

WAGNER CLEYTON FONSECA

**AJUSTE DO MODELO QUAL2K E SIMULAÇÃO DE
CENÁRIOS PARA O RIBEIRÃO CLARO**

Rio Claro – SP
2008

WAGNER CLEYTON FONSECA

AJUSTE DO MODELO QUAL2K E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PARA O RIBEIRÃO CLARO

*Monografia apresentada à Comissão do Trabalho de
Formatura do Curso de Graduação em Engenharia
Ambiental, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
– Unesp, Campus de Rio Claro, como parte das
exigências para o cumprimento da disciplina Trabalho
de Formatura no ano letivo de 2008.”*

Orientador: Prof^o. Dr. Samuel Conceição de Oliveira

Rio Claro – SP
2008

LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 1: Variáveis simuladas pelo modelo QUAL2K (CHAPRA <i>et al.</i> 2006).</u>	7
<u>Tabela 2: Valores típicos dos coeficientes de remoção de DBO (k_{dc} e K_d) a 20°C (adaptado de VON SPERLING, 2007)</u>	12
<u>Tabela 3: Valores usuais de coeficientes utilizados na modelagem de nitrogênio em rios (adaptado de VON SPERLING, 2007).</u>	15
<u>Tabela 4: Constantes globais utilizadas no modelo (GONÇALVES & DIBIAZI, 2006)</u>	16
<u>Tabela 5: Pontos de coleta de amostra de água no ribeirão Claro</u>	18
<u>Tabela 6: Divisão em trechos do segmento do ribeirão Claro a ser simulado</u>	22
<u>Tabela 7: Captações e lançamentos no trecho da simulado do ribeirão Claro (Fonte: DAEE).</u>	22
<u>Tabela 8: Pontos de lançamento de esgoto no ribeirão Claro e seus parâmetros físico-químicos (FONTE: DAAE e Saneamento de Rio Claro S.A.)</u>	24
<u>Tabela 9: Vazão com 90% de permanência (Q_{90}) e valores de OD e DBO nos tributários</u>	24
<u>Tabela 10: Resultados das análises físico-químicas realizadas em 27/08/2008</u>	25
<u>Tabela 11 - Parâmetros hidráulicos das medições realizadas com molinete hidrométrico.</u>	26
<u>Tabela 12: Dados de profundidade e largura medidos em campo</u>	27
<u>Tabela 13: Coeficientes de decaimento da DBO (k_{dc}) para cada trecho</u>	31
<u>Tabela 14: Coeficientes de reaeração para cada trecho</u>	32
<u>Tabela 15: Coeficientes de oxidação da amônia para cada trecho</u>	33
<u>Tabela 16: Características do efluente bruto e tratado na ETE Jardim das Flores (Fonte: Saneamento de Rio Claro S.A.)</u>	42

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 1: Sistema fluvial real e a representação esquemática segundo o modelo QUAL2K (CHAPRA <i>et al</i>, 2006)</u>	5
<u>Figura 2: Relação entre trechos e elementos no QUAL2K (CHAPRA <i>et al</i>, 2006)</u>	5
<u>Figura 3: Representação de um corpo hídrico ausente de tributários (GONÇALVES & DIBIAZI, 2006)</u>	6
<u>Figura 4: Balanço de vazão em um elemento <i>i</i></u>	7
<u>Figura 5: Balanço de massa (GONÇALVES & DIBIAZI, 2006)</u>	8
<u>Figura 6: Bacia do ribeirão Claro na UGRHI nº 5 do Estado de São Paulo</u>	21
<u>Figura 7: Comportamento de OD, DBO e condutividade</u>	26
<u>Figura 8: Sensibilidade paramétrica para diferentes níveis de perturbação nos valores de referência dos parâmetros</u>	30
<u>Figura 9: Ajuste do modelo QUAL2K ao ribeirão Claro para a variável OD</u>	34
<u>Figura 10: Qualidade do ajuste do modelo QUAL2K para a variável OD</u>	35
<u>Figura 11: Ajuste do modelo QUAL2K ao ribeirão Claro para a variável DBO</u>	35
<u>Figura 12: Qualidade do ajuste do modelo QUAL2K para a variável DBO</u>	36
<u>Figura 13: Comportamento da vazão no segmento simulado do ribeirão Claro</u>	37
<u>Figura 14: Comportamento da velocidade ao longo do segmento simulado</u>	37
<u>Figura 15: Comportamento da profundidade ao longo do segmento simulado</u>	38
<u>Figura 16: Comportamento da condutividade elétrica no segmento simulado do ribeirão Claro</u>	38
<u>Figura 17: Comportamento da concentração de íons amônio no segmento simulado do ribeirão Claro</u>	38
<u>Figura 18: Comportamento da concentração de nitrato no segmento simulado do ribeirão Claro</u>	39
<u>Figura 19: Comportamento do pH no segmento simulado do ribeirão Claro</u>	40
<u>Figura 20: Comparação das variáveis de qualidade das amostras de água com os limites impostos pela Resolução CONAMA 357/05 para as diferentes classes</u>	41
<u>Figura 21: Comportamento da variável OD caso todo o efluente lançado no ribeirão Claro fosse tratado</u>	43
<u>Figura 22: Comparação entre o perfil atual da variável OD (a) e o perfil de OD no primeiro cenário simulado (b)</u>	43
<u>Figura 23: Comportamento da DBO no cenário atual e no cenário considerando tratamento de</u>	

<u>100% do efluente lançado (cenário 1).</u>	44
<u>Figura 24: Detalhe do comportamento da DBO no cenário 1.</u>	45
<u>Figura 25: Comparação dos índices de OD observados no cenário 1 e os estabelecidos pela resolução CONAMA 357/05.</u>	45
<u>Figura 26: Comparação das concentrações de DBO do cenário 1 com os valores determinados pela resolução CONAMA 357/05.</u>	45
<u>Figura 27 – Comportamento da vazão no cenário atual e no cenário futuro (ano de 2018).</u>	47
<u>Figura 28: Comportamento da variável OD no cenário atual e em 2018 (Cenário 2).</u>	47
<u>Figura 29-Comportamento da variável DBO no cenário atual e em 2018 (Cenário 2).</u>	48
<u>Figura 30: Comportamento da variável OD nos cenários 1 e 3.</u>	49
<u>Figura 31: Comportamento da DBO no cenário 1 e 3.</u>	49

SUMÁRIO

<u>1. INTRODUÇÃO</u>	
<u>2. OBJETIVOS</u>	
<u>2.1. Objetivos Específicos</u>	3
<u>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	
<u>3.1 Modelo QUAL2K</u>	5
<u>4. MATERIAL E MÉTODOS</u>	
<u>4.1. Levantamento Bibliográfico</u>	17
<u>4.2. Caracterização do Ribeirão Claro</u>	17
<u>4.3. Análises físico-químicas das amostras de água</u>	18
<u>4.4. Inserção de dados no modelo</u>	19
<u>5. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</u>	
<u>5.1. Uso e Ocupação do Solo</u>	21
<u>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	
<u>6.1. Divisão do Ribeirão Claro em trechos</u>	22
<u>6.2. Inserção dos pontos de captação e lançamento</u>	22
<u>6.3. Análises físico-químicas das amostras de água</u>	25
<u>6.4. Pontos de medição de vazão</u>	26
<u>6.5. Pontos de medição de largura e profundidade</u>	27
<u>6.6. Análise de Sensibilidade Paramétrica</u>	28
<u>6.7. Ajuste do modelo</u>	31
<u>6.8. Situação do segmento simulado do ribeirão Claro quanto à Resolução CONAMA 357/05</u>	40
<u>6.9. Simulação de Cenários</u>	41
<u>7. CONCLUSÃO</u>	
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	

APÊNDICE I – MAPA DA BACIA DO RIBEIRÃO CLARO

APÊNDICA II – DETALHE DO SEGMENTO SIMULADO DO RIBEIRÃO CLARO

APÊNDICE III – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO

APÊNDICE IV – PLANILHAS DE CAMPO PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO

RESUMO

O presente projeto tem como objetivo ajustar o modelo QUAL2K ao ribeirão Claro para avaliar seu comportamento quanto às variáveis OD e DBO mediante simulação dos seguintes cenários: (i) implantação de uma ETE hipotética que trata todo o efluente atualmente lançado no corpo d' água; (ii) aumento da vazão de captação do DAAE para abastecimento público e (iii) aumento da vazão atual de lançamento de esgoto, sendo os dois últimos motivados pelo crescimento populacional. Os resultados obtidos permitiram concluir que o modelo QUAL2K apresentou um bom ajuste para a variável OD e um ajuste razoável para a variável DBO, sendo que o mesmo foi adequado para a simulação dos cenários propostos.

Palavras-chave: modelagem matemática, QUAL2K, parâmetros de qualidade de água, ribeirão Claro e simulação de cenários.

ABSTRACT

The project has as objective to fit the model QUAL2K to “Ribeirão Claro” river to evaluate the behavior of OD and DBO when are simulated the following sceneries: (i) implantation of a hypothetic wastewater station treatment that treats all the effluent thrown nowadays in the body of water; (ii) increase of withdrawal flow of DAAE to public supply and (iii) increase of nowadays flow of wastewater throwing, being the two last caused for the population increasing. The results obtained allowed to conclude that the model QUAL2K presented a good fitting to the variable OD and a reasonable fitting to the variable DBO, being that the same was suitable to the simulation of the sceneries proposed.

Keywords: mathematical modeling, QUAL2K, water quality parameters, “Ribeirão Claro” and sceneries simulation.

1. INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos tem sido alvo de muitas discussões dado o crescimento desordenado na sua utilização e na degradação de sua qualidade. Estima-se que, atualmente, mais de 1 bilhão de pessoas vivem em condições insuficientes de disponibilidade de água para consumo e que, em 25 anos, cerca de 5,5 bilhões de pessoas estarão vivendo em áreas com moderada ou séria falta de água (SETTI et. al., 2000).

Medidas como as resoluções 357 de 2005 e 397 de 2008, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que tratam dos parâmetros de qualidade dos efluentes lançados em corpos d' água e a classificação destes quanto ao seu uso pretendido, da outorga e até da cobrança de tarifas pelo uso dos recursos hídricos, têm sido adotadas com a intenção de mitigar os impactos do uso desordenado e progressivo dos recursos hídricos. O monitoramento dos referidos parâmetros são de suma importância para políticas de saúde pública, pois eles fornecem subsídios para implantação de métodos mais eficazes e econômicos no tratamento da água para abastecimento ou mesmo no tratamento de efluentes de uma indústria ou de uma cidade, de forma que os usos à jusante não sejam comprometidos.

O Brasil é um país com grande riqueza hídrica, porém sua distribuição irregular ao longo do território aliada a um crescimento exagerado de demandas localizadas e a degradação da qualidade dos corpos d' água caracterizam quadros de escassez, que é agravado pela ausência de uma gestão quantitativa eficiente.

Quando se aborda a questão dos recursos hídricos não se pode deixar de fazer uma análise no âmbito da bacia hidrográfica, incluindo as água subsuperficiais. Esta unidade básica de estudo é fundamental para o bom entendimento de variações na qualidade da água, pois o meio físico, biológico e social contido nesse ambiente é que influencia os parâmetros qualitativos e quantitativos dos recursos hídricos, seja por meio do lançamento do esgoto de uma cidade, captação de água por um produtor rural, ou pela ausência de mata ciliar que acelera o processo de assoreamento do corpo d' água.

O ribeirão Claro, integrante da bacia do rio Corumbataí, se encontra em uma das regiões de maior crescimento econômico do país, decorrente do êxodo de muitas indústrias da capital para o interior na busca de incentivos fiscais e maior disponibilidade de recursos hídricos. Como consequência dos processos de industrialização, urbanização e expansão agrícola, impactos diretos são causados ao corpo d' água, uma vez que a geração de efluentes é diretamente proporcional a todo esse crescimento.

A cidade de Rio Claro tem 42% (ou 25.000 m³/dia) da sua demanda atendida pela água do ribeirão Claro e, após o ponto de captação, são lançados os efluentes domésticos de

74.168 dos seus habitantes, sem tratamento. Por outro lado, o município de Piracicaba (SP) tem no rio Corumbataí o seu manancial que, à montante, recebe as águas poluídas por efluente doméstico do ribeirão Claro. Para que a qualidade da água seja mantida e o atual sistema de tratamento da cidade de Piracicaba não fique obsoleto, é necessário que os parâmetros de qualidade da água do ribeirão Claro sejam monitorados e um estudo da capacidade de autodepuração deste corpo d'água seja realizado a fim de garantir que os efluentes lançados ou a captação por parte do Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE) de Rio Claro feitas à montante, não comprometam os usos à jusante, principalmente a qualidade da água fornecida à população piracicabana.

Nesse contexto, os modelos de simulação são ferramentas importantes que podem auxiliar em planos de ação de municípios inseridos na bacia, uma vez que por meio deles é possível estimar o comportamento de alguns parâmetros de qualidade da água ao longo do curso d'água. Isto é possível por meio de simulações de cenários que envolvem desde a variação de carga das fontes poluidoras até a concentração de certos poluentes, além da consideração de processos de atenuação natural do rio e outras intervenções humanas como, por exemplo, pontos de captação de água, barragens, estações de tratamento de esgotos, etc.

Tais simulações podem ser extremamente úteis em processos de licenciamento ambiental (gestão e planejamento) pois fornecem informações sobre o comportamento do meio sob as condições impostas pelo empreendimento sem que o mesmo ainda não esteja instalado, constituindo-se numa importante ferramenta para a avaliação de impactos ambientais. Os dados fornecidos por estes modelos podem ser utilizados como base para tomada de decisão quanto a restrições principalmente em relação ao lançamento de efluentes que prejudiquem usos à jusante como, por exemplo, uma cidade que capta água de um rio para abastecimento público, entre outros.

Segundo Rosman (2005) *apud* Bárbara (2006), os modelos matemáticos de simulação são ferramentas integradoras e simplificadoras sem as quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica dos processos que ocorrem em sistemas naturais. O emprego de modelos na gestão dos recursos hídricos apresenta diversas vantagens, de acordo com Porto e Azevedo (2002):

- os riscos ambientais são inexistentes na simulação, uma vez que não há necessidade de despejo de produtos perigosos no corpo d' água para avaliar seu impacto, como aconteceria se o estudo fosse feito *in loco*;
- modelos são ferramentas em que as simulações podem ser exploradas “gratuitamente”, sem ônus para o sistema simulado, porém exigem profissionais especializados , visitas a

- campo e equipamentos de medição para sua implementação;
- são ferramentas flexíveis, uma vez que permite a simulação de diversas alternativas que englobam desde a variação de parâmetros de qualidade, condições físicas do sistema até a locação de fontes poluidoras.

2. OBJETIVOS

O objetivo global deste trabalho é ajustar o modelo QUAL2K e simular cenários para um dado segmento do ribeirão Claro nas proximidades da cidade de Rio Claro. Para o cumprimento deste objetivo geral os seguintes objetivos específicos são propostos:

2.1. Objetivos Específicos

- Ajustar o modelo QUA2K a dados de qualidade da água e outros obtidos em determinados pontos do ribeirão Claro;
- Simular cenários nos quais haja variação das cargas poluidoras pelo aumento ou tratamento das mesmas de forma que seja possível visualizar os benefícios ou malefícios de certas medidas no comportamento do ribeirão Claro;
- Verificar o atendimento do trecho à Resolução CONAMA 357/2005;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1925, Streeter e Phelps desenvolveram as primeiras equações para simular o oxigênio dissolvido (OD) e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) de um rio após o lançamento de um efluente. Neste modelo o processo de decomposição da matéria orgânica e a reaeração obedecem às seguintes equações diferenciais de primeira ordem:

$$dL/dt = -K_1L$$

$$dD/dt = -K_2D$$

onde: D=déficit de oxigênio dissolvido (mg/L); K_1 =coeficiente de desoxigenação (dia^{-1}); K_2 =coeficiente de reaeração (dia^{-1}); L: Demanda bioquímica última de oxigênio (mg/L); t=tempo (dia).

Apesar de não considerar a demanda de oxigênio bentônica, a sedimentação da matéria orgânica, e a re-oxigenação oriunda da fotossíntese e só se aplicar à decomposição aeróbia, este modelo foi precursor de muitos outros usados atualmente.

Atualmente, existem diversos modelos capazes de realizar simulações em corpos d'água a partir de diversas variáveis e diferentes números de relações entre elas, dentre os quais: SIMCAT, SIMOX, TOMCAT, QUAL2E, QUASAR, MIKE-II, WASP, QUAL2K e ISIS.

Um dos modelos que vem sendo muito utilizado no gerenciamento de recursos hídricos em escala mundial é o QUAL2E, o qual foi aplicado por BÁRBARA (2006) ao rio Araguari (AP), verificando-se boa aplicabilidade desta ferramenta.

O modelo QUAL2K é uma versão mais completa do QUAL2E por considerar um número maior de variáveis e reações. As principais inovações do QUAL2K estão apresentadas a seguir:

- enquanto no QUAL2E o rio deve ser segmentado em trechos e elementos iguais, o QUAL2K permite que o espaçamento dos elementos seja de tamanhos diferentes, o que confere maior flexibilidade para a alocação de pontos de lançamento de efluente, fluxos de afluentes na corrente de estudo e captação de água;

- apresenta duas formas de expressar a DBO carbonácea para representar a matéria orgânica: DBO rápida (referente ao material usualmente na forma solúvel de constituição mais simples) e DBO de oxidação lenta (DBO do material usualmente particulado, constituído de moléculas mais complexas). Entretanto, ainda não há dados de referência para serem utilizados nas simulações que incluam estas duas formas de DBO;

- a desnitrificação é modelada como uma reação de primeira ordem que ocorre em baixas concentrações de oxigênio;

- a DBO sedimentar (DSO) e o fluxo de nutrientes são simulados como uma função da matéria orgânica particulada fixa, das reações com os sedimentos e da concentração de formas solúveis na água;

- o modelo explicita simulações de algas sedimentáveis, que possuem estequiometria variável;

- a extinção da luz é calculada em função das algas, dos detritos e dos sólidos inorgânicos;

- a alcalinidade e o carbono orgânico total são simulados, e o pH é calculado com base nestas duas variáveis;

- um patógeno genérico é simulado e sua remoção é determinada em função da

temperatura, luz e fixação;

- permite que sejam especificados muitos parâmetros cinéticos em um trecho específico.

3.1 Modelo QUAL2K

Basicamente, O QUAL2K é um modelo que simula a qualidade da água em rios, considerando basicamente processos de transporte, mistura, fontes e sumidouros. Originalmente os dados eram inseridos no programa Excel, mas com o intuito de agilizar os cálculos, a versão 2007 os efetua no FORTRAN 90 que, por meio de uma interface, retorna os resultados na forma de gráficos no programa EXCEL.

Neste modelo, para efeito de cálculo, o rio é dividido em trechos com características hidráulicas semelhantes (declividade, profundidade, seção transversal, rugosidade, etc), os quais por sua vez são divididos em elementos computacionais de igual comprimento (Figuras 1 e 2). Com isso, o rio é conceituado como sendo uma associação de reatores de mistura completa conectados em série via mecanismos de advecção e dispersão que, se somados, formam um trecho.

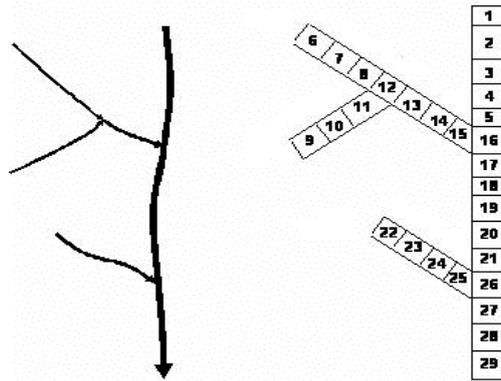


Figura 1: Sistema fluvial real e a representação esquemática segundo o modelo QUAL2K. (CHAPRA *et al*, 2006)

Após a divisão em trechos, estes são divididos em n elementos, como mostrado na Figura 2.

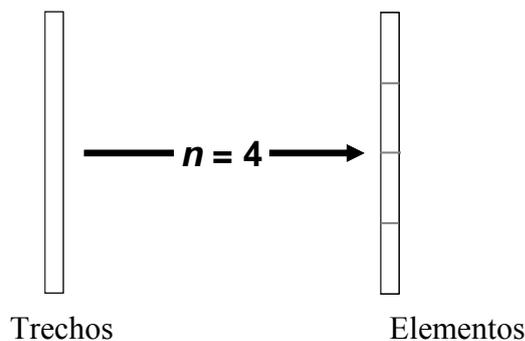


Figura 2: Relação entre trechos e elementos no QUAL2K (CHAPRA *et al*, 2006).

