média do escoamento e largura de superfície) são utilizadas na estimativa de alguns coeficientes de reação bioquímica por meio de equações da literatura. A determinação dessas grandezas é diferente para as três ferramentas computacionais analisadas.

A versão original da ferramenta QUAL-UFMG considera relações potenciais fixas para todo o curso de água. Essas relações potenciais são obtidas apenas quando existe estação fluviométrica em operação, o que torna a utilização deste método limitada em função da deficiência de estações em operação no país. Todavia, em função da modelagem em QUAL-UFMG ser realizada em planilha de cálculo Excel que pode ser modificada, nada impede ao usuário alterar o método de cálculo das grandezas hidráulicas (como exemplo, a utilização da equação de Manning para o cálculo da profundidade líquida e a equação da continuidade para o cálculo da velocidade média do escoamento).

De uma forma geral, a versão original da ferramenta QUAL-UFMG é simplificada quanto ao cálculo das grandezas hidráulicas, uma vez que considera uma seção transversal retangular única (esta seção aproxima-se da realidade apenas em cursos de água muito largos e rasos) e valores fixos dos coeficientes de ajuste das relações potenciais para todo o trecho de rio.

A utilização da ferramenta QUAL-UFMG no rio Jordão trouxe uma tarefa extra ao usuário, em função da alteração de seção retangular para transversal ao longo do trecho de rio estudado. Foram consideradas 4 seções trapezoidais diferentes ao longo de 4 trechos no rio Jordão, conforme mencionado no item 3.2. Esta alteração exigiu muita dedicação do usuário na alimentação dos dados ao longo dos trechos discretizados.

Na ferramenta QUALI-TOOL, por se tratar de abas específicas para hidráulica do modelo, o processo foi simples e rápido tanto para compreensão, quanto para obtenção dos resultados hidráulicos. A ferramenta faz uso da equação de Manning e equação da continuidade. A alimentação das características físicas do rio, como declividade de talude direito e esquerdo, largura de base e coeficiente de rugosidade de Manning é feita para cada trecho específico definido pelo usuário, o que torna a atividade facilitada e mais próximo da realidade do rio. Os dados de declividade longitudinal são obtidos previamente no traçado da topologia do sistema hídrico.

Quanto ao lançamento do modelo hidráulico do HEC-RAS, a etapa é simples, já que foi necessário introduzir apenas o aporte de vazão nas seções transversais e as declividades iniciais e finais nos dados de contorno para simulação de fluxo permanente.

Para geração de bons resultados da modelagem da qualidade do rio Jordão no HEC-RAS, a ferramenta exige um modelo hidráulico estabilizado. Entretanto, a quantidade de seções

transversais disponíveis neste estudo (seções ST1, ST2, ST3 e ST4) não permitiu realizar um bom modelo hidráulico, estável e dentro das limitações que a ferramenta necessita.

