



**Universidade Federal de Itajubá**  
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas

Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos  
**PROFÁGUA**

Viviane Ramos de Carvalho

Engenheira Ambiental

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DO RIO PIRACICABA (MG) PARA  
DILUIÇÃO DE EFLUENTES UTILIZANDO O MODELO DE  
QUALIDADE DA ÁGUA QUAL-UFMG**

Itabira – Minas Gerais

2020

Viviane Ramos de Carvalho

**Avaliação da capacidade do rio Piracicaba (MG) para diluição de efluentes utilizando o modelo de qualidade da água QUAL-UFMG**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), na Universidade Federal de Itajubá. Área de concentração: Regulação e governança de recursos hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Augusto Costa Gonçalves

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo de Aguiar do Couto

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Banca Examinadora: Prof. Dr. Anderson de Assis Moraes

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas - UNIFEI

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Elisabete Lourdes do Nascimento

Departamento Acadêmico de Engenharia Ambiental – UNIR

Itabira – Minas Gerais

2020

## AGRADECIMENTOS

Minha eterna gratidão à Deus, criador de todas as formas de vida, detentor das respostas de todas as questões e que com carinho me preparou para trilhar esta caminhada.

Agradeço aos meus pais, Sônia e Cosmo, por uma vida de dedicação e amor.

Sou grata aos meus familiares, amigos e irmãos em Cristo, que estiveram sempre presentes com abraços, sorrisos, palavras doces e orações.

Agradeço a todos os colegas de mestrado pela feliz convivência durante esses dois anos.

Aos professores José Augusto e Eduardo, pela orientação, disponibilidade, sugestões e conhecimentos transmitidos.

A todos os professores do Mestrado, demonstro minha admiração e respeito e agradeço-lhes pelos ensinamentos, colaborações e incentivos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Agradeço ainda a todos que não estão aqui diretamente referidos, mas que me apoiaram e contribuíram de alguma forma com este trabalho e na minha formação pessoal e profissional: muito obrigado pela colaboração.

*“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”*

*Isaac Newton*

## RESUMO

CARVALHO, Viviane Ramos. **Avaliação da capacidade do rio Piracicaba (MG) para diluição de efluentes utilizando o modelo de qualidade da água QUAL-UFMG**. 2020. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2020.

O modelo vigente de desenvolvimento socioeconômico, associado ao crescimento populacional acelerado e a necessidade de atendimento às diversas atividades humanas têm evidenciado um panorama complexo de poluição nos corpos hídricos, causando consequências diretas na capacidade de diluição e de autodepuração dos rios. A implantação de sistemas de suporte a decisão e modelagens de qualidade da água tornam-se essenciais para se alcançar uma eficiente gestão das águas e articulação dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos. Assim, o objetivo principal deste trabalho foi analisar a capacidade de diluição do rio Piracicaba utilizando o modelo de qualidade da água QUAL-UFMG. Para isso, foi realizado o ajuste e a calibração do modelo através de dados hidrológicos e de qualidade da água provenientes das estações fluviométricas. A partir dos resultados da modelagem constatou-se que o modelo conseguiu representar bem a realidade do rio estudado. A simulação hipotética efetuada de instalação de sistemas de tratamento de efluentes domésticos para alguns lançamentos diretamente no rio Piracicaba demonstrou um decréscimo de 36,96% na concentração de DBO. A mudança nas classes de enquadramento resultou em variações de até 79,83% nas vazões de diluição. A classe de enquadramento exerce significativa influência nas vazões de diluição, com aumento dos valores consoantes ao nível e restrição, ou seja, cada vez que diminui a DBO permitida no corpo d'água, a vazão de diluição eleva-se. É interessante ressaltar que de acordo com as condições calculadas de vazão de diluição, a consideração dos lançamentos em todo o corpo hídricos é de extrema importância para a determinação das vazões disponíveis e indisponíveis e consequente disponibilidade hídrica.

**Palavras chave:** Modelagem de Qualidade da Água, QUAL-UFMG, Diluição.

## ABSTRACT

CARVALHO, Viviane Ramos. **Evaluation of piracicaba river (MG) capacity for effluent dilution using the QUAL-UFMG water quality model.** 2020. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2020.

The supervised model of socioeconomic development, associated with accelerated population growth and the need to attend to various human activities evidenced in a complex panorama of pollution in water bodies, which directly affects the dilution capacity and self-purification of rivers. The implementation of decision support systems and water quality models is essential for efficient water management and articulation of the National Water Resources Policy instruments. Thus, the main objective of this work is to analyze the dilution capacity using the QUAL-UFMG water quality model in a case study in the Piracicaba River. For this, the model was adjusted and calibrated using hydrological and water quality data from fluviometric stations. From the results of the modeling it was possible to make a diagnosis of the basin and after the application of the model it was found that it was able to represent well the reality of the river studied. The hypothetical simulation considering the installation of domestic effluent treatment systems for some discharges directly into the Piracicaba River showed a 36.96% decrease in biochemical oxygen demand concentration. The change in the framing classes resulted in variations of up to 79.83% in the dilution flows. The framing class has a significant influence on the dilution flows, with an increase in the consonant values for level and restriction, that is, each time the permitted biochemical oxygen demand concentration in the water body decreases, the dilution flow increases. It is interesting to note that according to the calculated dilution flow conditions, the consideration of previous releases is of extreme importance for the determination of available and unavailable flows and consequent water availability.

**Keywords:** Water Quality Modeling, QUAL-UFMG, Dilution.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Mapa de localização da bacia do rio Piracicaba.....	21
Figura 02 – Vazão x Distância do rio Piracicaba obtido no modelo QUAL-UFMG.....	51
Figura 03 – Vazão x Distância do rio Piracicaba obtido no modelo QUAL-UFMG desconsiderando as captações.....	52
Figura 04 – OD x Distância do rio Piracicaba obtido no modelo QUAL-UFMG.....	54
Figura 05 – DBO x Distância do rio Piracicaba obtido no modelo QUAL-UFMG.....	54
Figura 06 – OD x Distância do rio Piracicaba obtido no modelo QUAL-UFMG considerando o cenário de tratamento de efluentes.....	57
Figura 07 – DBO x Distância do rio Piracicaba obtido no modelo QUAL-UFMG considerando o cenário de tratamento de efluentes.....	58
Figura 08 – Vazões de diluição, indisponível e disponível considerando a classe atual do rio (Classe 2).....	59
Figura 09 – Vazões de diluição, indisponível e disponível considerando o cenário de tratamento de efluentes.....	60
Figura 10 – Vazões de diluição, indisponível e disponível considerando o rio como Classe 1...62	
Figura 11 – Vazões de diluição, indisponível e disponível considerando o rio como Classe 3...63	

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Faixas típicas de $K_1$ , $K_d$ e $K_s$ .....	38
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Captações no rio Piracicaba.....	25
Tabela 02 – Dados da população desconsiderando-se a porcentagem de habitantes que são contemplados nos sistemas de tratamento de efluentes para os municípios e distritos que lançam efluentes no rio Piracicaba e seus tributários.....	26
Tabela 03 – Estimativa de consumo, volume lançado, carga poluidora gerada e concentração lançada de DBO no rio Piracicaba pela população urbana.....	27
Tabela 04 – Pontos de lançamentos de efluentes domésticos.....	27
Tabela 05 – ETE's que lançam efluentes no rio Piracicaba.....	29
Tabela 06 – Lançamento de efluentes industriais no rio Piracicaba.....	30
Tabela 07 – Trechos e declividades do rio Piracicaba.....	32
Tabela 08 – Largura medida para cada trecho definido.....	33
Tabela 09 – Cálculo da vazão incremental.....	36
Tabela 10 – Valores típicos de $K_2$ (base e, 20°C).....	39
Tabela 11 – Valores de $K_2$ segundo modelos baseados em dados hidráulicos do curso d'água (base e, 20°C).....	40
Tabela 12 – Concentração de saturação de oxigênio em água limpa (mg/L).....	41
Tabela 13 – Cálculos realizados para obtenção dos coeficientes de descarga.....	42
Tabela 14 – Estações fluviométricas selecionadas na bacia do rio Piracicaba.....	43
Tabela 15 – Valores médios dos coeficientes de descarga a, b, c e d.....	45
Tabela 16 – Estações de monitoramento de qualidade de água.....	46
Tabela 17 – Estimativa da carga de DBO lançada diretamente no rio Piracicaba pela população urbana para o cenário de tratamento de efluentes.....	48
Tabela 18 – Valores de $K_1$ , $K_d$ e $K_s$ após calibração utilizando solver.....	53
Tabela 19 – Valores de vazões de diluição, indisponível e disponível considerando a classe atual do rio (Classe 2).....	59

Tabela 20 – Valores de vazões de diluição, indisponível e disponível considerando o cenário de tratamento de efluentes.....	61
Tabela 21 – Valores de vazões de diluição, indisponível e disponível considerando o rio como Classe 1.....	62
Tabela 22 – Valores de vazões de diluição, indisponível e disponível considerando o rio como Classe 3.....	64

## **LISTA DE APÊNDICES**

Apêndice A – Tributários do rio Piracicaba.....	82
Apêndice B – Diagrama unifilar.....	88

## LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A – Área da bacia

ANA – Agência Nacional de Águas

BHRPI – Bacia Hidrográfica do rio Piracicaba

COPAM – Conselho de Política Ambiental

CERH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos

CBH – Comitê da bacia hidrográfica

CS – Concentração de saturação

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

$C_0$  – Concentração do constituinte na mistura

$C_r$  – Concentração do constituinte no componente 1

$C_e$  – Concentração do constituinte no componente 2

$C_{ef}$  – Concentração do parâmetro de qualidade no efluente

$C_{perm}$  – Concentração permitida para o parâmetro de qualidade no manancial onde é realizado o lançamento

$C_{nat}$  – Concentração natural do parâmetro de qualidade no manancial onde é realizado o lançamento

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

DN – Deliberação Normativa

D – Declividade

$D_a$  – Diferença de altitude

$D_h$  – Distância do rio

DBO – Demanda bioquímica de oxigênio

DESA/UFMG – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais

ETE – Estação de tratamento de efluentes

$\text{g/m}^3$  – Grama por metro cúbico

H – Profundidade

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

IDE-Sisema – Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

$\text{kgDBO/hab.d}$  – Quilograma de Demanda Bioquímica de Oxigênio por habitante dia

$\text{kgDBO/d}$  – Quilograma de Demanda Bioquímica de Oxigênio por dia

$K_1$  – Coeficiente de desoxigenação

$K_{1T}$  –  $K_1$  a uma temperatura T qualquer

$K_{1:20}$  –  $K_1$  à temperatura  $T=20^\circ\text{C}$

$K_d$  – Coeficiente de decomposição

$K_s$  – Coeficiente de sedimentação

$K_2$  – Coeficiente de reaeração

$\text{km}^2$  – Quilômetro quadrado

km – Quilômetro

$\text{L/s.km}^2$  – Litro por segundo por quilômetro quadrado

$\text{L/hab.dia}$  – Litro por habitante dia

$\text{L/dia}$  – Litro por dia

m – Metro

mm – Milímetro

$\text{mgDBO/L}$  – Miligrama de demanda bioquímica de oxigênio por litro

$\text{m}^3/\text{s}$  – Metro cúbico por segundo

$\text{mg/L}$  – Miligrama por litro

N – Nitrogênio

OD – Oxigênio dissolvido

P – Precipitação média anual

pH – Potencial hidrogeniônico

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

ProfÁgua – Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos

Q – Vazão

$Q_r$  – Vazão do compartimento 1

$Q_e$  – Vazão no compartimento 2

$Q_{dil}$  – Vazão de diluição para determinado parâmetro de qualidade

$Q_{ef}$  – Vazão do efluente que contém o parâmetro de qualidade analisado

$Q_{7,10}$  – Vazão mínima para um tempo de recorrência de dez anos e mínima de sete dias

$Q_{90}$  – Vazão em que 90% dos dados diários de vazão da série são iguais ou superiores a ela

$Q_{95}$  – Vazão em que 95% dos dados diários de vazão da série são iguais ou superiores a ela

$Q_{ind}$  – Vazão indisponível

$Q_{reman}$  – Vazão remanescente

$Q_{ef}$  – Vazão do efluente

RPPN – Reserva Particular do Patrimônio Natural

ton/mês – Tonelada por mês

SINGREH – Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos

T – Temperatura da água

t – Tempo de percurso

U.S.EPA – United State Environmental Protection Agency

UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

UPGRH – Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos

vs – Velocidade de sedimentação do material particulado

v – Velocidade do curso d'água

°C – Grau Celsius

$\theta$  – Coeficiente de temperatura

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	1
1. ADERÊNCIA.....	3
2. JUSTIFICATIVA.....	4
3. OBJETIVOS .....	5
3.1. Objetivo geral .....	5
3.2. Objetivos específicos .....	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
4.1. Qualidade da água.....	5
4.2. Poluição hídrica .....	7
4.3. Capacidade de diluição dos corpos d'água .....	8
4.4. Legislação aplicada aos recursos hídricos.....	11
4.5. Modelagem matemática da qualidade da água.....	15
4.6. Incerteza .....	16
4.7. Calibração e validação .....	17
4.8. Trabalhos desenvolvidos sobre modelagem de qualidade da água.....	18
5. METODOLOGIA .....	20
5.1. Caracterização da área de estudo .....	20
5.1.1. A bacia do rio Piracicaba.....	20
5.1.2. Clima.....	21
5.1.3. Geomorfologia .....	22
5.1.4. Drenagem .....	23
5.1.5. Vegetação .....	23
5.1.6. Atividades econômicas .....	24
5.2. Captação de água e lançamento de efluentes .....	24
5.2.1. Captação de água no rio Piracicaba .....	24
5.2.2. Lançamento de efluentes domésticos .....	25
5.2.3. Tratamento de efluentes domésticos.....	29
5.2.4. Lançamento de efluentes industriais .....	30
5.3. Equação de mistura em lançamentos pontuais.....	31
5.4. Diagrama unifilar .....	32
5.5. Declividade.....	32
5.6. Largura do canal .....	33
5.7. Vazão .....	33

5.7.1. Vazão do rio Piracicaba .....	33
5.7.2. Vazão dos tributários .....	35
5.7.3. Vazão incremental.....	35
5.8. Determinação dos coeficientes.....	36
5.9. Coeficientes de ajuste .....	42
5.10. Entrada de dados para calibração do modelo .....	45
5.11. Simulação de tratamento de efluentes .....	47
5.12. Vazão de diluição.....	48
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	51
6.1. Calibração do modelo .....	51
6.1.1. Vazão .....	51
6.1.2. Oxigênio Dissolvido e DBO.....	52
6.2. Simulação de cenário de tratamento de efluentes .....	57
6.3. Vazão de diluição.....	58
CONCLUSÕES .....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66
APÊNDICE A – Tributários do rio Piracicaba .....	82
APÊNDICE B – Diagrama unifilar do rio Piracicaba .....	88

## INTRODUÇÃO

O acelerado crescimento populacional e a industrialização têm contribuído para o aumento da produção de resíduos, além de elevar a demanda de água e à constante degradação dos mananciais. Segundo Pinheiro et al. (2013), o crescimento urbano e industrial acelerado está entre os fatores que mais têm causado diminuição na disponibilidade hídrica, seja pela crescente demanda por esse recurso ou pelo lançamento indiscriminado de resíduos nos rios, diminuindo a qualidade das águas.

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei nº. 9.433 de 8 de janeiro de 1997, no artigo 2, inciso I, mostra que entre os objetivos da referida lei está "assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos" (BRASIL, 1997). Mesmo diante da consciência de que água é um recurso indispensável, há permanentes ameaças à quantidade e qualidade da água doce disponível no planeta.

A existência de conflitos concernentes aos usos múltiplos das águas faz com que se torne de suma importância o estabelecimento de uma adequada gestão para esse recurso. A gestão das águas deve visar a satisfação das necessidades da população atual, sem comprometer o abastecimento das futuras gerações. Esses fatores vêm provocando cada vez mais preocupações entre pesquisadores, administradores, gerentes e tomadores de decisão acerca da capacidade de gerenciar os inúmeros conflitos resultantes da intensificação das atividades humanas e a degradação dos recursos hídricos (TUNDISI, 2006).

O complexo panorama de poluição nos corpos d'água tem consequências diretas para a redução das vazões dos rios, causando uma menor capacidade de diluição e autodepuração (PAREDES; ANDREAU; SOLERA; 2010). Este cenário tornou ainda mais importante os estudos sobre os aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos disponíveis. Portanto, são necessários ferramentas para quantificação desses impactos e instrumentos para gerenciamento, visando uma eficiente gestão dos recursos hídricos e propiciando suporte a tomada de decisões direcionadas a manutenção e preservação desses sistemas.

A PNRH dispõe de alguns instrumentos para gestão de recursos hídricos, como a outorga dos direitos de uso da água. Segundo essa lei, o poder outorgante por meio da outorga concede a derivação e captação de determinado volume de água, assim como o lançamento de efluentes, aproveitamento hidrelétrico, e outros usos que alterem o regime, a qualidade e a

quantidade da água existente em um corpo hídrico. Esse instrumento tem como objetivo disciplinar a utilização de água e compatibilizar a demanda e a disponibilidade hídrica.

Para que os processos de outorga sejam geridos em quantidade e qualidade, existe a necessidade de se considerar de forma articulada o enquadramento em classes de uso, o regime de vazão e a capacidade de autodepuração do corpo hídrico, tudo isto diante do cenário real da bacia hidrográfica (COLLISCHONN, 2014). É necessário, portanto, que se conheçam os impactos qualitativos e quantitativos que cada usuário causará ao manancial ao longo do tempo e dos trechos, em função de cada parâmetro de qualidade. Segundo Dibo (2013), após o conhecimento dos impactos individuais, é fundamental estimar e entender o impacto cumulativo para uma compreensão mais abrangente e estratégica das perturbações que poderão ocorrer em sistemas ambientais.

Neste contexto, a utilização da modelagem da qualidade de água pode ser considerada como uma importante ferramenta para subsidiar a gestão dos recursos hídricos visando o seu uso múltiplo (KNAPIK, 2009). A modelagem da qualidade das águas superficiais possibilita uma abordagem holística sobre os principais processos e interações que se desenvolvem em um ecossistema aquático, além de prever suas reações a estímulos externos e estimar a sua capacidade de assimilação de efluentes (SEMARH/SRH, 2014).

A utilização de modelos torna-se essencial para se alcançar uma eficiente gestão das águas e articulação dos instrumentos da PNRH, subsidiando os técnicos no entendimento do comportamento de cada trecho do rio (TERCINI, 2014). O modelo utilizado deve ser capaz de simular cenários de desenvolvimento futuro na bacia hidrográfica e estimar os regimes de descarga de efluentes, possibilitando fundamentar as decisões de gestão e manejo de bacias hidrográficas tomadas por seus responsáveis legais (GUEDES, 2009).

A bacia do rio Piracicaba, em Minas Gerais, vem sofrendo consideráveis transformações ao longo do tempo oriundas das atividades de industrialização, mineração e urbanização, e em muitos casos ocorre o comprometimento da qualidade das águas da região. O rio Piracicaba, curso d'água objeto deste estudo, está inserido na sub-bacia do rio Piracicaba, pertencente à bacia do rio Doce.

Desenvolvido em 2007 por von Sperling, o modelo de qualidade da água QUAL-UFMG é uma plataforma multifuncional e de simples utilização, capaz de simular a reaeração atmosférica e seus efeitos no balanço de oxigênio dissolvido, o decaimento de matéria orgânica e coliformes, além de abranger as séries de fósforo e nitrogênio (TEODORO et al, 2013).

Portanto, o presente trabalho tem como propósito analisar a capacidade de diluição do rio Piracicaba, utilizando o modelo de qualidade da água QUAL-UFGM.

## 1. ADERÊNCIA

O Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua) tem por princípio a capacitação dos diversos atores envolvidos na gestão de recursos hídricos, oferecendo bases técnicas sólidas para a melhor análise e consequente tomada de decisão.

O ProfÁgua é recomendado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), do Ministério da Educação, apoiado pela Agência Nacional de Águas (ANA) e coordenado pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), sendo oferecido em 14 Instituições de Ensino Superior distribuídas nas diversas regiões geográficas brasileiras.

Esta dissertação corrobora os objetivos do mestrado, atendendo à linha de pesquisa *Regulação e Governança de Recursos Hídricos*, correspondendo ao subitem sobre *Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água*, buscando aliar a teoria às necessidades práticas do sistema de recursos hídricos.

A dissertação tem como escopo complementar os estudos sobre a implementação de modelos matemáticos visando seu aperfeiçoamento para uma maior eficiência no processo de gestão e na tomada de decisões por parte dos órgãos governamentais. Esse objetivo adequa-se à linha de pesquisa escolhida, que propõe desenvolvimento e aplicação de métodos e ferramentas para gestão de bacias, considerando a poluição de corpos hídricos, doenças de veiculação hídrica, degradação de ambientes aquáticos, desastres naturais e eventos hidrológicos extremos.

Pretende-se auxiliar a gestão da bacia, possibilitando a identificação dos trechos que são mais impactados pelos lançamentos de efluentes, com vistas a não sobrecarregar o corpo hídrico e proporcionar condições adequadas para autodepuração do sistema.

Visa-se também prever a eficiência de instalação de estações de tratamento de efluentes das sedes municipais e distritos que efetuam lançamento de efluentes diretamente no rio Piracicaba, para gerenciar os riscos dos eventos extremos futuros, como: poluição, eutrofização, morte da biota aquática, interrupção no abastecimento e nos demais usos de água devido ao

excesso de efluentes lançados. A partir disso, pretende-se auxiliar na resposta aos desafios de integração conceitual destes problemas no entendimento da dinâmica espacial e temporal para a realização de modelos de previsão e gestão de riscos.

## 2. JUSTIFICATIVA

A escolha do tema do trabalho deu-se pela necessidade de analisar o curso de água de forma integrada, avaliando as consequências do lançamento dos efluentes outorgados para o corpo hídrico, os aspectos qualitativos e quantitativos que serão alterados, e os efeitos desse lançamento à jusante.

A escolha da bacia do rio Piracicaba como unidade de estudo se justifica devido à intensa atividade minerária, tanto de minério de ferro como de ouro. Além das atividades de mineração, a região se destaca na siderurgia e na silvicultura como insumo na produção de celulose. Segundo CONSÓRCIO ECOPLAN - LUME (2010) os usos da água na bacia são predominantes para o abastecimento industrial, que corresponde a 51% do total de retiradas estimadas. No que se refere ao uso e ocupação do solo, a bacia apresenta 60% de sua área com sistemas antropizados e 40% em estágio natural (PARH PIRACICABA, 2010).

Outro fator que influenciou na escolha da bacia é a presença de 12 estações de monitoramento da qualidade da água, correspondendo a uma densidade de estações de 1,40 por 1000 km<sup>2</sup>.

Escolheu-se simular cenários hipotéticos de instalação de sistemas de tratamento de efluentes domésticos porque o rio Piracicaba já apresenta números significativos de poluição devido aos lançamentos *in natura* de esgotos domésticos e industriais. Um exemplo disso é que o lançamento indiscriminado de esgoto doméstico nos cursos hídricos ocasiona a elevada densidade de coliformes termotolerantes nas águas da BHRPI, conforme divulgado no Boletim Informativo (IGAM, 2010b), com valor acima do limite legal estabelecido pela DN Conjunta COPAM-CERH nº 1 de 2008.

É imprescindível desenvolver estudos sobre a capacidade de diluição do corpo hídrico e os trechos adequados para lançamento de efluentes, com o propósito de não comprometer a classe de enquadramento, garantir a autodepuração e assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de águas, em padrões de qualidade adequados.

Desta maneira, é fundamental que o gerenciamento dos recursos hídricos tenha uma política clara e definida com relação ao ponto de vista técnico, privilegiando formas de tratamento de efluentes antes de serem lançados.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo geral**

Analisar a capacidade do rio Piracicaba para diluição de efluentes utilizando o modelo de qualidade da água QUAL-UFMG.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- 3.2.1.** Efetuar o ajustamento dos coeficientes que compõe o modelo QUAL-UFMG para o rio Piracicaba,
- 3.2.2.** Simular cenários hipotéticos de instalação de sistemas de tratamento de efluentes domésticos de quatro sedes que efetuam seu lançamento diretamente no rio Piracicaba,
- 3.2.3.** Estimar as vazões necessárias para diluição de efluentes requeridas pelos lançamentos alocados na bacia e as vazões disponíveis comparando-se com as classes de enquadramento.

### **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **4.1. Qualidade da água**

O conceito de qualidade no âmbito dos recursos naturais não se refere necessariamente à pureza, mas aos aspectos e características químicas, físicas e biológicas que servem de parâmetros para se analisar as diversas finalidades de tal recurso para a manutenção do equilíbrio natural e para o uso antrópico.

De maneira geral, pode-se dizer que a qualidade de uma determinada água é função das condições naturais e do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica (MENEZES, 2016).

As condições naturais são aquelas decorrentes da formação geológica da região, de onde são provenientes as características do solo e a vegetação nativa, podendo interferir no escoamento e infiltração das precipitações. Já as ações antrópicas podem gerar uma série de consequências negativas não só para o ser humano, como também para o meio ambiente.

O lançamento de efluentes gera poluição dos rios, impedindo e/ou dificultando a utilização dessa água para abastecimento humano e demais atividades. Além disso, a falta de conservação das Áreas de Preservação Permanente (APPs) no entorno do curso hídrico causa

assoreamento e conseqüente diminuição do fluxo de água (MMA, 2011). Nesse sentido, Gazzaz et al. (2012) afirmam que um dos grandes problemas da perturbação antrópica é o fato dela se acumular ao longo do espaço e do tempo.

O suprimento de água doce de boa qualidade é essencial para o desenvolvimento econômico, para a qualidade de vida das populações humanas e para a sustentabilidade dos ciclos no planeta (MMA, 2019). Segundo Sardinha et. al. (2008), dentre os recursos naturais fundamentais, a água é o que possui maior destaque, pois sua disponibilidade é necessária a todo tipo de vida no planeta, bem como para a maioria dos meios de produção.

O Brasil, mesmo sendo um país hidrograficamente privilegiado, em decorrência das dimensões continentais e diversidade geográfica, apresenta situações bem distintas relacionadas à disponibilidade hídrica, sendo afetado por problemas relativos à quantidade, assim como também à qualidade das águas (SANTOS et al., 2010).

A região Sudeste apresenta abundância de recursos hídricos, porém, com qualidade comprometida, com destaque à região que engloba a bacia hidrográfica do rio Doce que apresenta uma forte atividade industrial, nas áreas de celulose, siderurgia, mecânica pesada, alimentícia, além da extração mineral, e também por apresentar uma elevada população urbana (IGAM, 2010). Ainda segundo Viola (2008) os principais problemas de qualidade de água na bacia do rio Doce estão relacionados ao lançamento de esgotos domésticos e industriais.

A qualidade das águas de abastecimento, águas residuárias, mananciais e corpos receptores podem ser representados por diversos parâmetros de natureza física, química ou biológica. Os principais deles são: oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), turbidez, série de sólidos, nitrogênio, fósforo, temperatura, potencial hidrogeniônico (pH), micropoluentes inorgânicos, micropoluentes orgânicos, organismos patogênicos e coliformes (FUNASA, 2014).

As características físicas das águas são dadas mediante a detecção de propriedades físicas que, em geral, estão relacionadas à capacidade de percepção pelos sentidos humanos (visão e olfato), o que implica diretamente nas características estéticas da água (CETESB, 2008). As principais características físicas são: temperatura, turbidez e sólidos totais.

As características químicas das águas são devidas à presença de substâncias dissolvidas, geralmente avaliáveis somente por meios analíticos. As principais características químicas são:

pH, OD, DBO, nitrogênio total, fósforo total e componentes orgânicos e inorgânicos (CETESB, 2008).

As características biológicas são indicadores biológicos dos organismos presentes na água, que conforme suas naturezas têm significado sanitário e ambiental. Esses indicadores biológicos têm sido utilizados para aludir à presença ou ausência de agentes desencadeadores de doenças. Os microrganismos presentes na água, como por exemplo, algumas bactérias, vírus, algas e protozoários podem ser causadores de patogenicidades ao homem. Na prática é inviável analisar todos os microrganismos presentes na água, por isso a quantificação do grupo dos coliformes é tida como suficiente para indicar o teor de contaminação e a capacidade de transmitir doenças (FUNASA, 2013).

#### **4.2. Poluição hídrica**

Segundo a Política Nacional do Meio Ambiente, instituída pela Lei nº 6.938/1981, entende-se por poluição a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que: a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; c) afetem desfavoravelmente a biota; d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; e e) lancem matéria ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos (BRASIL, 1981).

De acordo com Ide e Ribeiro (2016), o lançamento de efluentes, a poluição difusa e a supressão da vegetação, que vem ocorrendo por todo o planeta, têm causado um problema que está cada vez mais grave: a deterioração da qualidade das águas e o assoreamento de corpos hídricos.

Quando um usuário lança efluentes líquidos em um corpo d'água, é bem provável que esteja agregando uma série de substâncias com características físico-químicas e biológicas distintas das originalmente presentes no corpo hídrico. Porém, dependendo da quantidade de efluente lançado, bem como da concentração de poluentes, o lançamento poderá ser incompatível com os demais usos antrópicos da água, ou com os objetivos de qualidade que a sociedade determinou por meio do enquadramento dos corpos de água em classes. Esse lançamento causará impactos negativos tanto para o equilíbrio do meio ambiente, quanto para os seres humanos que utilizam o recurso hídrico, podendo propiciar dificuldades de tratamento de água para abastecimento, doenças de veiculação hídrica, dentre outros. Diante disso, a poluição dos cursos hídricos é um dos problemas mais sérios, provocando a morte de aproximadamente 25 milhões de pessoas todos os anos (PIMPUNCHAT et al., 2009).

É necessário, portanto, que se conheçam os impactos qualitativos e quantitativos que cada usuário causará ao manancial ao longo do tempo e dos trechos da bacia, considerando cada parâmetro de qualidade. Após o conhecimento dos impactos individuais, é fundamental estimar e entender como se dará o impacto cumulativo desses usos nos corpos de água.

As atividades antrópicas geram efluentes que impactam diretamente na qualidade de corpos hídricos, sendo estes a principal destinação de esgotos brutos ou tratados. Segundo von Sperling (2014), a determinação da eficiência requerida no tratamento, bem como a possível alocação de cargas poluidoras em uma bacia, é função dos requisitos ambientais do corpo d'água receptor. A utilização de modelos matemáticos auxilia na forma de avaliar os impactos do lançamento da carga poluidora, assim como intervenções necessárias no corpo hídrico, como na previsão de cenários futuros.