O trecho inicial a ser simulado é chamado de cabeceira e para que uma variável seja simulada é necessário que um dado amostral seja inserido no programa, caso contrário o mesmo não simulará o seu comportamento.

Os afluentes podem ser divididos em trechos assim como o rio principal (Figura 1), ou inseridos no programa como fontes pontuais.

O modelo QUAL2K permite o cômputo de múltiplos pontos de captação de água, lançamento de efluentes, tributários e até estruturas hidráulicas como represas. Além disso, fontes difusas também podem ser adicionas à simulação por meio de sua distribuição em linha ao longo de um trecho, como pode ser constatado na Figura 3.

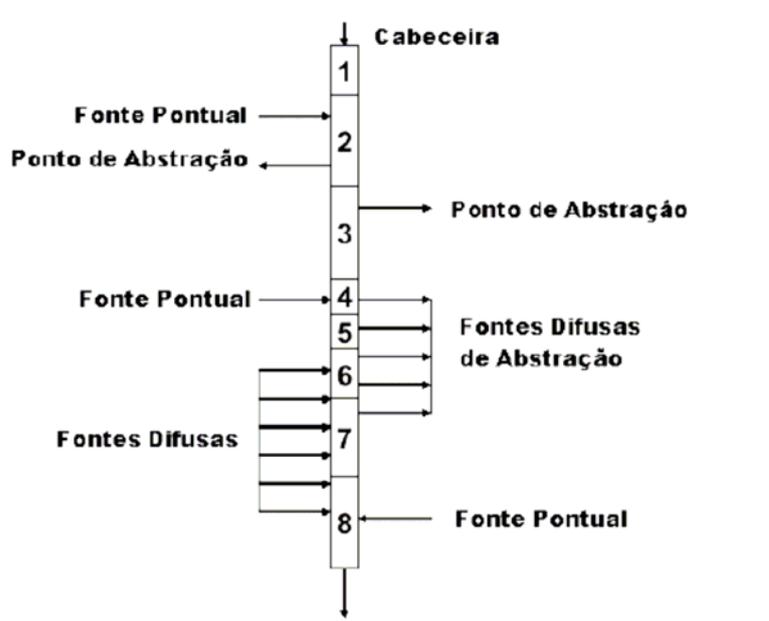


Figura 3: Representação de um corpo hídrico ausente de tributários (GONÇALVES & DIBIAZI, 2006).

O QUAL2K simula períodos de tempo em que, tanto a vazão do rio na bacia hidrográfica como suas entradas de cargas poluentes são consideradas constantes, isto é, simula regime hidráulico permanente (*“steady-state”*), permitindo avaliar a capacidade de assimilação de despejos poluentes pontuais ou difusas (SEFFRIN, 2001).

3.1.1. Balanço de Vazão

O balanço de vazão é feito em cada elemento computacional, conforme a seguinte equação:

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} + Q_{out,i}$$

onde: Q_i = vazão de saída do elemento i e de entrada no elemento $i+1$ (m^3/dia); Q_{i-1} = vazão de saída no elemento $i-1$ à montante (m^3/dia); $Q_{in,i}$ = vazão de entrada no elemento i por fontes pontuais e/ou difusas (m^3/dia); $Q_{out,i}$ = vazão de retirada do elemento i por fontes pontuais e/ou difusas (m^3/dia).

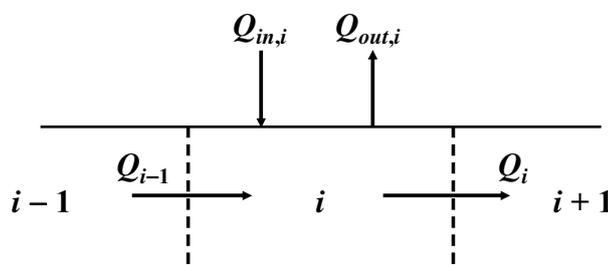


Figura 4: Balanço de vazão em um elemento i .

Cada elemento é idealizado como um canal de seção retangular com o intuito de simplificar o cálculo da vazão a partir da profundidade, conforme requer a equação de Manning:

$$Q = \frac{S_0^{1/2}}{n} \frac{A_c^{5/3}}{P^{2/3}}$$

onde: Q = vazão (m^3/s); S_0 = declividade (m/m); n = coeficiente de rugosidade de Manning; A_c = área da seção transversal (m^2); P = perímetro molhado (m).

3.1.2. Balanço de Massa

As variáveis simuladas pelo modelo QUAL2K estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Variáveis simuladas pelo modelo QUAL2K (CHAPRA *et al.* 2006).

Variáveis	Simbolo	Unidade
Condutividade	s	$\mu mhos$
Sólidos Suspensos Inorgânicos	m_i	mgD/L
Oxigênio Dissolvido	o	mgO_2/L
DBOC reação lenta	c_s	mgO_2/L
DBOC reação rápida	c_f	mgO_2/L
Nitrogênio Orgânico	n_o	$\mu gN/L$
Nitrogênio Amoniacal	n_a	$\mu gN/L$
Nitrato	n_n	$\mu gN/L$
Fósforo Orgânico	p_o	$\mu gP/L$
Fósforo Inorgânico	p_i	$\mu gP/L$
Fitoplâncton	a_p	$\mu gA/L$
Detritus	m_o	mgD/L
Patógenos	X	$Cfu/100mL$
Alcalinidade	Alk	$mgCaCO_3/L$
Carbono Inorgânico Total	c_T	$mole/L$
Biomassa de Algas de Fundo	a_b	mgA/m^2
Nitrogênio de Algas de Fundo	IN_b	mgN/m^2
Fósforo de Algas de Fundo	IP_b	mgP/m^2

Para cada um destes constituintes é aplicado o balanço de massa, exceto aqueles relacionados às algas de fundo, por meio de equações diferenciais que tentam retratar os processos que acontecem no ambiente fluvial, conforme esquematizado na Figura 5:

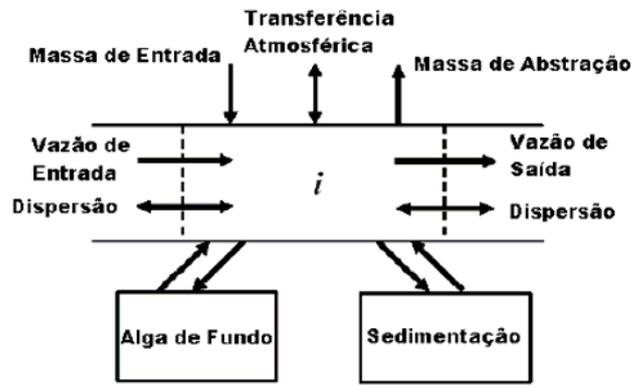


Figura 5: Balanço de massa (GONÇALVES & DIBIAZI, 2006).

A equação diferencial que expressa o balanço de massa para cada variável simulada nos elementos é a seguinte:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} c_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i} (c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i$$

onde: c_i : concentração da variável na saída do elemento i (mg/L); Q_{i-1} : vazão de saída do elemento $i-1$ e entrada no elemento i (m^3/d); V_i : volume do elemento i (m^3); c_{i-1} : concentração da variável na saída do elemento $i-1$ e de entrada no elemento i (mg/L); Q_i : vazão de saída do elemento i . $Q_{out,i}$: vazão de captação do elemento i (m^3/d); E'_{i-1} : coeficiente de dispersão longitudinal na saída do elemento $i-1$ e entrada do elemento i (m^2/d); E'_i : coeficiente de dispersão longitudinal na saída do elemento i (m^2/d); c_{i+1} : concentração da variável na saída do elemento $i+1$ (mg/L); W_i : carga externa introduzida por fontes difusas ou pontuais (mg/d); S_i : fontes externas e/ou sumidouros de constituintes devido a mecanismos de transferência de massa e reações ($g/(m^3.d)$).

As principais variáveis utilizadas na avaliação da situação de um corpo d'água quanto à poluição orgânica são: OD e DBO. A escolha da maioria dos autores em simular o comportamento destas duas variáveis se justifica pelas diversas interações que elas possuem com outras variáveis de qualidade de água ou hidráulicas (presença de barragens, alta declividade, etc).

3.1.3. DBO

A DBO é a quantidade de oxigênio dissolvido requerida pelos organismos presentes no meio aquático para oxidar/estabilizar a matéria orgânica existente em um efluente ou corpo d' água, ou seja, trata-se de uma medida indireta da quantidade de matéria orgânica presente na água que pode ser biologicamente estabilizada. Segundo LIMA (1997), a concentração de DBO depende de inúmeros fatores, dentre eles:

- efluentes lançados (fontes pontuais) e escoamento superficial (fontes difusas);
- volume de água retirado por captações;
- respiração e morte de algas;
- sedimentação e ressuspensão de matéria orgânica;
- produtos da digestão anaeróbia das camadas bentônicas.

O modelo QUAL2K considera como fontes de DBO, além daquelas poluidoras, a camada bentônica, a respiração e a morte de algas. Em contrapartida, a redução de DBO se dá pela desoxigenação da matéria orgânica carbonácea e pela sedimentação.

A equação que representa o comportamento da DBO (S_{cf}) é a seguinte:

$$S_{cf} = F_f r_{od} \text{ DetrDiss} + \text{SlowCHydr} - \text{FastCOxid} - r_{ondn} \text{ Denitr}$$

onde:

$$\text{SlowCHydr} = k_{hc}(T) c_s$$
$$\text{FastCOxid} = F_{oxc} k_{dc}(T) c_f$$
$$\text{Denitr} = (1 - F_{oxdn}) k_{dn}(T) n_n$$

S_{cf} : concentração de DBO carbonácea (mg/L); F_f : fração de dissolução dos detritos que se torna DBO rápida (adimensional); r_{od} : taxa de consumo de oxigênio para oxidação da fração dissolvida dos detritos (dia^{-1}); DetrDiss : concentração de detritos dissolvidos (mg/L); SlowCHydr : hidrólise da DBO lenta; $k_{hc}(T)$: taxa de hidrólise da DBO lenta, a qual é dependente da temperatura (dia^{-1}); c_s : concentração de DBO lenta (mg/L); FastCOxid : oxidação da DBO rápida; F_{oxc} : atenuação devido à baixa concentração de oxigênio (adimensional); $k_{dc}(T)$: taxa de decaimento da DBO rápida, a qual é dependente da

temperatura (dia^{-1}); r_{ondn} : taxa de consumo da DBO devido à desnitrificação (gO_2/mgN); F_{oxdn} : efeito da baixa concentração de oxigênio na desnitrificação (adimensional); $k_{dn}(T)$: taxa de desnitrificação do nitrato, a qual é dependente da temperatura (dia^{-1}); n_n : concentração de nitrato (mg/L).

3.1.4. OD

A quantidade de oxigênio dissolvido na água é influenciada por inúmeros fatores, dado que este gás é essencial nos processos de estabilização da matéria orgânica, como por exemplo, as reações de oxidação da amônia e do nitrito. Neste modelo, as fontes de oxigênio são a reaeração atmosférica e a fotossíntese realizada pelas algas.

Os sumidouros de oxigênio são: o consumo de oxigênio associado ao decaimento da DBO, a demanda de oxigênio pelos sedimentos, a oxidação da amônia e do nitrito e a respiração das algas.

A variação na concentração de OD é descrita pela seguinte equação diferencial:

$$S_o = r_{oa} \text{PhytoPhoto} + r_{od} \text{BotAlgPhoto} - r_{oc} \text{FastCOxid} - r_{on} \text{NH4Nitr} \\ - r_{oa} \text{PhytoResp} - r_{od} \text{BotAlgResp} + \text{OxReaer}$$

na qual:

$$\text{NH4Nitrif} = F_{oxna} k_n(T) n_a$$

$$\text{OxReaer} = k_a(T) (o_s(T, elev) - o)$$

onde: S_o : concentração de oxigênio dissolvido (mg/L); r_{oa} : quantidade de oxigênio necessária na conversão de íon amônio a nitrito (gO_2/gN) – vide item 3.1.5.4; PhytoPhoto : introdução de oxigênio pela fotossíntese do fitoplâncton; BotAlgPhoto : introdução de oxigênio pela fotossíntese das algas de fundo; r_{oc} : quantidade de O_2 necessária na oxidação do carbono (gO/gC); r_{on} : quantidade de oxigênio necessária na nitrificação do íon amônio (gO_2/gN); NH4Nitr : nitrificação da amônia; F_{oxna} : atenuação devido à baixa concentração de oxigênio (adimensional); $k_n(T)$: taxa de nitrificação do íon amônio, a qual é dependente da temperatura (dia^{-1}); n_a : concentração de íon amônio (mg/L); PhytoResp : consumo de oxigênio pela respiração do fitoplâncton; BotAlgResp : consumo de oxigênio pela respiração das algas de fundo; $k_a(T)$: coeficiente de reaeração atmosférica, o qual é dependente da temperatura (dia^{-1}); $o_s(T, elev)$ = concentração de saturação de oxigênio dissolvido, nas condições de temperatura T e elevação $elev$ locais (mg/L); o : concentração de oxigênio na massa líquida (mg/L).

A fotossíntese realizada pelas algas e a reaeração atmosférica são responsáveis por introduzir O₂ no meio aquático, sendo que o último processo é aquele que mais contribui quantitativamente.

3.1.4.1. Concentração de saturação do oxigênio

Lima (1997) reporta que a solubilidade do oxigênio nas condições normais de temperatura e pressão (27°C e 1 atm) é de 9,0 mg/L. Porém esse valor varia com a temperatura, sendo que essa dependência é expressa pela seguinte equação (Apha, 1992 apud Chapra, 2006):

$$\ln o_s(T, 0) = -139.34411 + \frac{1.575701 \times 10^5}{T_a} - \frac{6.642308 \times 10^7}{T_a^2} + \frac{1.243800 \times 10^{10}}{T_a^3} - \frac{8.621949 \times 10^{11}}{T_a^4}$$

onde: $O_s(T, 0)$ = concentração de saturação do oxigênio dissolvido em água doce ao nível do mar (elevação = 0) (mgO₂/L); T_a = temperatura absoluta (K).

As concentrações de saturação de OD podem variar de 14,6 mg/L a 0°C, até 7,6 mg/L a 30° C.

3.1.5. Parâmetros importantes nos balanços de OD e DBO

A matéria orgânica encontra-se sob duas formas nos corpos d' água: em suspensão ou dissolvida.

A DBO rápida expressa a quantidade de oxigênio necessária para a degradação da matéria orgânica dissolvida, que é realizada por organismos dispersos na massa líquida. A redução da DBO rápida acontece via oxidação e desnitrificação.

A DBO lenta representa a demanda de oxigênio para degradação da fração de matéria orgânica em suspensão (detritos) cuja redução ocorre por meio de hidrólise e posterior oxidação.

Entretanto, com a hidrólise da matéria orgânica e a dissolução dos detritos há aumento da DBO rápida, uma vez que ocorre acréscimo de matéria orgânica antes quantificada como

DBO lenta.

Os produtos gerados na degradação da matéria orgânica são moléculas simples, as quais são utilizadas por outras bactérias que por sua vez servem de alimento a organismos superiores.

3.1.5.1. Constante de decaimento da DBO (k_{dc})

Segundo Chapra (1997), a taxa específica de desoxigenação ou de decaimento da DBO obtida em laboratório (k_{dc}) possui valores típicos que variam de 0,05 a 0,5 dia⁻¹ de acordo com o nível de tratamento do efluente a ser lançado. Entretanto, o coeficiente de decomposição da DBO no rio (K_d), que leva em consideração a degradação da matéria orgânica pela biomassa suspensa e a contida no lodo de fundo, é maior ou igual a k_{dc} , como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2: Valores típicos dos coeficientes de remoção de DBO (k_{dc} e K_d) a 20°C (adaptado de VON SPERLING, 2007)

Curso d' água	k_{dc} (dia ⁻¹)	K_d (dia ⁻¹)	
		Rios rasos*	Rios profundos*
Recebendo esgoto bruto concentrado	0,35 – 0,45	0,50 – 1,00	0,35 – 0,50
Recebendo esgoto bruto de baixa concentração	0,30 – 0,40	0,40 – 0,80	0,30 – 0,45
Recebendo efluente primário	0,30 – 0,40	0,40 – 0,80	0,30 – 0,45
Recebendo efluente secundário	0,12 – 0,24	0,12 – 0,24	0,12 – 0,24
Com águas limpas	0,08 – 0,20	0,08 – 0,20	0,08 – 0,20

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

Thomann & Mueller (1987) *apud* Von Sperling (2007), sugerem as seguintes faixas para os valores de K_d , baseados na constatação de que rios mais rasos são mais influenciados pela biomassa presente nos sedimentos, a qual também contribui para a decomposição da DBO:

- rios com profundidade superior a 1,5 m: $K_d = 0,1$ a $0,5$ d⁻¹
- rios com profundidade inferior a 1,5 m: $K_d = 0,5$ a $3,0$ d⁻¹

3.1.5.2. Coeficiente de reaeração (k_a)

A reaeração atmosférica depende de algumas variáveis como a temperatura e algumas características do canal. A primeira influencia diretamente o coeficiente de solubilidade do oxigênio, e a segunda interfere no escoamento das águas, que por sua vez, quanto mais turbulento for, maior será a transferência de oxigênio à massa líquida.

De acordo com RODRIGUES (2005), o coeficiente de reaeração pode ser obtido por meio de fórmulas empíricas e semi-empíricas vinculadas a dados hidráulicos do sistema, ou por técnicas de medição, as quais requerem exaustivos trabalhos de campo e de laboratório, equipamentos e corpo técnico especializado.

No modelo QUAL2K estão disponíveis oito fórmulas empíricas para o cálculo de k_a (dia^{-1}) a 20 °C, cada uma com suas particularidades e condições de aplicação. Caso o usuário queira introduzir valores de k_a manualmente, basta especificá-lo para cada trecho na guia *Reach Rates*.

Uma das fórmulas disponíveis no modelo é a USGS (Pool Riffle) proposta por Melchin & Flores (1999) *apud* Chapra et al. (2005), que calcula k_a da seguinte forma:

$$k_{a(20^{\circ}\text{C})} = \frac{524,3 \cdot U^{0,606} \cdot S^{0,562}}{H^{0,698}}$$

onde: $k_{a(20^{\circ}\text{C})}$: constante de reaeração atmosférica (dia^{-1}); U : velocidade (m/s); S : declividade (m/m); H : profundidade (m).

As fórmulas para o cálculo de k_a são utilizadas para fornecer ao usuário uma estimativa inicial de tal parâmetro, de forma a possibilitar o ajuste do modelo com valores mais próximos do real.

3.1.5.3. Camada bentônica

Parte da matéria orgânica que sedimenta também necessita ser estabilizada e por isso a DBO dessa parcela é denominada demanda bentônica ou demanda de oxigênio do sedimento (DSO).

Em uma limitada espessura do lodo e na interface lodo-líquido, a decomposição é aeróbia, porém no interior das camadas de lodo o processo se torna anaeróbio, originando

substâncias como CO₂, CH₄, H₂S, e ácidos orgânicos que podem se difundir na massa líquida, exercendo novas demandas de oxigênio.

De acordo com o escoamento no corpo d' água em questão, tal camada pode ser revolvida e transportada, o que implica na mudança de diversas variáveis (inclusive DBO) tornando complexa a simulação do processo.

Neste trabalho não será levada em conta a influência da camada bentônica nas simulações.

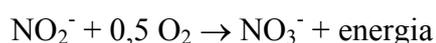
3.1.5.4. Nitrificação

A amônia existe em solução na forma não ionizada (NH₃) e na forma de íon amônio (NH₄⁺), segundo o equilíbrio:



Em pH < 8,0 , praticamente toda a amônia encontra-se na forma de NH₄⁺ (VON SPERLING, 2007).

A nitrificação consiste basicamente na oxidação da matéria orgânica nitrogenada, transformando a amônia em nitrito e, posteriormente, nitrato conforme as seguintes reações:



Esse processo é realizado por bactérias quimiossintetizantes que utilizam o gás carbônico como a principal fonte de carbono, sendo a energia proveniente da oxidação de um substrato inorgânico, no caso, a amônia.