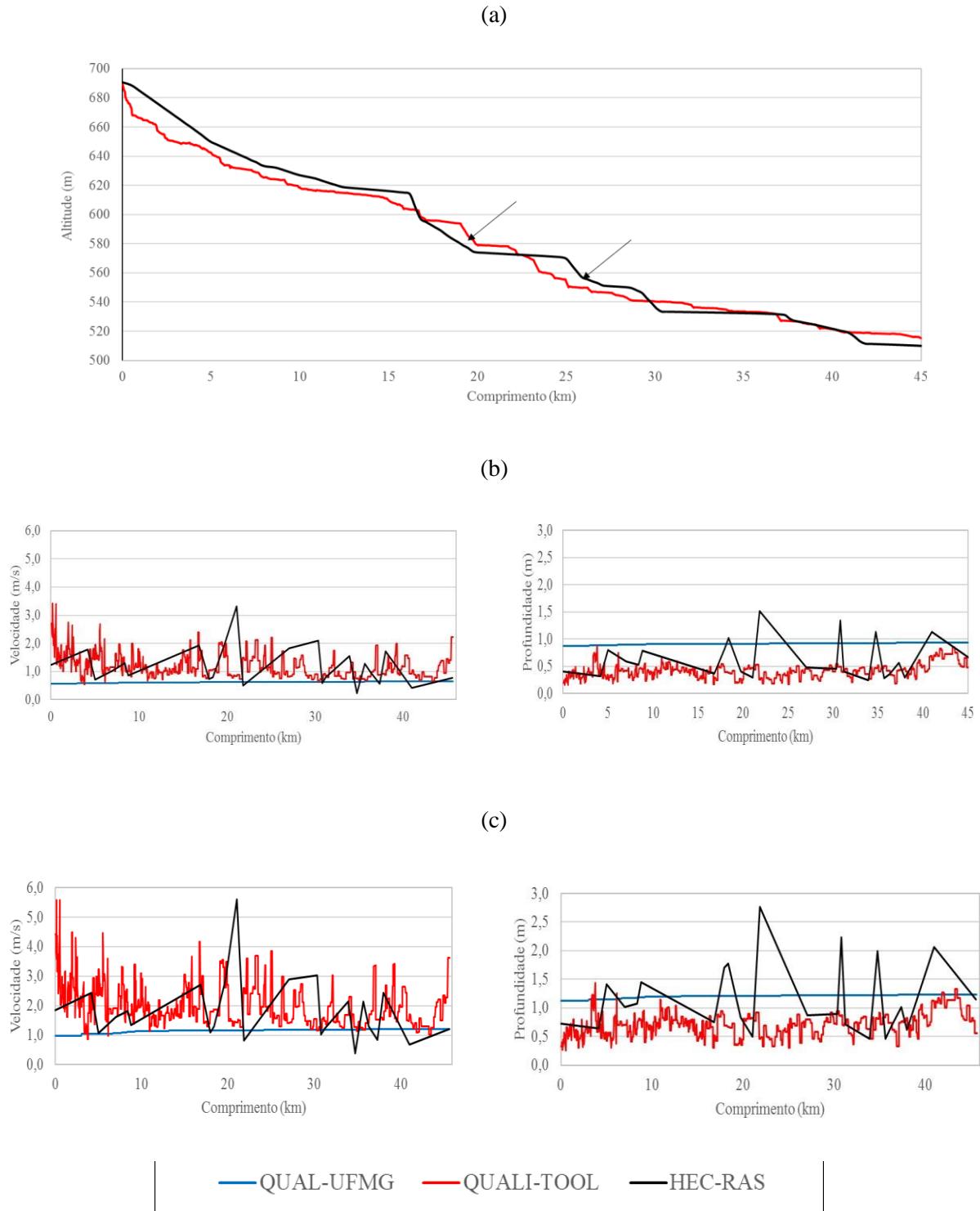
Esse fato pode ser observado por meio da comparação do perfil de elevação representado pelo QUALI-UFMG, QUALI-TOOL e HEC-RAS. A Figura 35 traz os perfis longitudinais de elevação do terreno, de profundidade líquida e velocidade média do escoamento utilizados pelas ferramentas QUALI-UFMG, QUALI-TOOL e HEC-RAS ao longo dos 45,6 km do rio Jordão em seu baixo curso.

Analizando os perfis na Figura 35, percebe-se com clareza as diferenças de cálculo entre as ferramentas. A ferramenta QUALI-TOOL trabalhou com 392 pontos de coordenadas geográficas para demarcação do rio e posteriormente discretizada em 1600 nós, contendo informações de altitude em cada um desses. Na ferramenta HEC-RAS foram introduzidas apenas 24 seções, sendo quatro delas conhecidas, que se interpolaram entre elas, deixando assim o rio distante da sua representação real. Por isso, observando o resultado percebe-se quedas acentuadas no perfil do HEC-RAS, principalmente após os 15º km e após o 25º km, onde se tem a presença de cachoeiras e cascatas, as quais não foram representadas no modelo de qualidade da água através das injeções de massa. Essa representação deveria ter sido realizada por meio de seções transversais conhecidas, com valores de batimetria, logo a montante e logo jusante do local de interesse.

Com foco nas Figura 35 (b) e Figura 35 (c), de uma forma geral, os perfis longitudinais de velocidade do escoamento e profundidade líquida nas três ferramentas estão dentro de uma mesma faixa de valores (profundidade de 0,15m até 1,5m e 0,26 até 2,7 m para os períodos de estiagem e chuvoso, respectivamente; velocidade média de 0,23 até 3,4 m/s e 0,39 até 5,6 m/s para os períodos de estiagem e chuvoso, respectivamente). As maiores oscilações na ferramenta QUALI-TOOL estão relacionadas ao maior detalhamento na declividade longitudinal. Apesar da ferramenta HEC-RAS apresentar a melhor metodologia para estimativa da profundidade líquida, a quantidade reduzida de seções transversais levantadas em campo comprometeu a aplicação desta ferramenta.

As diferenças nos perfis de velocidade do escoamento e profundidade líquida terão reflexos no valor do coeficiente de reaeração natural.

Figura 35 - Perfis longitudinais hidráulicos gerados pelas ferramentas computacionais: (a) elevação; (b) profundidade líquida e velocidade média do escoamento em período de estiagem; (c) profundidade líquida e velocidade média do escoamento em período chuvoso



Fonte: Autora (2018)

4.3 Dados fluviométricos e de qualidade de água

Na planilha de cálculo da ferramenta QUAL-UFMG existe a possibilidade de “Copiar-Colar” valores em várias células ao mesmo tempo, tomando-se a devida atenção com as mudanças de trecho. Todavia, o processo de discretização do trecho de rio deve ser feito de tal forma que permita alimentar os dados fluviométricos de entrada e de qualidade de água no lugar correto. Também, a forma de visualização global da planilha foi dificultada por conter inúmeras linhas e colunas (que tem relação direta com o passo de discretização e com o comprimento do rio).