### **4.3. Capacidade de diluição dos corpos d'água**

De acordo com Fleck (2014) o fenômeno de decomposição natural da matéria orgânica presente em um corpo d'água é conhecido como autodepuração. Segundo von Sperling (2014) a autodepuração está vinculada ao restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, após alterações induzidas pelos despejos afluentes.

A capacidade de diluição e de autodepuração de um rio é função de uma série de fatores que variam de um corpo hídrico para outro, e esta capacidade é que define o quanto de efluente – ou matéria orgânica – poderá ser lançado no corpo receptor. Essa capacidade é limitada e depende das características do corpo hídrico, da quantidade e natureza da matéria orgânica presente no mesmo, dos microrganismos que promovem a transformação dessa matéria orgânica em compostos mais simples, e das condições ambientais (BRAGA *et al.*, 2002).

Os microrganismos aeróbios consomem OD para oxidar a matéria orgânica biodegradável que foi lançada no corpo hídrico. Sendo assim, quanto mais matéria orgânica lançada, maior a quantidade necessária de oxigênio para sua estabilização. No momento em que a taxa de consumo de OD é maior que a taxa de produção, a concentração de oxigênio tende a se reduzir, ocorrendo o inverso, quando a taxa de consumo é menor que a taxa de produção (von Sperling, 2014).

O OD é um dos constituintes mais importantes dos recursos hídricos. Embora não seja o único indicador de qualidade da água existente, é um dos mais usados porque está diretamente relacionado com os tipos de organismos que podem sobreviver em um corpo de água. Quando

ausente, permite a existência de organismos anaeróbios que liberam substâncias que conferem odor, sabor e aspectos indesejáveis à água (FUNASA, 2014).

Segundo Paula (2011), a concentração de OD na água ocorre em função de diversas variáveis:

- Características do despejo estão associadas aos fatores de consumo do OD no meio, tais como a natureza do material biodegradável envolvido, a facilidade com que ele é biodegradado pelos organismos decompositores, a quantidade de oxigênio necessário para a biodegradação, a quantidade de poluente, a vazão despejada, etc.
- Características do corpo de água estão associadas à facilidade com que as cargas poluidoras são misturadas ao meio aquático. Entre as variáveis mais importantes estão a velocidade do fluido, a geometria do escoamento, a intensidade da difusão turbulenta e outras; e
- Produção de oxigênio: o OD no meio aquático pode ser originado pela atividade fotossintética dos organismos autótrofos ou pela reaeração, a qual consiste na passagem de oxigênio atmosférico para o interior do meio aquático por meio da interface ar-água.

Diante disso as trocas atmosféricas são mais intensas quanto maior for a turbulência no curso de água. Ocorre que, durante a fase de decomposição, usualmente o consumo é maior do que a reposição, seja por meio da fotossíntese ou pela reaeração. Apenas quando cessa a decomposição e os decompositores morrem é que o oxigênio começa a exceder, e sua concentração aumenta novamente (ÁVILA, 2014). Essas duas etapas ocorrem simultaneamente ao longo de todo o processo.

Outro fator que contribui para a capacidade de autodepuração é que os corpos de água apresentam um movimento próprio que transporta um poluente do seu ponto de despejo para outras regiões, e, portanto, sua concentração varia no espaço e no tempo. O transporte é feito pelo campo de velocidades da água, sendo esse fenômeno denominado advecção (ANDRADE, 2014). Quanto maior for a velocidade, mais rapidamente o poluente se afastará de seu ponto de despejo.

A concentração de substâncias dissolvidas ou em suspensão nos corpos hídricos é também função de processos difusivos. Segundo Feroni (2015) existem basicamente dois processos difusivos, conforme é descrito a seguir:

- Difusão molecular: resulta do movimento decorrente da agitação térmica das partículas existentes na água. Deve-se ressaltar, no entanto, que o efeito da difusão molecular na concentração de poluentes em corpos de água naturais é, em geral, desprezível.
- Difusão turbulenta: a existência de turbulência no escoamento da água provoca mistura mais rápida das substâncias presentes. Tal mistura ocorre a uma taxa muito mais intensa que a verificada na difusão molecular e é um mecanismo extremamente eficiente para a diminuição da concentração de poluentes nos rios.

Denomina-se dispersão o fenômeno de transporte de poluentes causado pela ocorrência conjunta de difusão molecular e/ou turbulenta e da advecção (PANTOJA, 2014).

Escoamentos que ocorrem com maior velocidade em uma superfície livre são mais turbulentos e tendem a apresentar uma interface ar-água com maior área superficial (ALÉ, 2011). Como a taxa de troca de gases nessa interface é proporcional à área da superfície, a turbulência aumenta a intensidade com a qual essas trocas ocorrem. Conseqüentemente, o oxigênio atmosférico penetra mais rapidamente no meio aquático, e os gases resultantes da decomposição anaeróbia podem deixar o meio aquático com a mesma rapidez (TEIXEIRA (2017).

A temperatura também altera a solubilidade dos gases e a cinética das reações químicas, fazendo com que a interação dos poluentes com o ecossistema aquático seja bastante influenciada por sua variação (SILVA & SANTOS, 2013). Portanto, a temperatura intensifica os processos bioquímicos, aumentando a velocidade da decomposição.

A ação da gravidade pode alterar a qualidade da água por meio da sedimentação de substâncias poluidoras em suspensão que sejam mais densas que o meio aquático. A presença de turbulência excessiva também pode introduzir efeitos negativos, dificultando a sedimentação de partículas indesejáveis ou mesmo removendo do fundo materiais que estariam já sedimentados (CAMPELLO, 2017).

O aumento da turbidez diminui a transparência e, portanto, a penetração de luz, interferindo na capacidade de autodepuração. A presença de luz é condição necessária para a existência de algas, que são fonte básica de alimento do meio aquático. Além disso, elas também são responsáveis pela produção de oxigênio (DANTAS, 2010).

A quantidade e o tipo de espécies presentes no meio aquático variam com a transparência da água, a quantidade de nutrientes disponíveis e a temperatura, entre outros

fatores. Assim, por exemplo, se existir excesso de nutrientes no meio aquático, haverá um crescimento adicional de fitoplâncton e, ainda, dependendo do nutriente em excesso, de diferentes tipos de algas. A tendência é que ocorram mudanças na estrutura populacional do ecossistema, levando a alterações na qualidade da água, como o teor de oxigênio disponível, o pH e outros (PINA, 2013).

Existem reações químicas no meio aquático por causa da presença de substâncias naturalmente existentes no meio ou que lá foram despejadas. Tais reações químicas podem ser afetadas por fatores como radiação solar, temperatura, pH, catalisadores e outros. É difícil prever o impacto ambiental resultante do despejo de certas substâncias no meio aquático em virtude da ocorrência de processos sinérgicos.

Segundo von Sperling (2014), dentro de um enfoque prático, deve-se considerar que uma água esteja depurada quando as suas características não mais sejam conflitantes com a sua utilização prevista em cada trecho do curso d'água. Isto porque não existe uma depuração absoluta: o ecossistema atinge novamente o equilíbrio, mas em condições diferentes das anteriores, devido ao incremento da concentração de certos produtos e subprodutos da decomposição. Em decorrência destes compostos, a comunidade aquática se apresenta de uma forma diferente, ainda que em novo equilíbrio.

Portanto, pode-se concluir que o fenômeno da autodepuração é realizado por meio de processos físicos (diluição, sedimentação), químicos (oxidação) e biológicos (decomposição da matéria orgânica por microrganismos heterotróficos).

#### **4.4. Legislação aplicada aos recursos hídricos**

As múltiplas atribuições e conotações da água, devido ao seu caráter indispensável à vida, tornam essencial a normatização do seu uso com uma legislação específica e atuação efetiva do poder público (ANA, 2013). Ao se avaliar a condição atual da qualidade da água de determinado corpo hídrico, frequentemente se busca comparar se os parâmetros estão de acordo com as legislações ambientais.

Os parâmetros mais importantes sobre qualidade da água são referenciados nas seguintes legislações:

- Padrão de potabilidade: Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX, do Ministério da Saúde;

- Padrão de corpos d'água: Resolução CONAMA 357/2005, do Ministério de Meio Ambiente e eventuais legislações estaduais;
- Padrão de lançamento: Resolução CONAMA 430/2011, do Ministério de Meio Ambiente e eventuais legislações estaduais.

Outro instrumento legal para o enfrentamento da problemática de se dispor de água em quantidade e qualidade é a Lei 9.433/1997 – a chamada Lei das Águas - que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SINGREH).

A Lei 9433/1997 visa estabelecer um controle quali-quantitativo dos recursos hídricos, e gerir tanto a captação de água, quanto o lançamento de efluentes. Essas duas interferências possuem inter-relações diretas e podem se dar de diversas formas. Podem interferir na capacidade de diluição do manancial, na captação a jusante do lançamento que retira certa carga poluidora (seja para posterior tratamento ou não), nos lançamentos a montante de captações que aumentam o fluxo disponível (podendo também afetar na qualidade do recurso a ser captado) e nos lançamentos sequenciais no corpo hídrico que diminuem a capacidade de diluição, principalmente com relação aos parâmetros em comum (BRASIL, 1997).

Para alcance dos objetivos elencados, a PNRH conta com a aplicação de seus instrumentos, quais sejam: os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; a cobrança pelo uso de recursos hídricos; e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Nesse sentido, o termo gerenciamento de qualidade da água implica no aproveitamento dos recursos hídricos de maneira que mantenha esta qualidade nos níveis estabelecidos para os usos pré-definidos. Esses usos podem ser descritos com base nas classificações do Enquadramento do corpo hídrico, instrumento legal que visa garantir que a qualidade da água seja compatível com a sua demanda. Seu objetivo é definir a meta de qualidade de cada rio, trecho de rio, lago ou ainda das águas subterrâneas contidas em aquíferos. Conforme a resolução CONAMA 357/2005, a referência para fixar essa meta consiste nos tipos de usos pretendidos de forma preponderante: para usos mais exigentes, a qualidade da água deve ser maior: para usos menos exigentes, a qualidade pode ser mais flexível (BRASIL, 2005).

Mais do que uma simples classificação, o enquadramento dos corpos d'água deve ser visto como instrumento de planejamento, pois deve estar baseado não necessariamente no seu estado atual, mas nos níveis de qualidade que deveriam possuir, ou ser mantidos nos cursos d'água, para atender às necessidades estabelecidas pela comunidade (ANA, 2007).

A outorga, segundo Almeida e Curi (2016), deve ser vista como um instrumento da alocação de água entre os mais diversos usos dentro de uma bacia hidrográfica. Essa distribuição de água deve buscar os seguintes objetivos mínimos: atender as necessidades ambientais, econômicas e sociais pelo uso da água; reduzir ou eliminar os conflitos entre usuários da água e possibilitar o planejamento das demandas futuras a serem atendidas.

Na análise de outorga para fins de lançamento de efluentes somente são avaliados os parâmetros relativos à temperatura, à DBO e, em locais sujeitos a eutrofização, ao fósforo e ao nitrogênio, conforme estabelecido na Resolução ANA nº 219, de 06 de junho de 2005.

A Deliberação Normativa CERH nº26, de 18 de dezembro de 2008, estabelece os procedimentos gerais de natureza técnica e administrativa a serem observados no exame de pedidos de outorga para o lançamento de efluentes em corpos de água superficiais no domínio do Estado de Minas Gerais. No artigo 2º da referida norma está estabelecido que, para a análise do requerimento de outorga para o lançamento de efluentes, deve-se ter como referência o parâmetro DBO (MINAS GERAIS, 2008).

O artigo 3º da DN CERH nº 26/2008 estabelece os seguintes critérios para a determinação da vazão de diluição:

I - Caso o corpo de água apresente qualidade melhor ao que prescreve sua classe, a concentração permitida de DBO no corpo receptor será igual ao padrão de DBO estabelecido na legislação ambiental vigente;

II – Caso o corpo de água apresente qualidade igual ou pior ao que prescreve sua classe, a concentração permitida de DBO no corpo receptor, será igual àquela calculada na mistura do efluente com o corpo receptor.

Assim, a classe de enquadramento dos cursos d'água é utilizada no processo de outorga de diluição de efluentes, com o objetivo de determinar a concentração máxima para cada poluente no curso d'água, de forma que se continue, após o lançamento, respeitando esse limite

de enquadramento. Além disso, para a emissão de outorgas de direito de uso de recursos hídricos também é necessária a quantificação das disponibilidades hídricas (ANA, 2019).

Deverão também ser apuradas as finalidades das outorgas concedidas, verificando-se a capacidade do corpo hídrico receptor quanto à assimilação ou quanto à autodepuração de parâmetros de qualidade outorgáveis, avaliando seu impacto sobre o OD, quando houver lançamento de efluentes. (IGAM, 2010).

Tem-se, portanto, a necessidade de comparar os usos em uma base única e integrada, pois as captações de água são usos consuntivos expressos em vazão demandada, enquanto os lançamentos são considerados usos não consuntivos representados pelas cargas poluentes (ANA, 2013).

Para contornar esse problema e comparar demandas quantitativas e qualitativas na mesma unidade de medida, alguns Estados e a própria Agência Nacional de Águas (ANA) adotam o conceito de “vazão de diluição”, proposta por Kelman (1997), ou seja, a vazão necessária para diluir um poluente até a sua concentração permitida, de acordo com a classe de enquadramento do curso d’água. Desse modo, o método permite que as interferências qualitativas no corpo hídrico sejam “transformadas” em equivalentes quantitativos, facilitando o balanço entre as demandas (captações e diluição de efluentes) e a disponibilidade hídrica do curso d’água (SOUZA et al., 2009).

Cabe salientar que a Resolução CONAMA nº 430/2011, em seu art. 9, veda a mistura de efluentes com águas de melhor qualidade, como as águas de abastecimento, do mar e de sistemas abertos de refrigeração sem recirculação para controlar as condições de lançamento e diluição antes do seu lançamento; e no art. 11 proíbe o lançamento de efluentes de quaisquer fontes poluentes em águas de classe especial, mesmo que tratados (BRASIL, 2011).

A partir do estabelecimento dos instrumentos de gestão de recursos hídricos, desenvolveu-se cada vez mais estudos voltados às técnicas metodológicas para análise dos processos de outorga de diluição de efluentes (GARCIA, 2011), visto que a complexidade dos usos da água em uma bacia hidrográfica demanda o desenvolvimento de sistemas capazes de coletar, armazenar e processar os dados hidrológicos e espaciais, transformando-os em informação útil ao processo de gestão dos recursos hídricos (MOREIRA, 2006).

#### **4.5. Modelagem matemática da qualidade da água**

Para auxiliar na gestão, controle e proteção dos recursos hídricos, são necessários ferramentas que possibilitem estudos mais aprofundados sobre as características dos rios, realizando não somente diagnósticos, como também prognósticos da região. Neste contexto, a utilização da modelagem da qualidade de água pode ser considerada como uma importante ferramenta para subsidiar a gestão dos recursos hídricos visando o seu uso múltiplo (KNAPIK, 2009).

Segundo (CASANOVA, 2005) um modelo é uma representação da realidade, uma tradução simplificada e generalizada do que se afigura como sendo as características mais importantes de uma situação do mundo real e uma abstração da realidade utilizada para se obter clareza conceitual.

Modelos ambientais objetivam representar a realidade tal como é observada ou medida, e por isto, dificilmente conseguem representar toda a complexidade das múltiplas interações nos sistemas ambientais, várias delas não mensuráveis ou quantificáveis (VON SPERLING, 2014).

Von Sperling (2014) desenvolveu uma adaptação ao modelo QUAL2E, o QUAL-UFMG, em planilha Excel®, o que permite aplicações rápidas e simples de modelagem de qualidade de água em rios. O autor explica que a simplificação foi feita devido ao fato da representação dos processos que envolvem as algas ser extremamente complexa e os valores dos coeficientes serem de difícil compreensão. Outras simplificações introduzidas foram a não consideração da dispersão longitudinal e a integração pelo método de Euler.

O QUAL-UFMG tem capacidade para simular até 15 constituintes orgânicos de qualidade da água, no entanto, neste trabalho foram utilizados os dois principais parâmetros básicos usados no monitoramento da qualidade à água: o OD e a DBO.

Por sua facilidade de uso, pela simples interface com os gráficos gerados, e por estar em português, o modelo pode ser usado em grande parte das aplicações em que se utiliza outros modelos como o QUAL2E. (PERIN, 2013).

#### 4.6. Incerteza

Para Perin (2013), os modelos matemáticos são técnicas que permitem representar alternativas e simular condições reais que poderiam ocorrer dentro de uma faixa de incertezas, inerentes ao conhecimento técnico-científico.

De acordo com Silva (2010) a confiabilidade do modelo de previsões depende da exatidão dos dados de entrada. Os valores dos parâmetros encontrados na literatura variam amplamente conforme as condições do corpo da água, e são muitas vezes determinados como valores médios de grandes intervalos, incorporando incertezas para os resultados produzidos.

Existem duas fontes de incerteza significativas nos modelos de qualidade da água (Loucks & Van-Bee, 2005). Uma decorre do conhecimento incompleto ou a falta de dados suficientes para estimar as probabilidades dos vários eventos que possam acontecer. A outra decorre da compreensão incompleta conceitual dos sistemas em estudo, bem como por dados limitados para testar hipóteses e/ou simulação de sistemas.

Os resultados de uma modelagem representam os cursos d'água de forma simplificada, e dificilmente consegue apresentar todas as características do sistema, sendo difícil quantificar todas as cargas poluentes e interações que ocorrem nos corpos d'água, o que confere incertezas aos resultados obtidos.

Segundo Fan et al. (2009) vários modelos de qualidade da água têm sido desenvolvidos para diferentes tipos de corpos d'água (rios, lagos e reservatórios). Alguns desses modelos têm incluído parâmetros básicos (OD e DBO), enquanto outros têm incluído critérios mais sofisticados de qualidade da água, como níveis de eutrofização e impactos por toxicidade.

Lindenschmidt (2006) afirmou que os modelos complexos não são necessariamente os mais úteis. Isto porque necessitam de grandes quantidades de dados para a estimativa, calibração e posterior verificação. Em alguns casos, modelos complexos de simulação podem envolver vários parâmetros que nunca tenham sido previamente medidos ou comunicados. Por estas razões, a utilização de modelos complexos de simulação da qualidade da água acaba não sendo viável, e os resultados simulados podem não ser tão confiáveis como se pretendia que fossem.

Outra causa de incerteza na modelagem de recursos hídricos é a poluição difusa. Essa se dá quando os poluentes atingem os corpos d'água de forma não controlada, sendo difícil

estabelecer padrões de lançamento, seja em termos de quantidade, frequência ou composição (AGEVAP, 2014).

Segundo Larentis (2004), as maiores dificuldades na modelagem da qualidade da água em uma bacia hidrográfica devem-se às fontes de caráter difuso, à quantificação de suas cargas poluentes e à localização de sua origem. Os mecanismos de transporte e a interação dos constituintes com o meio são representados matematicamente de forma simplificada, através de relações empíricas, coeficientes de exportação ou modelagem matemática, o que confere incertezas aos resultados obtidos, mas avaliam de maneira geral as condições de carga anual por fontes difusas de poluição.

O ajuste do modelo de qualidade de água significa a busca de parâmetros e variáveis de entrada que forneçam os resultados que melhor representem os valores observados de concentrações de poluentes no curso d'água.

Uma das metodologias da avaliação de incertezas consiste em avaliar quais são os parâmetros e variáveis de entrada sobre as quais mais se têm dúvidas em relação a suas aplicações no sistema em estudo, ou seja, são fontes de incerteza (LARENTIS, 2004).

#### **4.7. Calibração e validação**

Pode se dizer que calibrar um modelo é ajustar os parâmetros das equações matemáticas para que este consiga representar da maneira mais verossímil a realidade física, química e biológica de um corpo d'água. Ou seja, aproximar os resultados da simulação, dentro de uma precisão desejada, dos dados reais do sistema em estudo. A etapa de calibração trata-se do ajuste dos dados observados, ou medidos, com os dados estimados pelo modelo depois de inseridos os dados determinados na fase anterior (SILVA, 2010).

Para executar a calibração, o primeiro passo é separar a série temporal de dados medidos em dois períodos, um para calibração e o outro para validação. No período de calibração, as entradas do modelo são variadas até que um ajuste aceitável é obtido. O modelo é então rodado com os mesmos parâmetros de entrada para o período de validação e um ajuste é determinado (CASTRO, 2013).

A etapa de calibração, ou de estimativa dos parâmetros (coeficientes) componentes das equações é uma parte essencial na utilização de qualquer modelo matemático.

Após os parâmetros de entrada serem inseridos e o QUAL-UFMG executado, o modelo deve ser devidamente calibrado e validado para garantir sua confiabilidade e precisão. Isto é especialmente importante se o modelo for usado para extrapolação ou previsão de eventos futuros. Segundo Alves (2012) o grau de exatidão, que consiste na diferença entre os valores simulados e os valores medidos, dependerá dos objetivos de utilização do modelo, sendo que o grau de exatidão obtido poderá resultar do próprio processo de calibração e das limitações de tempo ou de recursos disponíveis. Os resultados da validação indicam se o modelo é capaz de reproduzir a série de dados não usados em sua calibração (LELIS et al., 2012).

Após a calibração, torna-se necessária a validação do modelo. A validação visa confirmar o ajuste dos parâmetros obtidos na calibração do modelo. Uma vez validado o modelo está pronto para ser utilizado de forma preditiva. Assim, podem ser respondidas perguntas como:

- Qual a eficiência de tratamento que a estação de tratamento de esgotos domésticos de determinada sede municipal deve ter para que o corpo receptor esteja dentro do seu enquadramento?
- Qual a eficiência de tratamento que a estação de tratamento de efluente industrial deve ter para que atenda aos padrões de lançamento e o corpo receptor não saia de sua classe?
- Há condições de se outorgar o lançamento de uma determinada carga poluidora de origem industrial ou doméstica em um determinado corpo d'água?
- Qual é o impacto do acréscimo de carga frente a uma expansão industrial existente?

Nesta pesquisa, a calibração e a validação foram realizadas com a utilização dos coeficientes  $K_1$ ,  $K_d$  e  $K_s$  no modelo. Para se chegar a uma melhor calibração, os valores obtidos com o modelo foram comparados com os dados da série histórica do projeto Águas de Minas.

#### **4.8. Trabalhos desenvolvidos sobre modelagem de qualidade da água**

Nas últimas décadas, foram publicados livros que abordam os princípios de modelagem da qualidade da água, tais como James (1993), Chapra (1997) e von Sperling (2007). Segundo Cox (2003), há também um corpo muito grande da literatura que descreve modelos individuais e processos, mas há pouca orientação sobre a adequação de modelos particulares ou softwares para situações específicas ou aplicações.

O modelo matemático QUAL-UFGM foi desenvolvido em planilhas de Excel® no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (DESA/UFGM), com o objetivo de possibilitar a modelagem da qualidade da água em rios (VON SPERLING, 2007). Ele é similar à versão disponível pela United State Environmental Protection Agency (USEPA), o QUAL2E. Este é mundialmente utilizado para a simulação da qualidade da água em rios, devido sua versatilidade e fácil compreensão e aplicação (OPPA, 2007).

No Brasil, foram realizados diversos estudos da qualidade da água utilizando o QUAL2E, a saber: na modelagem da qualidade da água do rio Tietê – SP (BITTENCOURT et al., 1995), na determinação da capacidade de autodepuração do rio Araguari – AP (BÁRBARA, 2006), no apoio ao gerenciamento das águas da bacia do Córrego dos Bagres – SP (BALDOCHI, 2002), na simulação de parâmetros de qualidade de água relacionados com nitrogênio no rio Santa Maria da Vitória – ES (PEREIRA & MENDONÇA, 2005), entre outros. Knapik (2009) implementou e calibrou o modelo de qualidade de água QUAL2E para definição e simulação de metas progressivas de remoção de carga da bacia do Alto Iguaçu (área aproximada de 3.000 km<sup>2</sup>), Região Metropolitana de Curitiba, tendo em vista o enquadramento de corpos hídricos.

No exterior, existe uma série de estudos também utilizando o QUAL2E, principalmente relacionados com a modelagem da qualidade da água em corpos hídricos: no rio Basin, em Gana (LARAMIE et al., 1989); nos rios Charles e Mystic, em Boston (WALTON & WEBB, 1992); no rio Yesilirmak, na Turquia (YUCEER et al., 2006); no rio Sava, na Eslovênia (DROLC & KONCAN, 1999); na avaliação de riscos de descarga de águas residuais não tratadas na Europa Central e Oriental (JAWORSKA, MASSCHELEYN & MCAVOY, 2001).

Lima (2016) desenvolveu um estudo que visou construir uma proposta preliminar de enquadramento do Rio Una - PE, baseada na análise da qualidade da água, nos usos atuais e pretendidos do corpo hídrico, bem como na modelagem matemática da qualidade da água. O modelo matemático utilizado foi o QUAL-UFGM, tendo sido analisados os parâmetros de OD e DBO.

Guedes (2009) utilizou os modelos matemáticos de Streeter-Phelps modificado, QUAL-UFGM e QUAL2Kw para avaliar a qualidade da água e a capacidade de autodepuração, em termos espaciais e temporais, no médio rio Pomba. O autor constatou que, com relação aos processos de calibração e validação, o modelo matemático de qualidade de água QUAL-UFGM

foi o que melhor representou as informações qualitativas observadas nas seções de monitoramento no rio Pomba.

Entre os sistemas desenvolvidos e voltados para análise das diluições dos efluentes e modelagem de cursos d'água, podem-se citar os trabalhos de Ferraz e Braga (1998) e Garcia (2011). Ferraz e Braga (1998) realizaram um trabalho no qual foi proposto um modelo decisório com o objetivo de compatibilizar as ofertas e demandas de água. Garcia (2011) desenvolveu um Sistema de Suporte à Decisão para auxiliar na concessão de outorga de lançamento de efluentes.

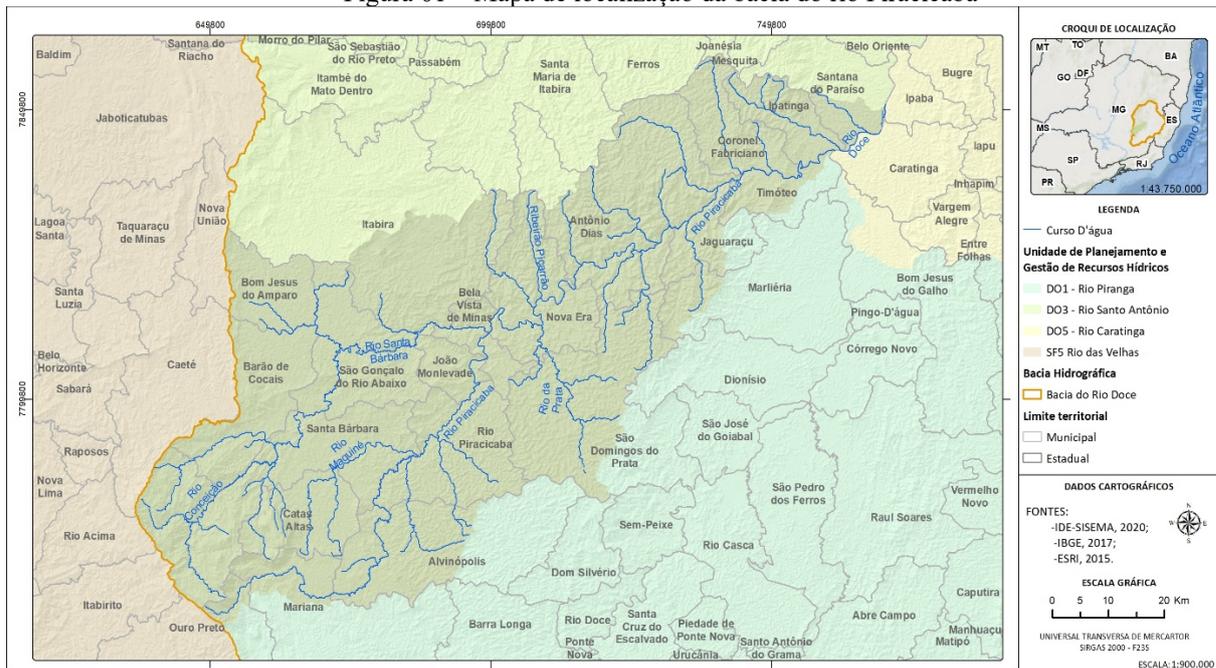
## **5. METODOLOGIA**

### **5.1. Caracterização da área de estudo**

#### **5.1.1. A bacia do rio Piracicaba**

A bacia hidrográfica do rio Piracicaba está localizada no leste do estado de Minas Gerais. A bacia está compreendida entre os meridianos de 42° 30' e 43°45' de longitude oeste do meridiano de Greenwich e entre os paralelos de 19°15' e 20°15' de latitude sul. O rio Piracicaba nasce no município de Ouro Preto, a cerca de 1700 m de altitude e segue até a divisa das cidades de Ipatinga e Timóteo, onde se encontra com o rio Doce, possuindo uma extensão de 241 km (CBH Piracicaba, 2019). A bacia possui uma área de 5685,86 km<sup>2</sup> e é formada por 21 municípios mineiros, sendo eles: Antônio Dias, Barão de Cocais, Bela Vista de Minas, Bom Jesus do Amparo, Catas Altas, Coronel Fabriciano, Ipatinga, Itabira, Jaguaráçu, João Monlevade, Marliéria, Nova Era, Rio Piracicaba, Santa Bárbara, Santana do Paraíso, São Domingos do Prata, São Gonçalo do Rio Abaixo, Timóteo, Alvinópolis, Mariana e Ouro Preto. O mapa de localização da bacia do rio Piracicaba é apresentado na Figura 01.

Figura 01 – Mapa de localização da bacia do rio Piracicaba



Fonte: elaborado pela autora.

A bacia do rio Piracicaba teve seu enquadramento homologado pela DN COPAM nº 9/1994, tendo em vista a necessidade de proteção dos recursos hídricos. A bacia do rio Piracicaba foi dividida em 78 trechos, sendo que destes, 2 pertencem ao leito principal e os 76 restantes pertencem aos afluentes e tributários. No leito principal, o Trecho 1, das nascentes até a confluência com o córrego Falhas, é enquadrado como Classe I, e o Trecho 2, da confluência com o córrego Falhas até a confluência com o rio Doce, é enquadrado como Classe II. Dos 76 trechos afluentes, 30 são enquadrados como Classe Especial, 36 como Classe I e 10 como Classe II.