Com base nos coeficientes estequiométricos das equações apresentadas, é possível calcular o consumo de oxigênio na nitrificação:

$$r_{oa} = \text{oxigênio necessário na conversão de amônio a nitrito} = 1,5(32)/14 = 3,43 \text{ gO}_2/\text{gN}$$

$$r_{oi} = \text{oxigênio necessário na conversão de nitrito a nitrato} = 0,5(32)/14 = 1,14 \text{ gO}_2/\text{gN}$$

O consumo total de oxigênio na nitrificação (r_{on}) pode ser obtido pela soma do oxigênio demandado nas duas etapas citadas, ou seja, 4,57 gO₂/gN. Este valor já consta no

default do programa QUAL2K, podendo ser visualizado na guia *Rates*.

A quantidade de O₂ necessário na etapa de nitrificação também é chamada de demanda nitrogenada ou demanda de segundo estágio, pois ocorre posteriormente às reações de desoxigenação carbonácea. Isto se deve ao fato das bactérias nitrificantes terem uma taxa de crescimento mais lenta que as bactérias heterotróficas (VON SPERLING, 2005).

A concentração de nitrato varia de acordo com a seguinte equação:

$$S_{ni} = \text{NH4Nitrif} - \text{Denitr} - r_{na}(1 - P_{ap}) \text{PhytoPhoto} \\ - (1 - P_{ab}) \text{BotAlgUptakeN}$$

onde:

S_{ni} : concentração de nitrato (mg/L); P_{ab} : preferência pelo íon amônio como fonte de nitrogênio pelas algas de fundo (adimensional); P_{ap} : preferência pelo íon amônio; BotAlgUptakeN: taxa de ressuspensão para o nitrogênio nas algas de fundo (mgN/m²/d).

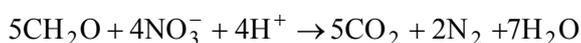
Muitos modelos consideram que a nitrificação ocorra em apenas uma etapa, ou seja, amônia é convertida diretamente a nitrato. Dessa forma, apenas é considerado no modelo o coeficiente de oxidação do íon amônio. A Tabela 3 mostra os valores usuais dos coeficientes utilizados na modelagem de nitrogênio em rios.

Tabela 3: Valores usuais de coeficientes utilizados na modelagem de nitrogênio em rios (adaptado de VON SPERLING, 2007)

Símbolo no QUAL2K	Símbolo na equação	Descrição	Valores usuais do coeficiente (20°)
k_{na}	k_n	Coeficiente de conversão de amônia em nitrato	- Cursos d' água profundos: 0,10 – 0,50 d ⁻¹ - Cursos d' água rasos: 0,20 – 1,00 d ⁻¹ ou mais

Segundo Thomann e Mueller (1987) *apud* Von Sperling (2007), os valores de k_{na} são similares aos do coeficiente K_d .

O modelo QUAL2K também inclui o processo de desnitrificação, que em condições anóxicas, consome nitrato liberando nitrogênio gasoso conforme a seguinte reação:



É importante notar que na desnitrificação há redução na concentração de nitrato e DBO, esta última devido ao consumo de carbono.

3.1.5.6. Efeito da Temperatura nas reações

A influência da temperatura em todas as reações de primeira ordem do modelo é dada pela seguinte equação:

$$k(T) = k(20)\theta^{T-20}$$

onde: $k(T)$ = constante cinética da reação à temperatura T (dia^{-1}); $k(20)$ = constante cinética da reação à temperatura de 20°C; θ = coeficiente de temperatura para a reação (adimensional).

3.1.5.7. Constantes

Na seção *Rates* da planilha em Excel, o modelo exige que a estequiometria das reações que envolvem a decomposição da matéria orgânica seja especificada pelo usuário, sendo que estes valores são utilizados globalmente em todos os cálculos do programa.

Os coeficientes da guia *Rates* são utilizados quando não há preenchimento ou o valor dos mesmos é nulo na guia *Reach Rates*, na qual é possível especificá-los para cada trecho.

Tabela 4: Constantes globais utilizadas no modelo (GONÇALVES & DIBIAZI, 2006)

Parâmetros	Valor	Símbolo
Estequiometria:		
Carbono	40	gC
Nitrogênio	7.2	gN
Fósforo	1	gP
Peso seco	100	gD
Clorofila	1	gA
Oxigênio:		
Modelo de reaeração	O'Connor-Dobbins	
Temperatura de correção	1,024	q_i
Efeito do vento na reaeração	None	
Consumo de O ₂ pela oxidação carbonacea	2,69	r_{oc}
Modelo de inibição de O ₂ para oxidação da DBO	Exponencial	
Parâmetro de inibição de O ₂ para oxidação da DBO	0,60	K_{secf}
DBO lenta:		
Taxa de oxidação	0	k_{des}
Temperatura de correção	1,047	q_{des}
DBO rápida:		
Taxa de oxidação	10	k_{dr}
Temperatura de correção	1,047	q_{dr}

3.1.6. Aplicações do Modelo QUAL2K

GONÇALVES & DIBIAZI (2006) aplicaram o referido modelo ao córrego São Simão (São Simão – SP) e constataram um bom ajuste do modelo aos dados experimentais de OD e DBO.

PARK & LEE (2001) aplicaram e compararam os modelos QUAL2K e QUAL2E no Rio Nankdong (Coréia), e comprovaram significativas discrepâncias entre os valores fornecidos pelos dois modelos para as variáveis DBO, OD e nitrogênio total. Além disso, os valores fornecidos pelo QUAL2K se aproximaram mais da realidade (dados de campo) devido à sua capacidade de simular: (i) a morte das algas que influi diretamente na DBO; (ii) a mudança na concentração de oxigênio dissolvido devido ao consumo pelas plantas fixas; (iii) a desnitrificação, que ocorre em condições anóxicas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Levantamento Bibliográfico

Para compreender o funcionamento do modelo QUAL2K, foram consultadas referências bibliográficas pertinentes tanto a este modelo quanto ao modelo QUAL2E.

Os pontos de captação de água e lançamento de efluentes, bem como suas vazões e características físico-químicas foram obtidas junto ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) de Rio Claro e Piracicaba, por meio de consulta aos processos de outorga localizados no trecho simulado.

4.2. Caracterização do Ribeirão Claro

O segmento a ser simulado foi escolhido com o intuito de avaliar a magnitude das alterações nos parâmetros de qualidade da água decorrentes de lançamentos de efluentes industriais e domésticos da cidade de Rio Claro. No Apêndice II é possível visualizar o segmento do ribeirão Claro considerado na simulação.

A divisão do corpo d' água em trechos foi feita com base em imagens de satélite (*Google Earth*) e por mapas na escala 1:10.000. Por meio destes últimos, calculou-se a declividade que forneceu subsídios para uma nova divisão do rio em trechos, agrupando extensões com características semelhantes.

As medições de largura e profundidade foram realizadas em 14 pontos ao longo do

ribeirão, sendo que um primeiro conjunto de medidas foi realizado com uma trena e um segundo com um tubo de PVC graduado.

Em quatro pontos (Q1, Q2, Q3 e Q4) foram realizadas medições de vazão com um molinete hidrométrico, a fim de comparar os cálculos de vazão realizados pelo modelo e os dados reais.

4.3. Análises físico-químicas das amostras de água

As amostras foram coletadas em seis pontos do ribeirão Claro, conforme descrito na Tabela 5.

O ponto P1 foi escolhido para que fosse possível conhecer o valor inicial das variáveis. Este ponto situa-se em uma fazenda à montante da cidade de Rio Claro.

No ponto P2, o Ribeirão Claro ainda não recebeu lançamento de esgoto doméstico, pois à jusante deste, há o ponto de captação de água para abastecimento público.

Nos pontos P3, P4, P5 e P6 o corpo d' água já recebeu lançamento de esgoto doméstico, o que torna possível a comparação entre as variáveis de qualidade à montante e à jusante dos lançamentos.

Tabela 5: Pontos de coleta de amostra de água no ribeirão Claro

Ponto	Coordenadas UTM		Descrição
	N (Km)	E (Km)	
P1	7.525,354	241,26	Início do trecho a ser simulado. À montante da rodovia Rio Claro - Araras
P2	7.523,04	239,044	Próximo à ponte da antiga estrada Araras – Rio Claro
P3	7.519,293	238,059	Após a barragem de captação de água do DAAE. Na ponte que liga a administração ao museu da Floresta Estadual Edmundo Navarro de Andrade.
P4	7.515,067	236,721	Na ponte da rodovia Washington Luís (SP-310).
P5	7.513,856	235,784	Fazenda próxima ao Clube de Campo
P6	7.511,340	233,309	Foz do ribeirão Claro (Usina do Corumbataí).

Foi realizada uma campanha de amostragem na época de estiagem (27/08/2008). Após as coletas, as amostras foram conservadas em banho de gelo e encaminhadas ao laboratório do Departamento de Bioquímica da UNESP, campus de Rio Claro.

Todas as análises foram realizadas pelo Departamento de Bioquímica da UNESP, campus de Rio Claro que, quinzenalmente, analisa a qualidade de água da refinaria da Petrobrás em Paulínia (SP). Os procedimentos analíticos seguiram as diretrizes preconizadas pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

4.4. Inserção de dados no modelo

4.4.1. Inserção dos dados na cabeceira (início da simulação)

Na guia *Headwater* da planilha de Excel pertencente ao modelo, deve-se introduzir as condições iniciais do segmento a ser simulado, como: vazão, altitude e parâmetros de qualidade da água. A profundidade e a velocidade são calculadas de três formas pelo programa: barragens, curvas de velocidade e equação de Manning. No presente trabalho optou-se pelo último método, o qual exige como dados de entrada a declividade do canal, a largura e o coeficiente de Manning.

4.4.2. Inserção dos afluentes na simulação

No trecho simulado os principais afluentes do ribeirão Claro são: na margem esquerda, os córregos Cachoeirinha e Vila Cristina; na margem direita, os córregos Santo Antônio, Santa Gertrudes e o da Fazenda Itaqui. Como não foi possível realizar uma medição de vazão, tampouco da qualidade de água dos tributários, todos foram considerados como fontes pontuais no modelo, ou seja, pontos de lançamento de água com vazões de 90% de permanência (Q_{90}), as quais foram obtidas por regionalização hidrológica no site do Sistema de Informação para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (<http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/regnet.exe/calcutm#r>).

Os parâmetros de qualidade da água dos afluentes foram obtidos por meio de levantamento bibliográfico (vide Tabela 10).

4.4.3. Inserção dos pontos de lançamento de esgoto doméstico (LED)

Segundo o DAAE de Rio Claro, há 6 pontos de lançamento de esgoto doméstico bruto no ribeirão Claro, cujas coordenadas foram utilizadas para localização dos pontos de

lançamento no Apêndice II, além do cálculo da distância destas até a foz, com o auxílio do *software AutoCAD Map*. Cabe ressaltar que todos os lançamentos situam-se à jusante da barragem de captação de água para abastecimento público.

Para o cálculo da vazão média de lançamento de esgoto doméstico, utilizou-se a seguinte equação:

$$Q_d = \text{Pop} \cdot \text{QPC} \cdot \text{R} / 1000$$

onde: Q_d = vazão média de lançamento de esgoto doméstico (m^3/dia); Pop= número de habitantes (hab); QPC = quota per capita de água (L/hab.dia); R = coeficiente de retorno esgoto/água

O dado referente ao número de habitantes que tem seus efluentes destinados ao ribeirão Claro foi fornecido pelo DAAE, assim como o coeficiente de retorno.

4.4.4. Inserção dos dados amostrais

Os dados oriundos da análise da qualidade da água ou aqueles de medições hidráulicas obtidos em campo foram introduzidos nas guias *WQ Data* e *Hydraulic Data*, respectivamente. Para que eles fossem visualizados nos gráficos gerados, foi necessário informar a localização (distância até a foz) de onde foram obtidos, além de qual cabeceira essa distância se referia. Cabe ressaltar que todos os números tiveram que ser separados por pontos, caso contrário não apareceriam nos gráficos gerados pelo programa.

5. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O ribeirão Claro nasce a uma altitude aproximada de 780 metros e desemboca no rio Corumbataí a uma cota de 500 metros. Ambos os corpos d' água pertencem à bacia do rio Piracicaba, que por sua vez situa-se na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) de nº 5 na porção central do Estado de São Paulo (Figura 6).

A bacia do ribeirão Claro apresenta 13,98 km de largura por 34,04 Km de comprimento, perfazendo uma área de 270 km^2 dentro dos municípios de Corumbataí, Rio Claro, Araras e Santa Gertrudes.

O ribeirão possui como afluentes, no seu alto curso, os córregos Jacu e o da Fazenda Angélica, ambos à margem direita. No médio curso, na margem esquerda, recebe água dos córregos Cachoeirinha e Vila Cristina, além dos córregos Ibitinga e Santo Antônio na margem direita. Por fim, no baixo curso, os córregos do Barreiro e o da Fazenda Itaqui desembocam no ribeirão Claro, que por sua vez, tem sua foz no rio Corumbataí (Apêndice I).

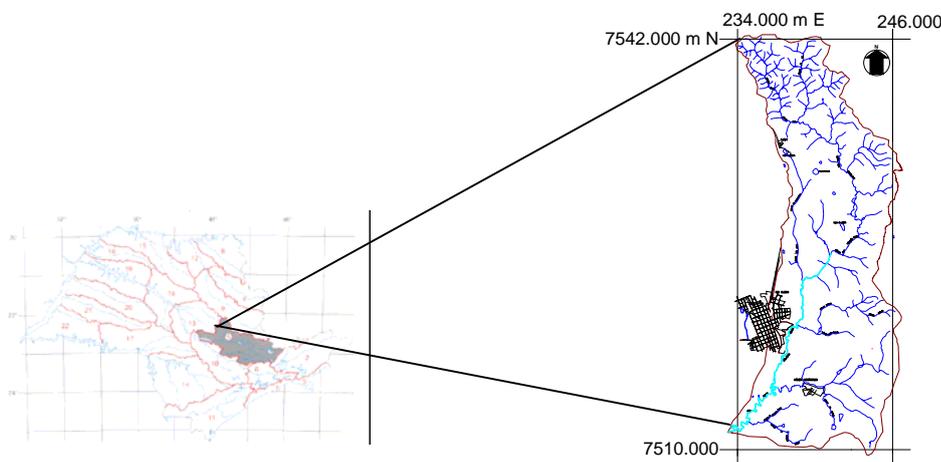


Figura 6: Bacia do ribeirão Claro na UGRHI nº 5 do Estado de São Paulo.

O ribeirão Claro nasce na zona rural de Corumbataí, atravessa áreas rurais com pastagem e cultivo de cana, a Floresta Estadual Edmundo Navarro de Andrade (FEENA) e a parte leste da zona urbana de Rio Claro, onde recebe efluentes domésticos e industriais. Por outro lado, há diversos pontos de captação neste mesmo curso d' água com a finalidade de irrigação e até mesmo de abastecimento público, como é realizado pelo DAAE, que possui uma barragem no curso do ribeirão para atender 74.168 habitantes, ou 40,3% da população rioclarense.

5.1. Uso e Ocupação do Solo

Por meio da análise de fotografias aéreas, CUNHA (2000) elaborou um mapa de uso e ocupação da bacia do ribeirão Claro, no qual constatou boa conservação de matas ciliares à montante e médio curso, onde localizam-se a mata natural da Fazenda São José e a FEENA. Entretanto, do médio curso à jusante, verificou a influência da ampliação das áreas urbanas (Jardim Conduta, Bairro Mãe Preta e Vila Cristina) na degradação das áreas de mata ciliar.

Em toda a bacia é predominante o cultivo de cana-de-açúcar, seguido de culturas perenes e silvicultura em grande parte representada pela FEENA. Ademais, é notória a presença de pastagens e áreas urbanas desocupadas às margens dos afluentes do referido ribeirão na porção sul-sudeste da bacia hidrográfica.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1.Divisão do ribeirão Claro em trechos

O ribeirão Claro foi dividido em 14 trechos conforme indicado na Tabela 6.

Tabela 6: Divisão em trechos do segmento do ribeirão Claro a ser simulado

Trecho	Distância da Foz (km)		Características do fluxo/leito
	Montante	Jusante	
1	28,282	26,132	Velocidade média com leito uniforme
2	26,132	20,235	Velocidade média com leito uniforme
3	20,235	19,456	Velocidade baixa com leito uniforme
4	19,456	18,386	Muito lento (represado) com leito uniforme
5	18,386	16,197	Velocidade média com leito uniforme
6	16,197	15,511	Turbulento com leito rochoso
7	15,511	13,489	Velocidade média com leito uniforme
8	13,489	9,381	Velocidade média com leito uniforme
9	9,381	5,310	Turbulento com leito rochoso
10	5,310	2,46	Velocidade baixa com leito rochoso
11	2,46	1,521	Velocidade baixa com leito uniforme
12	1,521	1,023	Muito Lento (represado) com leito uniforme
13	1,023	0,0	Muito turbulento com leito rochoso

6.2.Inserção dos pontos de captação e lançamento

A Tabela 7 mostra as captações e os lançamentos de efluentes obtidas junto ao DAEE.

Tabela 7: Captações e lançamentos no trecho da simulado do ribeirão Claro (Fonte: DAEE).

Empresa	Atividade	Coordenadas UTM		Vazão Captada (m ³ /h)	Vazão Lançada (m ³ /h)	DBO _{5,20} (mg/L)
		N (km)	E (Km)			
DAAE	Abastecimento público de água	238,50	7.519,67	1.440	-	-
Biscoitos Gudy	Fabricação de bolachas	236,94	7.516,05	-	7,25	300

É importante ressaltar que a DBO_{5,20} expressa a quantidade de oxigênio consumida pelos microrganismos durante 5 dias. Para o ajuste do modelo e simulação de cenários, é necessária a utilização da DBO última que reflete de forma mais próxima a quantidade de O₂ necessária à completa estabilização da matéria orgânica. Segundo Von Sperling (2005), muitos autores utilizam a seguinte equação para converter DBO_{5,20} em DBO última (DBO_u):

$$DBO_u = 1,46 \times DBO_{5,20}$$

Portanto a DBO_u referente ao lançamento da empresa Biscoitos Gudy é de 438,0 mg/L.

6.2.1. Estimativa do lançamento de esgoto doméstico

A população que tem seus efluentes destinados ao ribeirão Claro é de 85.600 habitantes, segundo levantamento realizado pela empresa Saneamento de Rio Claro S.A. em fevereiro de 2008. O coeficiente de retorno usualmente adotado é de 0,8, enquanto a quota per capita de água foi de 200 L/(hab.dia), correspondente a uma cidade média, como é o caso de Rio Claro.

Portanto, o cálculo da vazão média de lançamento de efluente doméstico no Ribeirão Claro é feito da seguinte forma, de acordo com a equação apresentada no item 3.4.3:

$$Q = 85.600 \times 200 \times 0,8 / 1000 = 13.696 \text{ m}^3/\text{dia} \text{ ou } 570,67 \text{ m}^3/\text{h}$$

A vazão média calculada foi dividida em seis pontos de lançamento com valores iguais cujas coordenadas foram fornecidas pelo DAAE (Tabela 8).

Os parâmetros físico-químicos do esgoto doméstico lançado no ribeirão Claro foram fornecidos pela empresa Saneamento de Rio Claro S.A (Tabela 8), a qual opera a Estação de

Tratamento de Efluentes (ETE) Jardim das Flores. Tais parâmetros foram inseridos no modelo para a realização da simulação.

Tabela 8: Pontos de lançamento de esgoto no ribeirão Claro e seus parâmetros físico-químicos (FONTE: DAAE e Saneamento de Rio Claro S.A.)

Pontos	Coordenada UTM		Vazão (m ³ /h)	Parâmetros físico-químicos						
	N (Km)	E (Km)		DBO (mg/L)	OD (mg/L)	Cond. (µS/cm)	Temp. (°C)	pH	NH ₄ ⁺ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
LED 1	238,60	7.519,42	95,11	374,0	0,0	819,0	21,7	7,4	38,0	3,58
LED 2	237,87	7.518,36								
LED 3	237,85	7.518,17								
LED 4	237,69	7.517,36								
LED 5	237,23	7.516,63								
LED 6	236,83	7.515,55								

Como citado anteriormente, a DBO introduzida na simulação foi a DBO última, cujo valor foi de 546,04 mg/L.

Os pontos de lançamento de efluente no ribeirão Claro podem ser visualizados no Apêndice II.

6.2.2. Inserção dos afluentes do ribeirão Claro no modelo

A Tabela 9 apresenta os principais tributários do ribeirão Claro e suas respectivas características.

