

MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO DOCE PELO MÉTODO *STREETER-PHELPS* A JUSANTE DO EMISSÁRIO DA CENIBRA

Cleuber Lucio da Silva Rodrigues¹
Ramon de Souza Ferreira²
Ramon Inácio Santos³

RESUMO

Diante das alterações climáticas ocorridas nas últimas décadas, promovendo cenários com grandes períodos secos ou com longos períodos de chuva intensa, o homem tenta de alguma forma prever ou minimizar os impactos causados por tais mudanças. Além das alterações climáticas, o homem também contribui negativamente através do desmatamento das matas ciliares, lançamentos de efluentes e assoreamentos dos corpos d'água, entre outras, para que as mudanças sejam ainda maiores. Mediante isso, conseguir mapear todas essas possibilidades de forma abrangente e fácil de ser interpretada, tornou-se fundamental para determinar o quão o corpo d'água está se alterando e até que ponto ele poderá se recuperar. Surgem então os modelos matemáticos. Através da modelagem matemática, vários cenários de autodepuração podem ser simulados inclusive permitindo que sejam feitos estudos em determinadas áreas a fim de determinar a qualidade da água ou os melhores meios de intervenção em pontos específicos para controle de poluição. Os modelos são capazes de determinar tanto fontes difusas como pontuais de poluição. O trabalho teve como objetivo calibrar o modelo matemático de *Streeter-Phelps* para simulação dos parâmetros da qualidade da água do Rio Doce. Os trechos foram definidos de acordo com alterações importantes nas características físicas, químicas e biológicas do rio. Após a realização da calibração e da modelagem, foi constatado que o Rio Doce possui uma água de boa qualidade, mesmo em tempos de baixa vazão e o fator principal determinante dessa qualidade é sua grande vazão em vista aos lançamentos de efluentes lançados em seu curso.

Palavras-chave: Autodepuração, Modelagem matemática e Qualidade da água.

ABSTRACT

In the face of climate changes in recent decades, promoting scenarios with large dry periods or long periods of heavy rain, the man tries to somehow prevent or minimize the impacts of such changes. In addition to climate change, man also contributes negatively through deforestation of riparian forests, effluent discharges and silting of water bodies, among others, so that the changes are even greater. Through this, able to map all these possibilities in a comprehensive and easy to interpret, it became critical to determine how the water body is changing and to what extent it can recover. Then come the mathematical models. Through mathematical modeling, various depuration scenarios can be simulated including allowing studies to be made in certain areas in order to determine the water quality or the best means of intervention in specific points for pollution control. The models are able to determine both diffuse sources as pollution point. The study aimed to calibrate the mathematical model *Streeter-Phelps* for simulation of water quality parameters do Rio Doce. The excerpts were defined according to major changes in physical, chemical and biological characteristics of the river. Upon completion of the calibration and modeling, it was found that Rio Doce has a good quality water, even at low flow times and the main determinant factor of this quality is a great flow in order to effluent discharges released in its course.

Keywords: Selfpurification, mathematical modeling and water quality.

¹ Engenheiro Ambiental, Mestre em Engenharia Civil – UFV

² Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária – Faculdade ÚNICA de Ipatinga

³ Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária – Faculdade ÚNICA de Ipatinga

1 INTRODUÇÃO

A qualidade e quantidade necessária de água para suprir as demandas geradas pelo homem através do aumento da produção industrial, pecuária, irrigação, entre outras, faz com que melhores formas de gestão sejam estudadas e implantadas. Pensando nisso é que foi criada a Lei 9.433/1997, chamada de Lei das Águas, e que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) que por sua vez criou o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SINGREH). A PNRH tem por base alguns fundamentos que determinam prioridades e responsabilidades sobre o uso da água.