Já a ferramenta QUALI-TOOL foi considerada a mais amigável quanto à inserção de dados de entrada. Apesar da dificuldade inicial de se obter a topologia do sistema, o restante do processo de modelagem assumiu-se didaticamente simples e de fácil entendimento. Quando o modelo indicava um suposto erro, o mesmo era identificado facilmente por meio das linhas de programação do *Visual Basic* e também pelo fato da ferramenta possuir uma interface simples com o usuário, que permite corrigir o código computacional. O manual que acompanha o download da ferramenta também auxiliou a operação de modelagem, uma vez que é completo e auto explicativo (MAGALHÃES; SALLA E ALAMY FILHO, 2017).

Quanto ao HEC-RAS, a introdução dos dados fluviométricos e qualitativos foi feita de forma individualizada para cada seção e cada parâmetro, tornando o processo trabalhoso principalmente na etapa de qualidade, já que foi necessário que cada seção estivesse com um valor de um determinado nutriente, seja ele zero ou não, a fim de evitar erros na simulação. No entanto, o modelo dispõe de outras alternativas para inserção dessas informações, seja por valor constante (como foi realizado nestas simulações) ou por importação de tabelas e séries temporais dos parâmetros. Com isso, vê-se a existência de alguns facilitadores dentro da ferramenta, mas que demandam um certo conhecimento da ferramenta pelo usuário para explorá-la.

Além disso, o HEC-RAS incorpora na sua metodologia as variações climáticas da região por um determinado período de tempo. Apesar de não ter sido o caso deste trabalho, o modelo também considera áreas de sombreamento ao longo do trecho do rio. Isso mostra a complexidade da ferramenta frente às outras duas analisadas nesse trabalho.

Outro ponto positivo da ferramenta HEC-RAS é a possibilidade de injeção de ar entre duas seções transversais próximas, a fim de representar fenômenos físicos como ressaltos, cachoeiras ou estruturas hidráulicas. Essa metodologia influencia no processo de reaeração atmosférica, já que as turbulências geram entradas de ar na massa líquida.

4.4 Coeficientes de reações bioquímicas e de sedimentação

Na ferramenta QUAL-UFMG, com exceção do coeficiente de reaeração natural, todos os outros coeficientes são mantidos fixos ao longo do curso de água, devidamente corrigido em função da variação da temperatura da água ao longo do trecho de rio estudado. Apesar de trabalhoso, a ferramenta permite ao usuário variar os valores dos coeficientes ao longo dos trechos discretizados.

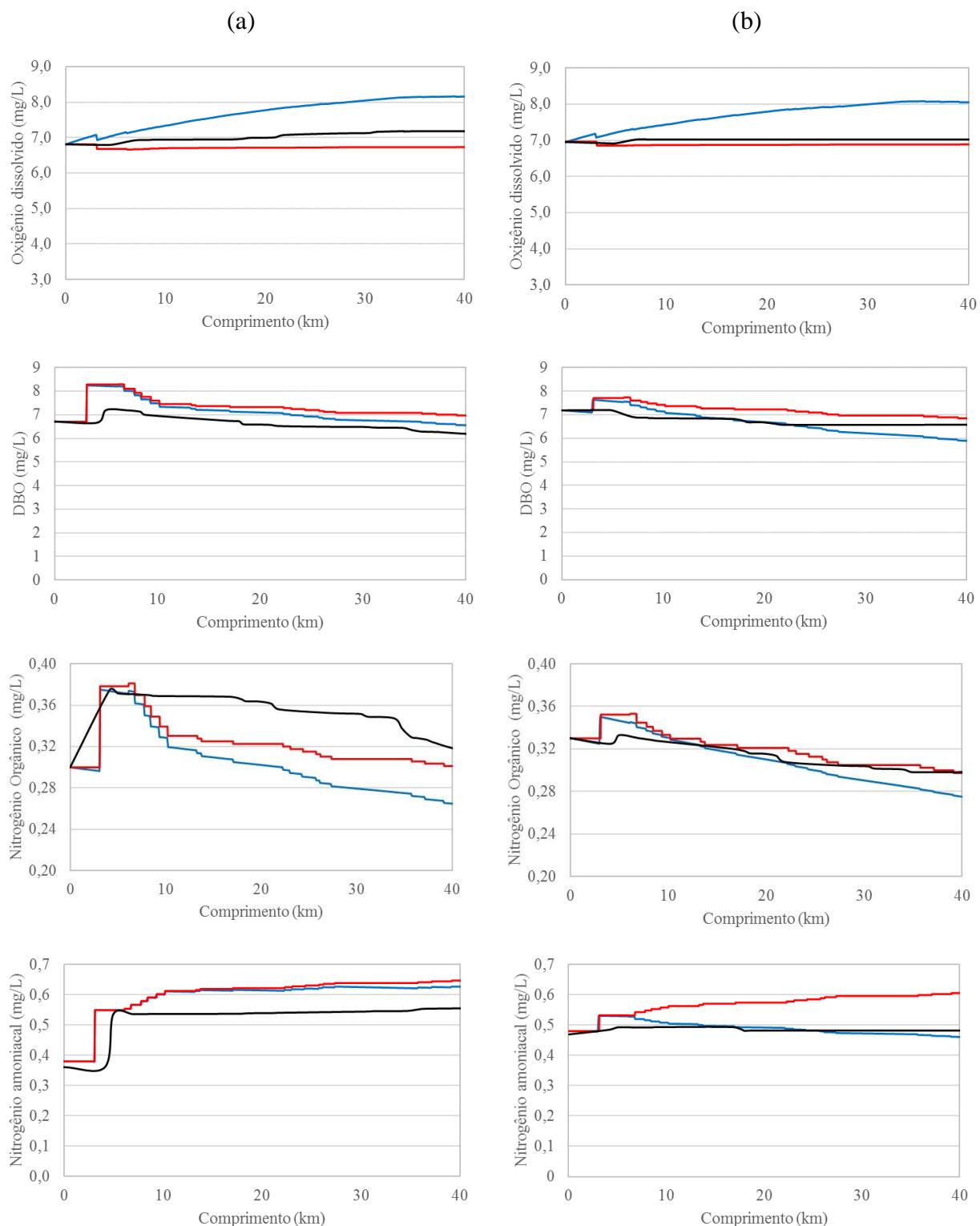
Na ferramenta QUALI-TOOL, a inserção de coeficientes também foi simples, identificando valores fixos para trechos quaisquer. Como vantagem, a ferramenta calcula o coeficiente K_2 automaticamente, desde que a célula correspondente permaneça vazia.