No ajuste do modelo e simulação de cenários, foi considerada a vazão Q₉₀, ou seja, 90% das vazões são iguais ou superiores a esse valor de vazão.

Tabela 9: Vazão com 90% de permanência (Q₉₀) e valores de OD e DBO nos tributários

Corpo d' água	Área da bacia de contribuição	Q ₉₀ (m ³ /s)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)
---------------	----------------------------------	--	--------------	---------------

	(Km ²)			
Afluente sem nome (leste)	9,48	0,044	7,3*	1,53*
Córrego Mãe Preta	17,13	0,081	6,5*	1,45*
Córrego Santo Antônio	25,59	0,120	7,45*	2,12*
Córrego Santa Gertrudes	51,96	0,245	7,23***	1,93***
Córrego da Fazenda Itaqui	13,60	0,065	6,5**	2,00**

Fonte : *CUNHA (2000); **Valor adotado; *** Média dos valores obtidos no dia 11/09/2006 nos três postos de monitoramento da CETESB no córrego Santa Gertrudes (2006).

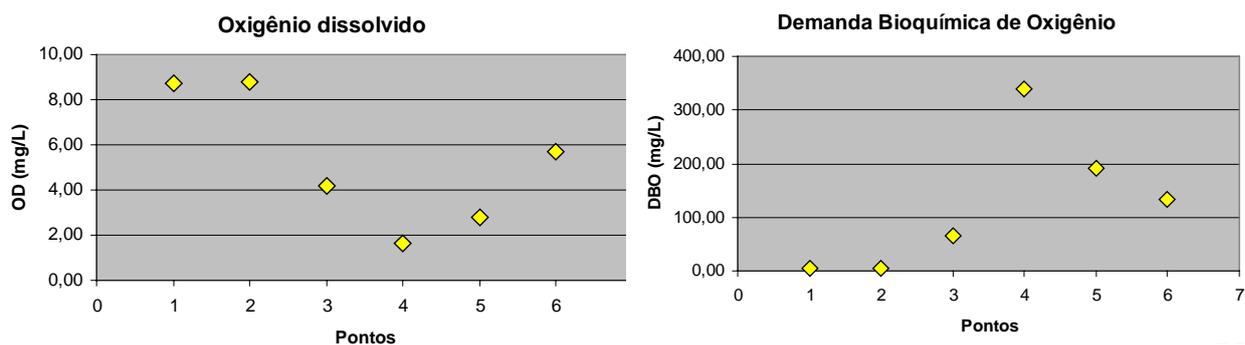
6.3. Análises físico-químicas das amostras de água

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados da campanha de amostragem realizada.

Tabela 10: Resultados das análises físico-químicas realizadas em 27/08/2008

Variável	P1	P2	P3	P4	P5	P6
OD (mg/L)	8,74	8,79	4,20	1,65	2,81	5,72
DBO _{5,20} (mg/L)	5,8	5,1	66,1	340,0	192,0	133,0
Temperatura	18,2	18,8	21,5	21,2	21	20,4
Amônia (µg/mL)	0,285	0,93	7,86	15,51	12,26	11,88
Nitrito (µg/mL)	0,0	0,0	0,0022	0,0236	0,0137	0,0
Nitrato (µg/mL)	0,0	0,0	0,0	0,7684	0,0-	0,5326
Condutividade (µS/cm)	58,6	46	150,3	766	564	476
pH	7,21	7,03	7,02	7,03	7,23	7,48

Na Figura 7 estão apresentados alguns dados da Tabela 10 na forma de gráficos.



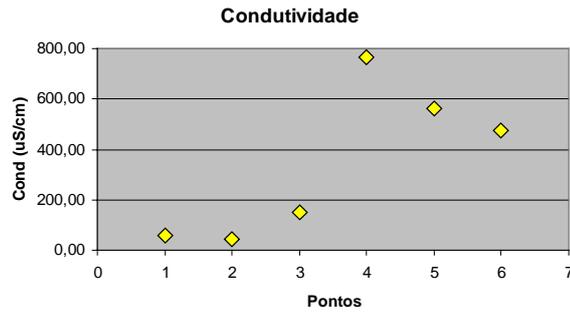


Figura 7: Comportamento de OD, DBO e condutividade ao longo dos pontos de amostragem.

Os pontos P1 e P2 localizam-se à montante do ponto de captação de água do DAAE e a sua boa qualidade em relação aos parâmetros analisados se deve a um recalque do efluente doméstico gerado nos bairros: Mãe Preta, Vila Industrial, São Miguel, Bandeirantes, Jardim América, Arco-Íris, Vila Verde, Village e Jardim Parque Residencial. A tubulação com efluente passa pela FEENA e o lança logo após a barragem de captação do DAAE (Foto 4 – Apêndice III).

É notável o impacto degradante dos diversos pontos de lançamento de esgoto doméstico sobre a qualidade da água do ribeirão Claro, o que pode ser constatado pela redução significativa da variável OD nos pontos P3 e P4, e um grande aumento nas variáveis DBO e condutividade também a partir do ponto P3 (Figura 7).

Com relação ao OD, a DBO e a condutividade, o ponto P4 é aquele que apresenta valores mais críticos pelo fato de estar próximo ao ponto de lançamento de esgoto doméstico LED 6 (vide Apêndice II). A turbulência, a redução no lançamento de efluentes e a contribuição de vazão dos tributários proporcionam uma melhora destes parâmetros à jusante, ou seja, aumento de OD e redução da DBO e da condutividade.

6.4. Pontos de medição de vazão

Os dados resultantes das medições da vazão com molinete hidrométrico são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros hidráulicos das medições realizadas com molinete hidrométrico.

Ponto [#]	Largura (m)	Profundidade média (m)	Velocidade (m/s)	Vazão (m ³ /s)
Q1	5,71	0,17	0,231	0,22
Q2	6,00	0,14	0,534	0,45
Q3	4,20	0,29	0,207	0,25
Q4	6,20	0,19	0,492	0,57

[#]os pontos citados podem ser visualizados no Apêndice II.

As planilhas de campo utilizadas para o cálculo das vazões se encontram no Apêndice IV.

Conforme Von Sperling (2005), a vazão observada é aquela que deve ser utilizada quando se deseja ajustar os coeficientes do modelo de forma que os dados simulados sejam os mais próximos possíveis dos observados (medidos). Dessa forma, a vazão obtida no ponto Q1 foi adotada para o ajuste do modelo e as vazões medidas nos demais pontos foram utilizadas para comparação com os valores calculados pelo modelo.

6.5. Pontos de medição de largura e profundidade

Ao todo foram visitados 14 pontos de caracterização ao longo do ribeirão Claro com a finalidade de medir a profundidade e a largura deste corpo d' água. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 12.

Nos trechos em que houve medição com molinete hidrométrico e pontos de caracterização, foram adotadas as medidas obtidas pelo primeiro método. Nos trechos em que houve dois ou mais pontos de caracterização, os dados médios foram inseridos no modelo, ou seja, a média dos dados de largura e profundidade em cada ponto.

Tabela 12: Dados de profundidade e largura medidos em campo

Ponto	Largura (m)	Profundidade (m)	Ponto	Largura (m)	Profundidade (m)
C2	4,00	0,36	C9	8,5	0,25
C3	6,00	0,14	C10	9,4	0,75

C4	6,45	0,4	C17	6,00	0,33
C5	10,1	0,85	C18	7,20	0,35
C6	4,7	0,68	C19	6,00	0,7
C7	4,7	0,35	C20	6,2	0,19
C8	4,5	0,65	Foz	10,0	0,5

6.6. Análise de Sensibilidade Paramétrica

Preliminarmente ao ajuste do modelo, procedeu-se à análise de sensibilidade paramétrica para identificar quais os parâmetros que mais influenciam em uma determinada variável e, dessa forma, indicar quais deles merecem maior atenção em suas estimativas para que o ajuste do modelo seja o melhor possível. Para isso foram realizadas perturbações em cada um dos parâmetros e observados os efeitos destas nas variáveis do modelo, no caso OD e DBO.

Inicialmente foram fixados valores de referência para os parâmetros e em seguida foram efetuadas perturbações de +10, +50 e +100% em alguns desses parâmetros, observando-se o comportamento das variáveis de saída do modelo (OD e DBO).

Os parâmetros perturbados foram: coeficiente de reaeração (k_a), constante específica da oxidação da DBO rápida (k_{dc}), vazão (Q_c) e temperatura na cabeceira (T_c). Os dois primeiros parâmetros foram escolhidos por meio da análise das equações diferenciais que descrevem o comportamento do OD e da DBO no modelo, enquanto que os outros dois foram incluídos devido à análise de sensibilidade realizada por BARBARA (2006) que também os considerou. Como não se levou em conta a influência das algas e da camada bentônica, os parâmetros r_{od} , k_{hc} e os termos, *PhytoPhoto*, *BotAlgPhoto*, *PhytoResp* e *DetrDiss* não foram incluídos na análise de sensibilidade e seus valores foram considerados nulos na simulação.

Para avaliar os efeitos de tais perturbações no comportamento das variáveis do modelo, utilizou-se a seguinte equação:

$$S = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{\hat{Y}_i} \right) \times 100\%$$

onde: S = sensibilidade paramétrica; \hat{Y}_i = valor da variável no estado de referência; Y_i = valor da variável no estado perturbado.

6.6.1. Sensibilidade ao coeficiente de desoxigenação ou de decaimento da DBO (k_{dc})

Observa-se que com o aumento de k_{dc} , há redução na concentração de DBO, pois seu decaimento é maior. O OD também diminui, uma vez que para a degradação de uma maior quantidade de matéria orgânica o consumo de oxigênio torna-se maior.

6.6.2. Sensibilidade ao coeficiente de reaeração (k_a)

Nota-se que o OD aumenta com o aumento do coeficiente de reaeração, porém a degradação da DBO é pouco influenciada por este parâmetro, indicando que, em tais condições, a remoção de DBO não está sendo limitada pelo suprimento de oxigênio, mas por um outro fator.

6.6.3. Vazão na cabeceira (Q_c)

Conforme se observa na Figura 8, o aumento de Q_c pouco influencia a concentração de OD, mas por outro lado acarreta significativa redução na concentração de DBO devido à diluição dos poluentes presentes e/ou lançados no corpo d' água.

6.6.4. Temperatura na cabeceira (T_c)

Com o aumento da temperatura há redução na solubilidade do OD e, conseqüentemente, a concentração de OD diminui. Além disso, com a elevação da temperatura, a degradação da matéria orgânica torna-se mais intensa e, embora a reaeração contribua para um aumento da concentração de OD, este aumento não é suficiente para superar o decréscimo causado pela maior velocidade de degradação.

6.6.5. Taxa específica de oxidação da amônia (k_n)

Há redução de OD pelo fato da oxidação da amônia consumir oxigênio. Quanto à DBO, a redução é explicada pelo fato de parte da matéria orgânica ser inicialmente convertida em NH_3 e NH_4^+ .

6.6.6. Coeficiente de desnitrificação (D)

Este parâmetro não influencia a concentração de OD porque a desnitrificação não envolve O_2 . Neste processo há consumo de matéria orgânica e, por esse motivo, ocorre redução de DBO.

A Figura 8 mostra os valores de sensibilidade paramétrica das variáveis OD e DBO para perturbações de 10, 50 e 100% nos valores de referência de alguns parâmetros.

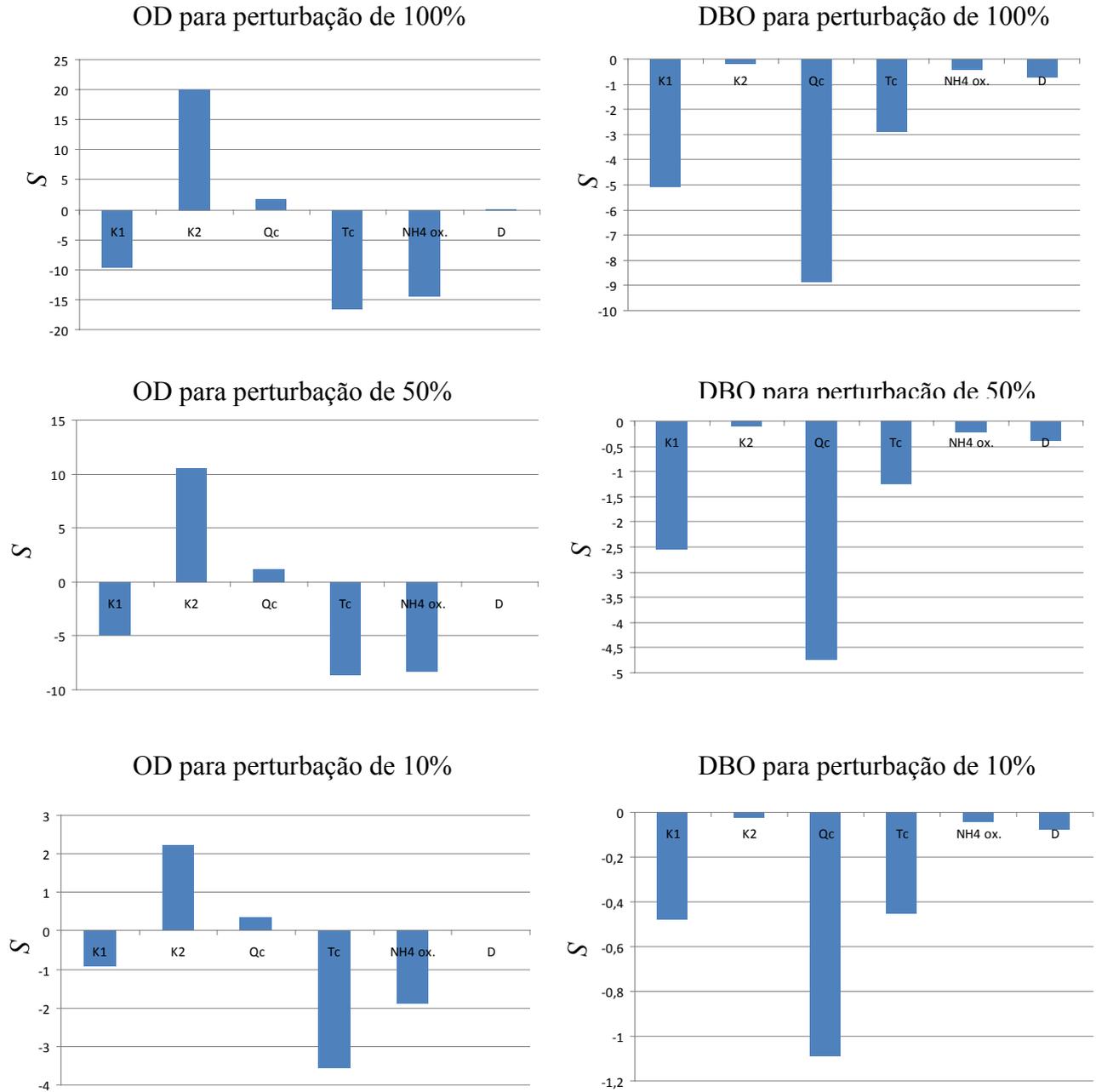


Figura 8: Sensibilidade paramétrica para diferentes níveis de perturbação nos valores de referência dos parâmetros.

Portanto conclui-se que para a variável OD, os parâmetros mais influentes são k_a , T_c , k_n e k_{dc} , enquanto que para a variável DBO os parâmetros que mais influenciam são Q_c , k_{dc} e T_c .

Como os parâmetros T_c e Q_c são medidos em campo, o ajuste do modelo foi realizado variando-se os valores dos coeficientes k_{dc} , k_a e k_n .

6.7. Ajuste do modelo

O ajuste consiste em variar os coeficientes do modelo de forma a se obter a melhor concordância possível entre os valores calculados pelo modelo e os dados coletados (CHAPRA, 1997).

No presente trabalho, o ajuste do modelo foi feito privilegiando-se as variáveis OD e DBO. Conforme observado na análise de sensibilidade, estas variáveis são mais sensíveis aos coeficientes k_a , k_n e Q_c , e k_d . Por isso, o ajuste foi realizado variando-se os valores destes coeficientes na guia *Reach Rates* do modelo QUAL2K, de forma que as diferenças entre os valores medidos de OD e DBO e aqueles estimados pelo modelo fossem as menores possíveis.

Para o ajuste do modelo, a vazão na cabeceira da simulação foi medida em campo, enquanto que para os afluentes foram adotadas as vazões Q_{90} , e a vazão de captação de água pelo DAAE foi mudada de 0,44 m³/s para 0,40 m³/s, para que os valores de vazão calculados pelo modelo ficassem mais próximos dos dados de campo. Cabe ressaltar que é essencial que a vazão também seja bem ajustada, pois como consta no item 6.6, esta variável é aquela que mais influencia a concentração de DBO.

6.7.1. Determinação das taxas específicas de cada trecho

Na guia *Reach Rates* são especificadas as taxas específicas para cada trecho, ou seja, é o local onde é possível ajustar o modelo ao corpo d' água desejado. Caso algum valor não seja preenchido ou mesmo nulo, o modelo adota um valor ou uma metodologia de cálculo que conste na guia *Rates*.

6.7.1.1. Coeficiente de decaimento da DBO (k_{dc})

A Tabela 13 apresenta os valores de k_{dc} adotados para o ajuste do modelo QUAL2K.

Tabela 13: Coeficientes de decaimento da DBO (k_{dc}) para cada trecho.

Trecho	k_{dc} (dia ⁻¹)	Trecho	k_{dc} (dia ⁻¹)
--------	-------------------------------	--------	-------------------------------

1	0,08	7	1,00
2	0,08	8	1,40
3	0,08	9	0,85
4	0,08	10	0,70
5	0,70	11	0,70
6	0,50	12	0,60
		13	0,70

Os coeficientes foram determinados com base no exposto no item 5.1.5.1. Nos quatro primeiros trechos optou-se pelos valores mínimos de k_d por se tratar de trechos de águas limpas.

No trecho 5 há o primeiro ponto de lançamento de esgoto doméstico proveniente da estação de recalque localizada às margens do trecho 2. Por este motivo optou-se pelo valor de $0,70 \text{ dia}^{-1}$ para o coeficiente uma vez que a vazão de lançamento é significativa.

Quanto ao trecho 6 não há fontes de poluição, por essa razão seu valor de k_d é menor que aquele do trecho 5. No trecho 7 há dois pontos de lançamento de esgoto doméstico, portanto o valor do coeficiente é maior que aquele designado para o trecho 5, que só possui um ponto de lançamento.

No trecho 8 há três pontos de poluição por efluente doméstico e, dessa forma, é o trecho que possui o valor de k_d mais elevado ($1,40 \text{ dia}^{-1}$).

Em direção à jusante não há mais fontes de poluição, portanto os coeficientes de decaimento da DBO são menores, até o limite de $0,60 \text{ dia}^{-1}$, que se refere ao trecho represado (trecho 12).

6.7.1.2. Coeficiente de reaeração (k_a)

Na Tabela 14 estão apresentados os valores de k_a estimados pela equação USGS e aqueles adotados para o ajuste do modelo QUAL2K.

Tabela 14: Coeficientes de reaeração para cada trecho

Trecho	Valor de k_a estimado pela equação USGS	Valor de k_a adotado (dia^{-1})	Trecho	Valor de k_a estimado pela equação USGS	Valor de k_a adotado (dia^{-1})
--------	---	--	--------	---	--

	(dia ⁻¹)			(dia ⁻¹)	
1	16,74	18,0	7	13,79	18,0
2	12,72	18,0	8	10,97	18,0
3	11,75	18,0	9	14,67	20,0
4	2,34	3,0	10	14,55	18,0
5	7,33	18,0	11	31,38	15,0
6	9,09	20,0	12	3,86	3,0
			13	46,06	22,0

Os valores calculados pela equação servem como base para o ajuste do modelo, entretanto, alguns deles não refletem a realidade da transferência de oxigênio para a massa líquida, uma vez que alguns trechos mais turbulentos (trechos 6 e 9) possuem valores muito discrepantes. O trecho 11 que possui fluxo calmo, segundo a equação, teria o segundo maior coeficiente de reaeração atmosférica, perdendo apenas para o trecho 13, que realmente é aquele mais turbulento de todo o segmento simulado.

Sendo assim, para trechos com velocidade média (trechos 1, 2, 3, 5, 7, 8 e 10) adotou-se o valor de k_a igual a 18,0 dia⁻¹. Para o trecho 11, que possui fluxo calmo, o valor do coeficiente utilizado foi de 15,0 dia⁻¹.