### 5.1.2. Clima

O clima da bacia do rio Piracicaba, assim como o de todo o Estado de Minas Gerais, é considerado de transição, pois recebe influência de sua posição latitudinal, dos fenômenos meteorológicos das latitudes médias e tropicais. Na bacia do rio Piracicaba, encontram-se três variações climáticas segundo a classificação de Köppen: clima tropical (AW), mesotérmico de verões quentes (CWA) e mesotérmico de verões brandos (CWb) (CRUZ,2009).

**Aw:** Clima tropical úmido (megatérmico) de savana, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média do mês mais frio é superior a 18° C. A precipitação do mês mais seco é inferior a 60 mm e também inferior a 100-P/25, sendo P a precipitação média anual. Este clima predomina na região do Baixo Piracicaba.

**Cwa:** Clima temperado chuvoso (mesotérmico com inverno seco e verão chuvoso). A temperatura média do mês mais frio é inferior a 18° e do mês mais quente superior a 22° C. O mês mais seco tem precipitação inferior à décima parte da precipitação do mês mais chuvoso. Este tipo de clima é predominante na Bacia Hidrográfica do rio Piracicaba, existente em toda a grande área central.

**Cwb:** Clima temperado chuvoso (mesotérmico), também chamado subtropical de altitude. Difere do tipo de clima Cwa unicamente por ser a temperatura média do mês mais quente inferior a 22° C, tendo, portanto, verão fresco. Este tipo de clima predomina na região alta da bacia do Piracicaba.

### **5.1.3. Geomorfologia**

Segundo CETEC (1998), três grandes unidades geomorfológicas são encontradas na bacia do rio Piracicaba: os chamados Planaltos Dissecados do Leste de Minas Gerais, a Serra do Espinhaço e o Quadrilátero Ferrífero. A unidade Planaltos dissecados do Leste de Minas compreende cerca de 80% da área da bacia. No extremo noroeste da bacia, localiza-se a unidade geomorfológica Serra do Espinhaço que funciona como divisor de águas da bacia do rio Piracicaba com a do São Francisco e finalmente a unidade Quadrilátero Ferrífero localizada na extremidade sudoeste da bacia onde se destaca a Serra do Caraça. Nesta área encontram-se algumas nascentes da bacia do rio Piracicaba.

Sobre a bacia do rio Piracicaba, Guerra (2001) afirma que o relevo da região é muito acidentado, com predominância de serras e colinas. Segundo Ab' Sáber (2003), o aspecto de “mares de morros” das colinas deve-se à composição geológica, formada por granito-gnaiss, que passaram por vários processos erosivos. As rochas são agrupadas em quatro formações, sendo: Complexo Granito-gnáissico (embasamento), Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi.

Além das regiões com afloramentos rochosos, CETEC (1988) descreve as seguintes classes de solo na bacia do rio Piracicaba: latossolo vermelho amarelo álico; latossolo vermelho escuro álico, argissolos vermelho-amarelos, argissolos vermelhos, podzólico vermelho amarelo eutrófico; solos litólicos, e solos aluviais eutróficos.

Os latossolos são predominantemente vermelho-amarelos, e se caracterizam por serem profundos e bem drenados. São encontrados na porção oeste da unidade, principalmente nos

planaltos dissecados e são solos cauliníticos, com gradiente textural entre os horizontes A e B, com menor condutividade hidráulica. Por sua vez, os latossolo amarelos ocorrem de maneira restrita junto à foz do rio Piracicaba. São solos profundos e bem estruturados, porém são ácidos e de baixa fertilidade.

Uma pequena porção da bacia é ocupada por argissolos vermelhos. O principal uso deste solo é a pastagem com capim colônia nos solos mais férteis. A principal limitação destes solos é a sua erodibilidade, que associada ao relevo e ao gradiente textural resultam em potenciais erosivos elevados. Por isso, durante chuvas fortes, pode ocorrer uma rápida saturação do horizonte superficial mais arenoso e uma reduzida infiltração da água na superfície do solo, o que favorece a ocorrência de processos importantes de erosão, mesmo quando o relevo é suavemente ondulado.

De forma geral, predomina na bacia a erosão em sulcos, seguida da erosão laminar (Consórcio ECOPLAN-LUME, 2010). Estes solos apresentam aptidão regular para pastagens plantadas em quase toda a bacia com exceção das terras altas nas cabeceiras do rio Piracicaba.

#### **5.1.4. Drenagem**

O padrão de drenagem da bacia do rio Piracicaba é do tipo dendrítico, onde a forma da drenagem é semelhante à distribuição dos galhos de uma árvore. Ocorre no caso da geologia com rochas homogêneas como os granitos ou ainda em rochas de origem sedimentar com substratos horizontais. Na região do Quadrilátero Ferrífero onde os cursos de água assumem a morfologia retilínea, o padrão de drenagem se caracteriza pela forma paralela, predominantemente (Guerra, 2001).

A bacia hidrográfica do rio Piracicaba é composta pelas sub-bacias do rio do Peixe e do rio Santa Bárbara, pela margem esquerda, e pela sub-bacia do rio da Prata, pela margem direita. Além dos rios mais significativos, ao longo do seu curso o rio Piracicaba recebe a descarga de quase uma centena de córregos e ribeirões, os quais compõem sua rede de drenagem.

#### **5.1.5. Vegetação**

A vegetação original da área desenvolve-se predominantemente sobre o bioma da Mata Atlântica, possuindo também uma pequena área sobre o bioma do Cerrado. Segundo Scolforo (2007), as seguintes classes de vegetação são ocorrentes na bacia: Floresta estacional sub

Montana e Montana, Campo, Campo rupestre, Cerrado, Eucalipto e Pinus. A vegetação original, composta de 90% de Mata Atlântica, foi devastada e o percentual remanescente é de apenas 0,2%. Estão situadas na bacia do rio Piracicaba 15 unidades de uso sustentável e três unidades de proteção integral. Chama-se atenção para a Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) do Caraça e o Parque Estadual do rio Doce (FEAM, 2013).

#### **5.1.6. Atividades econômicas**

A bacia do rio Piracicaba possui minerações, lavras de materiais preciosos, grandes siderúrgicas em áreas urbanas e grandes extensões de reflorestamento. As principais atividades econômicas desenvolvidas no território da bacia do rio Piracicaba são: a mineração, a siderurgia e silvicultura como insumo na produção de celulose.

Ou seja, os recursos naturais foram e continuam sendo elementos chaves no processo de crescimento econômico e desenvolvimento social da região, onde se localiza o maior complexo siderúrgico da América Latina e um dos mais importantes pólos da economia mineira (JÚNIOR, 2010).

Os usos da água na bacia, segundo CONSÓRCIO ECOPLAN - LUME (2010) é predominante para o abastecimento industrial, que corresponde a 51% do total de retiradas estimadas. Dada à densidade populacional, o abastecimento humano é o segundo maior uso consuntivo, respondendo por aproximadamente 44% das retiradas. O uso de irrigação e a dessedentação animal são pouco expressivos. A geração de energia destaca-se com os aproveitamentos hidrelétricos das usinas de Guilman Amorin e Sá Carvalho na calha principal do rio Piracicaba.

### **5.2. Captação de água e lançamento de efluentes**

#### **5.2.1. Captação de água no rio Piracicaba**

De acordo com os dados do IDE SISEMA (acessado em dezembro de 2019) encontrados na camada *Outorgas de direito de uso de recursos hídricos (1985 a 2019)* foi possível realizar o levantamento das captações vigentes de recurso hídrico no rio Piracicaba cujo tipo de uso é o consultivo (tabela 01).

Tabela 01 - Captações no rio Piracicaba

Ponto de captação	Vazão (m³/s)	Finalidade	Longitude	Latitude
Cap1	0,0108	Não informado	665177.16 m E	7770180.82 m S
Cap2	1	Não informado	665823.23 m E	7769662.26 m S
Cap3	0,1	Consumo humano e extração mineral	679371.86 m E	7776493.01 m S
Cap4	0,1	Consumo humano e extração mineral	679348.84 m E	7776469.43 m S
Cap5	0,0001	Recirculação de água	679081.27 m E	7777502.05 m S
Cap6	0,9	Consumo humano	678932.42 m E	7781690.63 m S
Cap7	0,9	Não informado	682781.68 m E	7787436.66 m S
Cap8	0,0108	Não informado	689744.45 m E	7793340.13 m S
Cap9	1	Irrigação	696170.74 m E	7800474.78 m S
Cap10	0,011	Aspersão de vias	696807.26 m E	7801405.01 m S
Cap11	1	Irrigação	697236.34 m E	7802318.62 m S
Cap12	0,89	Consumo humano e industrial	696824.90 m E	7803340.66 m S
Cap13	1	Consumo industrial	698240.25 m E	7806671.85 m S
Cap14	0,004	Consumo humano	708734.39 m E	7813512.47 m S
Cap15	1	Consumo humano, dessedentação de animais, irrigação	707847.58 m E	7814347.08 m S
Cap16	0,006	Não informado	707374.18 m E	7815452.49 m S
Cap17	1	Irrigação, Não informado	708022.50 m E	7817014.26 m S
Cap18	0,003	Aspersão de vias	708427.77 m E	7817316.03 m S
Cap19	1	Irrigação	708471.50 m E	7817382.29 m S
Cap20	0,011	Aspersão de vias	709444.93 m E	7816762.37 m S
Cap21	0,07	Urbanização	731216.80 m E	7829282.99 m S
Cap22	0,017	Aspersão de vias	731249.83 m E	7829281.36 m S
Cap23	1	Não informado	731247.91 m E	7829315.61 m S
Cap24	0,018	Consumo industrial	732692.84 m E	7829514.98 m S
Cap25	1	Irrigação	738510.84 m E	7833543.42 m S
Cap26	1	Não informado	742908.07 m E	7837891.76 m S
Cap27	0,98	Paisagismo, Urbanização	744945.04 m E	7839128.69 m S
Cap28	1	Aspersão de vias	744965.88 m E	7839160.21 m S
Cap29	0,173	Não informado	747655.83 m E	7839397.06 m S
Cap30	1	Consumo industrial	751617.46 m E	7838266.18 m S

Fonte: IDE SISEMA, 2020.

Os dados da Tabela 01 foram inseridos na modelagem para estimativa da vazão retirada com o objetivo de atender a diversos usos.

### 5.2.2. Lançamento de efluentes domésticos

Segundo PITE-Piracicaba (2012), dos 21 municípios pertencentes à bacia do rio Piracicaba, 19 lançam parcial ou integralmente seus efluentes gerados dentro da área da bacia, sejam eles tratados ou não. Apenas os municípios de Ouro Preto e Santana do Paraíso lançam seus efluentes fora da bacia do rio Piracicaba. Por este motivo, esses 2 municípios não foram considerados nas análises de lançamento de efluentes para inserção na modelagem.

Para os cálculos de população dos municípios e distritos que efetuam lançamento de esgotos *in natura* no rio Piracicaba e nos seus afluentes, levou-se em consideração os dados do total de habitantes de acordo com o IBGE, desconsiderando-se a porcentagem de habitantes que são contemplados nos sistemas de tratamentos de efluentes em funcionamento atualmente. Diante disso, a Tabela 02 retrata estas informações:

Tabela 02 – Dados da população desconsiderando-se a porcentagem de habitantes que são contemplados nos sistemas de tratamento de efluentes para os municípios e distritos que lançam efluentes no rio Piracicaba e seus tributários

<b>Município</b>	<b>População</b>
Antônio Dias	9.565
Alvinópolis	15.261
Barão de Cocais	28.442
Bela Vista de Minas	10.004
Catas Altas	4.843
Coronel Fabriciano	103.694
Itabira	53.927
Jaguaraçu	2.990
João Monlevade	73.057
Marliéria	1.638
Nova Era	17.528
Rio Piracicaba	12.779
Santa Bárbara	27.876
São Domingos do Prata	17.357
São Gonçalo do rio Abaixo	9.777
Timóteo	81.243
Mariana	1.456
<b>Total</b>	<b>471.437</b>

Fonte: IBGE, Nov/2019. Modificado pela autora.

A quantidade de poluentes transportada pelos esgotos pode ser estimada pela carga, expressa em massa por unidade de tempo, obtida pelo produto da concentração do poluente nos esgotos pela vazão afluente. Para a estimativa da carga orgânica adota-se usualmente para a contribuição de cada indivíduo o valor de 0,054 kg DBO/hab.d (VON SPERLING, 2005).

Para von Sperling (2014), a produção de esgotos está diretamente relacionada ao consumo de água. Como é sabido a fração de esgotos que chega à rede coletora pode variar. Isso porque a fração da água fornecida que adentra a rede coletora na forma de esgoto é denominada coeficiente de retorno e possui o valor usual de 80%.

Com os valores de consumo médio de água por município (obtidos no Plano de Ação de Recursos Hídricos (PARH) do rio Piracicaba), a população das sedes municipais, uma taxa de retorno de 80%, e a estimativa de carga orgânica por indivíduo segundo von Sperling, construiu-se a Tabela 03 com a relação dos municípios, volume lançado, carga poluidora gerada e concentração de DBO lançada no rio Piracicaba e em seus afluentes.

Tabela 03 - Estimativa de consumo, volume lançado, carga poluidora gerada e concentração lançada de DBO no rio Piracicaba pela população urbana

Município	Consumo de água (L/hab.dia)	Volume lançado (L/dia)	Carga poluidora gerada (kgDBO/d)	Concentração lançada (mgDBO/L)
Alvinópolis	97,10	1.481.800	824,1	556,1
Antônio Dias	96,82	926.100	516,5	557,7
Barão de Cocais	125	3.555.300	1.535,9	432,0
Catas Altas	524,69	2.541.100	261,5	102,9
Coronel Fabriciano	100,94	10.466.900	5.599,5	534,9
Itabira	143,31	7.728.300	2.912,1	376,8
Jaguaraçu	94,87	283.700	161,5	569,3
Marliéria	114,7	187.900	88,5	470,9
Mariana	114,7	167.000	78,6	470,6
Nova Era	114,70	2.010.500	946,5	470,7
Rio Piracicaba	88,77	1.134.400	690,0	608,3
Santa Bárbara	82,67	2.304.500	1.505,3	653,2
São Domingos do Prata	138,8	2.409.100	937,3	389,1
São Gonçalo do rio Abaixo	114,7	1.121.400	527,9	470,7
Timóteo	138,77	11.274.100	4.387,1	389,1
João Monlevade	179,93	13.145.100	3.945,1	300,1
Bela Vista de Minas	104,63	1.046.700	540,2	516,1

Fonte: PITE-Piracicaba (2012), PARH Piracicaba (2010) e FEAM (2012). Modificado pela autora.

Os dados da Tabela 03 foram utilizados para inserção na modelagem a fim de se estimar os respectivos volumes e cargas poluidoras lançadas que impactam o rio Piracicaba e seus afluentes.

É mostrado na Tabela 04 os pontos de lançamento de efluentes domésticos exclusivamente no rio Piracicaba, de acordo com o levantamento de campo feito pela equipe que desenvolveu o PITE-Piracicaba (2012):

Tabela 04 - Pontos de lançamentos de efluentes domésticos.

Ponto de lançamento	Cidade	Local de lançamento	Coordenadas	
			x	y
ED-03	Avinópolis (Distrito de Fonseca)	Rio Piracicaba	678125E	7769660N
ED-07	Antônio Dias	Rio Piracicaba	725595E	7829469N
ED-21	Coronel Fabriciano	Rio Piracicaba	748549E	7839186N
ED-24	Jaguaraçu	Rio Piracicaba	740165E	7835740N
ED-35	Nova Era	Rio Piracicaba	706718E	7813302N
ED-37	Rio Piracicaba	Rio Piracicaba	691734E	7795282N
ED-38	Rio Piracicaba	Rio Piracicaba	691820E	7795314N

Fonte: FEAM, 2012.

Além do demonstrado na Tabela 04, há ainda outros pontos de lançamentos de efluentes em tributários que impactam diretamente na qualidade do rio Piracicaba segundo informações do PITE-Piracicaba (2012), são eles:

- Alvinópolis: tanto a sede quanto os distritos de Fonseca, Barretos e Major Ezequiel, lançam seus efluentes no rio Piracicaba, córrego Barretos (que desagua no ribeirão Turvo), e rio Sem Peixe (afluente do rio Piranga).
- Barão de Cocais: efluentes são lançados em alguns córregos que desaguam no reservatório de Peti.
- Bela Vista de Minas: lança efluentes no córrego Boa Esperança, também conhecido como córrego Barro Branco.
- Catas Altas: trata 80% de seus efluentes, os outros 20% são lançados no rio Maquiné.
- Coronel Fabriciano: os efluentes são lançados em córregos que desaguam no ribeirão Caladão, e no próprio ribeirão Caladão. Apenas o bairro Manoel Domingos lança diretamente no rio Piracicaba.
- Itabira: 50% da população é atendida por tratamento. Os distritos de Senhora do Carmo e Ipoema não contribuem com lançamento na bacia do rio Piracicaba. Os outros 50% é lançado no rio do Peixe.
- Jaguaráçu: lança seus efluentes no córrego Onça Grande, já o distrito de Lagoa do Pau lança no rio Piracicaba.
- João Monlevade: a descarga dos efluentes ocorre no córrego Jacuí, sendo que 0,75% possui tratamento.
- Mariana: apenas o distrito de Santa Rita Durão contribui na bacia do rio Piracicaba, sendo seu lançamento no córrego Congonhas.
- Marliéria: contribui no córrego Onça Grande. O distrito de Cava Grande lança no rio Doce.
- Nova Era: contribui no próprio rio Piracicaba.
- Rio Piracicaba: tem seus efluentes lançados no rio Piracicaba. O distrito de Padre Pinto possui tratamento de 100% dos efluentes domésticos gerados.
- Santa Bárbara: contribui em alguns córregos que desaguam na represa de Peti.
- São Domingos do Prata: a descarga dos efluentes ocorre no rio da Prata. Apenas o distrito de Santana do Alfê contribui no córrego São João, que desagua no ribeirão Figueiredo.
- São Gonçalo do Rio Abaixo: contribui no rio Santa Bárbara.
- Timóteo: os efluentes são direcionados aos córregos que desaguam no ribeirão Timóteo.

Dessa forma, para escolha dos afluentes a serem modelados levou-se em consideração a carga poluidora lançada dos municípios e distritos citados anteriormente. São eles: rio Santa Bárbara, rio da Prata, rio do Peixe, rio Maquiné, ribeirão Turvo, ribeirão Figueiredo, Córrego Onça Grande, ribeirão Caladão, córrego Timóteo, córrego Jacuí, córrego Barro Branco e córrego Congonhas.

### 5.2.3. Tratamento de efluentes domésticos

Segundo FEAM (2012), todos os municípios da BHRPI possuem os serviços de coleta de esgotos. Porém, apenas sete possuem algum tipo de tratamento dos esgotos sanitários – Bom Jesus do Amparo, Catas Altas, Ipatinga, Itabira, João Monlevade, Rio Piracicaba e Ouro Preto – isto significa que 70% dos municípios inseridos na BHRPI não possuem nenhum sistema de tratamento de esgotos. A Tabela 05 indica os locais de lançamento dos efluentes após tratamento:

Tabela 05 - ETE's que lançam efluentes no rio Piracicaba

Nome da ETE	Cidade	Rio receptor	Concentração lançada de DBO (mgDBO/L)	(Coordenadas de lançamento)	
				x	y
ETE Horto	Ipatinga	Rio Piracicaba	96,57	754845E	7840888N
ETE Areal	Ipatinga	Rio Piracicaba	67,64	756000E	7840033N
ETE Bela Vista	Ipatinga	Rio Piracicaba	41,29	758162E	7841044N
ETE Bom Jesus do Amparo	Bom Jesus do Amparo	Ribeirão Bom Jesus	51,22	659836E	7819696N
ETE Sede	Catas Altas	Rio Maquiné	40,30	666810E	7780126N
ETE Morro d'água quente	Catas Altas	Córrego Paracatu	11,8	667156E	7775457N
Tanque séptico 1	Catas Altas	-	9,95	666757E	7778412N
Tanque séptico 2	Catas Altas	Córrego Paracatu	11,99	666505E	7775464N
ETE Laboreaux	Itabira	Rio do Peixe	22,0	691122E	7826727N
Tanque séptico 1 Cidade Nova	João Monlevade	Córrego Boa Vista	19,96	689200E	7807366N
Tanque séptico 2 Cidade Nova	João Monlevade	Córrego Boa Vista	1,99	688980E	7807080N
ETE São Bartolomeu	Ouro Preto	Rio das Velhas	13,30	648330E	7753439N
ETE Samarco	Ouro Preto	Córrego Água Suja	82,23	658872E	7755763N
ETE Padre Pinto	Rio Piracicaba	Solo na margem do Córrego Caxambu	30,9	698549E	7787292N

Fonte: FEAM, 2012.

#### 5.2.4. Lançamento de efluentes industriais

As cargas poluentes industriais foram obtidas pelo estabelecido na Resolução COPAM & CERH /2008, em que as atividades industriais potencialmente poluidoras dos recursos hídricos através do lançamento de efluentes líquidos ficam obrigadas a informar, até o dia 31/03 de cada ano, a carga poluidora lançada referente ao ano anterior (MINAS GERAIS, 2008). Com isso, foram obtidas as declarações de carga poluidora das empresas localizadas ao longo do rio Piracicaba que efetuaram a sua declaração relativa ao ano base de 2014, conforme Tabela 06:

Tabela 06 – Lançamento de efluentes industriais no rio Piracicaba

<b>Razão Social</b>	<b>DATUM</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Vazão Gerada m³/s</b>	<b>Vazão Tratada m³/s</b>	<b>DBO ton/mês</b>
Harsco Minerai s LTDA	WGS 84	-19,52609803	-42,65813098	0,0079096	0,0079096	2,59832
Unigal LTDA (1)	SAD 69	-19,4925	-42,53	0,0060116	0,0060116	0
Unigal LTDA (2)	SAD 69	-19,49088611	-42,55061667	0,0078816	0,0078816	0
Unigal LTDA (3)	SAD 69	-19,49091111	-42,55068333	0,0001782	0,0001782	0,02199
Unigal LTDA (4)	SAD 69	-19,49303889	-42,55326667	0,0001782	0,0001782	0,00427
Unigal LTDA (5)	SAD 69	-19,49498056	-42,55736667	0,0001782	0,0001782	0,00887
Unigal LTDA (6)	SAD 69	-19,4932	-42,554775	0,0001782	0,0001782	0,00617
Matadouro e Frigorífico Paladar LTDA	SAD 69	-19,57531472	-42,71531778	0,0011574	0,0011574	0,0423
Consórcio UHE Guilman- Amorim	CORREGO ALEGRE	-19,67712292	-42,91807713	0,0000038	0,0000038	0,00009
Samarco Mineração S.A.	CORREGO ALEGRE	-20,16972222	-43,49608611	0,0385802	0,0385802	0,1
ArcelorMittal Brasil S.A. (1)	SAD 69	-19,83655556	-43,1285	0,0002778	0,0002778	0,01116
ArcelorMittal Brasil S.A. (2)	SAD 69	-19,83738889	-43,12827778	0,0002778	0,0002778	0,00713
ArcelorMittal Brasil S.A. (3)	SAD 69	-19,83519444	-43,12858333	0,0002778	0,0002778	0,0023
ArcelorMittal Brasil S.A. (4)	SAD 69	-19,83361111	-43,12819444	0,0002778	0,0002778	0,00807
ArcelorMittal Brasil S.A. (5)	SAD 69	-19,83102778	-43,12777778	0,0002778	0,0002778	0,00808
ArcelorMittal Brasil S.A. (6)	SAD 69	-19,82952778	-43,12655556	0,0002778	0,0002778	0,01221
ArcelorMittal Brasil S.A. (7)	SAD 69	-19,82675	-43,12608333	0,0002778	0,0002778	0,0091
ArcelorMittal Brasil S.A. (8)	SAD 69	-19,82477778	-43,12627778	0,0002778	0,0002778	0,00459
Usiminas Mecânica S/A	SAD 69	-19,49944444	-42,565	0,0013496	0,0013496	0,03509
ArcelorMittal Inox Brasil S.A (1)	SAD 69	-19,52805556	-42,64944444	0,1456883	0,1456883	4,90534
ArcelorMittal Inox Brasil S.A (2)	SAD 69	-19,52777778	-42,63916667	0,2806578	0,2806578	2,45156
Companhia Vale do Rio Doce (1)	SAD 69	-19,73231849	-43,00449211	0,0000015	0,0000015	0
Companhia Vale do Rio Doce (2)	WGS 84	-19,72789639	-42,9854692	0,0000041	0,0000041	0

Razão Social	DATUM	Latitude	Longitude	Vazão Gerada m³/s	Vazão Tratada m³/s	DBO ton/mês
Companhia Vale do Rio Doce (3)	WGS 84	-19,73129393	-42,98397666	0,0000032	0,0000032	0
Companhia Vale do Rio Doce (4)	WGS 84	-19,72547496	-42,98701622	0,0000421	,0000421	0
Companhia Vale do Rio Doce (5)	SAD 69	-20,17375387	-43,48400939	0,0533179	0,0533179	1,21892
Companhia Vale do Rio Doce (6)	SAD 69	-20,16701566	-43,48940351	0,00037	0,00037	0,08919
Companhia Vale do Rio Doce (7)	SAD 69	-20,17565997	-43,49663011	0,00037	0,00037	0,02014
White Martins gases industriais	SAD 69	-19,46683333	-42,53666667	0,0088735	0,0088735	0
Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S/A – USIMINAS (1)	SAD 69	-19,48972222	-42,53	1,2333098	1,2333098	19,18043
Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S/A – USIMINAS (2)	SAD 69	-19,48972222	-42,5525	0,0173956	0,0173956	0
Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S/A – USIMINAS (3)	SAD 69	-19,49	-42,56027778	0,0059285	0,0059285	0
Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S/A – USIMINAS (4)	SAD 69	-19,49166667	-42,56083333	0,0200064	0,0200064	0
Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S/A – USIMINAS (5)	SAD 69	-19,485	-42,52555556	0,0160066	0,0160066	0

Fonte: FEAM, 2014. Modificado pela autora.

As vazões e concentrações de DBO obtidas, tanto para os efluentes domésticos quanto para os industriais, foram utilizadas como dados de entrada no modelo utilizado no estudo.

### 5.3. Equação de mistura em lançamentos pontuais

Lançamentos ou contribuições pontuais nos corpos hídricos precisam ser inseridos nos modelos de qualidade da água. Segundo von Sperling (2014), a partir do ponto de mistura esgoto-rio ou lançamento-rio, os modelos assumem o início do cálculo das reações físicas e bioquímicas.

A equação da mistura é uma média ponderada das concentrações com as respectivas vazões dos dois componentes que se misturam. A concentração de um constituinte qualquer (OD, DBO, N, P, coliformes, etc) pode ser obtida por meio da Equação 1:

$$C_0 = \frac{Q_r C_r + Q_e C_e}{Q_r + Q_e} \quad (1)$$

Onde:

$C_0$  = concentração do constituinte na mistura (mg/L ou g/m³)

$C_r$  = concentração do constituinte no componente 1 (ex: rio, imediatamente a montante do ponto de mistura (mg/L ou g/m<sup>3</sup>))

$C_e$  = concentração do constituinte no componente 2 (ex: esgoto, rio afluente), imediatamente a montante do ponto de mistura (mg/L ou g/m<sup>3</sup>)

$Q_r$  = vazão do compartimento 1 (L/s ou m<sup>3</sup>/s)

$Q_e$  = vazão no compartimento 2 (L/s ou m<sup>3</sup>/s)

No modelo, a fórmula acima leva em conta também as vazões, DBOs e ODs incrementais.

#### 5.4. Diagrama unifilar

Elaborou-se o diagrama unifilar da bacia posicionando os tributários modelados, a localização dos pontos de lançamento de efluentes domésticos e industriais, assim como também as captações de recurso hídrico no rio Piracicaba. O diagrama unifilar está apresentado no apêndice B.

#### 5.5. Declividade

Para os cálculos da declividade do rio Piracicaba, utilizou-se a Equação 2:

$$D = \frac{Da}{Dh} \quad (2)$$

Onde D = Declividade, Da = diferença de altitude, e Dh = distância do rio.

Após os cálculos foram definidos trechos que apresentam certa homogeneidade na declividade.

Com base nas informações obtidas, foram definidos 8 trechos que apresentaram uma homogeneidade na declividade. Os trechos definidos e suas respectivas declividades encontram-se na Tabela 07.

Tabela 07 - Trechos e declividades do rio Piracicaba

Trecho	Intervalo	i (m/m)
Trecho 1	da nascente até o km 14,5	0,05820
Trecho 2	do km 14,5 até o km 40,0	0,00630
Trecho 3	do km 40,0 até o km 109,0	0,00220

<b>Trecho</b>	<b>Intervalo</b>	<b>i (m/m)</b>
Trecho 4	do km 109,0 até o km 156,0	0,00049
Trecho 5	do km 156,0 até o km165,0	0,00040
Trecho 6	do km 165,0 até o km175,0	0,00004
Trecho 7	do km 175,0 até o km181,0	0,00006
Trecho 8	do km 181,0 até a foz no rio Doce	0,00008

Fonte: elaborado pela autora.

## 5.6.Largura do canal

Nos pontos escolhidos para a divisão dos 8 trechos não existem Estações Fluviométricas, o que permitiria, com maior precisão, a obtenção da largura do fundo do canal. Sendo assim, inferiu-se esta grandeza a partir da medida nos pontos finais dos trechos utilizando o software ArcGIS. As medidas obtidas para cada trecho encontram-se na Tabela 08.

Tabela 08 – Largura medida para cada trecho definido

<b>TRECHOS</b>	<b>LARGURA</b>
Trecho 1	11 m
Trecho 2	58 m
Trecho 3	30 m
Trecho 4	50 m
Trecho 5	30 m
Trecho 6	47 m
Trecho 7	110 m
Trecho 8	120 m

Fonte: Elaborado pela autora.

## 5.7.Vazão

### 5.7.1. Vazão do rio Piracicaba

Para o planejamento e gerenciamento de uma bacia hidrográfica, a fim de determinar a capacidade mínima de diluição de um curso de água, consideraram-se as condições críticas que ocorrem exatamente no período de vazão mínima. Tal vazão deve ser estimada a partir de dados fluviométricos históricos do curso de água, adotando-se usualmente a mínima para um tempo de recorrência de dez anos e mínima de sete dias ( $Q_{7,10}$ ). Com isto, estimou-se a  $Q_{7,10}$  com a utilização de uma ferramenta de gestão hidrológica para o Estado de Minas Gerais, chamada Hidrotec (UFV, 2009). Essa ferramenta permite estimar dados hidrológicos para as bacias hidrográficas situadas no Estado de Minas Gerais.