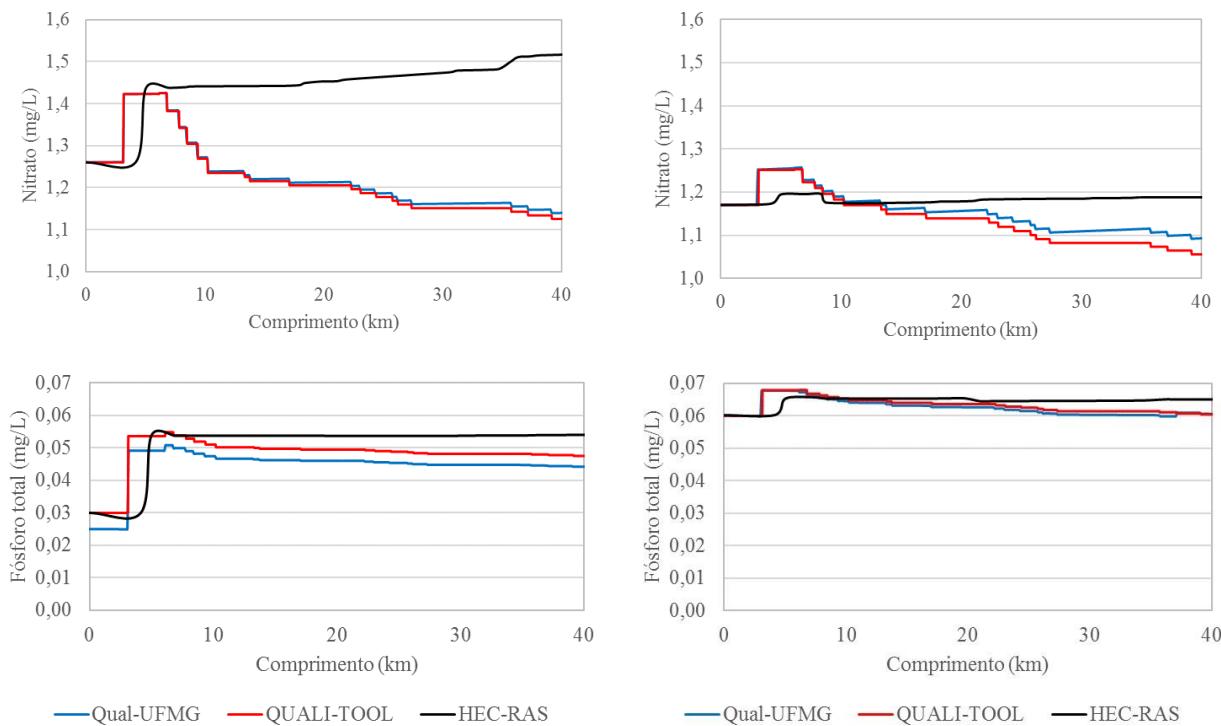
O módulo de qualidade da água na ferramenta HEC-RAS apresentou-se complexo pela quantidade de coeficientes que a ferramenta considera na modelagem, principalmente pelo fato de incluir as interações com as algas no sistema. Uma limitação apresentada na ferramenta HEC-RAS foi a invariabilidade dos coeficientes ao longo dos trechos, o que dificulta uma comparação de resultados entre outros modelos. Além disso, a ferramenta HEC-RAS apresenta seus coeficientes com nomenclaturas distintas das outras duas ferramentas brasileiras, necessitando consultar constantemente o Manual do Usuário para auxílio na modelagem.