Como em trechos à montante de barragens o fluxo é muito calmo, a reaeração atmosférica é mais baixa e, conseqüentemente, os coeficientes foram menores (3,0 dia⁻¹).

Para os trechos turbulentos (6 e 9), foi estipulado o valor de k_a igual a 20,0 dia⁻¹, enquanto que para o 13^o atribuiu-se o valor de 22,0 dia⁻¹, por ser aquele mais turbulento de todo o segmento simulado, correndo praticamente em pequenas cachoeiras.

6.7.1.3 Taxa de oxidação da amônia (k_{na})

Tabela 15: Coeficientes de oxidação da amônia para cada trecho.

Trecho	k_{na} (dia ⁻¹)	Trecho	k_{na} (dia ⁻¹)
1	0,08	7	1,00
2	0,08	8	1,40
3	0,08	9	0,85
4	0,08	10	0,70
5	0,70	11	0,70
6	0,50	12	0,60
		13	0,70

Conforme citado no item 5.1.5.4 foram adotados os mesmos valores de k_{dc} para k_{na} .

6.7.1.4 Coeficiente de Desnitrificação

Foi utilizado no ajuste e na simulação de cenários o coeficiente de desnitrificação que consta no *default* do modelo ($0,5 \text{ dia}^{-1}$).

6.7.2. Ajuste do modelo QUAL2K para a variável OD

A Figura 9 mostra o ajuste do modelo QUAL2K ao ribeirão Claro para a variável OD.

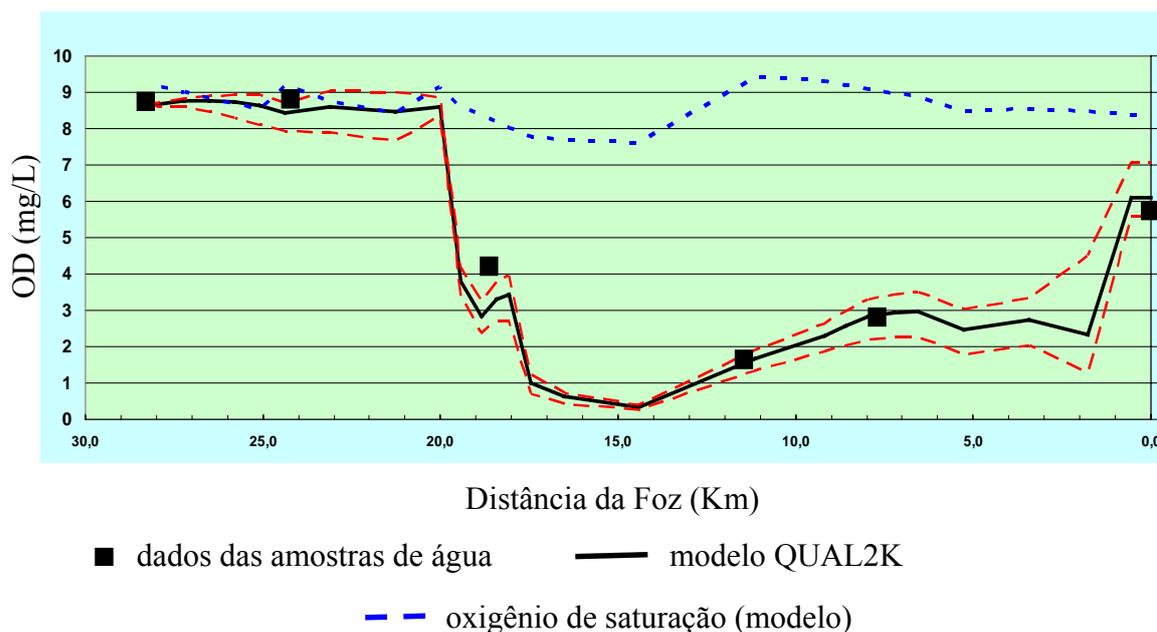


Figura 9: Ajuste do modelo QUAL2K ao ribeirão Claro para a variável OD.

Foi possível constatar que houve um bom ajuste do modelo QUAL2K ao ribeirão Claro no que tange à variável OD. O pequeno declínio na concentração de OD dissolvido observada nas proximidades do terceiro dado amostral (21,0 Km da Foz) se deve à desembocadura do córrego Santo Antônio, segundo maior afluente do ribeirão Claro em vazão e que possui concentração de OD menor e, conseqüentemente, provoca uma redução na concentração de oxigênio dissolvido no ribeirão Claro. Além disso, próximo a este ponto, há o ponto de captação de água para abastecimento realizado pelo DAAE e o início dos lançamentos de esgoto doméstico conforme a seguinte localização: 19,35 Km (trecho 5); 17,18 e 16,94 Km (trecho 7); 15,68, 13,89 e 12,24 Km (trecho 8), como pode ser visualizado no Apêndice II.

Pode-se notar um aumento na concentração de OD após o último ponto de lançamento de esgoto doméstico (LED 6) no Km 12,25, fato devido à redução no consumo de oxigênio

para estabilização da matéria orgânica, maior turbulência do corpo d'água e a entrada de água com maior concentração de OD proveniente dos afluentes.

O grande aumento de OD a partir do Km 1,78 (trecho 13) deve-se à transposição da barragem pela água, caracterizando fluxo muito turbulento à jusante da barragem, além do ribeirão Claro correr neste trecho sobre leito rochoso e com declividade acentuada (21,9 m/Km).

A Figura 10 mostra a distribuição dos pontos cujas abscissas são os valores observados e cujas ordenadas são os valores estimados pelo modelo. O ajuste perfeito do modelo aos dados experimentais corresponde a uma situação hipotética em que tais pontos estariam sobre a reta ideal $y=x$. Por esse critério, observa-se um bom ajuste do modelo para a variável OD.

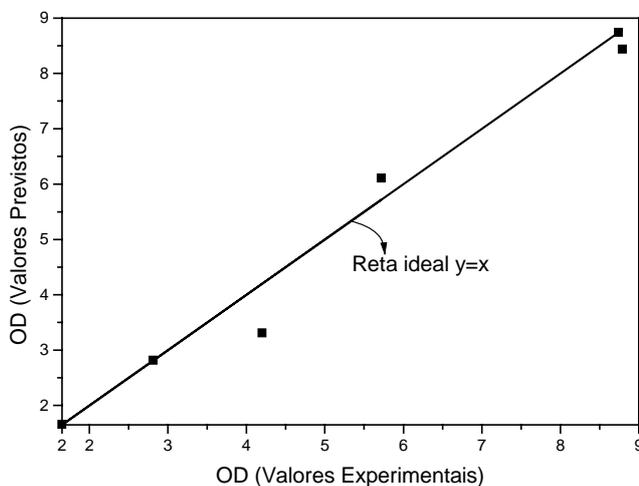


Figura 10: Qualidade do ajuste do modelo QUAL2K para a variável OD.

6.7.3. Ajuste do modelo QUAL2K para a variável DBO

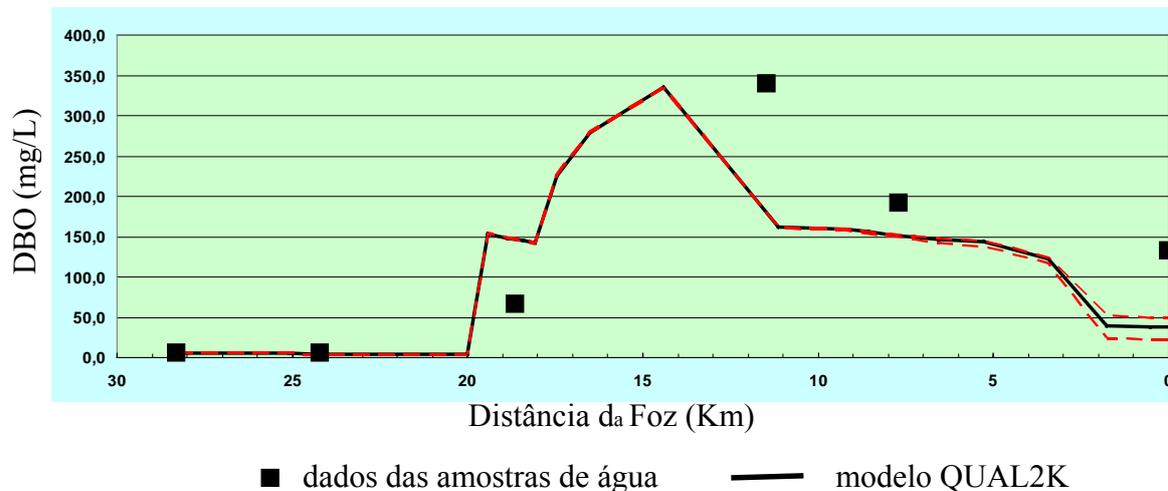


Figura 11 - Ajuste do modelo QUAL2K ao ribeirão Claro para a variável DBO

Pode-se notar que houve um ajuste razoável para a variável DBO. Isto pode ser explicado pela ausência de dados de vazão de lançamento de efluente doméstico em cada um dos seis pontos fornecidos pelo DAAE. Provavelmente nas proximidades do quarto dado de campo (P4) a vazão de lançamento é maior, porém, como foi explicado no item 5.3.1, a vazão calculada para lançamento de efluente doméstico foi igualmente dividida pelos seis pontos que existentes, segundo o DAAE. Ademais, alguns dados de lançamento de efluente industrial não foram inseridos no programa devido à ausência dos mesmos no DAEE, além daqueles que são realizados clandestinamente. Entretanto, é possível notar que o perfil gerado pelo modelo segue a tendência de comportamento dos dados amostrais.

A Figura 12 fornece um indicativo da qualidade do ajuste do modelo para a variável DBO.

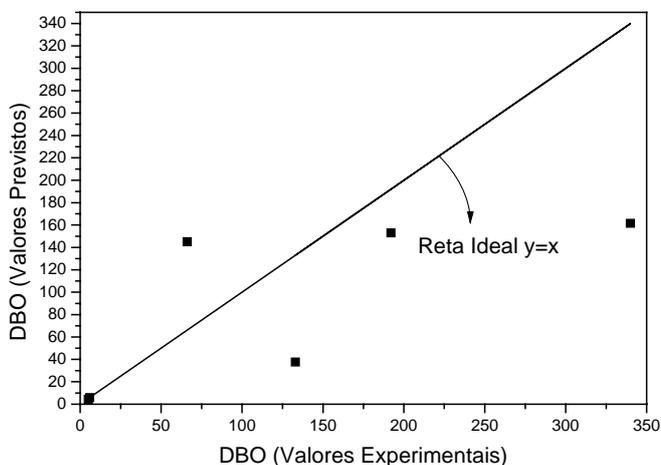
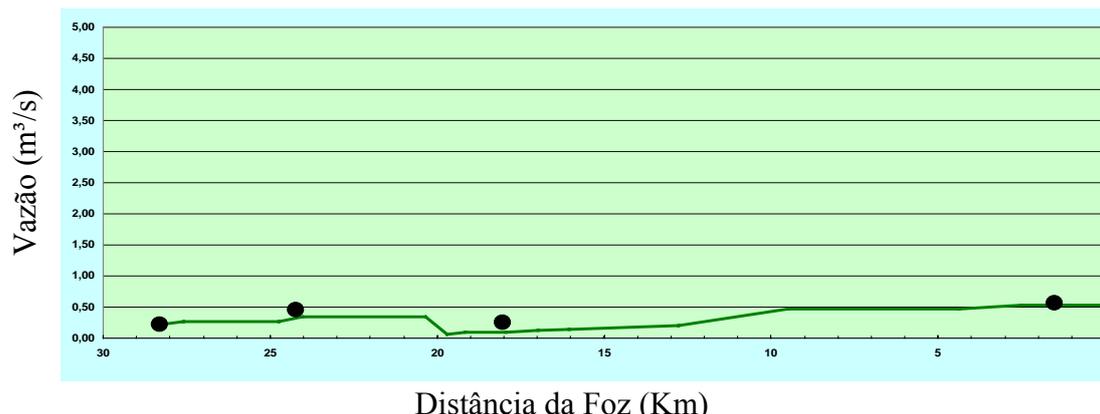


Figura 12: Qualidade do ajuste do modelo QUAL2K para a variável DBO.

Diferentemente do OD, o ajuste para a DBO foi razoável, fato que pode ser atribuído à imprecisão da localização das fontes de poluição que, se deslocadas 1,0 Km para a jusante forneceriam um ajuste melhor. Entretanto, como tais informações foram fornecidas por órgãos do município, optou-se pela não realização dessa mudança e, conseqüentemente, pelo ajuste mais pobre do modelo para a variável DBO.

6.7.4. Outras variáveis de saída do programa

6.7.4.1. Vazão



● dados obtidos em campo — modelo QUAL2K

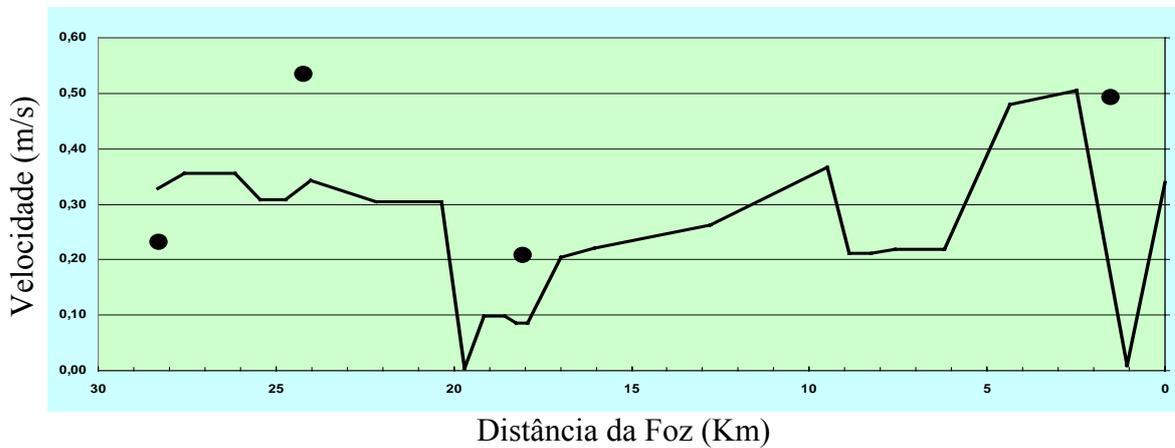
Figura 13: Comportamento da vazão no segmento simulado do ribeirão Claro.

Adotando-se os valores de Q_{90} para os afluentes, pode-se observar que os valores modelo ficaram muito próximos dos dados de vazão medidos em campo.

6.7.4.2. Velocidade

Na altura do Km 20,0 e do Km 1,0, a velocidade decresce vertiginosamente devido à presença de duas barragens (Figura 14).

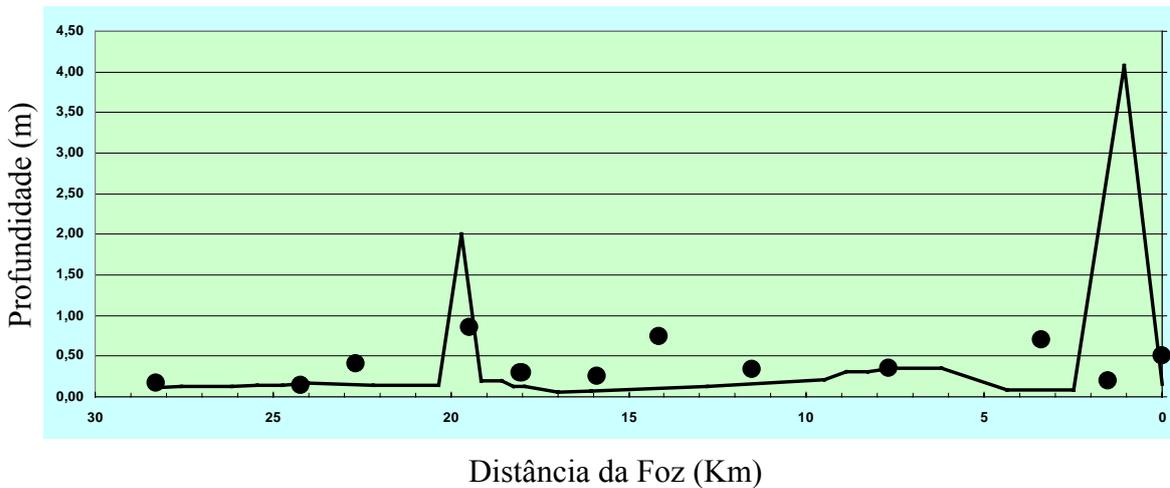
Observa-se que o modelo efetuou previsões de velocidade um pouco abaixo dos valores levantados em campo, com exceção do ponto P1, no qual a velocidade calculada foi maior.



● dados obtidos em campo — modelo QUAL2K

Figura 14: Comportamento da velocidade ao longo do segmento simulado.

6.7.4.3. Profundidade



● dados obtidos em campo — modelo QUAL2K

Figura 15: Comportamento da profundidade ao longo do segmento simulado.

Os dois picos de profundidade observados correspondem à barragem de captação de água do DAAE (2,0 m de altura) e a outra utilizada para geração de energia na Usina do Corumbataí, de 4,0 metros de altura.

6.7.4.4. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica indica a quantidade de sais dissociados na massa líquida e, como os esgotos domésticos apresentam altos níveis de condutividade, há um aumento neste parâmetro entre os Km 19,35 e 12,24 Km da foz, onde ocorrem lançamentos de esgoto doméstico. Dessa forma, pode-se explicar porque o comportamento da condutividade apresenta perfil semelhante ao do comportamento da DBO (Figura 11).

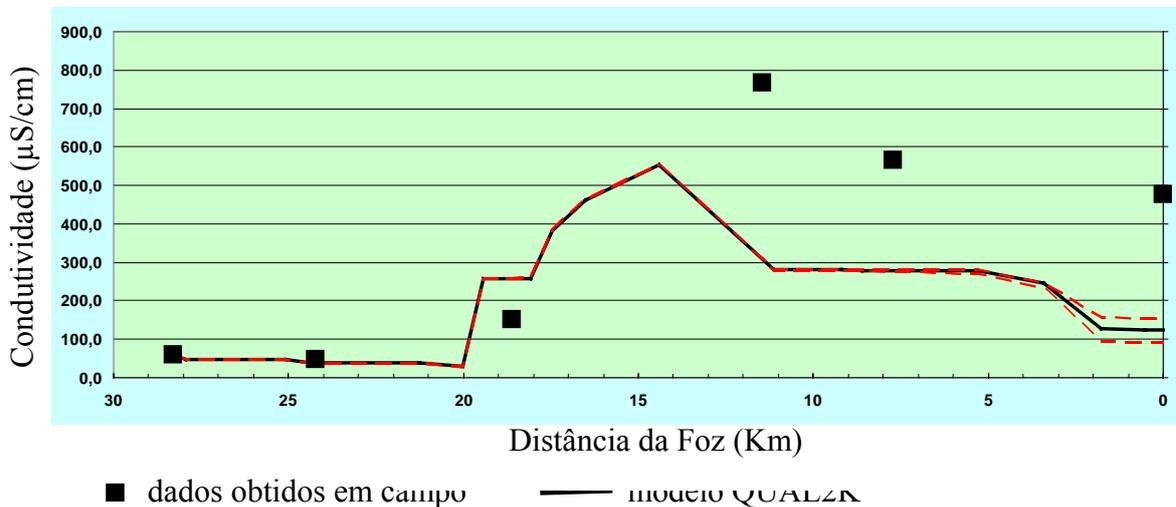


Figura 16: Comportamento da condutividade elétrica no segmento simulado do ribeirão Claro.