A plataforma Hidrotec foi estabelecida utilizando-se o software ArcGIS 9.3.1. Respeitando-se os limites das regiões hidrologicamente homogêneas, identificadas na regionalização hidrológica, foi possível ajustar modelos de regressão do tipo potencial em função da área de drenagem da bacia, utilizando-se os valores das variáveis e funções hidrológicas disponibilizadas na rede hidrográfica digital e procedendo o armazenamento destes modelos na referida rede hidrográfica.

Desta forma, para cada curso d'água identificado no mapa-base digital das regiões hidrográficas estudadas foi associada um modelo de regressão não linear, que poderá ser utilizado nas transferências e, ou, extrapolação espacial de informações hidrológicas.

Segundo UFV (2009), as vazões e volumes de regularização foram estimados através dos modelos de regressão não linear ajustados, em função da área de drenagem da bacia, conforme os passos:

1. identificação no mapa da rede hidrográfica da bacia, do curso d'água, onde se encontra a seção de interesse. Caso este curso d'água não esteja inserido no mapa, deve-se identificar o curso d'água mais representativo (afluente ou não) que servirá de base para a aplicação do modelo de regressão;

2. identificado o referido curso d'água têm-se acesso à uma tabela de atributos, contendo informação sobre o intervalo válido das áreas de drenagem recomendado na regionalização hidrológica e os modelos de regressão ajustados para cada variável ou função hidrológica estudada;

3. finalmente, estimou-se a variável ou função hidrológica desejada por meio da aplicação do modelo de regressão ajustado para o curso d'água de interesse, tendo como variável independente o valor da área de drenagem da sub-bacia identificada à montante do local da seção fluvial de interesse do usuário.

Segundo HIDROTEC (2010), na Consulta Espacial Georreferenciada – Modelos ajustados por curso d'água – Bacia do rio Doce, o modelo ajustado da vazão crítica em função da área da bacia para o rio Piracicaba é segundo a Equação 3:

$$Q_{7,10} = 0,0038A^{1,0129} \quad (3)$$

Onde  $A$  = área da bacia ( $\text{km}^2$ ).

Sendo a área da bacia do rio Piracicaba igual a  $5.685,86 \text{ km}^2$ , temos que  $Q_{7,10} = 24,155 \text{ m}^3/\text{s}$  e a vazão específica =  $4,15 \text{ L/s.km}^2$ . O intervalo válido para a Equação 3 é 272 a  $24.204 \text{ km}^2$ .

O valor da  $Q_{7,10}$  foi inserido no modelo para comparação entre a estimativa das vazões calculadas na modelagem e da vazão segundo HIDROTEC. Já a vazão específica foi utilizada para os cálculos das vazões incrementais.

Pela consulta espacial disponível no HIDROTEC, é possível obter a vazão de cabeceira para o rio Piracicaba, que é de  $0,301 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esse valor foi inserido como dado de entrada inicial do modelo, onde posteriormente foram realizados os cálculos de vazão ao longo da trajetória do rio Piracicaba.

Visando a obtenção das vazões, bem como os demais parâmetros hidráulicos (velocidade média e profundidade), foram selecionadas as séries históricas das estações fluviométricas localizadas ao longo do rio Piracicaba.

### **5.7.2. Vazão dos tributários**

Para inserção da vazão dos tributários do rio Piracicaba no modelo, obteve-se a  $Q_{95}$  (vazão em que 95% dos dados diários de vazão da série são iguais ou superiores a ela, ou seja, 5% das vazões diárias são inferiores) no site *online* de Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – IDE-Sisema. O apêndice A apresenta os afluentes do rio Piracicaba, com suas respectivas vazões ( $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{7,10}$ ).

Foram inseridos no modelo os tributários com vazão igual ou superior a  $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ . Posteriormente calculou-se a vazão incremental para consideração da vazão daqueles afluentes que não foram inseridas diretamente no modelo.

### **5.7.3. Vazão incremental**

A vazão natural afluente é a vazão que seria observada em determinado posto de medição considerando o rio na sua condição natural, ou seja, imaginando que não existe nenhum reservatório capaz de regularizar a vazão em nenhum ponto do rio. A partir do conceito de vazão natural pode ser introduzido o conceito de vazão incremental que é aquela

correspondente a toda vazão lateral captada entre um posto de medição e todos os postos de medição imediatamente a montante deste. Ou seja, é o incremento de água que está em outra bacia, mas que vai chegar nesse ponto de medição.

Calculou-se a vazão incremental dividindo-se a bacia do rio Piracicaba em 3 áreas devido às características semelhantes, sendo a primeira do km zero até o km 89,4 e a segunda do km 89,4 até o km 146,4 e a terceira do km 146,4 até o km 241. Multiplicando-se a vazão específica = 4,15 L/s.km<sup>2</sup> pela Área, dividindo-se pelo comprimento de cada trecho, encontra-se a vazão incremental a cada 100 m. É exposto na Tabela 09 estes resultados para cada 100 m, que é o passo de integração adotado neste estudo.

Tabela 09 - Cálculo da vazão incremental

Curso d'água	Área em km <sup>2</sup>	Comprimento km	Vazão Incremental m <sup>3</sup> /s (para cada 100 m)
Rio Piracicaba - Área 1	589,36	89,84	0,002722
Rio Piracicaba - Área 2	536,53	56,42	0,003946
Rio Piracicaba - Área 3	1616,50	94,60	0,007091

Fonte: elaborado pela autora.

## 5.8.Determinação dos coeficientes

Mancuso e Santos (2003) afirmam que o coeficiente  $K_1$  representa a taxa de decomposição da matéria orgânica biodegradável, a qual, por sua vez, depende de uma série de fatores físicos, químicos e biológicos. Entre tais fatores destacam-se principalmente a temperatura e a composição do efluente. O metabolismo microbiano é bastante afetado pela temperatura, causando, portanto, variações na taxa de conversão da matéria orgânica. A Equação 4 expressa esta relação empírica entre a temperatura e o coeficiente de desoxigenação  $K_1$ .

$$K_{1T} = K_{1,20} \cdot \theta^{(T-20)} \quad (4)$$

Onde:  $K_{1T} = K_1$  a uma temperatura T qualquer (d<sup>-1</sup>);  $K_{1,20} = K_1$  à temperatura T=20°C = (d<sup>-1</sup>); T = temperatura da água (°C) e  $\theta$  = coeficiente de temperatura.

A Equação 4 é também aplicável para  $K_d$  e  $K_s$  e o coeficiente  $\theta$  tem o valor 1,047 e 0,1024, respectivamente (EPA,1987).

O coeficiente de desoxigenação ( $K_1$ ), quando não determinado em laboratório, usualmente é estimado com base nas faixas de valores disponibilizados por von Sperling (2007).

O coeficiente  $K_d$  é a incorporação da decomposição da matéria orgânica pela biomassa suspensa na massa líquida, bem como pela biomassa no lodo de fundo. As condições ambientais na maioria das vezes mostram que a remoção da DBO apresenta valores maiores do que os determinados em laboratório (JÚNIOR, 2010). Segundo Chapra (1997), esta diferença é causada pela sedimentação da matéria orgânica e remoção da DBO pelo lodo do fundo. O coeficiente de decomposição da DBO no rio ( $K_d$ ) inclui estes dois fenômenos de tal forma que  $K_d$  (oxidação da DBO no rio)  $\geq K_1$  (oxidação da DBO em laboratório).

EPA (1985) e Thomann e Muller (1987) apresentam equações que relacionam  $K_d$  com as características hidráulicas (profundidade e vazão). São elas:

- $K_d$  em função da profundidade (Equações 5 e 6):

$$K_d = 0,3 (H \div 2,5)^{-0,434} \text{ (para } H \leq 2,5\text{m)} \quad (5)$$

$$K_d = 0,3 d^{-1} \text{ (para } H > 2,5\text{m)} \quad (6)$$

- $K_d$  em função da vazão (Equação 7):

$$K_d = 180 Q^{-0,49} \text{ (para } H \text{ entre } 0,3 \text{ e } 10\text{m e } Q \text{ entre } 0,15 \text{ e } 250 \text{ m}^3/\text{s)} \quad (7)$$

O  $K_s$  representa o quociente entre a velocidade de sedimentação do material orgânico sedimentável (DBO sedimentável) e a profundidade do rio (VON SPERLING, 2007). O valor de  $K_s$  pode ser calculado pela Equação 8:

$$K_s = v^s / H \quad (8)$$

Onde:  $K_s$  = coeficiente de sedimentação ( $d^{-1}$ );  $v^s$  = velocidade de sedimentação do material particulado (m/d);  $H$  = profundidade do rio (m).

Segundo von Sperling (2014), os valores típicos dos coeficientes de remoção de DBO  $K_1$ ,  $K_d$  e  $K_s$  podem ser sintetizados em faixas, dependendo da situação do rio (Quadro 1).

Quadro 1 – Faixas típicas de  $K_1$ ,  $K_d$  e  $K_s$

Origem	$K_1$ (laborat)	Rios rasos			Rios profundos		
		Decomp. $K_d$	Sediment. $K_s$	Remoção $K_r$ (= $K_s + K_d$ )	Decomp. $K_d$	Sediment. $K_s$	Remoção $K_r$ (= $K_s + K_d$ )
Curso d'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 d'água recebendo esgoto bruto de baixa concentração	0,30-0,40	0,40-0,80	0,05-0,25	0,45-1,05	0,30-0,45	0,00-0,15	0,30-0,60
Curso d'água recebendo efluente primário	0,30-0,40	0,40-0,80	0,05-0,10	0,45-0,90	0,30-0,45	0,00-0,05	0,30-0,50
Curso d'água recebendo efluente secundário	0,12-0,24	0,12-0,24	-	0,12-0,24	0,12-0,24	-	0,12-0,24
Curso d'água com águas limpas	0,08-0,20	0,08-0,20	-	0,08-0,20	0,08-0,20	-	0,08-0,20

Fonte: von Sperling (2007).

Nota: rios rasos: profundidade inferior a cerca de 1,0 ou 1,5 m; rios profundos: profundidade superior a cerca de 1,0 ou 1,5m.

No presente estudo utilizou-se como dados de iniciais para inserção no modelo, os valores de  $K_1$ ,  $K_d$  e  $K_s$  do Quadro 1.

O  $K_2$  é o coeficiente de reaeração, e depende da difusividade do oxigênio na água e da intensidade da turbulência do escoamento, aumentando seu valor, quanto mais intensa for a turbulência (LIMA 2016). A capacidade de um sistema se reaerar é uma função dos processos

de advecção e difusão que ocorrem dentro dele e das fontes internas de geração e remoção de oxigênio (MARTINS, 2015).

O valor do coeficiente  $K_2$  é mais determinante no balanço do OD que o  $K_d$ . Segundo von Sperling (2014), existem três formas para se estimar  $K_2$  nas simulações do OD em um curso de água:

- Valores médios tabelados;
- Valores em função das características hidráulicas do corpo de água;
- Valores correlacionados com a vazão do curso de água.

Os dados hidráulicos como vazão, altura d'água e velocidade das águas podem ser utilizados para a determinação do coeficiente de reaeração  $K_2$ , por meio de fórmulas hidráulicas encontradas na literatura técnica, aplicadas a cada par de valores de velocidade e altura d'água, como na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores típicos de  $K_2$  (base e, 20°C)

CORPO D'ÁGUA	$K_2$	
	PROFUNDO	(d <sup>-1</sup> ) RASO
Pequenas lagoas	0,12	0,23
Rios vagorosos, grandes lagos	0,23	0,37
Grandes rios com baixa velocidade	0,37	0,46
Grandes rios com velocidade normal	0,46	0,69
Rios rápidos	0,69	1,15
Corredeiras e quedas d'água	>1,15	>1,61

Fonte: (FAIR *et al*, 1973, ARCEIVALA, 1981, citado por VON SPERLING, 2014).

Podem-se determinar os valores de  $K_2$  correlacionando-os com a vazão do curso d'água. A profundidade e velocidade estão associadas à vazão e, assim, por transitividade, está relacionada ao  $K_2$ . Segundo von Sperling (2014), a relação entre  $K_2$  e Q pode ser descrita pela Equação 9:

$$K_2 = mQ^n \quad (9)$$

Onde: Q = vazão (m<sup>3</sup>/s); m e n = coeficientes da equação.

O coeficiente  $K_2$  também é tabelado, conforme a Tabela 11. Estes valores podem ser tomados como ponto de partida para a calibração do modelo, visando obter coeficientes mais condizentes com a realidade da bacia, que levem a menor diferença entre os dados de qualidade observados e estimados pelo modelo.

Tabela 11 – Valores de  $K_2$  segundo modelos baseados em dados hidráulicos do curso d'água (base e, 20°C)

Pesquisador	Fórmula	Faixa de Aplicação aproximada
O'Connor & Dobbins (1958)	$3,93.v^{0,5}.H^{-1,5}$	0,6m $\leq$ H < 4,0 m 0,05m/s $\leq$ v < 0,8m/s
Churchill et al. (1962)	$5,0.v^{0,97}.H^{-1,67}$	0,6m $\leq$ H < 4,0 m 0,8m/s $\leq$ v < 1,5m/s
Owens et al. (1954) (apud Branco, 1978; Chapra, 1997)	$5,3.v^{0,67}.H^{-1,85}$	0,1m $\leq$ H < 0,6 m 0,05m/s $\leq$ v < 1,5m/s

v : Velocidade do curso d'água (m/s)

H: altura da lâmina d'água (m)

Faixa de aplicabilidade adaptada e modificada por von Sperling (2007)

O teor de OD em um curso d'água, a montante do lançamento de despejos, é um produto das atividades na bacia hidrográfica a montante. Caso não seja possível coletar amostras de água neste ponto, e também se levando em consideração que a simulação pode ser para condições futuras, pode-se estimar a concentração de OD em função do grau de poluição aproximado do curso d'água. Se este apresentar poucos indícios de poluição, OD no rio pode ser adotado, por segurança, como 80 a 90% do valor de saturação de oxigênio (VON SPERLING, 2014).

A concentração de saturação (CS) de oxigênio pode ser calculada com base em considerações teóricas, ou através da utilização de fórmulas empíricas.

O valor de CS é função da temperatura da água, da altitude e da salinidade, sendo que:

- A elevação da temperatura reduz a concentração de saturação (a maior agitação entre as moléculas na água faz com que os gases dissolvidos tendam a passar para a fase gasosa).
- O aumento da altitude reduz a concentração de saturação (a pressão atmosférica é menor, exercendo uma menor pressão para que o gás se dissolva na água).
- A elevação da quantidade de sais dissolvidos na água reduz a concentração de OD. Assim, pode-se dizer que a água do mar contém menos OD que outras águas.

A Tabela 12 exhibe a concentração de saturação de oxigênio na água limpa para diferentes temperaturas e altitudes. Para altitudes intermediárias, os valores de OD podem ser interpolados linearmente, obtendo-se uma precisão satisfatória.

Tabela 12 - Concentração de saturação de oxigênio em água limpa (mg/L)

Temperatura (°C)	Altitude (m)			
	0	500	1000	1500
10	11,3	10,7	10,1	9,5
11	11,1	10,5	9,9	9,3
12	10,8	10,2	9,7	9,1
13	10,6	10,0	9,5	8,9
14	10,4	9,8	9,3	8,7
15	10,2	9,7	9,1	8,6
16	10,0	9,5	8,9	8,4
17	9,7	9,2	8,7	8,2
18	9,5	9,0	8,5	8,0
19	9,4	8,9	8,4	7,9
20	9,2	8,7	8,2	7,7
21	9,0	8,5	8,0	7,6
22	8,8	8,3	7,9	7,4
23	8,7	8,2	7,8	7,3
24	8,5	8,1	7,6	7,2
25	8,4	8,0	7,5	7,1
26	8,2	7,8	7,3	6,9
27	8,1	7,7	7,2	6,8
28	7,9	7,5	7,1	6,6
29	7,8	7,4	7,0	6,6
30	7,6	7,2	6,8	6,4

Fonte: von Sperling (2014)

Nos esgotos brutos, os teores de OD são normalmente nulos ou próximos a zero. Isto se deve à grande quantidade de matéria orgânica presente, implicando em um elevado consumo de oxigênio pelos microrganismos decompositores. Na rede de coleta e interceptação normalmente não há pontos de aeração, e por este motivo não há uma penetração significativa de oxigênio. Assim, adota-se usualmente, nos cálculos de autodepuração, o OD do esgoto bruto como zero.

Segundo von Sperling (2014) caso o esgoto seja tratado, as seguintes considerações podem ser efetuadas:

- Tratamento primário: Efluentes de tratamento primário podem ser admitidos como tendo OD igual à zero.
- Tratamento anaeróbio: Efluentes de processos anaeróbios de tratamento possuem também OD igual a zero.

- Lodos ativados, filtros biológicos percoladores e sistemas aeróbios similares: Efluentes desses sistemas sofrem uma certa aeração nos vertedores de saída dos decantadores secundários, podendo o OD subir a 2 mg/L ou mais. Se o emissário de lançamento final for longo, este oxigênio poderá vir a ser consumido, face à DBO remanescente do tratamento.
- Lagoas facultativas: Efluentes de lagoas facultativas podem apresentar teores de OD próximos à saturação, ou mesmo ainda mais elevados, face à produção de oxigênio puro pelas algas. A concentração de OD varia ao longo do dia, sendo mais elevada durante as horas de insolação. Para efeito de cálculo, pode-se adotar valores médios em torno de 4 a 6 mg/L.

### 5.9. Coeficientes de ajuste

É de se esperar que as condições morfométricas dos rios mudem ao longo de seu percurso, portanto é bastante vantajosa em termos de modelagem de qualidade que se obtenha esta equação de ajuste para cada trecho do rio (von Sperling, 2014). Desta forma, solucionou-se a fórmula de Manning por meio de equações de ajustes para os diversos trechos em que o rio foi dividido. Para a solução da equação de Manning necessita-se conhecer a declividade  $i$  para cada trecho e o coeficiente de rugosidade  $n$  de Manning. De posse destes dados, são realizados os cálculos para obtenção da área, perímetro molhado, raio hidráulico, vazão segundo a fórmula de Manning e velocidade, conforme Tabela 13:

Tabela 13 – Cálculos realizados para obtenção dos coeficientes de descarga

Dados necessários	Fórmulas
Área	$A=(b+2y).y$
Perímetro molhado	$P= b+2y(1+Z^2)^{0,5}$
Raio Hidráulico	$Rh=A/P$
Fórmula de Manning	$Q=(1/n).A. Rh^{(2/3)i^{0,5}}$
Velocidade	$U=Q/A$

Fonte: von Sperling (2014)

Estes valores permitem a construção de dois gráficos, um de velocidade x vazão e outro de profundidade x vazão, de cujas linhas de tendência (Potência) são obtidos os coeficientes das equações 10 e 11 (von Sperling, 2014).

Também pode-se obter os dados das vazões, bem como os demais parâmetros hidráulicos (velocidade média e profundidade), por meio das séries históricas de quatro estações fluviométricas (Tabela 14) pertencentes à rede de monitoramento da Agência Nacional de Águas (ANA) localizadas ao longo do rio Piracicaba.

Tabela 14 - Estações fluviométricas selecionadas na bacia do rio Piracicaba

Código	Estação	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	Coordenadas (UTM)	
			E (m)	N (m)
56610000	Rio Piracicaba	1.160	691216	7795033
56659998	Nova Era IV	3.203	706116	7813257
56696000	Mário de Carvalho	5.270	747569	7839461
56659999	Nova Era - Montante	3.060	704309	7813162

Fonte: Agência Nacional de Águas.

Os dados da série histórica das estações foram lançados em dois sistemas gráficos bidimensionais, (u, Q) e (y, Q), sendo, posteriormente, realizados ajustes não-lineares. Os coeficientes de ajuste, que são calculados em função da velocidade, profundidade e vazão média, foram calculados por meio de regressão de acordo com as equações 10 e 11:

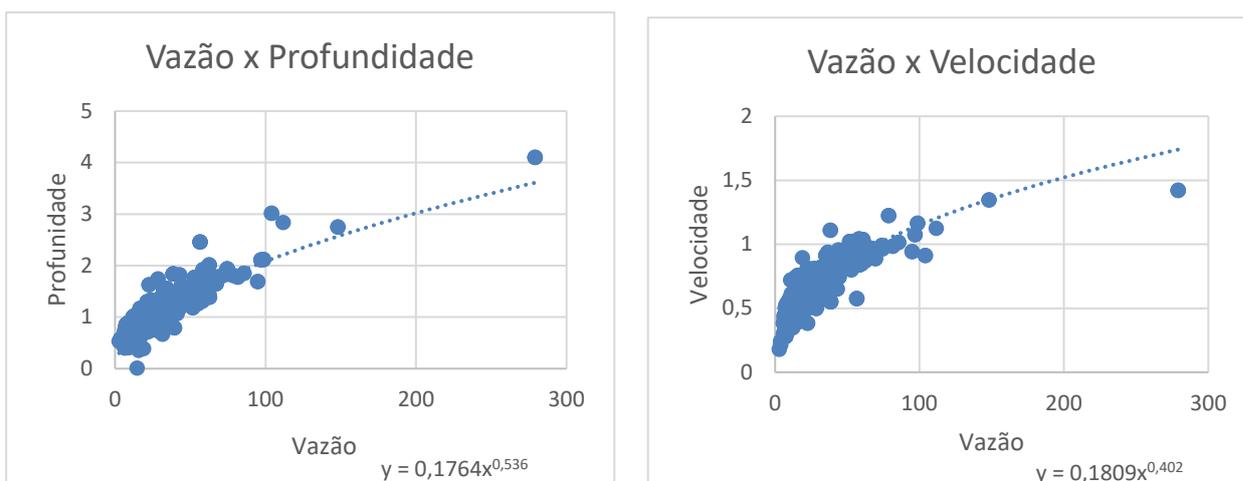
$$u = a \cdot Q^b \quad (10)$$

$$y = c \cdot Q^d \quad (11)$$

Onde Q = vazão volumétrica ou fluxo do trecho; u = velocidade; y = profundidade do canal e a, b, c e d são constantes empíricas.

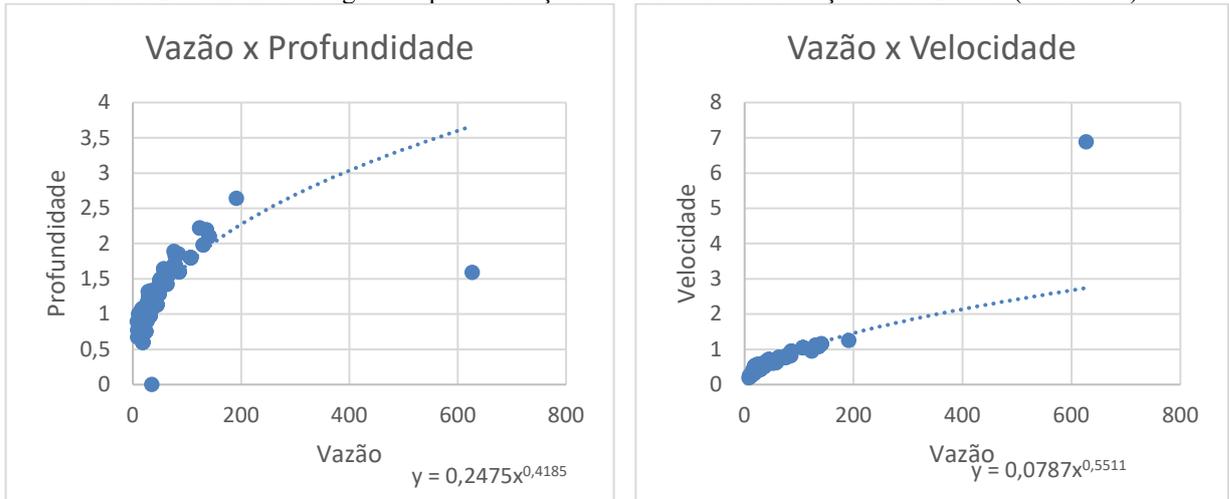
Sendo assim, a seguir são apresentados os gráficos de cada estação fluviométrica, assim como as equações com os coeficientes:

Gráfico 1 – Análise de regressão para obtenção de coeficientes estação da Rio Piracicaba (56610000)



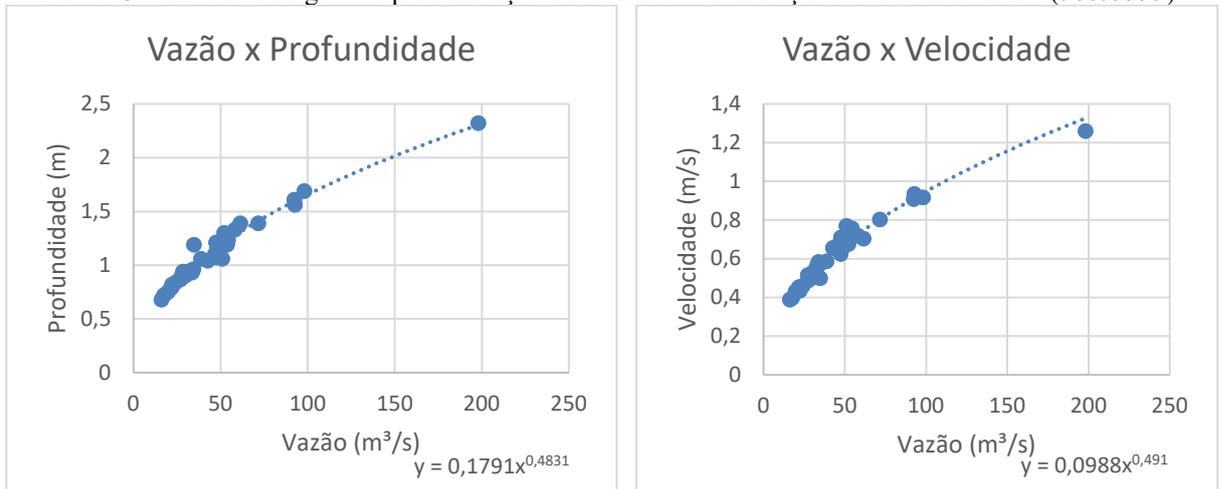
Fonte: elaborado pela autora, 2019.

Gráfico 2 – Análise de regressão para obtenção de coeficientes da estação Nova Era IV (56659998)



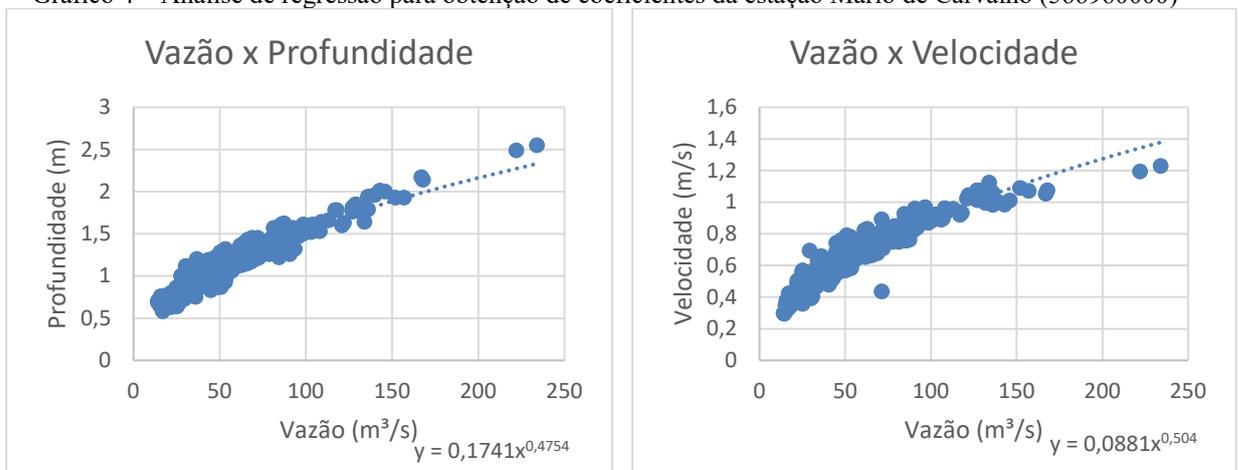
Fonte: elaborado pela autora, 2019.

Gráfico 3 – Análise de regressão para obtenção de coeficientes da estação Nova Era Montante (56659999)



Fonte: elaborado pela autora, 2019.

Gráfico 4 – Análise de regressão para obtenção de coeficientes da estação Mário de Carvalho (566960000)



Fonte: elaborado pela autora, 2019.

Da análise dos gráficos foi possível perceber que, de modo geral, quanto maior a profundidade e velocidade, conseqüentemente maior a vazão. Sabe-se que a vazão e a área são termos diretamente proporcionais, e que a área é dependente da profundidade do leito. Tendo isso em vista, pode-se estabelecer uma correlação entre esses fatores.

É importante ressaltar também que uma mudança na área de escoamento, através de redução ou aumento de diâmetro, de um obstáculo, ou ainda através de uma mudança na direção do escoamento provocam uma aceleração local do escoamento, alterando a velocidade.

A partir dos valores de vazão, foram calculados os valores dos coeficientes de velocidade e profundidade utilizando a média, conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores médios dos coeficientes de descarga a, b, c e d

Velocidade		Profundidade	
a	b	c	d
0,112	0,487	0,194	0,478

Fonte: elaborado pela autora.

Os coeficientes de descarga obtidos tanto pelos cálculos da Tabela 13, quanto pela Tabela 15 foram inseridos separadamente no modelo para os cálculos de velocidade e profundidade ao longo do percurso de todo o rio, com o objetivo de se realizar uma comparação de quais destes métodos mais se adequam na calibração.

#### **5.10. Entrada de dados para calibração do modelo**

O QUAL-UFMG utiliza a integração pelo método de Euler, que é considerada mais simples e de fácil compreensão pelo usuário na planilha Excel®. A principal desvantagem é a necessidade de curtos passos de integração (representados pela extensão dos segmentos em que o rio é dividido), fato esse que é contornado pela pouca exigência computacional que o modelo necessita, podendo ser adotadas curtas distâncias de integração, sem que isso gere tempos de cálculos excessivos.

Para toda a modelagem foi utilizado o delta da distância para integração do comprimento de cada segmento igual a 100 m, que viabilizou uma melhor integração dos parâmetros simulados.