4.5 Geração e visualização dos resultados.

Os resultados dos perfis longitudinais de OD, DBO, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrato e fósforo total, para as três ferramentas modeladas nos períodos chuvoso e estiagem, são representados na Figura 36. Para obtenção dos gráficos desta figura, os resultados de cada ferramenta foram compilados em uma planilha separadamente.

Figura 36 – Perfis longitudinais dos parâmetros de qualidade da água em período: (a) chuvoso; (b) estiagem





Fonte: Autora (2018)

De uma forma geral, no período de estiagem e chuvoso, os perfis longitudinais dos parâmetros de qualidade mantiveram a mesma tendência, com exceção ao oxigênio dissolvido na ferramenta QUAL-UFMG para o período de estiagem e chuvoso e série de nitrogênio na ferramenta HEC-RAS para o período chuvoso (Figura 36).

O aumento de OD na ferramenta QUAL-UFMG está vinculado ao nível de discretização do coeficiente de reação natural K_2 ao longo do trecho do rio Jordão estudado. A ferramenta QUAL-UFMG adotou as mesmas relações potenciais de $h = f(Q)$ e $v = f(Q)$ para todo o trecho de rio a partir de uma única estação fluviométrica instalada no ponto A (localizado no rio Jordão a montante da confluência com o córrego Brejo Alegre). Na realidade as características geométricas do canal natural (largura de base, declividade de talude e rugosidade das paredes laterais e do fundo) alteram ao longo do curso de água. Já nas outras ferramentas, apesar de utilizar métodos diferentes para a estimativa das grandezas hidráulicas (equação de Manning na ferramenta QUALI-TOOL e *Standard Step Method* na ferramenta HEC-RAS), discretizaram as características geométricas ao longo de quatro trechos no rio Jordão.

A variação da série de nitrogênio na ferramenta HEC-RAS no período chuvoso tem relação com a profundidade líquida calculada nas três ferramentas (Figura 35c). As profundidades elevadas estimadas no HEC-RAS diminuem a capacidade de sedimentação do nitrogênio orgânico, resultando em maiores concentrações de nitrogênio na massa líquida, e consequentemente de nitrato após o processo de nitrificação. Todavia, a profundidade elevada minimiza a influência do ressurgimento de fundo do nitrogênio amoniacal, o que justifica também o perfil reduzido de nitrogênio amoniacal para a simulação na ferramenta HEC-RAS.

Nas ferramentas QUAL-UFMG e QUALI-TOOL, especificamente nas confluências dos tributários com o rio Jordão, as variações nos perfis em forma de degrau são ocasionadas pela desconsideração do coeficiente de difusão turbulenta em ambiente lótico. De acordo com Chapra (1997), Silvino (2008) e Salla et al. (2014c), este coeficiente pode ser desprezado em rios e córregos. Em contrapartida, a ferramenta HEC-RAS utiliza a equação de Fisher (1979) para a estimativa do coeficiente de difusão turbulenta. Este estudo assumiu valores de 50 a 200 m²/s para o coeficiente de difusão turbulenta na ferramenta HEC-RAS, o que justifica o comportamento mais suavizado do perfil junto às confluências dos afluentes com o rio Jordão.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Diante da avaliação da aplicabilidade das três ferramentas computacionais QUAL-UFMG, QUALI-TOOL e HEC-RAS utilizando o rio Jordão como área de estudo, por meio de simulações dos mesmos cenários para as três ferramentas, com foco na análise da criação da topologia do sistema, procedimentos de entrada e interpretação dos resultados, chegou-se ao Quadro 2 que é um resumo comparativo dos três modelos.

As três ferramentas trabalham em ambiente lótico, todavia em escalas diferentes. A ferramenta QUAL-UFMG, apesar de não limitar a quantidade de afluentes, torna-se imprópria para cursos de água de ordem 3 ou superior, também por que não vincula os resultados das simulações de ordem inferior ao de ordem superior. A quantidade máxima de 15 tributários na ferramenta QUALI-TOOL limita sua capacidade espacial, além da lentidão no processamento em *Visual Basic*. Já a ferramenta HEC-RAS trabalha em qualquer escala, desde um trecho de rio até uma bacia hidrográfica complexa.