6.7.4.5. Íon Amônio (NH_4^+)

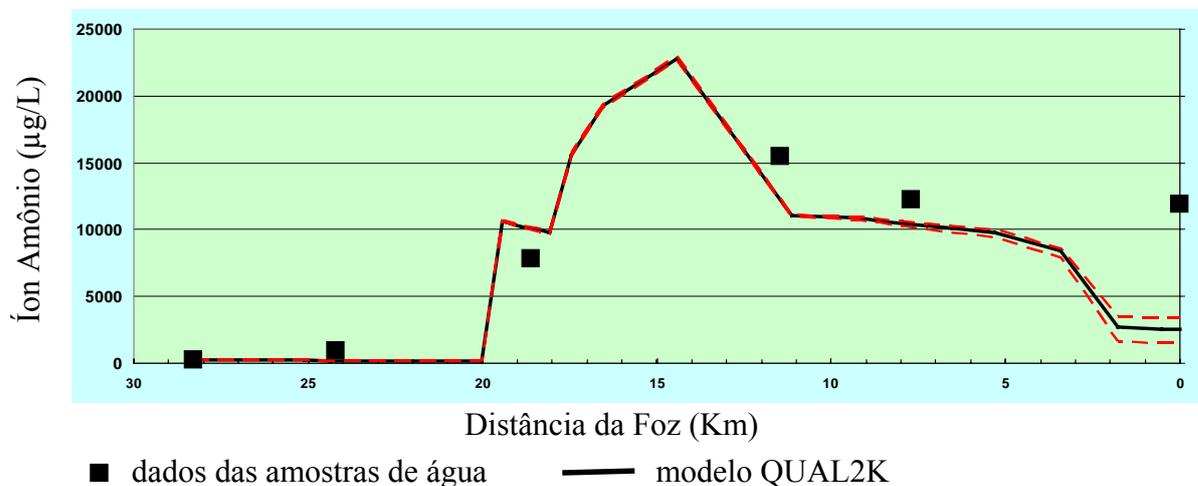
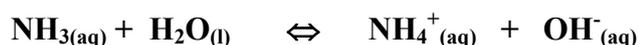


Figura 17: Comportamento da concentração de íons amônio no segmento simulado do

ribeirão Claro.

A amônia (NH_3) é produzida no primeiro estágio de decomposição do nitrogênio orgânico, que se encontra na forma de proteínas, aminoácidos e uréia. A amônia existe em solução tanto na forma ionizada NH_4^+ (íon amônio) como na forma não ionizada NH_3 , conforme a equação:



Segundo Von Sperling (2007), em pH menores que 8,0, praticamente toda a amônia se encontra na forma NH_4^+ . Como o modelo QUAL2K exige como entrada a concentração de íon amônio, utilizou-se a medida da concentração de amônia (NH_3) como dado, uma vez que esta se encontra na forma de NH_4^+ em pH abaixo de 8,0, como é o caso.

O pico na concentração de íon amônio na Figura 16 ocorre devido aos lançamentos de esgoto doméstico, muito rico em nitrogênio orgânico e amônia, entre o Km 19,35 e 12,24.

Na Figura 16, nota-se que o perfil de comportamento da concentração do íon amônio é semelhante ao da DBO e condutividade elétrica.

6.7.4.6. Nitrato (NO_3^-)

O nitrato é formado no processo de nitrificação, ou seja, na oxidação da amônia e do íon amônio.

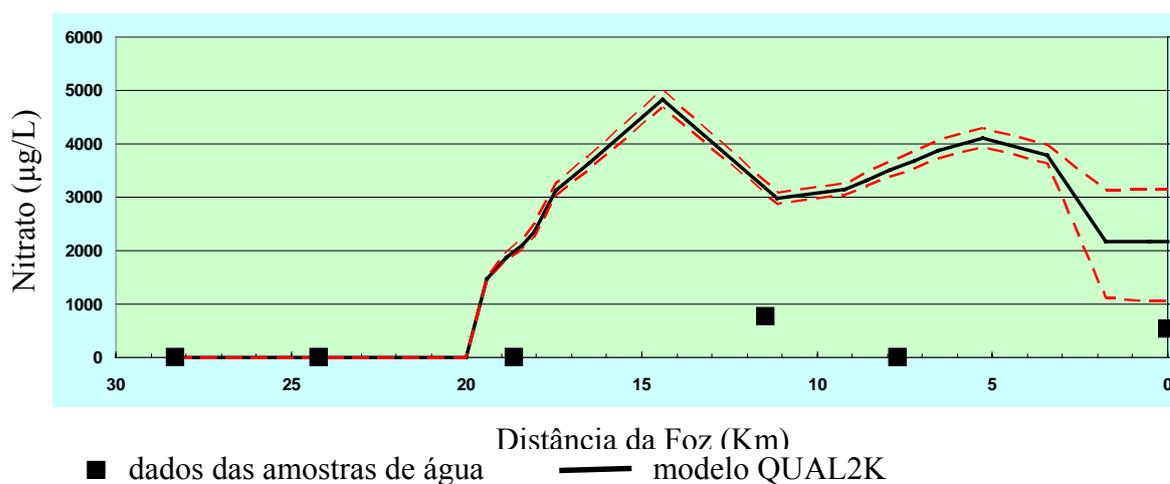


Figura 18: Comportamento da concentração de nitrato no segmento simulado do ribeirão Claro.

A concentração de íons nitrato tem comportamento semelhante ao da DBO, condutividade, e concentração de íons amônio, pois a concentração de NO_3^- é também aumentada pelo lançamento de esgoto doméstico, o qual além de contribuir com o próprio nitrato, contém altas concentrações de amônio que, quando oxidadas no processo de nitrificação, formam mais íons nitrato, aumentando a concentração destes íons no corpo d'água.

6.7.4.7.pH

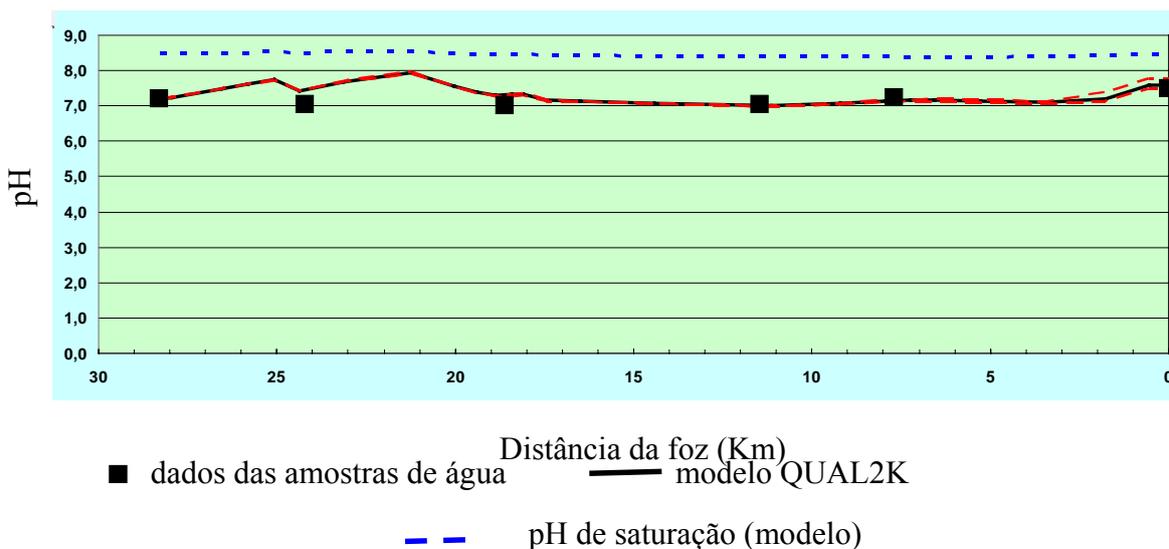


Figura 19: Comportamento do pH no segmento simulado do ribeirão Claro.

Pode-se observar que não houve variações significativas no pH, evidenciando a capacidade tamponante do ribeirão Claro.

6.8. Situação do segmento simulado do ribeirão Claro quanto à Resolução CONAMA 357/05

Com base na Figura 20, o parâmetro OD nas amostras P3, P4 e P5 não atendem à concentração mínima de 5,0 mg/L de OD estabelecida pela referida resolução para a classe II. Cabe ressaltar que no ponto P4, o valor é tão reduzido que fica abaixo até dos limites da classe IV, pois próximo deste há o sexto ponto de lançamento de efluente doméstico (Vide Apêndice II).

Quanto à DBO, as amostras P1 e P2 ficam dentro do limite de 10,0 mg/L imposto pela classe III, e as demais apresentam valor muito superior a este.

O pH de todas as amostras encontra-se dentro do estabelecido para todas as classes de

enquadramento.

A Figura 20 compara as variáveis de qualidade das amostras de água coletadas e aquelas estabelecidas na Resolução CONAMA 357/05.

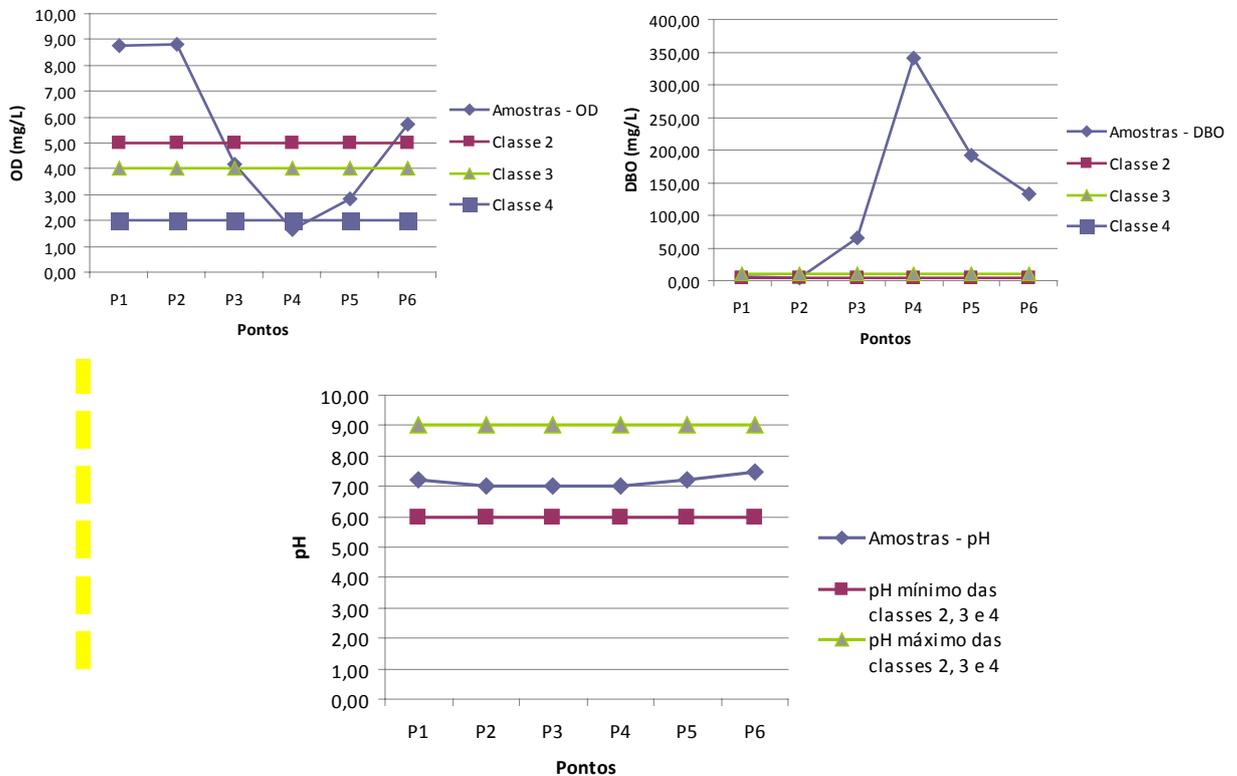


Figura 20: Comparação das variáveis de qualidade das amostras de água com os limites impostos pela Resolução CONAMA 357/05 para as diferentes classes

6.9. Simulação de Cenários

Para a simulação de cenários deve-se adotar a situação mais crítica do corpo d' água, ou seja, aquela em que ele se encontra com uma vazão crítica ($Q_{7,10}$, Q_{90} ou Q_{95}). No entanto, a vazão medida no ponto Q1 (cabeceira da simulação) com molinete hidrométrico é inferior à $Q_{7,10}$ obtida no site do SIGRH e, portanto, o primeiro valor foi o utilizado na simulação dos cenários.

6.9.1. Cenário 1 – Tratamento de todo esgoto bruto lançado no ribeirão Claro

Segundo informações da empresa Saneamento de Rio Claro S.A., será implantada uma estação de tratamento de esgoto no Jardim Conduta, a qual será responsável pelo tratamento

de todo esgoto doméstico lançado atualmente no ribeirão Claro. Dessa forma, para a simulação deste cenário adotou-se que o ponto de lançamento da ETE seja no mesmo local que o ponto de lançamento existente (LED 6), um pouco à jusante do bairro citado. As vazões dos seis pontos de lançamento foram somadas e reunidas todas neste único ponto.

Os parâmetros de qualidade dos efluentes tratados foram fornecidos pela própria empresa que é responsável pela administração da ETE Jardim das Flores. A estação a ser implantada, segundo a Saneamento de Rio Claro S.A., terá um sistema de tratamento semelhante ao da ETE Jardins das Flores, que consiste em um reator anaeróbio seguido de lodo ativado.

A seguir são apresentados os dados comparativos do efluente bruto e do efluente tratado na ETE Jardim das Flores.

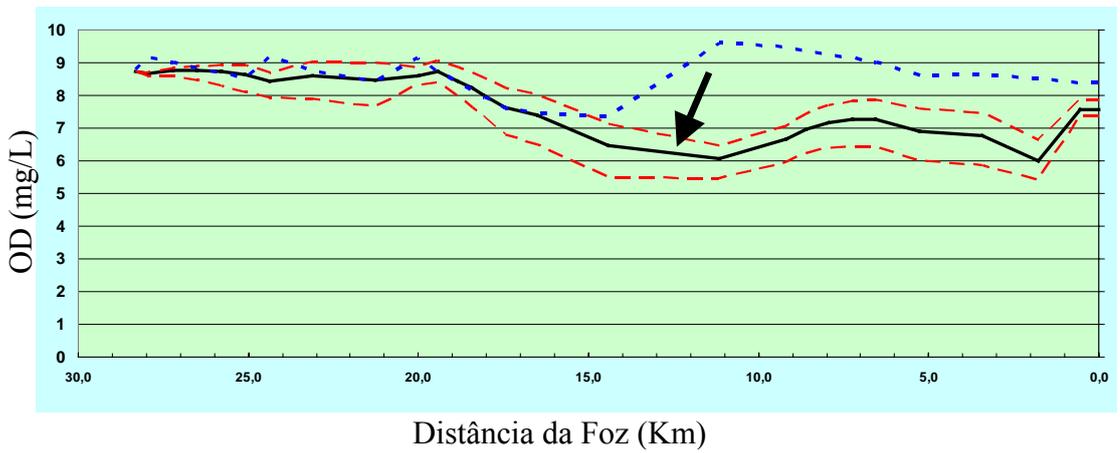
Tabela 16: Características do efluente bruto e tratado na ETE Jardim das Flores (Fonte: Saneamento de Rio Claro S.A.)

Parâmetro	Unidade	Efluente Bruto	Efluente Tratado
DBO _{5,20}	mg/L	374,0	13,0
OD	mg/L	0,30	3,0
Condutividade	µS/cm	819,0	888,0
pH	-	7,4	7,5
NH ₄ ⁺	mg/L	38,0	33,2
NO ₃ ⁻	mg/L	3,58	0,11
Temperatura	°C	21,7	21,0

Como citado no item 6.2, a DBO_{5,20} deve ser convertida para DBO_u para a simulação de cenários. Portanto a DBO do efluente tratado introduzida para a simulação do cenário 1, foi a DBO_u, com valor de 18,98 mg/L.

Com o hipotético tratamento de todo efluente atualmente lançado no ribeirão Claro é possível notar um expressivo aumento na concentração de OD passando de 0,0 mg/L a 3,0 mg/L após o tratamento, fato este que está associado ao alto nível de remoção de DBO que, no efluente bruto é de 374,0 mg/L e, depois de tratado, é de 13,0 mg/L.

A Figura 21 mostra como seria o comportamento da variável OD no ribeirão Claro se 100% do esgoto lançado em seu leito fosse tratado.

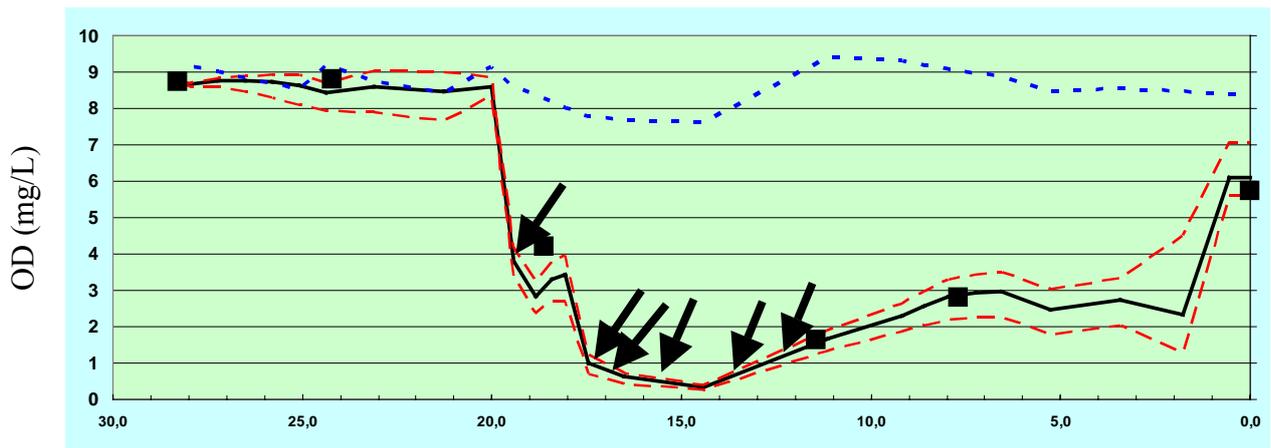


➔ Ponto de lançamento do esgoto tratado da futura ETE Conduta

Figura 21: Comportamento da variável OD caso todo o efluente lançado no ribeirão Claro fosse tratado.

A Figura 22 mostra os perfis de comportamento da variável OD atual (a) e do primeiro cenário simulado (b).

(a)



(b)

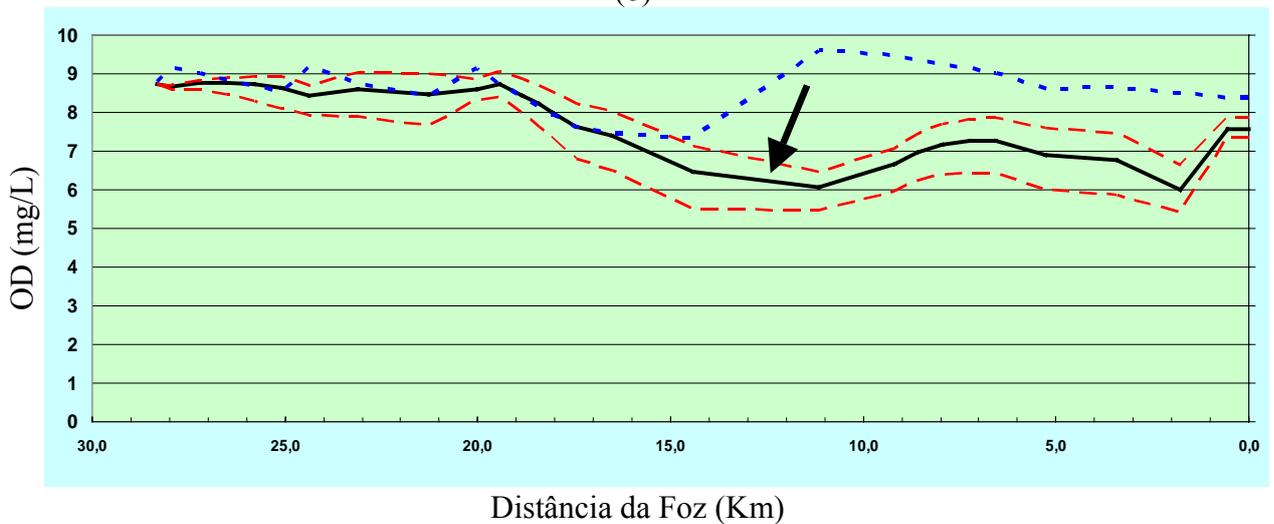


Figura 22: Comparação entre o perfil atual da variável OD (a) e o perfil de OD no primeiro cenário simulado (b).

As setas no gráfico (a) da Figura 22 indicam os pontos atuais de lançamento de efluente doméstico (LEDs) e, no gráfico (b), o ponto de lançamento da futura ETE.

Enquanto atualmente a concentração de OD atinge 0,34 mg/L no Km 14,41, com o tratamento de 100% do esgoto lançado no ribeirão Claro, o OD dissolvido chegaria no mínimo a 5,99 mg/L no Km 1,78.