Os dados de qualidade de água utilizados nesse estudo foram provenientes das campanhas de monitoramento de qualidade de água do “Projeto Águas de Minas”, de

responsabilidade do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), e dos arquivos sobre Indicadores de Qualidade da Água da plataforma Metadados, de responsabilidade da Agência Nacional das Águas (ANA)

Na bacia do rio Piracicaba, se localizam 12 estações de monitoramento das quais foram obtidos os dados de qualidade da água para inserção no modelo, correspondendo a uma densidade de estações 1,40 por 1000 km<sup>2</sup>. Os dados das estações são apresentados na Tabela 16:

Tabela 16 – Estações de monitoramento de qualidade de água

Estação	Curso d'água	Nº de dados disponíveis	Período de amostragem	Frequência de amostragem	Coordenadas	
					Latitude	Longitude
RD074	Rio Piracicaba	42	10/2008 a 04/2019	Trimestral	-20°10'43,00"	-43°24'47,00"
RD075	Rio Piracicaba	42	10/2008 a 04/2019	Trimestral	-20°09'35,00"	-43°17'40,00"
RD076	Rio da Prata	42	10/2008 a 04/2019	Trimestral	-19°47'03,00"	-43°00'11,00"
RD099	Rio Maquiné	42	10/2008 a 04/2019	Trimestral	-20°04'24,00"	-43°24'43,00"
RD025	Rio Piracicaba	86	11/1997 a 04/2019	Trimestral	-19°56'21,00"	-43°10'48,00"
RD026	Rio Piracicaba	77	02/2000 a 04/2019	Trimestral	-19°50'04,00"	-43°07'38,00"
RD027	Rio Santa Bárbara	82	08/1998 a 04/2019	Trimestral	-19°48'36,00"	-43°13'60,00"
RD029	Rio Piracicaba	86	07/1997 a 04/2019	Trimestral	-19°46'00,00"	-43°02'39,00"
RD030	Rio do Peixe	76	10/2000 a 04/2019	Trimestral	-19°44'03,00"	-43°01'41,00"
RD032	Rio Piracicaba	77	02/2000 a 04/2019	Trimestral	-19°37'11,00"	-42°48'02,00"
RD034	Rio Piracicaba	77	02/2000 a 04/2019	Trimestral	-19°31'48,00"	-42°36'09,00"
RD031	Rio Piracicaba	86	07/1997 a 04/2019	Trimestral	-19°31'33,00"	-42°39'28,00"

Fonte: ANA (2019)

Os dados das estações utilizados na modelagem foram os correspondentes aos anos de 2008 a 2019.

Após a inserção dos dados necessários no modelo, foi realizada a calibração utilizando a ferramenta estatística Solver do Microsoft Excel® para estimar os valores de  $K_1$ ,  $K_d$  e  $K_s$ . Essa ferramenta minimiza os erros quadráticos dos valores experimentais com os valores estimados, gerando como resultado os valores otimizados dos coeficientes  $K_1$ ,  $K_d$  e  $K_s$ , usada nas equações para modelagem da qualidade da água. Esse método de otimização faz com que a curva estimada se aproxime ao máximo dos valores observados em campo para cada trecho, minimizando o erro entre valor observado e estimado.

A avaliação do ajuste do modelo foi realizada empregando-se o indicador estatístico RMEQ (Raiz da média dos erros ao quadrado), conforme Equação 12:

$$RMEQ = \sqrt{\frac{\Sigma(Y_{obs} - Y_{est})^2}{n}} \quad (12)$$

Onde:  $Y_{obs}$  = valor observado;  $Y_{est}$  = valor estimado;  $n$  = número de dados.

Segundo von Sperling (2014), RMEQ tem bom comportamento estatístico e proporciona uma medição direta do erro do modelo. Quanto mais próximo de 0 (zero), melhor o ajuste requerido.

### **5.11. Simulação de tratamento de efluentes**

Neste trabalho foi realizada a simulação da instalação de sistemas de tratamento de esgotos domésticos de 4 sedes que efetuam seu lançamento diretamente no rio Piracicaba.

A simulação de cenários de tratamento de esgoto está fundamentada na necessidade de um tratamento eficiente dos efluentes dos municípios que lançam seus efluentes no rio Piracicaba, tendo em vista os valores modelados e o permitido para o rio considerado Classe 2.

Segundo (FEAM, 2012) o número de ETEs em projeto, elucida um cenário promissor quanto à expansão da parcela de população atendida por tratamento na BHRPI. Entretanto vale ressaltar que as situações dos projetos são particulares de cada município; alguns devem ser reelaborados enquanto outros estão prontos para serem aplicados.

A fim de vislumbrar um possível cenário futuro, foram contabilizadas as ETEs fora de operação, em obras e em projeto destacadas no PITE-Piracicaba (2012). Dessa forma, calculou-se a carga de DBO que seria removida caso essas ETEs estivessem funcionando. Portanto, a situação apresentada no cenário futuro é hipotética, dada a incerteza da concretização dos projetos e finalização das obras.

Na Tabela 17 são apresentados os valores de concentrações de DBO gerada e lançada pela população urbana total inserida na bacia do Piracicaba, considerando também o cenário futuro, ou seja, a inclusão das ETEs fora de operação e com chance de reativação, as ETEs em obras e as ETEs em projeto disponíveis no PITE-Piracicaba (2012) .

Tabela 17 – Estimativa da concentração de DBO lançada no rio Piracicaba pela população urbana para o cenário de tratamento de efluentes

<b>Município</b>	<b>Concentração lançada (mgDBO/L)</b>	<b>Concentração removida simulando instalação de ETEs (%)</b>	<b>Concentração lançada no cenário (mgDBO/L)</b>
Antônio Dias	557,7	6,6	520,9
Avinópolis (Fonseca)	556,1	70	166,83
Nova Era	470,7	8	433,0
Rio Piracicaba	608,3	83,1	102,8

Fonte: PITE-Piracicaba (2012). Modificado pela autora.

Com isso, mantendo os parâmetros cinéticos previamente determinados na calibração, foi simulado um cenário hipotético para a bacia, avaliando as variáveis OD e DBO.

### 5.12. Vazão de diluição

Segundo von Sperling (2014) a diluição tem uma grande influência na capacidade de assimilação de um rio. Um rio com pequena capacidade de diluição possivelmente sofrerá de forma mais expressiva os efeitos da poluição, ao passo que um rio de grande vazão, ao receber uma pequena vazão de esgotos, poderá não sentir impactos importantes.

Ou seja, a vazão de diluição de determinado efluente é a vazão necessária do corpo hídrico para diluição da concentração dos parâmetros de modo que os mesmos não atinjam valores orientadores maiores que os previstos nas legislações. Nesse contexto, é válido ressaltar que de acordo com a CONAMA 430/2011 é vedada, para fins de diluição antes do seu lançamento, a mistura de efluentes com águas de melhor qualidade, tais como as águas de abastecimento, do mar e de sistemas abertos de refrigeração sem recirculação (BRASIL, 2011).

Como o QUAL-UFMG não contempla a determinação das vazões de diluição requeridas pelos lançamentos no rio, as fórmulas que determinam as mesmas foram acrescentadas nas planilhas utilizadas na modelagem.

No que concerne à quantificação dos impactos qualitativos do lançamento de efluentes, Cardoso da Silva et al. (2004) desenvolveram estudos apoiados em conceitos propostos por Kelman (1997) onde as interferências qualitativas no corpo hídrico são “transformadas” em equivalentes quantitativos. Esse procedimento facilita, significativamente, as análises de outorga que realizam lançamento de efluentes, unificando, dessa forma, as análises quantitativas e qualitativas pertinentes.

A Equação 13 em que se baseia o balanço qualitativo é chamada de Equação de Diluição, proposta por Kelman (1997):

$$Q_{dil} = (Q_{ef} \times (C_{ef} - C_{perm}) \div (C_{perm} - C_{nat})) \quad (13)$$

em que:

$Q_{dil}$  = vazão de diluição para determinado parâmetro de qualidade;

$Q_{ef}$  = vazão do efluente que contém o parâmetro de qualidade analisado;

$C_{ef}$  = concentração do parâmetro de qualidade no efluente;

$C_{perm}$  = concentração permitida para o parâmetro de qualidade no manancial onde é realizado o lançamento;

$C_{nat}$  = concentração natural do parâmetro de qualidade no manancial onde é realizado o lançamento.

A vazão de diluição ( $Q_{dil}$ ) é a vazão necessária para diluir determinada concentração ( $C_{ef}$ ) de dado parâmetro de qualidade, de modo que a concentração resultante ( $C_{mistura}$ ) seja igual ou menor à concentração permitida ( $C_{perm}$ ).

O resultado da equação de diluição é uma vazão do manancial, denominada Vazão de Diluição ( $Q_{dil}$ ), da qual o usuário se “apropria” virtualmente para diluir determinado parâmetro presente em seu efluente. Essa vazão se propaga para jusante, podendo o seu valor aumentar, diminuir, ou mesmo se manter constante, dependendo das seguintes condições:

- a) Se o parâmetro de qualidade que está sendo diluído é conservativo ou não-conservativo;
- b) Se as concentrações permitidas ( $C_{perm}$ ) do parâmetro nos trechos de jusante ao do lançamento sofrerão mudanças.
- c) Quando do lançamento de efluentes, a vazão de diluição somada à vazão do próprio efluente resulta em uma Vazão de Mistura cuja concentração final não deverá ultrapassar determinado limite.
- d) Na Vazão de Mistura de um determinado parâmetro de qualidade não poderá ser diluído mais nenhum lançamento desse mesmo parâmetro, sendo possível, porém, a sua utilização para diluição de outros parâmetros, bem como para captação.

No caso de lançamento de efluentes que possuam poluentes não-conservativos, como a DBO, por exemplo, a concentração resultante na vazão de mistura sofrerá um decaimento natural ao longo do tempo e dos trechos do manancial, decorrente da possibilidade de autodepuração do corpo hídrico. Porém, a vazão da mistura que este usuário torna indisponível no manancial para outras diluições do mesmo parâmetro é aqui chamada de Vazão Indisponível ( $Q_{indisp}$ ). A vazão indisponível no ponto de lançamento pode ser determinada pela Equação 14.

$$Q_{ind} = Q_{dil} + Q_{ef} \quad (14)$$

O balanço qualitativo deve ser realizado quantificando-se em todos os trechos, a vazão indisponível total de cada parâmetro de qualidade, com ou sem decaimento, proveniente dos diversos lançamentos efetuados pelos usuários.

Para determinar a variação das vazões de diluição após cada lançamento considerando a capacidade de autodepuração foi inserida nas planilhas em Excel® a Equação 15 proposta por Cardoso da Silva e Monteiro (2004):

$$Q_{ind} = ((Q_{ef} + Q_{dil}) \times C_{perm1} \times e^{-K_1 \cdot t}) \div C_{permn} \quad (15)$$

em que:

$Q_{ind}$  = vazão indisponível no ponto de lançamento (em m<sup>3</sup>/s);

$Q_{ef}$  = vazão do efluente (em m<sup>3</sup>/s);

$K_1$  = coeficiente de desoxigenação (dia<sup>-1</sup>);

$t$  = tempo de percurso (em dias) do trecho onde ocorre o lançamento até o trecho aonde se deseja calcular a vazão indisponível;

$C_{perm1}$  = concentração permitida de DBO<sub>5</sub> para o manancial no trecho onde ocorre o lançamento;

$C_{permn}$  = concentração permitida de DBO<sub>5</sub> para o manancial no trecho onde se deseja calcular a vazão indisponível.

$Q_{dil}$  = vazão de diluição no trecho onde ocorre o lançamento (em m<sup>3</sup>/s)

A partir da Equação 14 pode-se estabelecer que a vazão indisponível possui concentração igual à permitida para o trecho de lançamento. A carga de DBO presente na vazão indisponível sofrerá autodepuração. Com isso, a concentração adotada para o trecho de lançamento sofrerá redução, segundo a equação de decaimento, resultando em uma

concentração final num dado trecho de jusante. A concentração final continua correspondendo à vazão indisponível inicial. Com isto estabelecido, duas situações se mostram possíveis:

- Ou se conserva a mesma vazão ( $Q_{\text{indisp1}}$ ) com uma concentração menor ( $C_{\text{finaln}}$ );
- Ou se calcula uma outra vazão ( $Q_{\text{indispn}}$ ) com a concentração permitida para o trecho em análise ( $C_{\text{permn}}$ );

Em ambas as situações, a carga do poluente deverá ser a mesma. Diante disso, a segunda alternativa se mostra mais útil, pois apenas as vazões sofrerão variação, mantendo-se as concentrações sempre iguais aos limites ( $C_{\text{perm}}$ ) estabelecidos para os trechos;

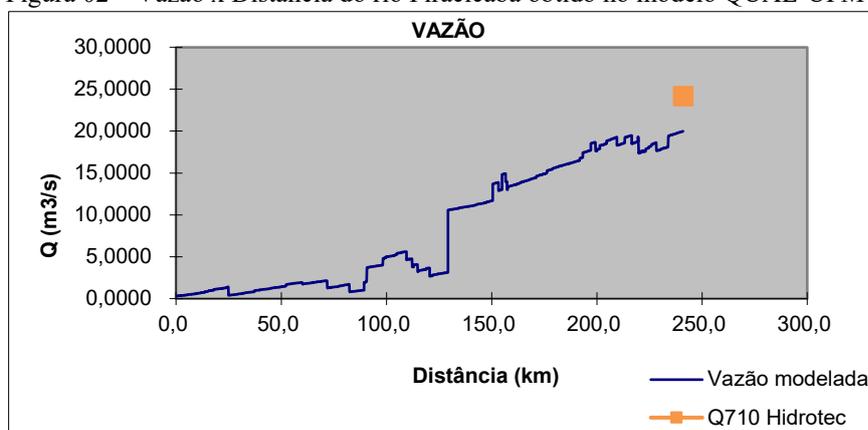
## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Calibração do modelo

#### 6.1.1. Vazão

Alimentando-se o modelo QUAL-UFGM com os dados necessários, foi obtida a vazão ao longo do rio Piracicaba, a qual está apresentada na Figura 02. Percebeu-se que a estimativa de vazão pelo modelo é bem aproximada do valor de  $Q_{7,10}$  para o HIDROTEC (2010).

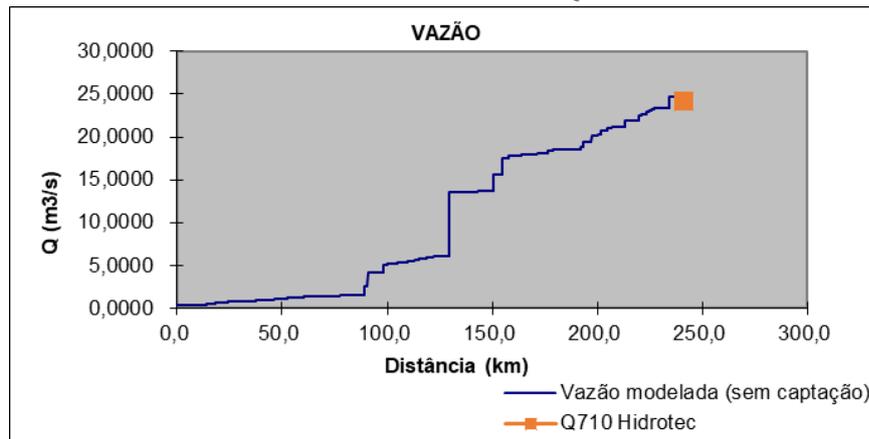
Figura 02 – Vazão x Distância do rio Piracicaba obtido no modelo QUAL-UFGM



Fonte: elaborado pela autora.

O ponto representado pela vazão Hidrotec não coincide com o ponto final modelado pois a modelagem leva em consideração as captações do rio Piracicaba. Já a  $Q_{7,10}$  segundo Hidrotec é calculada pela área da bacia, sem levar em consideração os volumes retirados do rio. O gráfico da Figura 03 foi construído desconsiderando-se as captações, com o objetivo de se obter uma melhor comparação dos valores estimados e observados.

Figura 03 – Vazão x Distância do rio Piracicaba obtido no modelo QUAL-UFMG desconsiderando as captações



Fonte: elaborado pela autora.

Da Figura 03 foi possível constatar que a calibração da vazão ocorreu de forma adequada. Em um estudo sobre autodepuração no rio Piracicaba, Mourão (2010) encontra uma curva semelhante na modelagem de vazão.

Da análise das Figuras 02 e 03, pode-se constatar que ao longo do percurso do Rio Piracicaba, a vazão passa por aumentos abruptos devido, principalmente, aos afluentes. Todavia, há também declinações ao longo do percurso. O primeiro trecho em que isso é observado é próximo ao km 25 devido às captações existentes neste trecho. Após isso, a curva ascende e desce moderadamente devido aos tributários que desaguam no rio Piracicaba e às captações efetuadas, respectivamente.

Por volta do km 90 há dois tributários com maior vazão que desaguam no rio estudado, o ribeirão Turvo e o rio Maquiné. Do km 110 ao 120 há captações que são evidenciadas pela descendência da curva de vazão. No km 130 há uma grande contribuição devido à vazão do tributário rio Santa Bárbara, que pode ser percebido pelo acréscimo abrupto na curva. Por volta do km 50 há dois picos de vazões, representados pelo rio da Prata e rio do Peixe, respectivamente. Após isso, há um aumento da vazão devido ao desaguamento de alguns tributários no rio Piracicaba. Em determinados pontos há também a declinação da curva devido às captações. Logo, é visível que a vazão dos tributários e as captações exercem variações significantes no perfil de descarga.

### 6.1.2. Oxigênio Dissolvido e DBO

Para início da modelagem de oxigênio dissolvido e DBO, foram inseridos os dados médios da série histórica das estações de qualidade da água de monitoramento do IGAM e da plataforma Metadados – ANA.

É importante ressaltar que parte dos dados encontrados de DBO das estações ficaram abaixo do limite de quantificação do método utilizado, sendo assim, não foi possível obter um valor exato desse parâmetro. Esses valores abaixo do limite de quantificação não mostram a realidade do corpo hídrico, o que prejudicou que a calibração ocorresse de forma adequada. Nas estações onde os valores constam como “<2”, admitiu-se 2, para possibilitar a calibração.

Na tentativa de melhorar o ajuste, testou-se as diversas formas para obtenção de  $K_2$ , e a que melhor se adequou à curva foi a equação proposta por O’connor e Dobins (1958) apresentada na Tabela 11.

Outro fator que afeta diretamente na calibração é a utilização dos valores adequados de velocidade e profundidade do rio. Para isso, inseriu-se os valores dos coeficientes por meio dos cálculos realizados presentes na Tabela 13 e Tabela 15.

Para uma calibração mais acurada foi utilizada a ferramenta Solver do Excel®. Após essa etapa, obteve-se os dados dos coeficientes  $K_1$ ,  $K_d$  e  $K_s$ , orientados pelos limites do quadro 1. Com isso, foram obtidos os valores de  $K_1$ ,  $K_d$  e  $K_s$  da Tabela 18.

Tabela 18 – Valores de  $K_1$ ,  $K_d$  e  $K_s$  após calibração utilizando solver

<b>Distância (km)</b>	<b><math>K_1</math></b>	<b><math>K_d</math></b>	<b><math>K_s</math></b>
0,0 até 25,3	0,07	0,09	0
25,4 até 27,7	0,07	0,17	0
27,8 até 29,7	0,07	0,06	0
29,8 até 45,6	0,07	0,09	0
45,7 até 48,2	0,07	0	0
48,3 até 63,9	0,07	0,08	0
64,0 até 97,1	0,07	0,09	0,09
97,2 até 98,9	0,35	0	0,19
99,0 até 111,6	0,35	0,39	0,19
111,7 até 115,2	0,17	0,87	0,19
115,3 até 119,7	0,17	0	0,19
119,7 até 121,8	0,39	0,87	0,19
121,9 até 136,5	0,07	0,87	0,19
136,6 até 139,2	0,07	0,17	0
139,3 até 141,8	0,39	0,44	0,05
141,9 até 142,7	0,39	0	0,05
142,8 até 178,4	0,07	0,08	0
178,5 até 184,1	0,09	0,17	0
184,2 até 216,1	0,07	0,08	0
216,2 até 241	0,09	0,13	0,05

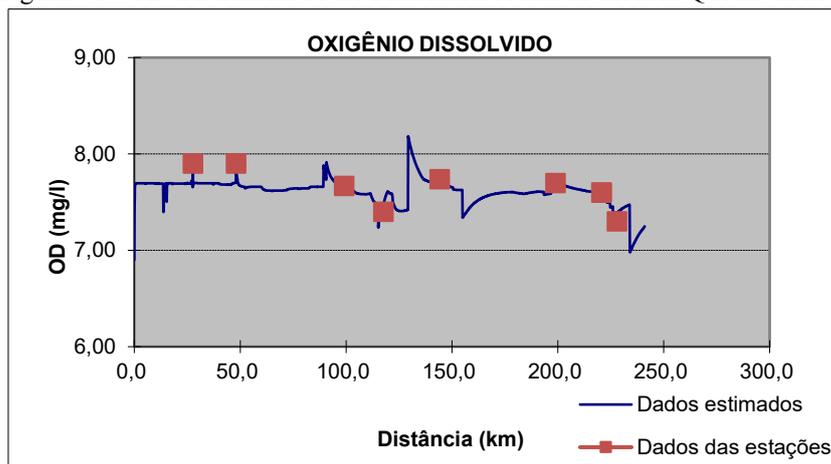
Fonte: elaborado pela autora.

A raiz da média dos erros ao quadrado (RMEQ) foi utilizada para avaliar o erro produzido pelo modelo. Quanto mais próximo de zero, melhor o comportamento estatístico da modelagem.

O índice RMEQ da modelagem de OD foi de 0,005. Para a modelagem de DBO foram calculados 2 índices, um utilizando os valores <LQ das estações como comparação, e outro desconsiderando estes valores. Para o primeiro caso o índice foi de 0,7 e para o segundo caso o índice calculado foi de 0,1. Percebe-se que a utilização de valores imprecisos afeta na calibração da modelagem.

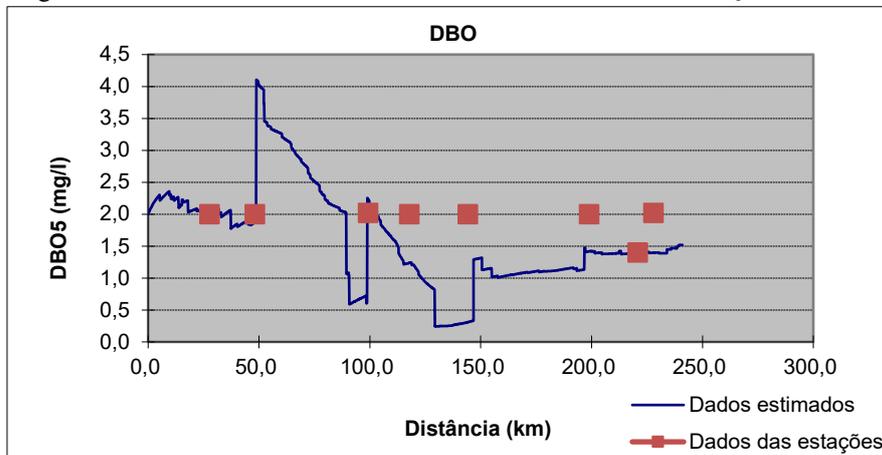
Esses métodos de otimização fazem com que a curva estimada se aproxime ao máximo dos valores observados em campo para cada trecho, minimizando o erro entre valor observado e estimado. É apresentado nas Figuras 04 e 05 as modelagens de OD e DBO, respectivamente:

Figura 04 – OD x Distância do rio Piracicaba obtido no modelo QUAL-UFGM



Fonte: elaborado pela autora

Figura 05 – DBO x Distância do rio Piracicaba obtido no modelo QUAL-UFGM



Fonte: elaborado pela autora

A partir das Figuras 04 e 05, observou-se uma boa concordância entre os valores estimados e observados tanto para os dados de entrada iniciais, como também aos valores calibrados de  $K_1$ ,  $K_d$  e  $K_s$  pelo Solver.

Os resultados produzidos pelo modelo QUAL-UFGM mostraram-se bastante acurados neste estudo, pois nota-se uma pequena diferença em relação aos dados observados de concentração de OD e DBO ao longo do trecho em análise, com exceção de alguns pontos no gráfico de DBO, devido aos dados menores que o limite de quantificação presente nas estações.

Mourão (2010) em um estudo de modelagem no rio Piracicaba observou que o ajuste da curva de decaimento da DBO com os dados de campo, considerando que o limite de detecção da DBO é  $< 2,0$ , pode ser considerado como razoável. Apesar de não conseguir representar grandes variações pontuais, a simulação conseguiu acompanhar a curva de tendência.

A partir da análise da Figura 04, foi possível constatar que nos 20 primeiros km houve uma queda na concentração de OD devido ao lançamento de efluentes industriais. Por volta dos km 30 e 50 houve um aumento na concentração de OD devido à confluência com tributários, dentre eles o córrego Faria e o ribeirão Durão. No trecho posterior, há aumento do OD, pois uma parcela da matéria orgânica já se encontra grandemente estabilizada.

Paralelamente também ocorre a introdução de oxigênio atmosférico na massa líquida, aumentando os teores de OD (a produção de oxigênio pela reaeração atmosféricas passa a ser maior que o consumo de oxigênio para a estabilização da matéria orgânica). Este mesmo processo ocorre no decorrer da modelagem. Nas proximidades do km 90 há uma ascendência na concentração de OD devido ao desaguamento do ribeirão Turvo e do rio Maquiné. Entre os km 110 e 115 há descendência na concentração de OD devido ao ponto de confluência com o córrego Jacuí (tributário impactado pelos efluentes de João Monlevade), assim como também pelas captações existentes neste trecho, fazendo com que a vazão disponível para diluição e degradação da matéria orgânica seja menor, conseqüentemente aumentando a concentração de DBO, e causando a diminuição de OD.

Após isso, há um aumento de OD devido aos afluentes que desaguam no rio Piracicaba. Em seguida, há uma atenuação na curva provocada por captações e pelo ponto de confluência com o córrego Barro Branco, impactado pelo lançamento de efluentes do município Bela Vista de Minas. No km 130 há um aumento considerável na concentração de OD devido ao afluente

Santa Bárbara. Após esse trecho, há diminuição de OD devido ao lançamento de efluentes de Nova Era, às várias captações, e aos lançamentos de efluentes industriais.

A partir do km 200 há diminuição na concentração de OD devido às captações existentes neste trecho, assim como os lançamentos de efluentes domésticos e industriais.

Neste trecho foi observada a menor concentração de OD resultante da modelagem (6,98 mg/L), e isso ocorre devido à proliferação bacteriana, com predominância das aeróbias, consumindo o OD disponível no meio para os seus processos metabólicos. Entretanto, em alguns pontos há ascendência devido à contribuição dos afluentes no rio Piracicaba.

Analisando-se a Figura 05 foi possível perceber que no começo da modelagem há elevações nas concentrações de DBO devido ao lançamento de efluentes industriais e às captações. Há também diminuições na concentração de DBO devido às contribuições incrementais de recurso hídrico pelos afluentes.

Próximo ao km 35 há diminuição de DBO devido à contribuição do córrego Faria. Por volta do km 50 há um aumento considerável da concentração de DBO devido ao lançamento de efluentes de Fonseca. É importante destacar que neste trecho a vazão do rio Piracicaba é considerada baixa se comparado aos trechos próximos à foz, por isso o lançamento de Fonseca se mostra bem expressivo na curva de DBO. Após isso, há uma diminuição significativa de DBO devido à autodepuração do rio, assim como o desaguamento de tributários que auxiliam na diluição de efluentes.

Por volta do km 90 há uma queda considerável devido ao recebimento do Ribeirão Turvo e posteriormente do rio Maquiné, que contribuem consideravelmente com a vazão. Por volta do km 100 há um aumento de DBO devido ao lançamento de efluentes do município de Rio Piracicaba. Após isso, há atenuação da curva devido ao processo de autodepuração, e aos pontos de confluência com tributários, dentre eles o rio Santa Bárbara.

Por volta do km 150, ocorre um aumento na concentração de DBO devido o lançamento de efluentes domésticos de Nova Era. Em seguida há uma queda de DBO devido principalmente ao desaguamento do rio da Prata e rio do Peixe. Após isso há um leve crescimento na curva devido às captações existentes, assim como alguns lançamentos industriais. Próximo ao km 200 há o recebimento de efluentes de Antônio Dias, por isso a concentração de DBO aumenta. Por fim, há uma leve atenuação da curva devido aos afluentes, seguido de um pequeno aumento devido aos efluentes domésticos e industriais próximo à foz do rio Piracicaba.

O rio Piracicaba pertence à classe 2 de enquadramento e, segundo os cálculos da modelagem, todo o trecho estudado atende aos valores máximos permitidos dos parâmetros OD e DBO.

Cabe ressaltar que erros de calibração causados principalmente pela heterogeneidade dos dados e picos nas concentrações das variáveis de qualidade de água são inevitáveis na modelagem.

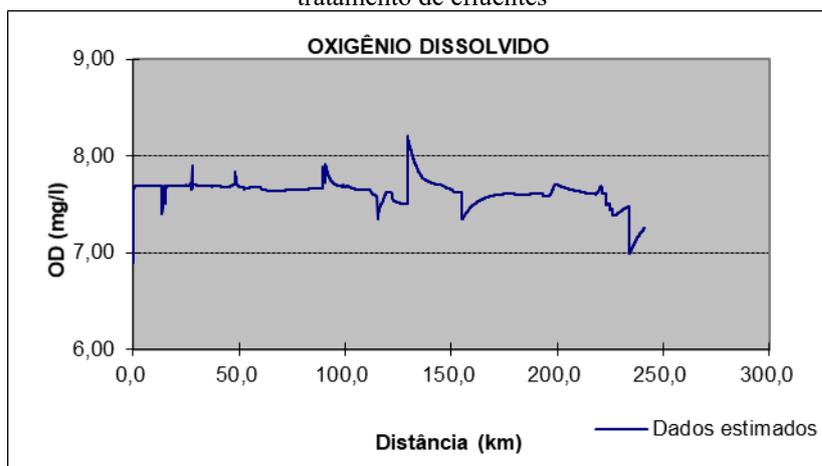
## 6.2. Simulação de cenário de tratamento de efluentes

Foi efetuada uma simulação a partir da remoção da carga orgânica em virtude de uma hipotética instalação de sistemas de tratamento de esgotos domésticos em Antônio Dias, Fonseca, Rio Piracicaba e Nova Era.