Dentre as três ferramentas, a ferramenta HEC-RAS se mostrou a mais complexa devido à maior quantidade de dados de entrada necessários na modelagem da parte hidráulica e de qualidade da água. O método *Standard Step Method* melhor representa a profundidade líquida ao longo do curso de água, além de trabalhar com transiente hidráulico. Em contrapartida, a ferramenta HEC-RAS tem a limitação da não variação dos coeficientes das reações bioquímicas do modelo. Também, a necessidade da inclusão de seção transversal para alimentação das cargas poluentes no rio principal limita seu uso em estudos com limitação financeira para os trabalhos de campo.

As ferramentas QUAL-UFMG e QUALI-TOOL se mostraram parecidas pelo fato de terem sido desenvolvidos em formatos de planilha de Excel e utilizarem o mesmo equacionamento matemático. A ferramenta QUALI-TOOL, apesar de não ter interface com sistema SIG, por mapear toda a extensão do escoamento por meio de coordenadas geográficas e altitude, consegue representar com mais precisão a topologia hídrica.

Quadro 2 – Resumo comparativo das ferramentas QUAL-UFMG, QUALI-TOOL e HEC-RAS.

Características	QUAL-UFMG	QUALI-TOOL	HEC-RAS
Desenvolvedor	Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)	Universidade Federal de Uberlândia (UFU)	US Army Corps of Engineers - EUA
Última versão publicada	Versão Única (2007)	Versão Única (2017)	Versão 5.0.5 (2018)
Idioma	Português	Português	Inglês
Licença gratuita	X	X	X
Formato	Planilha de Excel	Planilha de Excel	Plataforma
Suporte ao usuário	Não	Não	Sim, pago
Treinamento	Não	Não	Sim, pago
Documentação completa: manual do usuário, manual de fundamentos do modelo e exemplos (projetos)	–	X	X
Interface gráfica para entrada de dados e exibição dos resultados	–	X	X
Exportação de resultados em formato de gráficos	X	X	X
Integração com SIG para entrada de dados e exibição de resultados de forma georeferenciada	–	–	X
Consideração de dados climatológicos	–	–	X
Consideração de valores de referência	X	X	X
Consideração de coeficiente de dispersão	–	–	X
Consideração de injeção de massa de ar	–	–	X
Consideração de área de sombra	–	–	X
Modelagem de OD e DBO	X	X	X
Modelagem da série de Nitrogênio e Fósforo	X	X	X
Modelagem da coliformes	X	X	–
Modelagem de temperatura e algas	–	–	X

Fonte: Autora (2018)

Para estudos mais simplificados, em escalas reduzidas, as ferramentas QUAL-UFMG e QUALI-TOOL trazem resultados satisfatórios, além de possuírem interface amigável, gratuita e de fácil acesso ao usuário. A ferramenta HEC-RAS, por se tratar de um modelo complexo e com conexão com SIG, é aconselhada em estudos que exigem um nível de detalhamento superior. O sucesso das simulações em HEC-RAS está vinculado às disponibilidades de pessoal qualificado e financeira para obtenção dos dados batimétricos em campo.

REFERÊNCIAS

- ANDREU, J.; CAPILLA, J.; SANCHIS, E. (1995) *.AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management*. Jurnal of Hydrology, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Espanha, v. 177, p. 269-291, set. 1995. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02963-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02963-X)
- ARNTSEN. M. (2016). *Monitoring and modelling of water flow and quality at the Hoffselva DEMO site (Oslo)*. Dissertação de mestrado. Norwegian University of Science and Technology. Department of Hydraulic and Environmental Engineering. 2016
- BEZERRA, I. S. O.; MENDONCA, L. A. R.; FRISCHKORN, H. (2008) Autodepuração de cursos d'água: um programa de modelagem Streeter Phelps com calibração automática e correção de anaerobiose. Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 61, n. 2, p. 249-255, Jun 2008. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672008000200020>
- CALMON, A. P. S. et al. (2016). Uso combinado de curvas de permanência de qualidade e modelagem da autodepuração como ferramenta para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água superficiais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito, Vitória, ES, Brasil, v. 21, n. 1, p. 118-133, mar. 2016. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p118-133>
- CAO, X.J. & ZHANG, H. (2006) Commentary on study of surface water quality model. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, vol. 4, n. 4, p. 18–21.
- CETESB – Legislação Federal de Controle da Poluição Ambiental. ASCETESB, S. Paulo, 1986.
- CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J.; TAO, H. (2006). *QUAL2K: a modeling framework for simulating river and streamwater quality, version 2.04: documentation and users' manual*. Medford: Civil and Environmental Engineering Dept. Tufts University.
- CHAPRA, S.C. (1997) *Surface water-quality modeling*. Tufts University, Long Grove, Illinois, Waveland Press Incorporation, 844 p.
- CHOW, V. T. *Open-Channel Hydraulics*. University of Illinois. The Blackburn Press, 2009.
- CLIMATE-DATA.ORG: Disponível em: < <https://pt.climate-data.org/location/25077/>>. Acesso em: Agosto. 2018
- CONAMA. (2005). Resolução CONAMA nº 357/05. Estabelece a classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional. Brasília, SEMA, 2005. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf> > Acesso em: Abril de 2017.
- CUNHA, C. L. N.; FERREIRA, A. P. (2006). Contribuições para o Desenvolvimento da Capacidade de Previsão de um Modelo de Qualidade de Água. Revista Brasileira de

Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, v. 11, n. 2, p. 71-83, jun. 2006. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v11n2.p71-83>

DE PAULA, L.M. (2011). Avaliação da qualidade da água e autodepuração do rio Jordão, Araguari (MG). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Engenharia Civil, Uberlândia, 177 p.