Na Figura 23 podem ser observadas as concentrações de DBO estimadas pelo modelo na situação atual e aquelas resultantes do tratamento de 100% do esgoto lançado no Ribeirão Claro (cenário 1).

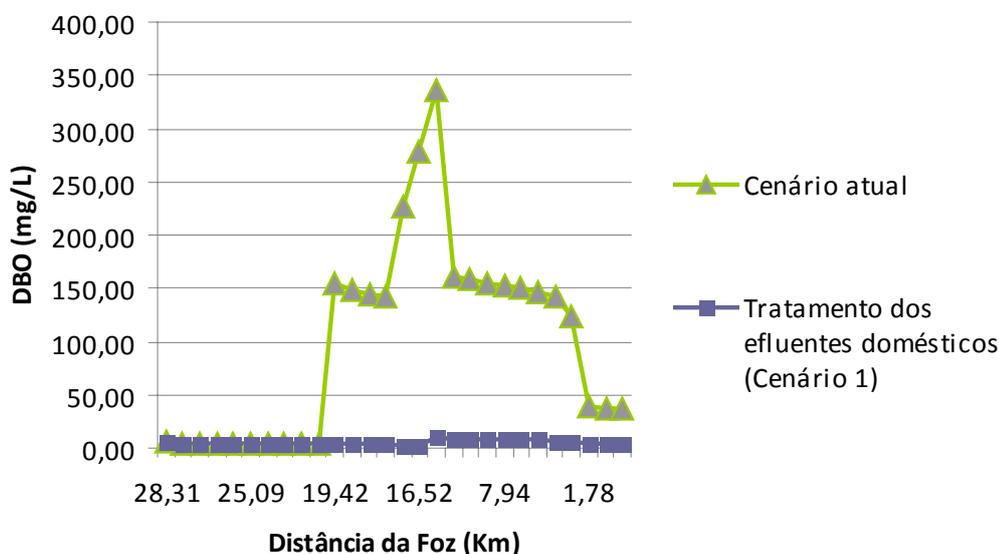


Figura 23: Comportamento da DBO no cenário atual e no cenário considerando tratamento de 100% do efluente lançado (cenário 1).

No cenário atual, segundo os cálculos do modelo, a DBO atinge um pico de 335,23 mg/L no Km 14,41, enquanto que no cenário 1 o maior valor de DBO é de 10,95 mg/L também no Km 14,41, como pode ser observado na Figura 23.

Enquanto que na foz a DBO do cenário atual apresenta um valor de 37,63 mg/L, no cenário 1 este valor é muito inferior (3,44 mg/L), mostrando que o tratamento dos efluentes domésticos lançados atualmente no ribeirão Claro proporcionaria uma grande melhoria na qualidade de suas águas (Figura 24).

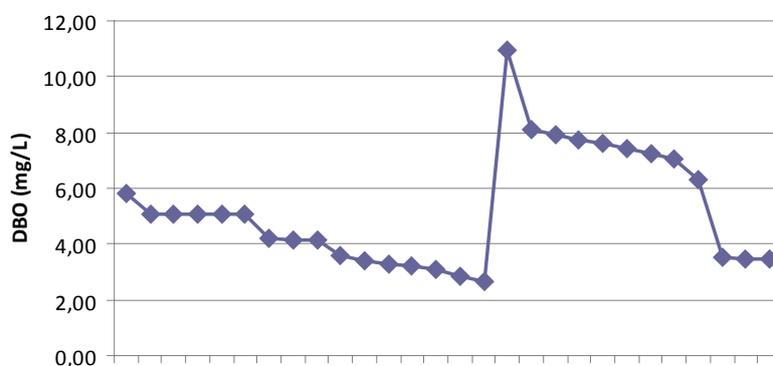


Figura 24: Detalhe do comportamento da DBO no cenário 1.

5.10.1.2. Comparação do cenário 1 com os limites estabelecidos pela resolução CONAMA 357/05.

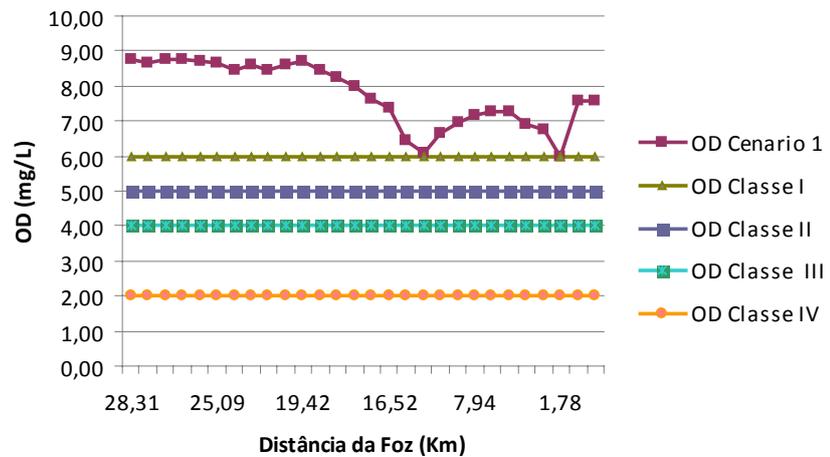


Figura 25: Comparação dos índices de OD observados no cenário 1 e os estabelecidos pela resolução CONAMA 357/05.

Caso todo efluente fosse tratado (cenário 1), o ribeirão Claro atenderia aos limites estabelecidos na classe I e II para a variável OD.

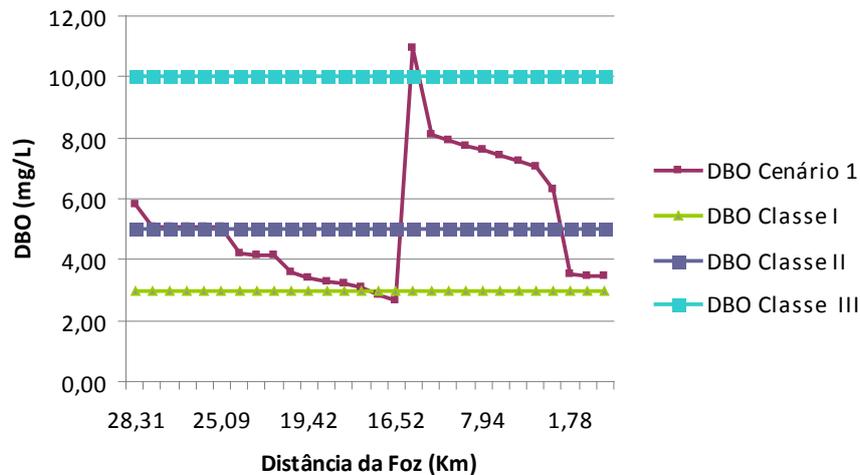


Figura 26: Comparação das concentrações de DBO do cenário 1 com os valores determinados pela resolução CONAMA 357/05.

Os resultados obtidos na simulação do cenário 1 mostram que em relação à DBO, o ribeirão Claro apenas não atenderia aos padrões estabelecidos pela Classe III na altura do Km 14,41.

6.9.2. Cenário 2 – Situação do ribeirão Claro em 2018

Por meio de dados da SEADE (2008), foi possível ajustar no programa *Origin 50*® a curva de crescimento logístico para a população de Rio Claro entre os anos de 1980 e 2008. A equação da curva ajustada para a população rioclareense é a seguinte:

$$y = \frac{452431,11059}{1 + 3,15984 \cdot e^{-0,03049 \cdot t}}$$

onde: y = população estimada no ano t ; t = tempo (anos)

Como a equação refere-se à população total e a ETA I abastece apenas uma parte desta (38,79%), projetou-se a curva logística para 2018 e calculou-se o crescimento percentual que, posteriormente, foi aplicado à população atualmente abastecida pela ETA 1 e àquela que tem seus efluentes destinados ao ribeirão Claro.

Com base na equação supracitada, a população total de Rio Claro em 2018 será de 230.164 habitantes, representando um crescimento de 20,37 %. Com isso, a população que atualmente é abastecida pela ETA I de 74.168 habitantes, passará a ser em 2018 de 89.276 habitantes.

Atualmente a vazão captada pela ETA I é de 0,40 m³/s, abastecendo uma população de 74.168 habitantes. Por meio de uma regra de três simples, considerando-se as mesmas características de operação e distribuição da ETA I e, que em 2018 a população abastecida pela mesma será de 89.276 habitantes, a vazão de captação passará a ser de 0,48 m³/s. Entretanto, adotando-se esse valor de captação, o ribeirão Claro secaria à jusante, pois o programa acusa vazão negativa no trecho 9. Por isso, para a simulação deste cenário, foi inserida uma vazão de captação de 0,46 m³/s.

Como haverá aumento da população, a vazão de lançamento de esgoto doméstico também deve ser recalculada, conforme a fórmula citada na seção 3.4.3., considerando que a população que destinará seus efluentes ao Ribeirão Claro em 2018 sofrerá um aumento de 20,37 %, passando dos atuais 85.600 para 103.036 habitantes. Portanto, a vazão de lançamento em cada um dos seis pontos, em 2018, será de 0,032 m³/s sem tratamento.

A Figura 27 ilustra o comportamento da vazão previsto para o ano de 2018

considerando a captação de água necessária ao abastecimento público e o lançamento de esgoto no referido ano.

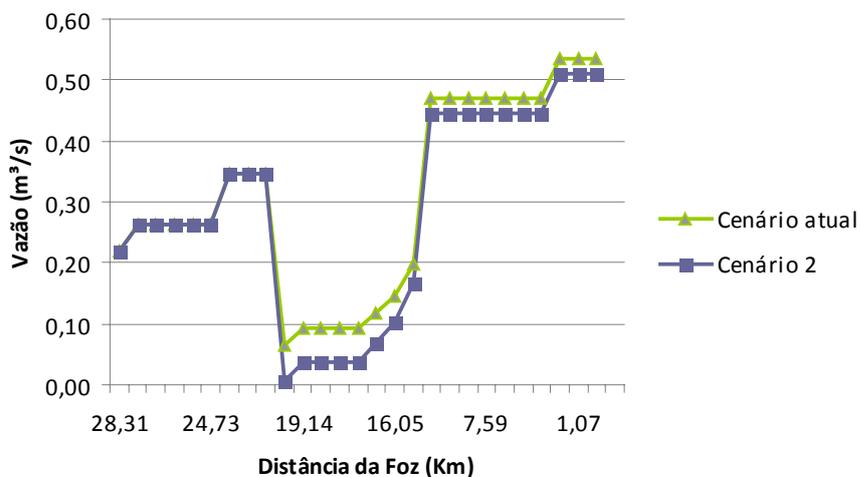


Figura 27 – Comportamento da vazão no cenário atual e no cenário futuro (ano de 2018)

Na altura do Km 20,0 é possível notar um maior decréscimo na vazão do ribeirão Claro por conta do aumento da vazão a ser captada para abastecimento público, de 0,40 atual para 0,46 m³/s em 2018. Logo à jusante deste ponto, a vazão do ribeirão Claro fica próxima de zero (0,01m³/s), denunciando um cenário crítico para o futuro, no qual o corpo d' água não suportará tal aumento na demanda de água.

A Figura 28 mostra o comportamento da variável OD no cenário atual e em 2018.

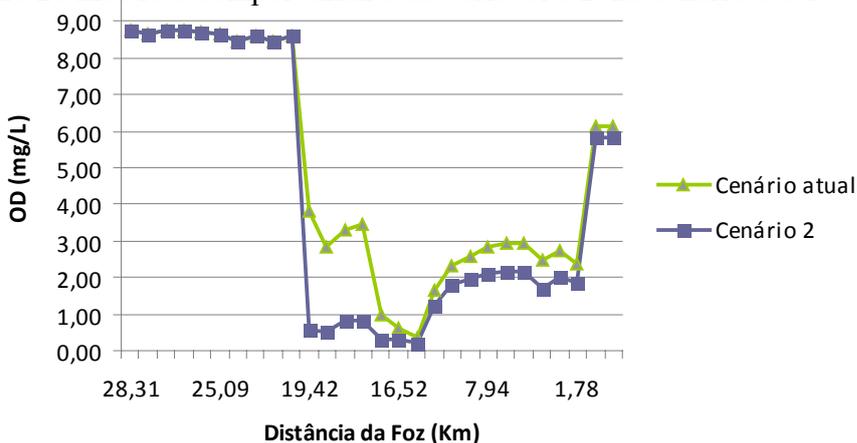


Figura 28: Comportamento da variável OD no cenário atual e em 2018 (Cenário 2).

Entre o Km 17,0 e o Km 14,0, nota-se uma considerável redução na concentração de OD, que pode ser explicada pela redução da vazão do corpo d' água, a qual influi

significativamente na concentração da DBO (vide item 5.7.), aumentando-a. Com o aumento da DBO, a concentração de OD tende a diminuir.

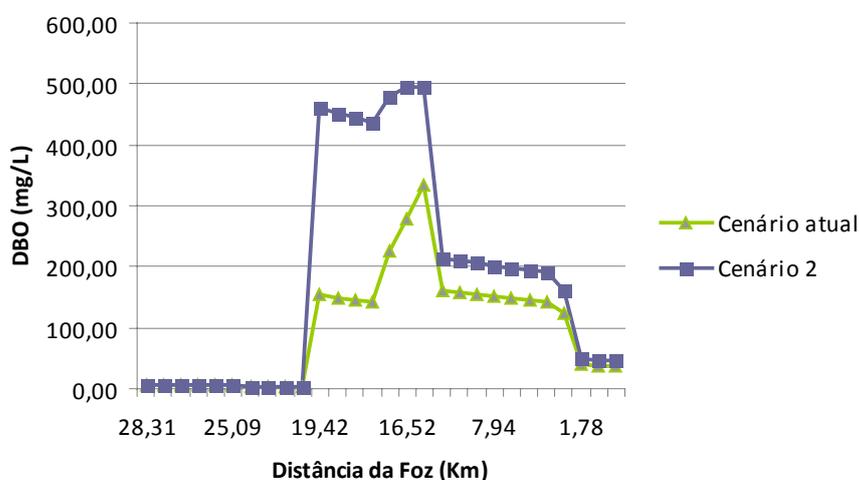


Figura 29-Comportamento da variável DBO no cenário atual e em 2018 (Cenário 2).

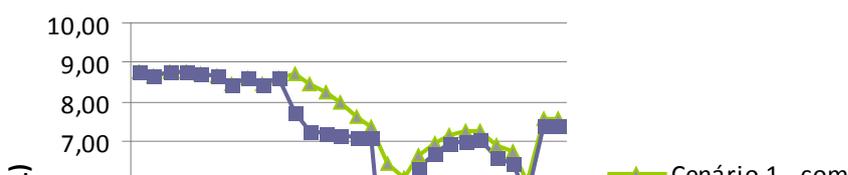
O pico na concentração de DBO no cenário atual é de 335,23 mg/L, enquanto que em 2018, devido à redução na vazão do corpo d' água, juntamente com aumento da vazão de esgoto, o pico sobe para 495,34 mg/L. Tal comportamento era esperado, pois na análise de sensibilidade, a vazão é o parâmetro mais influente na concentração de DBO e, como a vazão de esgoto foi aumentada, a concentração de DBO teve um grande aumento devido à redução na sua diluição.

Portanto, a qualidade da água do ribeirão Claro tende a piorar significativamente com o crescimento populacional.

6.9.3. Cenário 3 – Situação do ribeirão Claro em 2018 com tratamento de 100% dos efluentes domésticos lançados

Para a simulação deste cenário adotou-se a vazão de captação para abastecimento público calculada no cenário 2, e a vazão de lançamento de esgoto doméstico do mesmo cenário em um único ponto, que corresponderia à futura ETE a ser implantada no Jardim Conduta. Além disso, foram considerados os mesmos parâmetros de qualidade do efluente tratado utilizados no cenário 1.

A Figura 30 ilustra o comportamento da variável OD no cenário 1, no qual todo efluente da população atual é tratado, e no cenário 3 que prevê o tratamento de 100% do



efluente da população em 2018.

Figura 30: Comportamento da variável OD nos cenários 1 e 3.

Observa-se que com o aumento populacional em 2018, há decréscimo na concentração de OD logo após o ponto de captação do DAAE (Km 19,7), cuja vazão foi incrementada para atender à demanda da nova população. À jusante do ponto de lançamento de efluente tratado pela futura ETE Conduta (Km 12,25), é notável um grande decréscimo na concentração de OD devido ao aumento na vazão de lançamento de esgoto em consequência do incremento populacional e, principalmente, à redução da vazão do corpo d' água pela captação de água no Km 19,7.

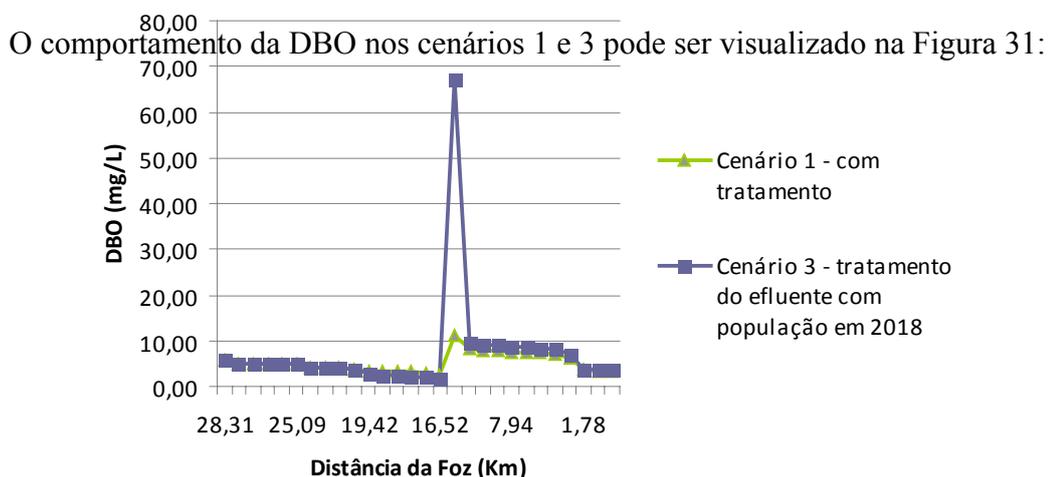


Figura 31: Comportamento da DBO no cenário 1 e 3.

A DBO, após o ponto de lançamento da futura ETE Conduta, aumenta em virtude do aumento da vazão de lançamento ocasionado pelo incremento populacional em 2018 e,

principalmente, pela baixa vazão do corpo d' água no trecho. Logo após o pico, a DBO é reduzida significativamente e o OD aumenta devido à entrada de água do córrego Santa Gertrudes, que possui vazão considerável e, dessa forma, provoca a diluição da DBO e, por conseguinte, aumento da concentração de OD.

7. CONCLUSÃO

Foi possível efetuar um bom ajuste do modelo QUAL2K à variável OD no ribeirão Claro. Entretanto, para a DBO o ajuste foi razoável, possivelmente pela falta de informações precisas sobre as vazões de lançamento de esgoto doméstico e de outras indústrias que lançam efluentes neste corpo d' água, além daqueles efetuados de forma clandestina.

O *software* QUAL2K v7 mostrou ser de fácil manuseio, pois a boa disposição de suas planilhas e o manual em formato digital permite que o processo de simulação seja facilmente entendido.

O lançamento de esgoto doméstico sem tratamento no ribeirão Claro causa significativa degradação ambiental, fato que pode ser constatado comparando-se os dados dos pontos P1 e P2 (à montante dos lançamentos) e P3 e P4 (à jusante dos lançamentos). Enquanto no primeiro a concentração de OD é de 8,74 mg/L, no ponto P4 a concentração é de 1,65 mg/L. Ainda no ponto P4, o valor da DBO no corpo d' água é de 340,0 mg/L, o qual está próximo da concentração de um efluente bruto (374,0 mg/L).

Na simulação do cenário 1, pode-se constatar que o tratamento de todo o esgoto doméstico lançado atualmente no ribeirão Claro traria melhorias substanciais nos parâmetros de qualidade da água OD e DBO, que atualmente atingem valores críticos de 0,34 e 335,23 mg/L, respectivamente, enquanto que no cenário simulado estes valores seriam de 5,99 e 10,95 mg/L.