Os valores de concentração de DBO gerada e lançada pela população urbana considerando o cenário futuro, ou seja, a inclusão das ETEs fora de operação e com chance de reativação, as ETEs em obras e as ETEs em projeto conforme Tabela 17, foram inseridos na modelagem.

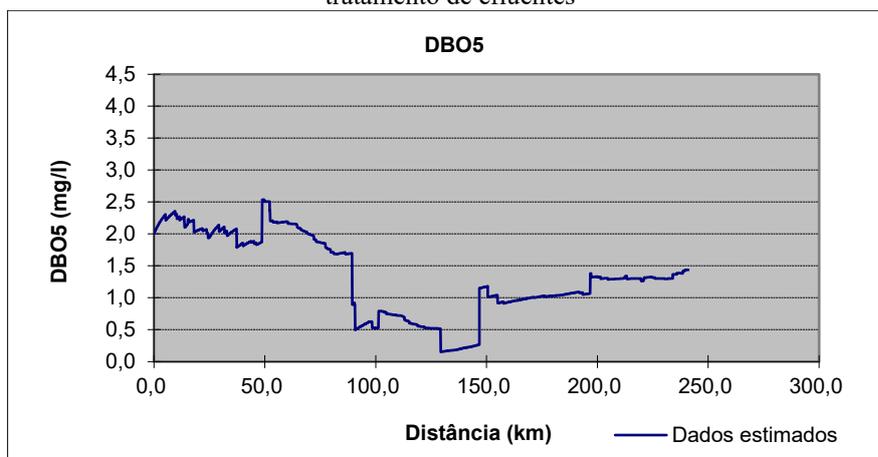
Com isso, mantendo os parâmetros cinéticos previamente determinados na calibração, foi simulado um cenário hipotético para a bacia, avaliando as variáveis OD e DBO. Os resultados estão representados nas Figura 06 e 07.

Figura 06 – OD x Distância do rio Piracicaba obtido no modelo QUAL-UFMG considerando o cenário de tratamento de efluentes



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 07 – DBO x Distância do rio Piracicaba obtido no modelo QUAL-UFGM considerando o cenário de tratamento de efluentes



Fonte: elaborado pela autora.

Da Figura 06 pode-se constatar que houve poucas alterações nos valores de OD devido à instalação hipotética das ETEs.

A partir da Figura 07 verificou-se que, em virtude do funcionamento das ETEs, as concentrações de DBO diminuíram nos pontos onde ocorriam os lançamentos de efluentes.

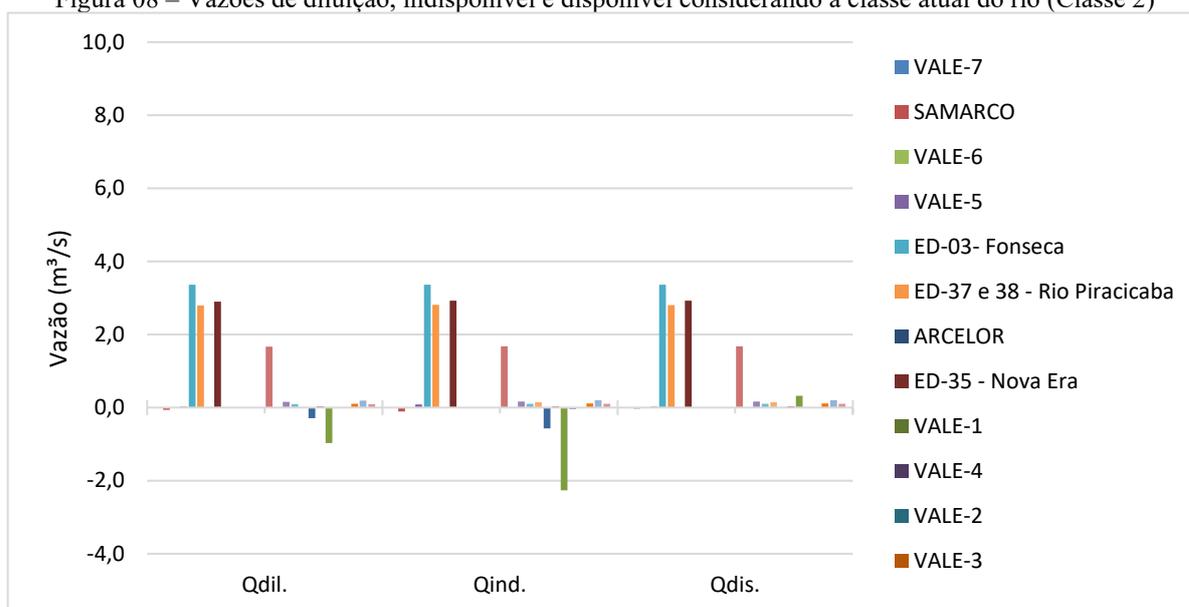
Nas proximidades do km 50 e 100 há uma diminuição de 48,44% da concentração de DBO se comparado à Figura 05, devido ao tratamento dos efluentes domésticos de Fonseca e Rio Piracicaba. O tratamento de efluentes de Nova Era e de Antônio Dias não impactaram de forma expressiva (apenas 10,72%) no decréscimo da curva de DBO devido à baixa porcentagem de carga removida prevista na instalação de ETEs segundo o PITE – Piracicaba (2012).

Pode-se perceber que nos trechos em que ocorriam os lançamentos de efluentes houve um decréscimo considerável na concentração de DBO se comparado à modelagem do trecho sem considerar a simulação. Os resultados demonstraram a necessidade do aumento da eficiência de cobertura e tratamento de efluentes nos municípios ao longo do rio Piracicaba.

### 6.3. Vazão de diluição

Para os cálculos das vazões de diluição, vazões indisponíveis e vazões disponíveis, foram inseridos no modelo QUAL-UFGM as Equações 13, 14 e 15, apresentadas no tópico 5.12. Após a inserção das equações, obteve-se um gráfico considerando todos lançamentos de efluentes no rio Piracicaba e a concentração permitida considerando sua respectiva classe de enquadramento atual (Classe 2), conforme Figura 08:

Figura 08 – Vazões de diluição, indisponível e disponível considerando a classe atual do rio (Classe 2)



Fonte: elaborado pela autora.

É apresentado na Tabela 19 os valores das vazões de diluição, vazões indisponíveis e vazões disponíveis de acordo com os cálculos realizados:

Tabela 19 – Valores de vazões de diluição, indisponível e disponível considerando a classe atual do rio (Classe 2)

Empreendimento	Qdil.	Qind.	Qdis.
VALE-7	0,000445354	0,000815354	0,000815277
SAMARCO	-0,062959453	-0,101539653	-0,024377010
VALE-6	0,004092211	0,004462211	0,004461811
VALE-5	0,029418016	0,082735916	0,023892179
ED-03-Lançamento de Fonseca	3,361375138	3,366868138	3,365875223
ED-37 e 38 - Rio Piracicaba	2,794960307	2,808090307	2,803495016
ARCELOR (somar tudo)	0,000402929	0,002624929	0,001817277
ED-35 - Nova Era	2,903712528	2,926982528	2,926339484
VALE-1	-0,000001873	-0,000003373	-0,000000373
VALE-4	-0,000052796	-0,000094896	-0,000010694
VALE-2	-0,000005145	-0,000009245	-0,000001044
VALE-3	-0,000004019	-0,000007219	-0,000000819
Consórcio UHE	0,000001362	0,000005162	0,000002438
ED-07 - Antônio Dias	1,669922827	1,680622827	1,680324071
Paladar	0,000191103	0,001348503	0,001348268
ED-24 - Jaguarçu	0,160554153	0,161578153	0,161550068
Harsco	0,096222402	0,104132002	0,104108713
ARCELOR INOX-1	0,004017048	0,149705348	0,149672016
ARCELOR INOX -2	-0,286291875	-0,566949675	-0,005632829
ED-21 - Coronel Fabriciano	0,035235367	0,035476067	0,035468234
USIMINAS (Tudo)	-0,973266322	-2,266966322	0,320365638
Unigal (Tudo)	-0,018302625	-0,032902625	-0,003701839
WHITE MARTINS	-0,012357028	-0,021230528	-0,003482789
ETE Horto	0,105138004	0,109238004	0,109214902
ETE Areal	0,189458465	0,200158465	0,200116367
ETE Bela Vista	0,096923370	0,106323370	0,106301048

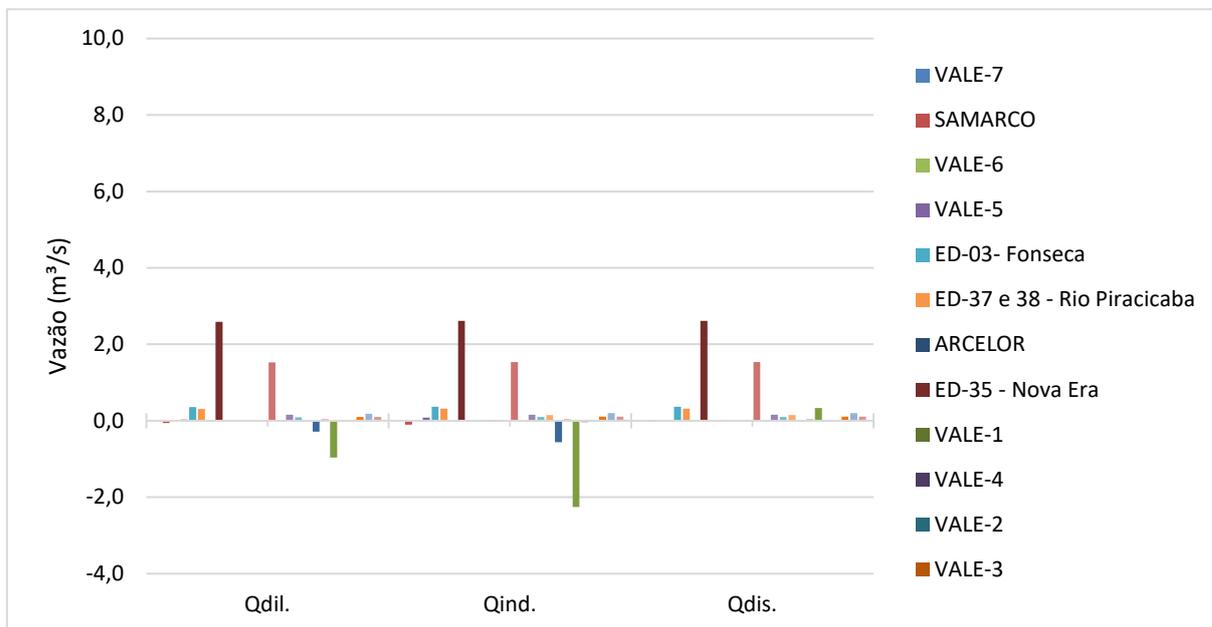
Fonte: elaborado pela autora.

Para os cálculos das vazões de diluição da Equação 13, adotou-se como concentração natural do parâmetro DBO de qualidade no manancial onde é realizado o lançamento a concentração atual do parâmetro no determinado ponto de lançamento. Isso pode ser justificado pois a concentração atual de DBO quase sempre é maior que a concentração natural do rio, e dessa forma é possível estimar o quanto cada usuário comprometerá qualitativamente o manancial de forma dependente e considerando as interferências de outros usuários.

Adotando-se a concentração atual de DBO do manancial, percebeu-se que algumas vazões de diluição apresentaram o resultado negativo, significando falta de água para a diluição dos efluentes lançados. Essa condição faz com que todas as análises retratem situações que são influenciadas pelos usos existentes, mascarando o real efeito que cada usuário causa ao manancial separadamente, porém, analisando os efeitos no rio como um todo.

Para comparação das vazões de diluição, vazões indisponíveis e vazões disponíveis no cenário de instalação de ETEs, realizou-se os mesmos cálculos das Equações 13, 14 e 15. Obteve-se a Figura 09:

Figura 09 – Vazões de diluição, indisponível e disponível considerando o cenário de tratamento de efluentes



Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 20 retrata os valores das vazões de diluição, vazões indisponíveis e vazões disponíveis para o cenário de tratamento de efluentes de Antônio Dias, Fonseca, Nova Era e Rio Piracicaba:

Tabela 20 – Valores de vazões de diluição, indisponível e disponível considerando o cenário de tratamento de efluentes

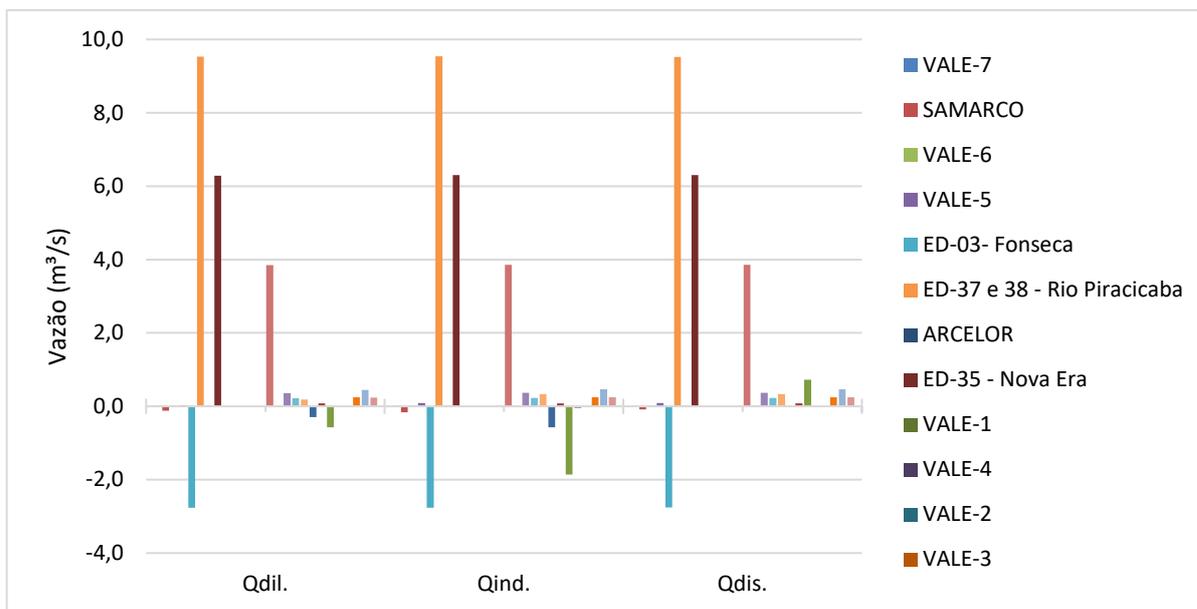
<b>Empreendimento</b>	<b>Qdil.</b>	<b>Qind.</b>	<b>Qdis.</b>
VALE-7	0,000445354	0,000815354	0,000815277
SAMARCO	-0,062959453	-0,101539653	-0,024377010
VALE-6	0,004092211	0,004462211	0,004461811
VALE-5	0,029418016	0,082735916	0,023892179
ED-03-Lançamento de Fonseca	0,360843438	0,366336438	0,366228403
ED-37 e 38 - Rio Piracicaba	0,305462485	0,318592485	0,318071126
ARCELOR (somar tudo)	0,000352776	0,002574776	0,001867380
ED-35 - Nova Era	2,587080159	2,610350159	2,609776679
VALE-1	-0,000001837	-0,000003337	-0,000000337
VALE-4	-0,000051795	-0,000093895	-0,000009693
VALE-2	-0,000005047	-0,000009147	-0,000000947
VALE-3	-0,000003943	-0,000007143	-0,000000743
Consórcio UHE	0,000001340	0,000005140	0,000002460
ED-07 - Antônio Dias	1,526067913	1,536767913	1,536494730
Paladar	0,000187840	0,001345240	0,001345006
ED-24 - Jaguarauçu	0,157817127	0,158841127	0,158813517
Harsco	0,094801911	0,102711511	0,102688540
ARCELOR INOX-1	0,003957831	0,149646131	0,149612812
ARCELOR INOX -2	-0,282213777	-0,562871577	-0,001555633
ED-21 - Coronel Fabriciano	0,034734970	0,034975670	0,034967947
USIMINAS (Tudo)	-0,961602391	-2,255302391	0,332027093
Unigal (Tudo)	-0,018083659	-0,032683659	-0,003482920
WHITE MARTINS	-0,012209988	-0,021083488	-0,003335781
ETE Horto	0,103892206	0,107992206	0,107969368
ETE Areal	0,187243188	0,197943188	0,197901556
ETE Bela Vista	0,095792754	0,105192754	0,105170669

Fonte: elaborado pela autora.

Percebeu-se que as vazões de diluição, indisponíveis e disponíveis necessárias para atendimento do parâmetro DBO de acordo com a classe 2 de enquadramento diminuiu em 59,21%, 49,68% e 50,34%, respectivamente, com a instalação dos sistemas de tratamentos de efluentes de acordo com a Tabela 19. Conforme citado anteriormente, essa diminuição se mostrou mais expressiva com o tratamento de efluentes domésticos de Fonseca e de Rio Piracicaba, pois estes sistemas preveem uma porcentagem maior de carga removida do que o previsto para Antônio Dias e Nova Era. Para estes dois municípios, os valores de vazões necessárias para diluição diminuem de forma quase que imperceptível pelo gráfico de barras, explicitando a necessidade de aumentar a porcentagem de remoção de carga orgânica nas ETes de Antônio Dias e Nova Era.

Outra forma de comparar as vazões de diluição, vazões indisponíveis e vazões disponíveis foi feita admitindo-se hipoteticamente que o rio Piracicaba pertence à Classe 1 de enquadramento. Os resultados estão na Figura 10:

Figura 10 – Vazões de diluição, indisponível e disponível considerando o rio como Classe 1



Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 21 exibe os valores das vazões de diluição, vazões indisponíveis e vazões disponíveis admitindo-se que o rio Piracicaba pertence à Classe 1 de enquadramento:

Tabela 21 – Valores de vazões de diluição, indisponível e disponível considerando o rio como Classe 1

Empreendimento	Qdil.	Qind.	Qdis.
VALE-7	0,002644146	0,003014146	0,003013861
SAMARCO	-0,122509558	-0,161089758	-0,083921637
VALE-6	0,014406213	0,014776213	0,014774887
VALE-5	0,032418060	0,085735960	0,085708317
ED-03-Lançamento de Fonseca	-2,763441155	-2,768934155	-2,757134815
ED-37 e 38 - Rio Piracicaba	9,527801277	9,540931277	9,525318048
ARCELOR (somar tudo)	0,001552816	0,003774816	0,003771093
ED-35 - Nova Era	6,283476423	6,306746423	6,305360863
VALE-1	-0,000002246	-0,000003746	-0,000000746
VALE-4	-0,000063562	-0,000105662	-0,000021458
VALE-2	-0,000006197	-0,000010297	-0,000002097
VALE-3	-0,000004847	-0,000008047	-0,000001646
Consórcio UHE	0,000001195	0,000004995	0,000004994
ED-07 - Antônio Dias	3,850546036	3,861246036	3,860559642
Paladar	0,001841802	0,002999202	0,002998679
ED-24 - Jaguarçu	0,362646228	0,363670228	0,363607015
Harsco	0,221837405	0,229747005	0,229695623
ARCELOR INOX-1	0,188071562	0,333759862	0,333685549
ARCELOR INOX -2	-0,293216805	-0,573874605	-0,012556229
ED-21 - Coronel Fabriciano	0,079036894	0,079277594	0,079260090
USIMINAS (Tudo)	-0,569935049	-1,863635049	0,723611270
Unigal (Tudo)	-0,022961043	-0,037561043	-0,008359269
WHITE MARTINS	-0,016737537	-0,025611037	-0,007862370
ETE Horto	0,244215222	0,248315222	0,248262709
ETE Areal	0,449792632	0,460492632	0,460395778
ETE Bela Vista	0,236864586	0,246264586	0,246212883

Fonte: elaborado pela autora.

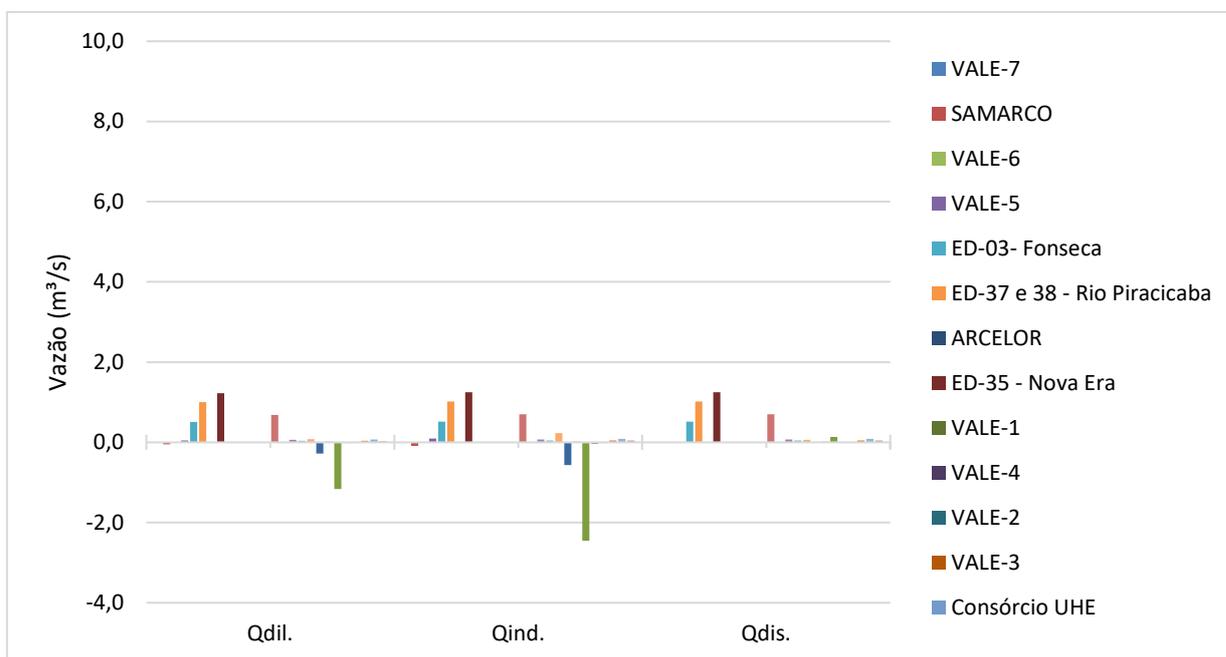
A classe 1 por ser a mais restritiva apresenta os maiores valores de vazão de diluição, e por consequência, a maior indisponibilidade de água para outorga. Percebeu-se um aumento de 76,39%, 64,09% e 64,04% das vazões de diluição, indisponível e disponível, respectivamente, para todos os lançamentos comparando-se aos valores da Tabela 19.

O número de lançamentos com valores de vazão disponível negativos foi mais expressivo se comparando aos valores de vazão disponível de classe 2.

Nas condições simuladas para classe 1, o corpo d'água em vários pontos não suporta a carga de matéria orgânica lançada, necessitando de uma melhor alocação de cargas na bacia ou aumento na eficiência de tratamento dos efluentes.

Por fim, comparou-se as vazões de diluição, vazões indisponíveis e vazões disponíveis admitindo-se supostamente que o rio Piracicaba pertence à Classe 3 de enquadramento. Os resultados estão na Figura 11:

Figura 11 – Vazões de diluição, indisponível e disponível considerando o rio como Classe 3



Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 22 indica os valores das vazões de diluição, vazões indisponíveis e vazões disponíveis admitindo-se que o rio Piracicaba pertence à Classe 3 de enquadramento:

Tabela 22 – Valores de vazões de diluição, indisponível e disponível considerando o rio como Classe 3

<b>Empreendimento</b>	<b>Qdil.</b>	<b>Qind.</b>	<b>Qdis.</b>
VALE-7	0,000081249	0,000451249	0,000288724
SAMARCO	-0,047369265	-0,085949465	-0,008788257
VALE-6	0,001255557	0,001625557	0,001625411
VALE-5	0,044791655	0,098109555	0,008523496
ED-03-Lançamento de Fonseca	0,508378250	0,513871250	0,513719705
ED-37 e 38 - Rio Piracicaba	1,002748452	1,015878452	1,014216020
ARCELOR (somar tudo)	0,001429466	0,003651466	0,000791753
ED-35 - Nova Era	1,227715445	1,250985445	1,250710610
VALE-1	-0,000001666	-0,000003166	-0,000000166
VALE-4	-0,000046845	-0,000088945	-0,000004744
VALE-2	-0,000004563	-0,000008663	-0,000000463
VALE-3	-0,000003563	-0,000006763	-0,000000363
Consórcio UHE	0,000002730	0,000006530	0,000001069
ED-07 - Antônio Dias	0,686114642	0,696814642	0,696690773
Paladar	0,000589836	0,001747236	0,000567465
ED-24 - Jaguarauçu	0,066603041	0,067627041	0,067615286
Harsco	0,036085797	0,043995397	0,043985558
ARCELOR INOX-1	0,082751055	0,228439355	0,062923232
ARCELOR INOX -2	-0,283026572	-0,563684372	-0,002368248
ED-21 - Coronel Fabriciano	0,014657257	0,014897957	0,014894667
USIMINAS (Tudo)	-1,159804968	-2,453504968	0,133866601
Unigal (Tudo)	-0,016147342	-0,030747342	-0,001547014
WHITE MARTINS	-0,010329473	-0,019202973	-0,001455665
ETE Horto	0,041411884	0,045511884	0,045502259
ETE Areal	0,072238155	0,082938155	0,082920711
ETE Bela Vista	0,034523681	0,043923681	0,043914460

Fonte: elaborado pela autora.

Na CONAMA 357/2005, a classe 3 é a menos rigorosa, com padrão para DBO de 10 mg/L. Assim, a simulação para essa condição resultou em pequenas quantidades de água para diluir a carga lançada e elevada quantidade apropriada para diluição. Percebeu-se uma diminuição de 79,83%, 66,82% e 66,92% das vazões de diluição, indisponível e disponível, respectivamente, para todos os lançamentos comparando-se aos valores da Tabela 19.

A classe de enquadramento exerce significativa influência nas vazões de diluição, com aumento dos valores consoante ao nível e restrição, ou seja, cada vez que diminui a concentração de DBO permitida no corpo d'água, a vazão de diluição eleva-se.

Em um estudo sobre a capacidade de autodepuração do rio Piracicaba, Fraga (2014) observou que, apesar dos lançamentos de efluentes domésticos e industriais aumentarem na medida em que se direciona para a foz do rio, não foram observados mais trechos cujos valores de DBO ultrapassaram os limites estabelecidos pela legislação. Isto é justificado devido ao aumento da vazão no rio Piracicaba, que provoca uma maior diluição dos efluentes nele lançados.

É interessante ressaltar que de acordo com as condições simuladas para esse trabalho, a consideração dos lançamentos anteriores é de extrema importância para a determinação das vazões de diluição e consequente disponibilidade hídrica. Porém, para determinação dos custos pela diluição de efluentes, não se devem considerar os lançamentos anteriores, porque dessa maneira, usuários de jusante estariam pagando por uma indisponibilidade hídrica que não foi devida ao seu lançamento.

A metodologia de outorga para lançamento de efluentes no rio Piracicaba deve ser baseada em experiências e metodologias que se apoiam em uma análise da capacidade de autodepuração do rio, com o intuito de alocar de maneira otimizada as vazões de diluição respeitando a classe de enquadramento. Se em algum ponto a vazão disponível para outorga for inferior à requerida para diluição de efluentes, sugere-se determinar a redução de carga necessária ou então outra localização ao longo do curso d'água com disponibilidade hídrica.

## **CONCLUSÕES**

Com a calibração adotada para o modelo, os valores de OD e DBO foram satisfatórios. Ressaltando-se que para os trechos do km 117, km 145, km 198 e km 227 não houve ajuste adequado da curva para a variável DBO devido à 89,4% dos valores serem menores que 2 mg/L.

A simulação hipotética de instalação de sistemas de tratamento de efluentes domésticos para alguns lançamentos diretamente no rio Piracicaba demonstrou um decréscimo de 36,96% na concentração de DBO, o que contribuiria para a manutenção da qualidade do rio caso essas ETEs estivessem em funcionamento.

A mudança nas classes de enquadramento resultou em variações de até 79,83% nas vazões de diluição. Com o aumento da restrição, diminuindo os valores permitidos de DBO no rio, as vazões de diluição tiveram seus valores aumentados de forma acentuada.

É interessante ressaltar que de acordo com as condições calculadas de vazão de diluição, a consideração dos lançamentos anteriores é de extrema importância para a determinação das vazões disponíveis e indisponíveis e consequente disponibilidade hídrica.

## RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista os resultados alcançados nesta pesquisa e pensando-se na utilização do modelo para novas simulações, as seguintes proposições podem ser feitas:

- Levantamento de dados que demonstrem a real contribuição de carga tanto doméstica quanto industrial;
- Incorporar as demais contribuições industriais e minerárias que não foram consideradas nas Declarações de Carga Poluidora;
- Estabelecimento de uma rede provisória de coleta de amostras para calibrar e validar o modelo dos tributários que porventura tenham aporte de carga poluidora mais significativa;
- Modelar os tributários mais importantes divididos em trechos homogêneos de declividade para uma escolha mais apurada da equação que melhor representa o K2;
- Desenvolver métodos que possam estimar com precisão as fontes de poluição em bacias hidrográficas, principalmente as fontes difusas.

Assim, será possível entender melhor o comportamento do curso d'água, com a simulação de cenários mais próximos das condições reais do rio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER R.; BOGNER K.; MIELEITNER J.; ZOBRIST J. e SRINIVASAN R.. **Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT**. Journal of Hydrology, Volume 333, p. 413-430, 2007.

ABBASPOUR, K.C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLØVE, K. **A Continental-Scale Hydrology and Water Quality Model for Europe: Calibration and Uncertainty of a High-Resolution Large-Scale SWAT Model**. Journal of Hydrology v.524, p.733–752, 2015.

AB´SÁBER, A. N. **Os Domínios de Natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Outorga dos direitos de usos de recursos hídricos**. Brasília: [s. n.], 2019. 80 p. Disponível em: [http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/ana\\_encarte\\_outorga\\_conjuntura2019.pdf](http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/ana_encarte_outorga_conjuntura2019.pdf). Acesso em: 27 jul. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Brasília; Agência Nacional de Águas – ANA, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Resolução nº 219, de 6 de junho de 2005.** Diretrizes para análise e emissão de outorga de direito de uso de recursos hídricos para fins de lançamento de efluentes. [S. l.], 6 jun. 2005. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2005/219-2005.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Panorama do enquadramento dos corpos d'água do Brasil e Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil.** Brasília: ANA, 2007. 124 p. il. (Caderno de Recursos Hídricos, 5).