DROLČ, A.; ZAGORC KONCAN, J. (1995). *Water quality modelling of the river Sava, Slovenia*. Elsevier Science, National Institute Of Chemistry, Hajdrihova, Sloovenia And University Of Ljubljana, Faculty Of Chemistry And Chemical Technology, Askerceva, Slovenia, v. 30, n. 11, p. 2587-2592, abr. 1995. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00154-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00154-6)

FAN, C.; WANG, W.; LIU, K. F. (2012) *Sensitivity analysis and water quality modeling of a tidal river using a modified Streeter-Phelps equation with HEC-RAS-calculated hydraulic characteristics*. Environmental Modeling &Assessment. v. 17, n. 6, p. 639-651. <https://doi.org/10.1007/s10666-012-9316-4>

FAN, C.; KO, C-H; WANG, W-S. (2009) *An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation*. Journal of Environmental Management, Ming Chi University Of Technology, National Taiwan University, Ming Chi University Of Technology, Taiwan, v. 90, n. 2009, p. 1824-1832, Jan. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.011>

FISCHER, H.B; LIST, E.J; KOH, R.C.Y; IMBERGER, J; BROOKS, N.H. (1979) *Mixing in inland and coastal waters*, San Diego, Academic Press, 1979.

FLECK. L.; TAVARES, M.H.F; EYNG. E. (2013) Principais modelos matemáticos de qualidade da água e suas aplicações: uma revisão. *Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia*, v. 4, n. 7, p. 47-62.

GONÇALVES, J. C. de S. I; GIORGETTI, M. F. (2013) Mathematical model for the simulation of water quality in rivers using the Versim PLE ® software. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, v.7, n.1, p.48-63. 2013. <https://doi.org/10.4090/juee.2013.v7n1.048063>

HALAJ, P. et al. (2014) *Modeling of contaminant dispersion in streams: 1D versus 2D model use comparison: case study on the Ondava River*. Journal of International Scientific Publications: Ecology and Safety, Slovakia, v. 8, p. 393-399, jul. 2014.

GUIMARÃES, T.M.H. (2018) Interferência do uso e ocupação do solo na qualidade da água em bacia hidrográfica com disponibilidade hídrica crítica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Engenharia Civil, Uberlândia, 84 p.

HEC - Hydrologic Engineering Center. (2016) *River analysis system users reference manual version 5.0*. US Army of Crop Engineers. Davis, Califórnia.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Araguari. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: Agosto 2017.

JENSEN, M.R.; LOWNEY, C.L. (2004) Temperature Modeling with HEC - RAS. Critical transitions in water and environmental resources management. In: World Water Congress, American Society of Civil Engineers, Marrakech, Morocco. [https://doi.org/10.1061/40737\(2004\)404](https://doi.org/10.1061/40737(2004)404)

LEONARD, B.P. (1979) *A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 19, n. 1, pp. 59-98. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(79\)90034-3](https://doi.org/10.1016/0045-7825(79)90034-3)

MAGALHÃES, A.A.; SALLA, M.R.; FILHO, J.E. (2017) Manual do Usuário QUALITOOL: Uma ferramenta gráfica-interativa para simulação da qualidade da água em ambientes lóticos. 36 p.

MENDES, W.J.S. (2014) *Adaptação do modelo de Streeter-Phelps para modelagem da qualidade da água em uma grande bacia semiárida*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Engenharia Civil com ênfase em Recursos Hídricos, Fortaleza, 127 p.

MOURÃO JUNIOR, P. R. (2010). Aplicação do modelo de autodepuração de qualidade das águas QUAL-UFMG estudo de caso sub-bacia do Rio Piracicaba. 144 f. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

ONU. Declaração de Estocolmo de 1972. Disponível em: <www.mma.gov.br/estruturas/agenda21/_arquivos/estocolmo.doc>. Acesso em Abril 2017.