O aumento da vazão de captação de água para abastecimento público e o conseqüente aumento na vazão de lançamento de esgoto simulados no cenário 2, no ano de 2018, causariam, segundo o modelo, significativos decréscimos na concentração de OD e aumento na concentração de DBO, principalmente após o ponto de captação. Este fato era esperado, pois na análise de sensibilidade paramétrica ficou evidenciado que a vazão exerce grande influência sobre a variável DBO. É importante ressaltar que a vazão do ribeirão Claro à jusante do ponto de captação ficou muito próxima de zero (0,01 m³/s), demonstrando um

cenário futuro muito crítico, caso a demanda de água da ETA I aumente conforme o simulado.

No cenário 3 simulou-se o tratamento de 100% do esgoto doméstico lançado no ribeirão Claro pela população rioclarense em 2018. Os resultados de tal simulação foram comparados com os do cenário 1 a fim de verificar a capacidade do tratamento em manter as condições do corpo d' água receptor diante do crescimento populacional. Os resultados das simulações mostraram que se a futura “ETE Jardim Conduta” mantiver a eficiência de tratamento até 2018, ela atenuaria de forma significativa os impactos do crescimento populacional sobre os parâmetros de qualidade da água OD e DBO, que só tem suas concentrações alteradas de forma visível logo após o ponto de captação e no Km 14,0 , pois as vazões nestes pontos sofrem grandes reduções.

É importante ressaltar que por mais complexo que seja o modelo QUAL2K, ele incorpora diversas simplificações do sistema fluvial, sendo necessário que seus resultados sejam analisados de forma crítica e não adotados como uma representação fiel da realidade, mas que podem ser utilizados como ferramentas norteadoras na tomada de decisão quanto à gestão dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BÁRBARA, V.F. Uso do modelo Qual2E no estudo da qualidade da água e da capacidade de autodepuração do rio Araguari – AP (Amazônia). Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente - Universidade Federal de Goiás – Goiânia – GO -2006.

CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Básico. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo**, 2006. Disponível em www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/publicacoes.asp. Acesso em 09 jul. 2007.

CHAPRA, S.C. **Surface Water-Quality Modeling**. New York, NY: McGraw-Hill. 844 p.

1997.

CHAPRA, S.C.; PELLETIER, G.J.; TAO, H. **QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.04: Documentation and Users Manual**. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA, 2006.

CUNHA, M. A. A. **Diagnóstico da qualidade das águas da bacia do Ribeirão Claro (SP) através de diversas análises inclusive Multivariadas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista – Rio Claro - 2000.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling**. Athens, Georgia. 2. ed. 455 p. 1985.

GONÇALVES, J.C.S.I.; DIBIAZI, A.L.B. **Diagnóstico Ambiental. Monitoramento e modelagem matemática da qualidade da água do Córrego São Simão aplicada a seleção de alternativas para o tratamento de esgotos do município de São Simão-SP**. União de Cursos Superiores – COC - Ribeirão Preto, 2006.

LIMA, C.A.A. **O uso do modelo QUAL2E na simulação da qualidade das águas do rio Jacaré-Guaçu**. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo – São Carlos, 1997.

PALMIERI, V. **Calibração do modelo Qual2E para o rio Corumbataí (SP)**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Metalúrgica - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003. 91 f.

PARK, S. S.; LEE, Y.S. **A water quality modeling study of Nankdong River, Korea**. Ecological Modelling, Seoul, v.152, p. 65-75, 2001.

PORTO, R.L.L.; AZEVEDO, L.G.T. **Sistemas de Suporte a Decisões Aplicados a Problemas de Recursos Hídricos**. In: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Rubem La Laina Porto (Org.). Porto Alegre, RS: UFRGS. 2. ed. 420 p. 2002.

RODRIGUES, R.B. **Sistema de Suporte à Decisão Proposto para a Gestão Quali-Quantitativa dos Processos de Outorga e Cobrança pelo Uso da Água.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo – São Paulo, 2005. 155 p.

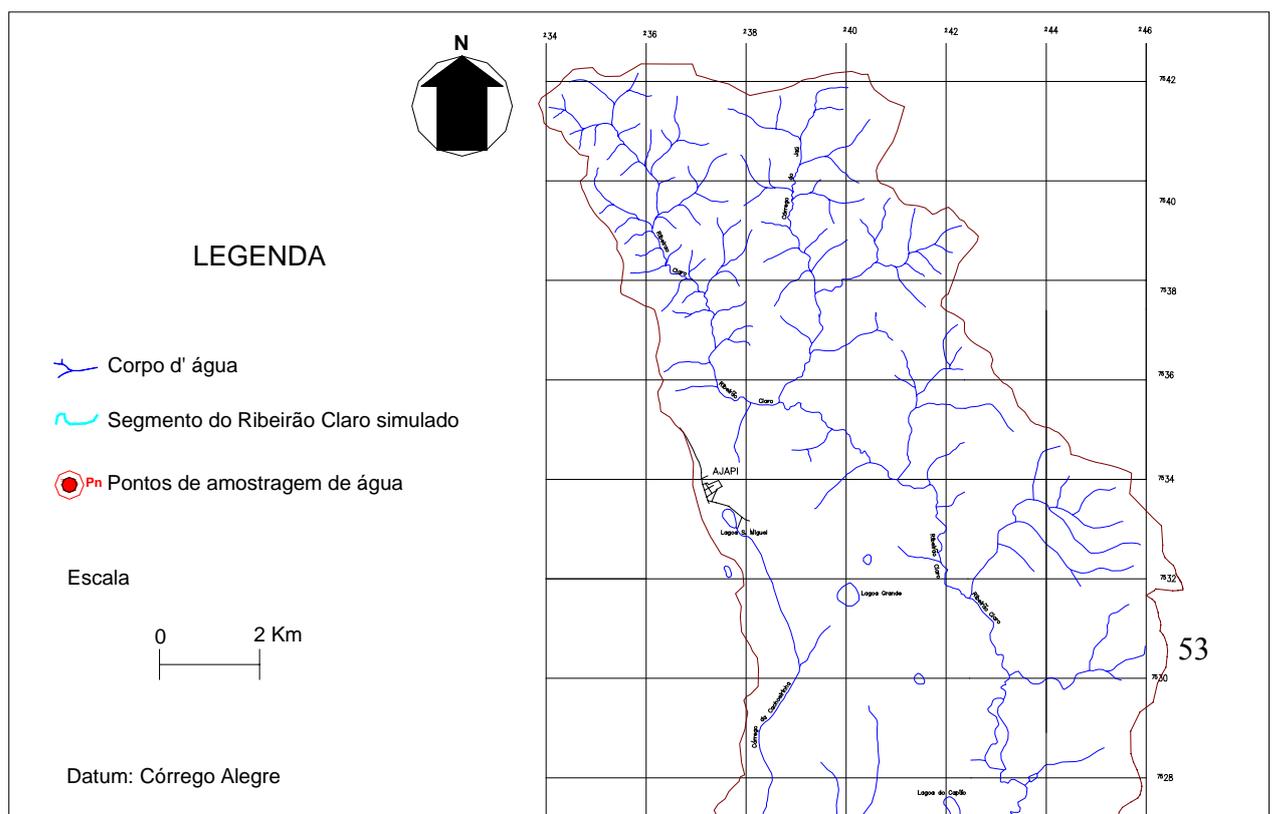
SEADE, Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. **Informação dos Municípios Paulistas**, 2008. Disponível em www.seade.gov.br/produtos/imp/index.php. Acesso em 01 out. 2008.

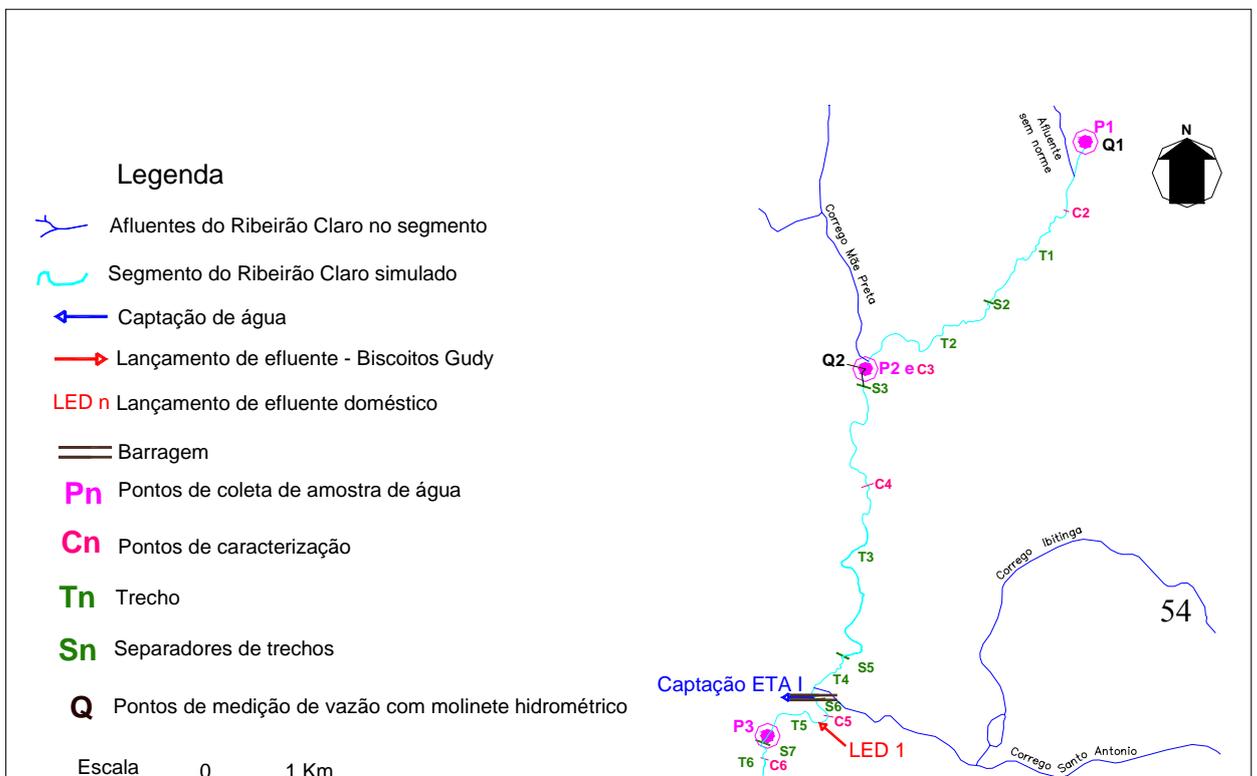
SEFFRIN, G. F. F. **Simulação Atual e Previsão Futura da Qualidade das Águas do Rio Ibicuí utilizando o modelo QUAL2E.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, 2001. 100p.

SETTI, A.A.; LIMA, J.E.F.W.; CHAVES, A.G.M.; PEREIRA, I.C. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos.** 2ª ed. Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas - Brasília, 2000. 207p.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos.** Série Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias; v.1. Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte, 2005. 452 p.

VON SPERLING, M. **Estudos e Modelagem da qualidade da água de rios.** Série Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias; v.7. Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte, 2007. 588 p.





APÊNDICE III – Relatório Fotográfico



Foto 1: Medição de vazão com molinete hidrométrico na cabeceira da simulação.(27/08/2008)



Foto 2: Medição de largura no ponto de caracterização C4. (02/09/2008)

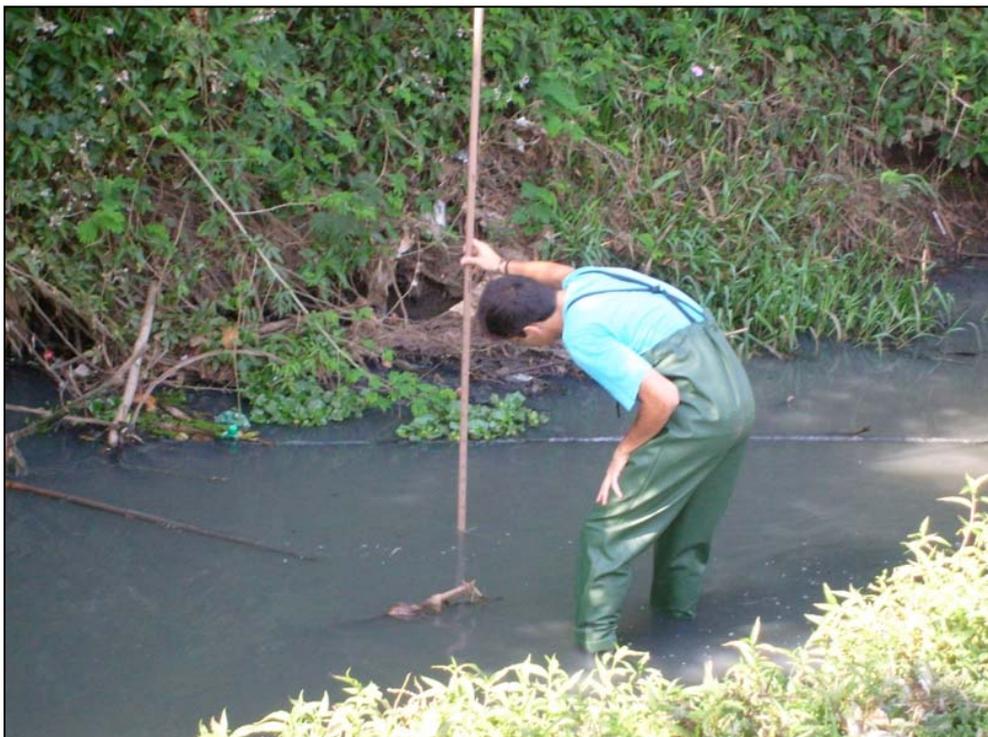


Foto 3: Medição de profundidade com cano de PVC graduado no trecho 5. (05/09/2008).



Foto 4: Lançamento de esgoto doméstico no Ribeirão Claro – trecho 5. (05/09/2008)

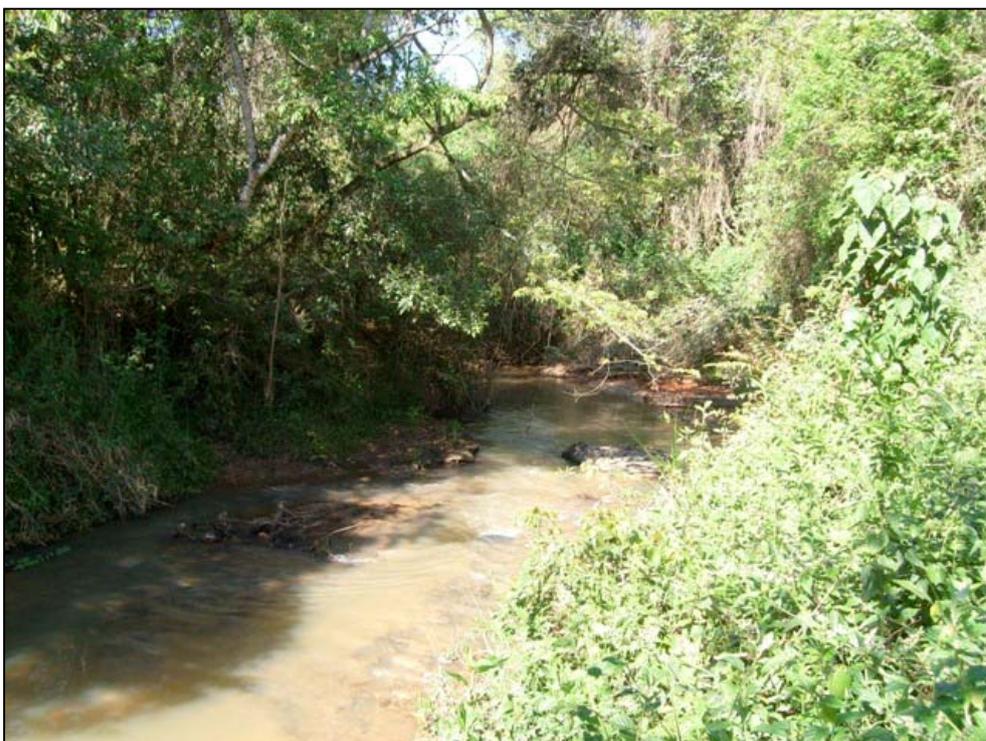


Foto 5: Trecho 2 do Ribeirão Claro que atravessa a FEENA.



Foto 6: Trecho 6 da simulação.

APÊNDICE IV - PLANILHAS DE CAMPO PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO

Ponto: Q1

Coordenadas UTM N: 7.525,37 Km (N) / 241,28 Km (E)

Data: 27/08/2008

Hélice: 4-18730

Tempo: 50 s

VERTICAL Margem: D	Distância (m)	Profundidade (m)	Rotações		
			0,2h	0,6h	0,8 h
1	0,25	0,00		0	
2	0,40	0,03		0	
3	0,50	0,10		0	
4	0,60	0,12		0	
5	0,70	0,14		5	
6	0,90	0,11		2	
7	1,20	0,10		30	
8	1,60	0,14		38	

9	1,90	0,15		31	
10	2,20	0,12		66	
11	2,50	0,13		95	
12	2,80	0,16		102	
13	3,10	0,16		114	
14	3,40	0,17		125	
15	3,70	0,18		89	
16	4,00	0,23		68	
17	4,30	0,29		99	
18	4,50	0,29		101	
19	4,70	0,26		110	
20	4,90	0,25		122	
21	5,10	0,25		113	
22	5,30	0,25		82	
23	5,50	0,23		47	
24	5,60	0,17		21	
25	5,96	0,00		0	

Vazão: 0,22 m³/s

Área molhada: 0,95 m²

Velocidade média: 0,231 m/s

Largura: 5,71 m

Profundidade média: 0,17 m

Raio hidráulico: 0,16 m

Ponto: Q2

Coordenadas UTM N: 7.523,03 Km (N) / 239,06 Km (E)

Data: 27/08/2008

Hélice: 4-18730

Tempo: 50 s

VERTICAL Margem: E	Distância (m)	Profundidade (m)	Rotações		
			0,2h	0,6h	0,8 h
1	6,40	0,00		0	
2	6,00	0,00		0	
3	5,70	0,10		118	
4	5,30	0,13		151	
5	4,90	0,16		155	
6	4,50	0,17		157	
7	4,10	0,18		169	
8	3,70	0,18		190	
9	3,30	0,20		185	

10	2,90	0,20		223	
11	2,50	0,23		224	
12	2,10	0,20		246	
13	1,80	0,16		244	
14	1,50	0,15		243	
15	1,20	0,13		231	
16	0,90	0,08		101	
17	0,40	0,00		0	
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					

Vazão: 0,45 m³/s

Área molhada: 0,85 m²

Velocidade média: 0,534 m/s

Largura: 6,00 m

Profundidade média: 0,14 m

Raio hidráulico: 0,15 m

Ponto: Q3

Coordenadas UTM N: 7.518,89 Km (N) / 237,91 Km (E)

Data: 05/09/2008

Hélice: 4-18730

Tempo: 50 s

VERTICAL Margem: E	Distância (m)	Profundidade (m)	Rotações		
			0,2h	0,6h	0,8 h
1	0,30	0,00		0	
2	0,50	0,14		21	
3	0,70	0,20		26	
4	1,00	0,28		35	
5	1,30	0,34		52	
6	1,60	0,37		60	
7	1,90	0,41		57	
8	2,20	0,40		98	
9	2,50	0,38		85	

10	2,80	0,37		101	
11	3,10	0,41		88	
12	3,40	0,30		86	
13	3,70	0,34		59	
14	4,00	0,15		53	
15	4,50	0,00		0	
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					

Vazão: 0,25 m³/s

Área molhada: 1,22 m²

Velocidade média: 0,207 m/s

Largura: 4,20 m

Profundidade média: 0,29 m

Raio hidráulico: 0,28 m

Ponto: Q4

Coordenadas UTM N: 7.511,98 Km (N) / 234,58 Km (E)

Data: 05/09/2008

Hélice: 4-18730

Tempo: 50 s

VERTICAL Margem: D	Distância (m)	Profundidade (m)	Rotações		
			0,2h	0,6h	0,8 h
1	0,40	0,00		0	
2	0,90	0,13		28	
3	1,20	0,21		69	
4	1,40	0,24		126	
5	2,00	0,26		188	
6	2,50	0,23		202	
7	3,00	0,24		207	
8	3,50	0,23		212	
9	4,00	0,27		207	

10	4,50	0,25		198	
11	5,00	0,17		190	
12	5,50	0,14		195	
13	5,80	0,10		155	
14	6,60	0,00		0	
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					

Vazão: 0,57 m³/s

Área molhada: 1,15 m²

Velocidade média: 0,492 m/s

Largura: 6,20 m

Profundidade média: 0,19 m

Raio hidráulico: 0,18 m