ALÉ, J. A. V. **Escoamentos viscosos.** 1. ed. Porto Alegre: [s. n.], 2011. 132 p. Disponível em: [https://issuu.com/jorgeantoniovillarale/docs/apostila\\_escoamentos\\_viscosos\\_2011](https://issuu.com/jorgeantoniovillarale/docs/apostila_escoamentos_viscosos_2011). Acesso em: 4 mar. 2020.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUÍ, Y. **O pré-cambriano do Brasil.** São Paulo: Edgard Blücher, 1984. 378 p.

ALMEIDA, M. A.; CURI, Wilson Fadlo. **Gestão do uso de água na bacia do Rio Paraíba, PB, Brasil com base em modelos de outorga e cobrança.** Revista Ambiente & Água, [s. l.], ano 2016, v. 11, ed. 4, 2016. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-993X2016000400989&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-993X2016000400989&script=sci_arttext). Acesso em: 15 maio 2020.

ALVES, Z. C. A. G. **Modelação Hidráulica de um Sistema de Distribuição de Água – Aplicação a uma Zona de Castelo Branco.** 2012. Dissertação (Mestrado em Construção Sustentável) – Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco, Portugal, 2012.

ANDRADE, E. B. **Estudo da autodepuração do rio Vieira através da modelagem matemática.** Orientador: Lênio Marquer de Miranda. 2014. 200 p. Monografia (Pós graduação *lattus sensus* em Recursos Hídricos e Ambientais) - Universidade Federal de Minas Gerais - Instituto de Ciências Agrárias, Montes Claros, 2014. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-A2CJ5L/1/tcc\\_\\_\\_edson\\_barbosa\\_andrade.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-A2CJ5L/1/tcc___edson_barbosa_andrade.pdf). Acesso em: 19 dez. 2019.

APHA – American Public Health Association; AWWA – American Water Works Association; WEF – Water Environment Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 21 ed., Washington, 2005.

ARNOLD, J.G.; MUTTIAH, R.S; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P.M. **Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin.** Journal of Hydrology, v.227, p.21-40, 2000.

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (AGEVAP). **Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e planos de ação de recursos hídricos das bacias afluentes.** [S. l.: s. n.], 2014. 145 p. v. 4. Disponível em: <http://ceivap.org.br/conteudo/rp-04-diagnostico-das-fontes-de-poluicao-revisao-final.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2020.

ÁVILA, L. C. **Modelagem da qualidade da água utilizando coeficientes bibliográficos e experimentais - Aplicação ao rio Vacacaí Mirim.** Orientador: Maria do Carmo Cauduro

Gastaldini. 2014. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7852/AVILA%2C%20LAUREN%20CORTEZI%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 5 mar. 2020.

BALDOCHI, M. A. **Utilização do modelo QUAL2E como apoio ao gerenciamento da qualidade das águas da bacia do córrego dos Bagres**. 2002. 196 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-01122016-130751/publico/Dissert\\_Baldochi\\_MariaA\\_corrigida.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-01122016-130751/publico/Dissert_Baldochi_MariaA_corrigida.pdf). Acesso em: 3 mar. 2020.

BÁRBARA, V. F. **Uso do modelo Qual2e no estudo da qualidade da água e da capacidade de autodepuração do rio Araguari - Ap (Amazônia)**. 2006. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tde/593/1/Viniciu%20Fagundes%20Barbara%20em%20PDF.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2020.

BENASSI, S. F. **Estudo das Variáveis Limnológicas e do Processo de Autodepuração na “Descontinuidade Serial” do ribeirão Bonito (SP)**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 120 p. 2002.

BRAGA, B. *et al.* **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo, SP: Prentice Hall. 305 p. 2002.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm)>. Acesso em 02 de outubro de 2018.

BRASIL. **Lei nº 9984, de 17 de julho de 2000**. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. [S. l.], 17 jul. 2000. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=371>. Acesso em: 3 abr. 2019.

BRASIL. **Lei nº 6938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, 31 ago. 1981. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=313>. Acesso em: 5 out. 2019.

BRASIL. **Portaria nº 5, de 28 de setembro de 2017**. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. [S. l.], 28 set. 2017. Disponível em: [http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005\\_03\\_10\\_2017.html](http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html). Acesso em: 28 jul. 2020.

BRASIL. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. [S. l.], 18 mar. 2005. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 15 ago. 2019.

BRASIL. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. [S. l.], 13 maio 2011. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 27 out. 2019.

BITTENCOURT, A. G.; PEREIRA, C. A.; OLIVEIRA, L. H.; NOGUEIRA, W. J.; TORSANI, J. S.; LORAMIE, R. L.; MERCER, L. W. **Modelagem Matemática do rio Tietê com modelo QUAL2EU para preparação do Projeto Tietê.** In: Anais do 18º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES. Salvador (BA). 1995.

BROWN, L. C.; BARNWELL JR., T. O. **The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and user manual.** United States Environmental Protection Agency – U.S.EPA. Environmental Research Laboratory. Athens. Georgia. 189 p. 1987.

CAMPELLO, B. S. C. **Estudo da velocidade de queda e do início do movimento das partículas de borracha e areia.** Orientador: Jorge Luis Zegarra Tarqui. 2017. 106 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/RAOA-BBQPSN/1/dissertacao\\_final\\_bsc.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/RAOA-BBQPSN/1/dissertacao_final_bsc.pdf). Acesso em: 16 abr. 2020.

CAMPOS, M. C. S. **Utilização do modelo Qual2E para o estudo do decaimento bacteriano na Bacia dos Rio das Velha.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997.

CAMPOS, J. N. B., STUDART, T. M. C. **Alocação e realocação do direito de uso da água: uma proposta de modelo de mercado limitado no espaço.** In: REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS, v.7, no2. abr/jun. Porto Alegre. ABRH, 2002. p 5-16.

CASANOVA, M. *et al.* **Bancos de Dados Geográficos.** Curitiba - PR: MundoGEO, 2005. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/livros/bdados/>. Acesso em: 5 dez. 2019.

CASTRO, K. B. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada.** Orientador: Henrique Llacer Roig. 2013. 141 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2013. Disponível em: [https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/13863/1/2013\\_KassiaBatistaCastro.pdf](https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/13863/1/2013_KassiaBatistaCastro.pdf). Acesso em: 25 set. 2019.

CBH Piracicaba. Disponível em <http://www.cbhpiracicabamg.org.br/>. Acesso em 06 de novembro de 2018.

CHAPRA, S. C. **Surface Water Quality Modeling.** WCB/McGraw-Hill, 1997. 844p.

COLLISCHONN, B. **Sistema de apoio à decisão para outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Orientador: Carlos Eduardo Morelli Tucci. 2014. 196 p. Tese (Doutorado em recursos hídricos e saneamento ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/119403/000970166.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 4 mar. 2020.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem, 2008**. São Paulo: CETESB, 2011. Disponível em: <[www.cetesb.sp.gov.br](http://www.cetesb.sp.gov.br)>. Acesso em: 15/11/2019.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem, 2008**. São Paulo: CETESB, 2011. Disponível em: <[www.cetesb.sp.gov.br](http://www.cetesb.sp.gov.br)>. Acesso em: 22 abr. 2013.

CONSÓRCIO ECOPLAN LUME (2010). **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce**. Volume I, 478 p.

COSTA, O. S. **Determinação Indireta do Coeficiente de Reaeração Através de Dissolução Unidimensional de Sondas de Ácido Oxálico**. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, 2000.

COX, B.A.. **A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers**. The Science of the Total Environment, Volumes 314-316, p. 303–334, Outubro de 2003.

CRUZ, L.P., 2009. **Avaliação da evolução do comitê de bacia hidrográfica do rio Piracicaba/MG**. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009. 127p.

DANTAS, Ê. W. **Ecologia da comunidade de algas planctônicas em reservatórios de Pernambuco (Nordeste, Brasil)**. Orientador: Ariadne do Nascimento Moura. 2010. 143 p. Tese (Doutorado em Botânica) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, 2010. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Enio\\_Dantas/publication/45589409\\_Ecologia\\_da\\_comunidade\\_de\\_algas\\_planctonicas\\_em\\_reservatorios\\_de\\_Pernambuco\\_Nordeste\\_Brasil/links/00b7d53a3300a530db000000/Ecologia-da-comunidade-de-algas-planctonicas-em-reservatorios-de-Pernambuco-Nordeste-Brasil.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Enio_Dantas/publication/45589409_Ecologia_da_comunidade_de_algas_planctonicas_em_reservatorios_de_Pernambuco_Nordeste_Brasil/links/00b7d53a3300a530db000000/Ecologia-da-comunidade-de-algas-planctonicas-em-reservatorios-de-Pernambuco-Nordeste-Brasil.pdf). Acesso em: 4 jun. 2020.

DIBO, A. P. A. **A inserção de impactos ambientais cumulativos em Estudos de Impacto Ambiental: o caso do setor sucroenergético paulista**. Orientador: Tadeu Fabrício Malheiros. 2013. 145 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos - SP, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-09012014-152837/publico/DissertacaoAnaPaulaAlvesDibo.pdf>. Acesso em: 7 maio 2020.

Disponível em <http://www.hidrotec.ufv.br/SAGA/>. Acesso em 24/11/2019.

DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. (1977) **Manual para serviços de hidrometria**. São Paulo: DNAEE.

DROLC, A.; KONCAN, J. Z. **Calibration of QUAL2E model for the Sava River (Slovenia)**. Water science and technology, [s. l.], v. 40, ed. 10, p. 111-118, 19 jan. 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273122399006812>. Acesso em: 10 mar. 2020.

DROLC, A.; ZAGORC, K. J. **Water quality modelling of the river Sava, Slovenia**. Water Research, v. 30, n. 11, p. 2587-2592, 1996.

EPA, United States Environmental Protection Agency, Athens (1987). **The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS**. Documentation and user model. 189 p.

FAN, C.; KO, C.; WANG, W. **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. v. 90, n. 5, p. 1824-1832, 2009.

FEAM (MG). **Plano para Incremento do Percentual de Tratamento de Esgotos Sanitários na Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba**. Belo Horizonte: [s. n.], 2012. 636 p. Disponível em: <https://docplayer.com.br/23388170-Plano-para-incremento-do-percentual-de-tratamento-de-esgotos-sanitarios-da-bacia-hidrografica-do-rio-piracicaba.html>. Acesso em: 5 mar. 2019.

FERRAZ, A.R.G. & BRAGA JUNIOR, B.P.F. (1998). **Modelo Decisório para a Outorga de Direito ao Uso da Água no Estado de São Paulo**. RBRH, 3, 5-19.

FERONI, R. C. **Simulação numérica da transferência de massa de compostos odorantes através da interface de um sistema multifásico líquido-gás**. Orientador: Neyval Costa Reis Jr. 2015. 121 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2015. Disponível em: [https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/10329/1/tese\\_9431\\_Versao%20Final%20-%20Rita%20Feroni.pdf](https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/10329/1/tese_9431_Versao%20Final%20-%20Rita%20Feroni.pdf). Acesso em: 20 mar. 2020.

FLECK, L. **Modelagem matemática da cinética da decomposição aeróbia da matéria orgânica**. Orientador: Eduardo Eyng. 2014. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel - PR, 2014. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/2636/1/Leandro%20Fleck.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2020.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. 127 p.

FORMENTINI, T. A. **Coefficientes de desoxigenação e de reaeração superficial em trechos do rio Vacacaí Mirim**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7756>. Acesso em: 12 nov. 2018.

FRAGA, M. S. **Modelagem de qualidade da água do rio piracicaba visando a avaliação de sua capacidade de autodepuração**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, [S. l.], 2015. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/7356>. Acesso em: 4 jun. 2019.

FUNASA (Brasil). **Manual Prático de Análise de Água**. In: MANUAL Prático de Análise de Água. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: [http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files\\_mf/manual\\_pratico\\_de\\_analise\\_de\\_agua\\_2.pdf](http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/manual_pratico_de_analise_de_agua_2.pdf). Acesso em: 23 jul. 2020.

FUNASA (Brasil). **Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAS**. 1. ed. Brasília: [s. n.], 2014. 116 p. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/documents/20182/38937/Manual+de+controle+da+qualidade+da+%C3%A1gua+para+t%C3%A9cnicos+que+trabalham+em+ETAS+2014.pdf/85bbdcbc-8cd2-4157-940b-90b5c5bfc87>. Acesso em: 24 jul. 2020.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Plano para incremento do percentual de tratamento de esgotos sanitários na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba**: sumário executivo. Belo Horizonte: FEAM, 2013. 55 p.

GARCIA, J. I. B. **Sistema de suporte a decisão para o lançamento de efluentes**. 2011. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GASTALDINI, M. C. C. *et al.* **Diagnóstico atual e previsão futura da qualidade das águas do Rio Ibicuí utilizando o modelo QUAL2E**. Engenharia Sanitária e Ambiental, vol. 7, n. 3 e n. 4, 2002.

GAZZAZ, N. M.; YUSOFF, M. K.; RAMLI, M. F.; ARIS, A. Z.; JUAHIR, H. **Characterization of spatial patterns in river water quality using chemometric pattern recognition techniques**. Marine Pollution Bulletin, v. 64, n. 4, p. 688-698, 2012.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007. 176 p.

GUERRA, C. B. **Impactos Ambientais na Bacia do Rio Piracicaba**. Belo Horizonte: Diagramarte, 1993.

IDE, W. R.; RIBEIRO, M. L. **Calibração do modelo de qualidade de água QUAL-UFMG para o Rio Taquarizinho em período de estiagem**. Research Gate, [s. l.], 14 mar. 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/298071994\\_CALIBRACAO\\_DO\\_MODELO\\_DE\\_QUALIDADE\\_DE\\_AGUA\\_QUAL-UFMG\\_PARA\\_O\\_RIO\\_TAQUARIZINHO\\_EM\\_PERIODO\\_DE\\_ESTIAGEM](https://www.researchgate.net/publication/298071994_CALIBRACAO_DO_MODELO_DE_QUALIDADE_DE_AGUA_QUAL-UFMG_PARA_O_RIO_TAQUARIZINHO_EM_PERIODO_DE_ESTIAGEM). Acesso em: 22 maio 2019.

IGAM (MG). Consórcio ECOPLAN - LUME. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do Rio Doce e planos de ações para as unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da bacia do Rio Doce**. [S. l.]: [s. n.], 2010. 472 p. Disponível em: [http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2016/12/PIRH\\_Doce\\_Volume\\_I.pdf](http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2016/12/PIRH_Doce_Volume_I.pdf). Acesso em: 27 out. 2019.

IGAM (MG). **Manual Técnico e Administrativo de Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: [s. n.], 2010. 234 p. Disponível em: [http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2018/OUTORGA/Manual\\_de\\_Outorga\\_IAM.pdf](http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2018/OUTORGA/Manual_de_Outorga_IAM.pdf). Acesso em: 30 out. 2019.

IGAM, 2010. **Mapa Boletim Informativo**. Disponível em: <<http://www.IGAM.mg.gov.br/qualidade-das-aguas>>. Acesso em 22 de maio de 2019.

JAWORSKA J.S., MASSCHELEYN P., MCAVOY D.C. (2001) **Application of the QUAL2E Water Quality Model for Untreated Discharge Risk Assessment in Central and Eastern Europe**. In: Linkov I., Palma-Oliveira J. (eds) *Assessment and Management of Environmental Risks*. NATO Science Series (Series IV: Earth and Environmental Series), vol 4. Springer, Dordrecht.

JAMES, A.. **An introduction to water quality modeling**. 2 ed, John Wiley & Sons, Londres, 1993.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos Domésticos**. 6a, Rio de Janeiro, 2011. 1050p.

JÚNIOR, P. R. M. **Aplicação do Modelo de autodepuração de Qualidade das Águas QUAL-UFGM: Estudo de Caso Sub-bacia do Rio Piracicaba**. 2010. 160 p. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade Sócio-econômica e Ambiental – Área de Concentração: Ambimetria)- Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2966>>. Acesso em: 06 nov. 2018.

KELMAN, J. (1997) **Gerenciamento de recursos hídricos: outorga e cobrança**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 12. Anais... Vitória.

KNAPIK, H. G. **Reflexões sobre Monitoramento, Modelagem e Calibração na Gestão de Recursos Hídricos: Estudo de caso da Qualidade da Água da Bacia do Alto Iguaçu**. Curitiba, 2009. 197 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

KANNEL, P. R. *et al.* **Application of QUAL2K for water quality modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati**. *Environ. Monit. Assess.*, vol.125, p.201-217, 2007.

KANNEL Prakash R.; KANEL, Sushil R.; LEE, Seockheon; LEE, Young-Soo; GAN, Thian Y.. **A Review of Public Domain Water Quality Models for Simulating Dissolved Oxygen in Rivers and Streams**. *Environmental Modeling & Assessment*, Volume 16, 2º edição, p. 183-204, Abril de 2011.

KLEIN, L. (1962). **River pollution. II. Causes and effects**. London, Butterworths Scientific Publications. v.2.

KIRKBY, M. J.; NADEN, P. S.; BURT, T. P.; BUTCHER, D. P. **Computer simulation in physical geography**. 2. ed. Chichester; New York: John Wiley & Sons, 1993.

KLEMEŠ, V. **Operational testing of hydrological simulation models.** *Hydrological Sciences Journal*, v. 31, n. 1, p. 13-24, 1986.

LARAMIE, S. A.; MARIVOET, J.; VANOUPLINES, P. **Application of QUAL2E and QUAL2EU models to the Densu river basin in Ghana.** In: LAIKARI, H. *River Basin Management*. Editora Pergamon Press. New York. 1989.

LARENTIS, D. G. **Modelagem matemática da qualidade da água em grandes bacias: sistema Taquari-Antas – RS.** 2004. 177 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2004.

LEE, C. (1973). **Models in planning.** Na introduction to the use of quantitative models in planning. Oxford. Pergamon Press.

LELIS, T. A. et al. Solo. **Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil.** *Rev. Bras. CiêncMinas Gerais*, vol.36, n.2, p. 623-634, 2012.

LIMA, E. E. S. **Modelagem matemática da qualidade da água como suporte ao enquadramento da bacia do rio Una – PE.** Orientador: Simone Rosa da Silva. 2016. 109 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Instituto de Tecnologia de Pernambuco, Recife, PE, 2016.

LIMA, L. C. T. M. **Simulação da qualidade da água em uma bacia hidrográfica: aplicação a bacia do rio Curu (CE).** 1998. 171 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1998.

LINDENSCHMIDT, K. E. **The effect of complexity on parameter sensitivity and model uncertain in river water quality modeling.** *Ecological Modeling*. v. 190, p. 72–86, 2006.

LISBOA, L. **Sistema para análise das outorgas de captação de água e diluição de efluentes na bacia do Rio Piracicaba - MG.** 2014. 109 p. Tese (Doctor Scientiae em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/9399/texto%20completo.pdf?sequence=3&isAllowed=y>>. Acesso em: 02 out. 2018.

LOUCKS, D.P.; van-Bee, E. **Water quality modelling and prediction.** In: Loucks, van Bee (Eds.), *Water Resources Systems Planning and Management An Introduction to Methods, Models and Applications, Studies and Reports in Hydrology*, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. UNESCO Publishing, Paris, France, ISBN 92-3-103998-9, p. 377 e 422, 2005.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. **Reúso da água.** Barueri, SP: Manole, 2003.

MARTINS, Jana Lodi. **Avaliação do impacto da implantação do sistema de esgotamento sanitário na qualidade da água da bacia do rio Piraquara no município do Rio de Janeiro.** Orientador: José Paulo Soares de Azevedo. 2015. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível

em: file:///C:/Users/VIVIANE/Downloads/MARTINS\_JL\_TM\_15.pdf. Acesso em: 4 mar. 2020.

MBULIGWE, S. E.; KASEVA, M. E. **Pollution and Self-Cleansing of an Urban River in a Developing Country: A Case Study in Dar es Salaam, Tanzania.** *Environmental Management*. vol. 36, n. 2, p. 328–342, 2005.

MELCHING, C. S.; YOON, C. G. Key Sources of Uncertainty in QUAL2E Model of Passaic River. **Water Resource Plan Manage**, v. 122, n. 2, pp. 105-113. 1996.

MENDONÇA, A. S. F. **Application of the QUAL2E model to Environmental Impact Assessment.** *Advances in Hydro Science and Engineering*, v. 1, n. 2, pp. 349-354. 1992.

MENEZES, J. P. C. *et al.* Relação entre padrões de uso e ocupação do solo e qualidade da água em uma bacia hidrográfica urbana. **Eng Sanit Ambient**, [s. l.], ano 2016, v. 21, ed. 3, 2016. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/206496065.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2020.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n.º 1 de 5 de maio 2008.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa n.º 09, de 19 de abril de 1994.** Dispõe sobre o enquadramento da Bacia do Rio Piracicaba. Belo Horizonte, 27 abr. 1994. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=108>. Acesso em: 26 nov. 2019.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa n.º 26, de 18 de dezembro de 2008.** Dispõe sobre procedimentos gerais de natureza técnica e administrativa a serem observados no exame de pedidos de outorga para o lançamento de efluentes em corpos de água superficiais no domínio do Estado de Minas Gerais. Minas Gerais, 30 dez. 2008. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=9028>. Acesso em: 3 set. 2019.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) (Brasil). **Conferência das nações unidas sobre meio ambiente e desenvolvimento: Proteção da qualidade e do abastecimento dos recursos hídricos: aplicação de critérios integrados no desenvolvimento, manejo e uso dos recursos hídricos.** [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/informma/item/674.html>. Acesso em: 7 jul. 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) (Brasil). **Áreas de Preservação Permanente e Unidades de Conservação X Áreas de Risco: O que uma coisa tem a ver com a outra?.** Brasília: [s. n.], 2011. 99 p. Disponível em: [https://www.mma.gov.br/estruturas/202/\\_publicacao/202\\_publicacao01082011112029.pdf](https://www.mma.gov.br/estruturas/202/_publicacao/202_publicacao01082011112029.pdf). Acesso em: 24 jul. 2020.

MOREIRA, M. C. **Gestão de recursos hídricos: sistema integrado para otimização da outorga de uso da água.** 2006. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

OPPA, L. F.; - **Utilização De Modelo Matemático De Qualidade Da Água Para Análise De Alternativas De Enquadramento Do Rio Vacacaí Mirim** - Dissertação De Mestrado, Santa Maria, RS, Brasil; 2007.

PALMIERI, V. **Calibração do modelo QUAL2E para o rio Corumbataí (SP)**. Dissertação de Mestrado. Pontifca Universidade Católica (RJ). 2004.

PANTOJA, P. H. B. **Uma solução da equação difusão-advecção com o termo contragradiente**. Orientador: Davidson Martins Moreira. 2014. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2014.

Disponível em:

[https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/10307/1/tese\\_8508\\_Disserta%C3%A7%C3%A3o%20vers%C3%A3o%20final.pdf](https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/10307/1/tese_8508_Disserta%C3%A7%C3%A3o%20vers%C3%A3o%20final.pdf). Acesso em: 14 maio 2020.

PAREDES, J.; ANDREU, J.; SOLERA, A. (2010) **A decision support system for water quality issues in the Manzanares River (Madrid, Spain)**. Science of the Total Environment v. 408, p. 2576-2589.

PAULA, L. M. Avaliação da qualidade da água e autodepuração do rio Jordão, Araguari (MG). *In*: PAULA, Liliane Magnavaca de. **Avaliação da qualidade da água e autodepuração do rio Jordão, Araguari (MG)**. Orientador: Marcio Ricardo Salla. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 2011. p. 196. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14157/1/d.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2020.

PEARCE, D.W.; TURNER, R.K. **Economics of natural resources and the environment**. Johns Hopkins University Press, Baltimore. 1990.

PEREIRA, T. V.; MENDONÇA, A. S. **Aplicação de Modelagem Computacional na Simulação de Parâmetros de Qualidade de Água Relacionados com Nitrogênio em Curso d'água**. *In*: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa. Paraíba. 2005.

PEREIRA, M.; KAYSER, R. B.; COLLISCHONN, W. **Integração do Modelo Hidrológico para Grandes Bacias MGB-IPH e Sistemas de Informação Geográfica para suporte a decisão de outorga de direito de uso da água**. Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 9, n. 2, p. 21-33, 2012.

PERIN, L. T. **Uso do modelo QUAL-UFMG no estudo da qualidade da água e da capacidade de autodepuração do rio km119 – Campo Mourão-PR**. 2013. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso II do Curso Superior de Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Campo Mourão, [S. l.], 2013.

Disponível em:

[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1630/1/CM\\_COEAM\\_2012\\_2\\_13.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1630/1/CM_COEAM_2012_2_13.pdf). Acesso em: 16 mar. 2019.

PIMPUNCHAT, B.; SWEATMAN, W. L.; WAKE, G. C.; TRIAMPO, W.; PARSHOTAM, A. **A mathematical model for pollution in a river and its remediation by aeration**. Applied Mathematics Letters, v. 22, n. 3, p. 304-308, 2009.

PINA, R. W. **Avaliação experimental do crescimento da comunidade fitoplanctônica do reservatório João Leite em diferentes condições de luz e nutrientes**. Orientador: Eduardo Queija de Siqueira. 2013. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tede/3804/5/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20-%20Rafaela%20Wolff%20de%20Pina%20-%202013.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2020.

PINHEIRO, R. B. *et al.* **Outorga para Lançamento de Efluentes — Uma Metodologia de Apoio à Gestão de Recursos Hídricos**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [s. l.], ano 2013, v. 18, ed. 4, 17 ago. 2013. Disponível em: [https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/154/7505434aac0c837030b65e328bc045d0\\_922daf4b5f90dfb068150f4a1aa595e6.pdf](https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/154/7505434aac0c837030b65e328bc045d0_922daf4b5f90dfb068150f4a1aa595e6.pdf). Acesso em: 16 abr. 2020.

PINHEIRO, R. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, S.R.; MEDEIROS, Y. D. P., AURELIANO, J. T. **Outorga para lançamento de efluentes – Uma metodologia de apoio à gestão de recursos hídricos**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 4, p. 55-65, 2013.

PÖPEL, H.J. (1979). **Aeration and gas transfer**. 2. Ed. Delft, Delft University of Technology. 169 p.

QASIM, S.R. (1985). **Wastewater treatment plants: planning, design and operation**. Holt, Rinehart and Winston, New York.

RATHBUN, R. E.; GRANT, R. S. **Comparison of the radioactive and modified techniques for measurement of stream reaeration coefficients**. U.S. Geological Survey. Water Resources Investigations. p. 68-78, 1975.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Editora Escrituras, 1999. 717 p.

RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. A. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Edgard Blucher, 1991. 332 p.

RODRIGUES, R. B. **SSD RB - sistema de suporte a decisão proposto para a gestão qualitativa dos processos de outorga e cobrança pelo uso da água**. 2005. 179 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-16092005-135904/pt-br.php>. Acesso em: 02 out. 2018.

SANTOS, J. S.; BARACUHY, J. G. V.; LIMA, V. L. A.. Aspectos Legais da Cobrança de Água No Brasil. *Revista Educação Agrícola Superior*, Campina Grande, v. 25, n. 2, p.74-78, 2010.

SARDINHA, D. S. *et al.* **Avaliação da qualidade da água e autodepuração do Ribeirão do Meio, Leme (SP)**. Engenharia Sanitária e Ambiental, vol. 13, n. 3 e n. 4, 2008. SANTOS, J. S.; BARACUHY, J. G. V.; LIMA, V. L. A.. Aspectos Legais da Cobrança de Água No Brasil. *Revista Educação Agrícola Superior*, Campina Grande, v. 25, n. 2, p.74-78, 2010.

SCOLFORO, J.R e CARVALHO, L.M.T. **Mapeamento e inventário da flora nativas dos reflorestamentos de Minas Gerais.** Lavras:UFLA,288 P,2007.

SILVA, A. K. M.; SANTOS, W. L. P. **Estudo dos gases e a poluição atmosférica: Cinética química e a química verde: abordagens temáticas para o ensino médio.** 2013. 63 p. Dissertação (Mestrado em ensino de Ciências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: [http://ppgec.unb.br/wp-content/uploads/boletins/volume8/18\\_2013\\_AnaKarolineSilva.pdf](http://ppgec.unb.br/wp-content/uploads/boletins/volume8/18_2013_AnaKarolineSilva.pdf). Acesso em: 8 jul. 2020.

SEMARH/SRH (SE). **Proposta de uma metodologia de enquadramento para a bacia do Sergipe com a utilização dos dados de qualidade de água disponibilizados pela SEMARH-SE.** Sergipe: [s. n.], 2014. 54 p. Disponível em: [https://www.semarh.se.gov.br/recursos\\_hidricos/wp-content/uploads/2018/05/Enquadramento-PBH-Sergipe\\_pdf.pdf](https://www.semarh.se.gov.br/recursos_hidricos/wp-content/uploads/2018/05/Enquadramento-PBH-Sergipe_pdf.pdf). Acesso em: 11 mar. 2020.

SILVA, L.M.C. & MONTEIRO, R.A. (2004) **Outorga de direito de uso de recursos hídricos: uma das possíveis abordagens.** In: MACHADO, C.J.S. Gestão de águas doces. Rio de Janeiro: Interciência, p. 135-178.

SILVA, L. R. S. **Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelo de simulação de bacias hidrográficas.** Orientador: Sérgio Koide. 2010. 241 p. Tese (Doutorado em tecnologia ambiental e recursos hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010. Disponível em: [https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/7232/1/2010\\_LucianaRobertaSarmentodaSilva.pdf](https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/7232/1/2010_LucianaRobertaSarmentodaSilva.pdf). Acesso em: 8 abr. 2020.

SILVA, M.M.A.P.M. **Modelagem da qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba – MG.** Orientador: Sergio Donizete Faria. 2014. 164 p. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522017000100133&script=sci\\_abstract&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522017000100133&script=sci_abstract&tlng=pt). Acesso em: 19 jul. 2019.

SISEMA. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos.** Belo Horizonte: IDE-Sisema, 2019. Disponível em: [idesisema.meioambiente.mg.gov.br](http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br). Acesso em: 27/12/2019.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Disponível em: [ibge.gov.br](http://ibge.gov.br). Acesso em: 18/11/2019.

SOUZA, J. D. de. **Modelo espaço-temporal em SIG para análise de Qualidade da água em uma bacia hidrográfica.** Curitiba, 2004. 177p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) UFPR.