PALIWAL, R.; SHARMA, P.; KANSAL, A. (2006). *Water quality modelling of the river Yamuna (India) using QUAL2A-UNCAS*. Journal of Environmental Management, School Of Environmental Management, Guru Gobind Singh Indraprastha University, Kashmere Gate, India, v. 87, p. 131-144, maio. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.02.003>

PAREDES-ARQUIOLA, J. et al. (2010). *Water Quantity and Quality Models Applied to the Jucar River Basin, Spain*. Water Resource Manage, Institute Of Water And Environmental Engineering, Technical University of Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain, v. 24, n. 11, p. 2759-2779, set. 2010. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9578-z>

PEREIRA, C.C. & LIMA, J.D. (2015) As influências dos usos das terras da Bacia Hidrográfica do córrego Brejo Alegre de Araguari (MG) sobre a qualidade das águas. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, v. 3, n. 19, p. 162-178. <https://doi.org/10.17271/2318847231920151052>

PREDICTION of Worldwide Energy Resources. Disponível em: <<https://power.larc.nasa.gov>>. Acesso em: 16 jul. 2018.

PREFEITURA DE ARAGUARI. Notícias: Realizada vistoria na ETE Central. Araguari. Disponível em: <<http://www.araguari.mg.gov.br/noticias/realizada-vistoria-na-ete-central>> Acesso em: Agosto 2018.

RINALDI, S. e SONCINI-SESSA, R. *Sensitivity Analysis of generalized Streeter-Phelps Models. Advances in Water Resources*, Milão, Itália, Vol. L, nº3, 1978.

OLIVEIRA FILHO, A. A. e LIMA NETO, I. E. *Water quality modeling at Poti river in Teresina (Piauí, Brazil)*. Eng Sanit Ambient, – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, v.23, n.1. jan/fev 2018. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522017142354>

SALLA, M.R.; PEREIRA, C.E.; ALAMY FILHO, J.E.; DE PAULA, L.M.; PINHEIRO, A.M. (2013) Self-depuration study of Jordão River, located in Dourados River Basin. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 105-114. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200002>

SALLA, M.R.; ARQUIOLA, J.P.; SOLERA, A.; ÁLVAREZ, J.A.; PEREIRA, C.E.; ALAMY FILHO, J.E.; OLIVEIRA, A.L. (2014a) Integrated modeling of water quantity and quality in the Araguari River basin, Brazil. *Latin American Journal of Aquatic Research*, v. 42, n. 1, p. 224-244, 2014a. <https://doi.org/10.3856/vol42-issue1-fulltext-19>

SALLA, M. R. et al. (2014b) *Self-cleaning ability of the middle and lower courses of the Uberaba River, UPGRH-GD8*. Journal of Urban and Environmental Engineering, Department Of Civil Engineering, Federal University Of Uberlandia, Brazil, v. 8, n. 1, p. 118-133, jun. 2014b. <https://doi.org/10.4090/juee.2014.v8n1.118133>

SALLA, M.R. et al. (2014c). Sistema de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Uberabinha, Minas Gerais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, v. 19, n.1, p. 189-204, 2014c. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p189-204>

SCAVIA, D.; KELLY, E.L.A.; HAGY, J.D. (2006) A simple model for forecasting the effects of nitrogen loads on Chesapeake Bay hypoxia. *Estuaries and Coasts*, v. 29, n. 4, p. 674–684. <https://doi.org/10.1007/BF02784292>

SILVINO, A.N.O. (2008) Avaliação e modelagem da qualidade da água da bacia do rio Coxipó, no município de Cuiabá - MT. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Mato Grosso, Física e Meio Ambiente, Cuiabá, 173 p.

STREETER, H. W., PHELPS, E. B. *A study of the natural purification of the Ohio River. Public Health Bulletin 146*, U.S. Washington: Public Health Service, 1925.

SULIMAN, ALI H. AHMED. (1985). *Using HEC-RAS and QUAL2E to asses Johor river water quality*. Master of Engineering (Master of Engineering in Civil-Hydraulics and Hydrology) - Faculty of Civil Engineering, University Technology Malaysia, Malaysia, 1985.

THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. – *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. Harper Collins Publishers, 1987. 664 p.

- VON SPERLING, M. (1996) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos (princípios do tratamento biológico de águas residuárias)*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, UFMG.
- VON SPERLING, M. (2007) *Estudos e modelagem da qualidade da água de rios*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, UFMG, v. 7, 588 p.
- WANG, Qinggai et al. (2013) *A Review of Surface Water Quality Models*. Hindawi Publishing Corporation - The Scientific World Journal. Appraisal Center For Environment And Engineering, Ministry Of Environmental Protection, Beijing, China, p. 1-7. Maio 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/231768>
- YU, L.; SALVADOR, N. N. B. (2004) Software for water quality modeling in rivers and its application. *GIS and RS in hidrology, water resources and environment*, vol. I, Chen *et al* (eds.), 2004.
- Zhang, Z., e B.E. Johnson. (2014). *Application and evaluation of HEC-RAS nutrient simulation module (NSM I)*. EMRRP Technical Notes Collection. ERDC TN-EMRRP-SR-47. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- ZUFFO, A. C. (2002) Proposta metodológica para gestão integrada da qualidade das águas. XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancun, México, 21 al 31 de Outubro, 2002.