SOUZA, W. G. de; SALIM, F. P. C.; SILVA, L. M. C. da. **Aplicação de metas progressivas de melhorias de qualidade de água no processo de outorga para diluição de efluentes.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. Anais... Campo Grande, 2009.

TEIXEIRA, H. A. **Análise comportamental do efluente liberado pela ETE/Osório na lagoa dos Barros, através de modelagem computacional**. Orientador: Fernando Mainardi Fan. 2017. Trabalho de Diplomação (Engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. p. 124. Disponível em:

<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/188385/001086529.pdf?sequence=1>.

Acesso em: 25 jul. 2020.

TEODORO, A. et al. **Implementação do conceito Capacidade de Diluição de Efluentes no modelo de qualidade da água QUAL-UFGM: estudo de caso no Rio Taquarizinho (MS)**. 2013. 14 p. Artigo Técnico (.)- Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v18n3/1413-4152-esa-18-03-00275.pdf>>. Acesso em: 02 out. 2018.

TERCINI, J. R. B. **Modelagem da qualidade da água integrando rio e reservatório**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2014. p. 117. Disponível em: [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-18032015-153955/publico/Joao\\_Tercini\\_Dissertacao.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-18032015-153955/publico/Joao_Tercini_Dissertacao.pdf). Acesso em: 24 jul. 2020.

THOMANN, R. V., MUELLER, J. A. **Principles of surface water quality modeling and control**. Harper International edition. 644p, 1987.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da água no Brasil**. Brasília, DF: UNESCO, 2001. 156 p.

TUNDISI, J. G. **Novas Perspectivas para a Gestão de Recursos Hídricos**. São Paulo: Dossiê Água, n.70, pp. 24-35, jun.-ago./2006.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: Enfrentando a escassez** (Editora RiMa, IIE. 248p, 2003).

UFRS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Métodos de pesquisa**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 120 p.

VASCONCELOS NETO, A. **Aplicação do modelo QUAL2E no rio Barigui**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba (PR). 2003.

VIOLA, Z.G.G. **Avaliação da qualidade das águas da bacia do rio Doce/MG: caracterização da matéria orgânica e seus impactos ambientais**. Belo Horizonte, 2008 Tese de doutorado, Instituto de Ciências Biológicas. UFMG.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos / Marcos von Sperling – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais ;2005. 452p. (Princípios do Tratamento biológico de águas residuárias, v.1).**

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte, UFMG. v.2. 1996.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 180p.

VON SPERLING, M. **Estudos e Modelagem da qualidade da água dos rios** / Marcos von Sperling – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2007. 588p. (Princípios do Tratamento biológico de águas residuárias, v.7).

VON SPERLING, M. **Estudos e Modelagem da qualidade da água dos rios** / Marcos von Sperling – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2014. 588p. (Princípios do Tratamento biológico de águas residuárias, v.7, 2. Ed.).

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos** / Marcos von Sperling – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais ;2005. 452p. (Princípios do Tratamento biológico de águas residuárias, v.1).

WALTON, R.; WEBB, M. QUAL2E simulations of Pulse Loads. **Journal of Environmental Engineering**, ASCE , pp. 1017-1031. 1992.

YUCEER, M.;KARADURMUS, E.; BERBER, R. **Simulation of river streams: Comparison of a new technique with QUAL2E**. Science Direct, [s. l.], 15 dez. 2006.

Disponível em:

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0895717707000477?token=7263A57DC15B89312143106F239B432497B133A9C6090B0EFB21C9EFEE6C1AC962AD644B8916A3420C3AF6B43FC25D04>. Acesso em: 6 mar. 2020.

ZIEGLER, T. K. **Predicting Downstream Thermal Effects Resulting from Cooling Water Discharge using QUAL2E-UNCAS**. In: Anais do 58º American Conference, Chicago (EUA). pp. 881-886. 1996.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A – Tributários do rio Piracicaba

Nome do curso d'água	Q90	Q95	Q7_10
Córrego Olaria	0,03083689	0,02517602	0,02408761
sem nome	0,00236026	0,00190674	0,00216982
sem nome	0,00168243	0,00135727	0,00158023
sem nome	0,00636919	0,00516639	0,00549823
sem nome	0,00329699	0,00266715	0,00296744
sem nome	0,0010939	0,00088093	0,00105588
Ribeirão Figueiredo	0,67142387	0,55514694	0,43143857
Córrego dos Macacos	0,02212153	0,01803596	0,01764743
sem nome	0,0009016	0,00072549	0,00088099
sem nome	0,00126842	0,00102209	0,00121289
sem nome	0,00759097	0,00616188	0,00648046
sem nome	0,00075978	0,00061094	0,00075051
sem nome	0,00182809	0,00147528	0,00170803
sem nome	0,01055745	0,00858151	0,00882647
sem nome	0,00154947	0,00124958	0,00146296
sem nome	0,01111026	0,00903274	0,00925865
Córrego Batatal	0,03739487	0,03055431	0,02885542
sem nome	0,00358665	0,00290247	0,00321097
sem nome	0,00341457	0,00276266	0,00306645
Córrego do Machado	0,10401269	0,08534366	0,07522159
sem nome	0,00087545	0,00070436	0,00085703
Ribeirão do Turvo	1,11635595	0,9249552	0,69459186
sem nome	0,00123955	0,00099873	0,00118702
sem nome	0,00083641	0,00067283	0,00082119
Ribeirão Caladão	0,24430955	0,20116316	0,16737518
Córrego Água Limpa	0,03644356	0,02977386	0,02816731
Córrego Barbosa	0,19538518	0,16073152	0,13576674
sem nome	0,00288748	0,0023346	0,0026208
Córrego das Cruzes	0,02398834	0,0195645	0,01903866
sem nome	0,00111283	0,00089623	0,00107298
sem nome	0,00534209	0,00433013	0,00466327
sem nome	0,00225575	0,00182198	0,00207971
sem nome	0,00626368	0,00508046	0,00541288
Córrego das Palmeiras	0,02746758	0,02241457	0,02161367
sem nome	0,00142238	0,00114668	0,00135027
Ribeirão Japão	0,17644805	0,14509233	0,12340276
Córrego Sítio Largo	0,00884308	0,00718277	0,00747669

Nome do curso d'água	Q90	Q95	Q7_10
sem nome	0,001575	0,001271	0,001486
sem nome	0,001843	0,001487	0,001721
Córrego Indaiá	0,056352	0,046122	0,042368
sem nome	0,01054	0,008567	0,008812
Córrego do Ramos	0,034078	0,027834	0,026452
sem nome	0,005388	0,004368	0,004358
sem nome	0,00023	0,000184	0,000215
Córrego Gariroba	0,033568	0,027415	0,02608
sem nome	0,003666	0,002967	0,003277
sem nome	0,001185	0,000954	0,000986
sem nome	0,000854	0,000687	0,000837
sem nome	0,000709	0,00057	0,000598
Córrego da Serra	0,024127	0,019678	0,019142
Córrego Itapaji	0,029006	0,023675	0,022746
Córrego Santana	0,03487	0,028483	0,027027
sem nome	0,003759	0,003042	0,003355
sem nome	0,004617	0,00374	0,003759
sem nome	0,001028	0,000827	0,000828
sem nome	0,002007	0,00162	0,001844
sem nome	0,004496	0,003642	0,003968
sem nome	0,002689	0,002174	0,002452
sem nome	0,007403	0,006009	0,00633
sem nome	0,000815	0,000656	0,000787
sem nome	0,00149	0,001201	0,001408
sem nome	0,000995	0,000801	0,000966
sem nome	0,001664	0,001342	0,001564
Córrego do Congo	0,014632	0,011909	0,011982
sem nome	0,01446	0,011769	0,011851
sem nome	0,026569	0,021678	0,020951
sem nome	0,000445	0,000357	0,000367
sem nome	0,00061	0,00049	0,000553
sem nome	0,000558	0,000448	0,000462
sem nome	0,000559	0,000449	0,00055
Córrego Clemente	0,006565	0,005325	0,005656
Córrego Pinheiros	0,025137	0,020505	0,019891
Córrego Vargem do Carrinho	0,008809	0,007155	0,007449
sem nome	0,001823	0,001471	0,001592

Nome do curso d'água	Q90	Q95	Q7_10
sem nome	0,00154457	0,00124561	0,00145862
sem nome	0,00496172	0,00402059	0,00435156
Ribeirão Bicudo	0,31684081	0,26116369	0,21351865
Córrego Timóteo	0,1786729	0,14692938	0,12485956
Córrego Talho Aberto	0,0685444	0,05614526	0,05089881
sem nome	0,00351834	0,00284697	0,00315365
sem nome	0,00177428	0,00143168	0,0016609
sem nome	0,00262888	0,00212469	0,00240031
sem nome	0,00609651	0,00494432	0,00527746
sem nome	0,00179708	0,00145016	0,00168088
sem nome	0,00385446	0,00312011	0,003435
sem nome	0,00385678	0,00312201	0,00343695
sem nome	0,00174758	0,00141005	0,00163748
sem nome	0,00299428	0,00242131	0,00271149
sem nome	0,00679961	0,00551701	0,00584552
sem nome	0,00609197	0,00494062	0,00527378
sem nome	0,00624568	0,0050658	0,00539831
sem nome	0,00398342	0,00322494	0,00354253
sem nome	0,00239969	0,00193873	0,00220376
sem nome	0,00635555	0,00515528	0,00548721
sem nome	0,00202044	0,00163118	0,00187582
sem nome	0,00197567	0,00159489	0,00183686
sem nome	0,00115423	0,00092971	0,00111032
sem nome	0,00149179	0,00120288	0,00141189
sem nome	0,00389296	0,00315141	0,00346713
sem nome	0,00491412	0,00398186	0,00431245
sem nome	0,00613136	0,0049727	0,00530571
sem nome	0,00328708	0,00265909	0,00295908
sem nome	0,00241222	0,00194889	0,00221453
sem nome	0,00104377	0,00084039	0,00101048
Córrego Montanha	0,07946351	0,06512871	0,05845673
Córrego Mutuca	0,01641396	0,01336611	0,01334425
sem nome	0,00062231	0,00049999	0,00059496
sem nome	0,0047289	0,00383117	0,00416002
sem nome	0,00189198	0,00152705	0,00176388
sem nome	0,00109976	0,00088566	0,00103791
sem nome	0,00322616	0,00260961	0,00290769
sem nome	0,0053907	0,0043697	0,00470301
sem nome	0,0003156	0,00025286	0,00032418
sem nome	0,00105326	0,00084806	0,00090609
sem nome	0,00121292	0,00097719	0,00106625
sem nome	0,00066498	0,00053442	0,00058402

Nome do curso d'água	Q90	Q95	Q7_10
sem nome	0,001749	0,001411	0,001419
sem nome	0,000757	0,000609	0,000626
sem nome	0,006835	0,005546	0,005874
sem nome	0,004067	0,003293	0,003612
Córrego Salvador	0,062399	0,051092	0,046612
sem nome	0,003516	0,002845	0,003152
sem nome	0,001718	0,001386	0,001612
sem nome	0,001508	0,001216	0,001426
sem nome	0,001428	0,001151	0,001355
sem nome	0,002206	0,001782	0,002037
sem nome	0,003878	0,003139	0,003454
sem nome	0,002767	0,002237	0,002518
sem nome	0,002736	0,002211	0,002492
sem nome	0,004017	0,003252	0,00357
sem nome	0,002444	0,001974	0,002241
sem nome	0,002134	0,001723	0,001974
sem nome	0,004093	0,003314	0,003634
sem nome	0,002839	0,002295	0,00258
sem nome	0,002334	0,001886	0,002147
sem nome	0,00358	0,002897	0,003206
sem nome	0,005265	0,004268	0,0046
sem nome	0,003217	0,002602	0,0029
sem nome	0,004219	0,003417	0,003739
sem nome	0,006465	0,005245	0,005576
Córrego da Onça	0,472085	0,389765	0,310198
Córrego Congonhas	0,034451	0,02814	0,026722
sem nome	0,001033	0,000831	0,001
sem nome	0,010462	0,008504	0,008752
sem nome	0,001357	0,001093	0,001244
Ribeirão Severo	0,989666	0,819581	0,620485
sem nome	0,007158	0,005809	0,006134
sem nome	0,000612	0,000491	0,000613
sem nome	0,000578	0,000464	0,000581
sem nome	0,000738	0,000594	0,000665
sem nome	0,002596	0,002098	0,002299
Córrego do Rosário	0,014285	0,011626	0,011716
sem nome	0,005946	0,004822	0,005155
sem nome	0,001095	0,000882	0,000929
sem nome	0,002809	0,002271	0,002266
Córrego São Luís	0,051688	0,042289	0,039074
sem nome	0,002868	0,002319	0,002308
sem nome	0,001866	0,001506	0,001563

Nome do curso d'água	Q90	Q95	Q7_10
sem nome	0,00229701	0,00185544	0,00208962
sem nome	0,00171154	0,00138085	0,0013725
Córrego Ana Matos	0,05099019	0,04171576	0,03858034
Córrego Fidalgo	0,1921864	0,15808937	0,13368381
sem nome	0,01349374	0,0109793	0,01110723
Córrego Barro Branco	0,11863686	0,09739558	0,08508531
sem nome	0,00489868	0,0039693	0,00389776
sem nome	0,00075937	0,00061061	0,00060786
sem nome	0,02530409	0,02064213	0,02001507
Córrego Mata Virgem	0,01822794	0,01484965	0,01472085
sem nome	0,00136016	0,00109633	0,00129487
sem nome	0,00206989	0,00167127	0,00191878
sem nome	0,00181677	0,00146611	0,00169812
Córrego Capela Branca	0,01197978	0,00974269	0,00993569
sem nome	0,00220192	0,00177832	0,00203319
sem nome	0,00174022	0,00140409	0,00163102
sem nome	0,00103562	0,0008338	0,00100309
sem nome	0,00158397	0,00127752	0,00149344
sem nome	0,00322979	0,00261256	0,00291075
sem nome	0,00269438	0,00217785	0,00245628
Córrego Viva Povo	0,14359124	0,11797447	0,10174381
sem nome	0,00249815	0,00201861	0,00228834
Rio Santa Bárbara	8,91244361	7,44766322	4,86116804
sem nome	0,00503721	0,00408202	0,00441354
Rio do Peixe	2,17164654	1,80423867	1,29538691
sem nome	0,00546545	0,00443053	0,00476406
Ribeirão Grande	0,80947139	0,6698016	0,51401613
Córrego Ponte Nova	0,11131763	0,09136292	0,08015891
sem nome	0,00514561	0,00417022	0,00450244
sem nome	0,00189755	0,00153157	0,00176874
Ribeirão Gomes de Melo	0,96631097	0,80016117	0,60676019
sem nome	0,00371121	0,00300369	0,00331529
Córrego Barreiro	0,03384685	0,027644	0,02628317
Córrego Mutuca	0,01836631	0,01496284	0,01482549
sem nome	0,01140656	0,00927464	0,00948972
sem nome	0,01321762	0,01075372	0,01089421
sem nome	0,02391411	0,01950371	0,01898347
sem nome	0,0086643	0,00703697	0,00733503
sem nome	0,00202427	0,00163428	0,00187914
sem nome	0,00374489	0,00303107	0,00334347

Nome do curso d'água	Q90	Q95	Q7_10
sem nome	0,001142	0,00092	0,000934
sem nome	0,000741	0,000596	0,000602
sem nome	0,000703	0,000565	0,000599
sem nome	0,003132	0,002533	0,002578
Córrego dos Macacos	0,024426	0,019923	0,019363
sem nome	0,002963	0,002396	0,002685
Córrego Onça Grande	0,356984	0,294397	0,238759
sem nome	0,004146	0,003357	0,003678
Ribeirão da Prainha	0,345524	0,284908	0,231572
Córrego Manacá	0,038174	0,031194	0,029418
sem nome	0,007285	0,005913	0,006236
sem nome	0,0009	0,000725	0,000791
sem nome	0,000829	0,000667	0,000741
sem nome	0,001608	0,001297	0,001334
sem nome	0,000438	0,000352	0,000357
sem nome	0,000701	0,000564	0,00058
sem nome	0,004207	0,003406	0,003463
sem nome	0,001035	0,000833	0,001003
sem nome	0,004196	0,003398	0,00372
sem nome	0,004455	0,003608	0,003652
sem nome	0,007256	0,005889	0,005961
sem nome	0,008576	0,006965	0,006917
sem nome	0,011056	0,008989	0,009217
sem nome	0,001976	0,001595	0,00181
sem nome	0,000418	0,000335	0,000355
sem nome	0,003784	0,003063	0,003054
sem nome	0,003702	0,002996	0,003104
sem nome	0,001339	0,001079	0,001276
sem nome	0,000438	0,000351	0,000448
Córrego Zabelinha	0,016941	0,013797	0,013745
sem nome	0,000881	0,000709	0,00072
sem nome	0,000858	0,00069	0,000724
Córrego Mata do Paiol	0,102634	0,084208	0,074287
sem nome	0,002257	0,001823	0,001904
sem nome	0,000788	0,000634	0,000668
sem nome	0,000661	0,000531	0,000546
sem nome	0,000869	0,000699	0,000823
sem nome	0,001075	0,000865	0,001039
sem nome	0,001736	0,001401	0,001555
sem nome	0,002527	0,002042	0,002313

Nome do curso d'água	Q90	Q95	Q7_10
sem nome	0,00328223	0,00265516	0,002955
sem nome	0,00061497	0,00049407	0,0005877
sem nome	0,01926037	0,01569429	0,01550042
sem nome	0,00086029	0,00069211	0,000838
Ribeirão Cocais Pequeno	0,70097864	0,57968598	0,44920152
sem nome	0,0162919	0,01326631	0,01325128
sem nome	0,01109896	0,00902352	0,00924983
Córrego Pedra Furada	0,05809712	0,04755551	0,04359556
sem nome	0,00133612	0,00107687	0,00108487
sem nome	0,02834711	0,0231353	0,02226123
sem nome	0,00196114	0,00158311	0,00159011
sem nome	0,00402518	0,0032589	0,00320117
sem nome	0,00048673	0,00039066	0,00038602
Córrego Granjeiro	0,03272686	0,02672556	0,02546772
sem nome	0,00182306	0,00147121	0,00160621
sem nome	0,00841663	0,006835	0,00713846
Córrego Pé-de-Serra	0,13231385	0,10867247	0,09424034
sem nome	0,00921701	0,00748777	0,00777241
sem nome	0,00218839	0,00176735	0,00202149
sem nome	0,00177008	0,00142828	0,00142522
sem nome	0,01047538	0,00851453	0,00876219
sem nome	0,00095624	0,00076964	0,00079607
sem nome	0,00244992	0,00197948	0,00205759
sem nome	0,00908494	0,00738004	0,00766806
sem nome	0,00203372	0,00164195	0,00187923
sem nome	0,00432703	0,00350432	0,00382799
sem nome	0,00346896	0,00280685	0,00311217
sem nome	0,00113628	0,0009152	0,00109414
sem nome	0,00185306	0,00149551	0,00167313
sem nome	0,00335518	0,00271441	0,00301646
Córrego Bateias	0,0177243	0,0144377	0,01433956
sem nome	0,00317374	0,00256704	0,002827
sem nome	0,00391443	0,00316886	0,00348504
sem nome	0,00290232	0,00234664	0,00263341
sem nome	0,00118945	0,0009582	0,00112688
sem nome	0,01014458	0,00824456	0,00850277
sem nome	0,00097154	0,000782	0,00091274
sem nome	0,00142111	0,00114566	0,00115268
sem nome	0,00151212	0,00121934	0,00127453
Córrego Brumado	0,06484628	0,05310401	0,04832228
sem nome	0,00112698	0,00090768	0,00103566
sem nome	0,00679591	0,005514	0,00584254

Nome do curso d'água	Q90	Q95	Q7_10
Córrego da Chácara	0,019561	0,01594	0,015727
sem nome	0,010416	0,008466	0,008716
sem nome	0,000524	0,00042	0,000459
Córrego João Manuel	0,038221	0,031232	0,029452
sem nome	0,008602	0,006986	0,007053
sem nome	0,004498	0,003644	0,003475
sem nome	0,000615	0,000494	0,000582
Córrego Xeréré	0,041891	0,034244	0,032093
sem nome	0,000844	0,000679	0,00077
sem nome	0,000612	0,000492	0,000544
sem nome	0,001673	0,001349	0,001423
sem nome	0,001165	0,000939	0,001071
sem nome	0,003761	0,003044	0,003094
sem nome	0,003042	0,00246	0,002692
sem nome	0,001331	0,001072	0,001134
sem nome	0,00463	0,003751	0,003823
Córrego Viradouro	0,010443	0,008488	0,008737
sem nome	0,001101	0,000887	0,001
sem nome	0,00059	0,000474	0,000534
sem nome	0,001169	0,000942	0,000992
sem nome	0,000453	0,000363	0,000426
sem nome	0,011039	0,008974	0,009203
sem nome	0,000646	0,000519	0,000546
sem nome	0,001543	0,001245	0,001426
sem nome	0,002633	0,002128	0,002129
Córrego da Chiquinha	0,061727	0,05054	0,046142
sem nome	0,003647	0,002951	0,003261
sem nome	0,001116	0,000898	0,00104
sem nome	0,002456	0,001985	0,002253
Córrego Faria	0,165112	0,135734	0,115962
sem nome	0,001024	0,000824	0,000916
sem nome	0,001907	0,001539	0,001588
sem nome	0,008882	0,007215	0,007433
sem nome	0,006618	0,005369	0,005365
sem nome	0,000404	0,000324	0,000346
sem nome	0,000694	0,000558	0,000581
sem nome	0,000456	0,000366	0,00037
sem nome	0,000577	0,000463	0,0005
sem nome	0,001839	0,001484	0,001717
sem nome	0,009726	0,007903	0,008173
sem nome	0,000539	0,000433	0,000449
sem nome	0,00206	0,001663	0,001713

Nome do curso d'água	Q90	Q95	Q7_10
sem nome	0,00320661	0,00259373	0,00289118
sem nome	0,00271749	0,0021966	0,00247601
sem nome	0,00322218	0,00260638	0,00290433
sem nome	0,00368846	0,0029852	0,00329625
sem nome	0,00660637	0,00535959	0,00568978
sem nome	0,00218452	0,00176421	0,00201814
sem nome	0,00087021	0,00070013	0,00083779
sem nome	0,00104085	0,00083803	0,00100784
sem nome	0,00192208	0,00155145	0,00179015
sem nome	0,00106753	0,0008596	0,00102255
Córrego Toló	0,01203116	0,00978465	0,0099756
sem nome	0,00250481	0,00202402	0,00229406
sem nome	0,00381094	0,00308475	0,00339867
Rio Maquiné	1,9629584	1,63018068	1,17842665
sem nome	0,00244559	0,00197597	0,00211242
sem nome	0,0040569	0,00328468	0,00349888
sem nome	0,00397667	0,00321946	0,0034572
sem nome	0,01193478	0,00970595	0,00990073
sem nome	0,0018759	0,00151402	0,00174983
sem nome	0,00251591	0,00203302	0,00217032
sem nome	0,01021111	0,00829885	0,00855499
Córrego Jacui	0,1468591	0,1206705	0,10391099
Córrego Morro Alto	0,01382211	0,0112476	0,0113602
sem nome	0,00329192	0,00266303	0,00296317
sem nome	0,00166467	0,00134288	0,00154063
sem nome	0,00411876	0,00333497	0,00365515
sem nome	0,00147102	0,00118606	0,00139347
sem nome	0,0015529	0,00125236	0,001466
sem nome	0,00499138	0,00404473	0,00437592
sem nome	0,00388085	0,00314157	0,00345703
sem nome	0,00158701	0,00127998	0,00149613
sem nome	0,00083291	0,00067	0,00074538
sem nome	0,00279835	0,00226224	0,00237979
sem nome	0,00818116	0,006643	0,00695124
sem nome	0,00083637	0,00067279	0,00078949
sem nome	0,00416131	0,00336957	0,00369051
sem nome	0,00117143	0,00094363	0,00102252
Córrego Traíra	0,04110627	0,03359984	0,03152961
sem nome	0,00053866	0,00043253	0,0004961
sem nome	0,00081664	0,00065685	0,0007403
sem nome	0,00122754	0,00098901	0,00114612
sem nome	0,00859575	0,00698107	0,00728066
sem nome	0,00171563	0,00138416	0,0014706

Nome do curso d'água	Q90	Q95	Q7_10
Córrego das Almas	0,113185	0,092902	0,081418
sem nome	0,000373	0,000299	0,000337
sem nome	0,000698	0,000561	0,000632
sem nome	0,00484	0,003922	0,00397
sem nome	0,005462	0,004428	0,00461
sem nome	0,001589	0,001282	0,001337
sem nome	0,000609	0,000489	0,000566
sem nome	0,000392	0,000314	0,000404
Córrego Quilombo	0,007899	0,006413	0,006727
sem nome	0,005079	0,004116	0,004448
sem nome	0,000476	0,000382	0,000478
sem nome	0,002022	0,001632	0,001877
sem nome	0,001914	0,001545	0,001776
sem nome	0,002482	0,002005	0,002274
sem nome	0,002391	0,001932	0,002197
sem nome	0,000771	0,00062	0,000761
sem nome	0,003427	0,002773	0,003077
sem nome	0,003778	0,003058	0,003371
sem nome	0,000401	0,000322	0,000379
sem nome	0,00263	0,002126	0,002402
sem nome	0,002613	0,002111	0,002386
sem nome	0,001437	0,001159	0,001363
sem nome	0,001883	0,00152	0,001704
sem nome	0,005267	0,004269	0,004601
sem nome	0,0033	0,00267	0,00297
sem nome	0,006364	0,005162	0,005494
sem nome	0,001624	0,00131	0,001492
sem nome	0,005637	0,00457	0,004904
sem nome	0,001189	0,000958	0,001142
Ribeirão Piçarrão	0,437197	0,360847	0,288675
sem nome	0,001501	0,001211	0,001395
sem nome	0,001052	0,000847	0,001018
sem nome	0,003964	0,003209	0,003526
Rio da Prata	2,37997	1,978061	1,411433
sem nome	0,003804	0,003079	0,003393
sem nome	0,001406	0,001134	0,001336
sem nome	0,000972	0,000782	0,000945
sem nome	0,001902	0,001535	0,001772
Córrego do Tanque	0,01171	0,009523	0,009726
sem nome	0,000891	0,000717	0,000859
sem nome	0,001134	0,000913	0,001072
sem nome	0,00093	0,000749	0,000907
sem nome	0,002894	0,00234	0,002626

Nome do curso d'água	Q90	Q95	Q7_10
sem nome	0,00070036	0,00056297	0,00060947
sem nome	0,00216673	0,00174978	0,00191005
sem nome	0,00231315	0,00186854	0,00203768
Córrego do Ângelo	0,03818686	0,0312041	0,02942743
sem nome	0,00139176	0,0011219	0,00128724
Córrego Fundão	0,04695074	0,03839801	0,03571031
sem nome	0,02046668	0,01668141	0,01640794
Córrego Limoeiro	0,08807197	0,07221475	0,06436847
Córrego das Galinhas	0,03014363	0,02460772	0,02358004
sem nome	0,00129127	0,00104057	0,00109431
Ribeirão Durão	0,14985536	0,12314266	0,10589536
sem nome	0,00139899	0,00112775	0,00118074
sem nome	0,00276304	0,00223357	0,00251486
sem nome	0,00334169	0,00270346	0,00300511
sem nome	0,0033395	0,00270168	0,00300326
sem nome	0,02189659	0,01785181	0,0174793
sem nome	0,02253918	0,01837788	0,0179593
sem nome	0,01621976	0,01320733	0,01319632
sem nome	0,00132396	0,00106703	0,00126257
sem nome	0,0017123	0,00138147	0,00160611
sem nome	0,00375501	0,00303929	0,00335193
sem nome	0,00424969	0,00344143	0,00376387
sem nome	0,00091006	0,00073232	0,00086042
sem nome	0,00120884	0,00097389	0,00115945
sem nome	0,00121252	0,00097686	0,00116275
sem nome	0,00124691	0,00100468	0,00119362
sem nome	0,00496605	0,00402412	0,00435512
sem nome	0,00744644	0,00604409	0,00636482
Córrego da Prata	0,04874853	0,03987446	0,0369895
sem nome	0,00124132	0,00100016	0,0011886
sem nome	0,00179814	0,00145101	0,00168181
sem nome	0,00117802	0,00094895	0,00104813
sem nome	0,00220881	0,00178391	0,00197359
sem nome	0,00158778	0,0012806	0,00149681
sem nome	0,00142653	0,00115005	0,00135396
Córrego do Barroso	0,28669108	0,23621502	0,19442915

Nome do curso d'água	Q90	Q95	Q7_10
sem nome	0,001207	0,000973	0,001158
sem nome	0,001127	0,000907	0,001085
sem nome	0,001435	0,001157	0,001304
sem nome	0,00093	0,000749	0,000907
sem nome	0,001456	0,001174	0,00138
sem nome	0,002894	0,00234	0,002627
Córrego Itajuru	0,006684	0,005423	0,005752
sem nome	0,001011	0,000814	0,000981
sem nome	0,001975	0,001594	0,001836
sem nome	0,001563	0,00126	0,001475
sem nome	0,003337	0,002699	0,003001
sem nome	0,008528	0,006926	0,007227
sem nome	0,011308	0,009194	0,009413
sem nome	0,009645	0,007837	0,00811
sem nome	0,007772	0,006309	0,006625
sem nome	0,006038	0,004896	0,00523
sem nome	0,001197	0,000964	0,001106
sem nome	0,009786	0,007952	0,008221
sem nome	0,001208	0,000973	0,001158
sem nome	0,002464	0,001991	0,002259
sem nome	0,003393	0,002745	0,003048
Córrego da Passagem	0,071726	0,058763	0,053109
sem nome	0,001466	0,001182	0,001389
sem nome	0,002424	0,001959	0,002225
sem nome	0,001182	0,000952	0,001135
sem nome	0,00494	0,004003	0,004334
sem nome	0,002333	0,001885	0,002147
sem nome	0,000627	0,000504	0,000627
sem nome	0,000791	0,000636	0,00078
sem nome	0,003761	0,003044	0,003357
sem nome	0,000706	0,000568	0,000701
sem nome	0,000738	0,000593	0,00073
Córrego Atalho	0,040936	0,03346	0,031407
sem nome	0,035534	0,029028	0,027508
sem nome	0,001343	0,001083	0,00128
Córrego Santo Isidoro	0,01821	0,014835	0,014707
sem nome	0,002237	0,001807	0,002063

## APÊNDICE B – Diagrama unifilar do rio Piracicaba