De acordo com o Art. 1º da Política Nacional de Recursos Hídricos, a água é considerada bem público, limitada, e que possui valor econômico e que em situações de escassez seu uso deve ser priorizado para consumo humano e dessedentação de animais. Por não ser infinita, existe a necessidade da implantação de uma boa gestão que conte com a participação do poder público, usuários e das comunidades em prol do uso múltiplo e consciente com o objetivo de manter qualidade e quantidades suficientes para atender as demandas.

Dessa forma, estudar o comportamento de um corpo d'água e determinar sua qualidade ao longo do seu curso torna-se necessário não só como bem fundamental à vida, mas também como visão sustentável e cumprimento às legislações vigentes.

Outro ponto importante refere-se aos fatores climáticos que podem modificar as características dos rios. Recentemente passamos por um período de escassez hídrica. Através da modelagem matemática é possível simular diversos cenários para o rio e diferentes tipos de lançamentos de efluentes, mesmo antes de serem gerados.

Determinar as características da bacia onde o rio está inserido é o primeiro passo do estudo. Tipos de ocupação, relevo, vegetação, clima e outras intervenções antrópicas também devem ser levados em conta.

Segundo Von Sperling (2007), modelos matemáticos representam a realidade como ela é observada ou medida, dificilmente conseguindo representar toda a complexidade das múltiplas interações nos sistemas ambientais, várias delas não mesuráveis ou quantificáveis.

Tendo como ferramenta de trabalho um modelo matemático é possível determinar a qualidade da água de qualquer rio e como ele se comporta a determinados lançamentos de efluentes. Este trabalho tem como objetivo investigar, através do matemático de *Streeter-Phelps*, como o Rio Doce se comporta e autodepura em um trecho pré-definido de 46 quilômetros ao receber o efluente pontual gerado pelo processo industrial da CENIBRA.

Esse trabalho também levará em conta as características do Rio Santo Antônio, importante rio afluente do Rio Doce. A montante da sua foz com o Rio Doce no município de Naque existe uma usina hidrelétrica que modifica seu curso natural. Sua vazão é controlada de acordo com demandas por geração de energia elétrica e consumo de água, alterando, assim, sua forma natural e conseqüentemente o produto da mistura pós-afluência.

Por fim, os resultados apresentados pelo modelo podem servir para mapeamento de poluição hídrica, planejamentos para tomadas de decisões e/ou para simular cenários futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Caracterização da Bacia Hidrográfica do Rio Doce

A Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD) estende-se por uma área de 86.715 quilômetros quadrados, dos quais 86% estão no Leste mineiro e 14% no Nordeste do Espírito Santo. Segundo IBGE (2010), a população abrangida é de aproximadamente 4.759.505 habitantes e distribuída em 229 municípios, sendo 203 mineiros e 26 capixabas.

A atividade antrópica da região acarreta em vários impactos nos rios da bacia. Segundo Iusifith Chafith Felipe, pedagogo, engenheiro de telecomunicações e presidente reeleito do Comitê da Bacia Hidrográfica Piracicaba (CBH Piracicaba) e vice-presidente CBH Doce/MG em entrevista concedida à Revista eletrônica Viver Mais, 87% do esgoto das cidades que estão na BHRD e microbacias são jogados nos rios. Outras atividades também geram muitos impactos na área da bacia como mineração, as obras da duplicação da BR-381 e a implantação do mineroduto Minas-Rio.

Todas as sub-bacias também influenciam na qualidade e quantidade das águas do Rio Doce. Uma delas é a do Rio Piracicaba, que possui 48% das terras destinadas à pecuária, 35% com floresta Estacional Semi-Decidual e 8% com áreas de reflorestamento. A outra sub-bacia de influência é a do Rio Piranga. O rio que dá nome a essa bacia nasce no município de Ressaquinha cuja sede não está inserida na bacia do rio Doce e se desenvolve por 470 quilômetros quando se encontra com o Ribeirão do Carmo e forma o Rio Doce. As atividades realizadas nessa sub-bacia são a pecuária, silvicultura, mineração, agricultura e suinocultura. Segundo o Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce (2010), a sub-bacia possui 77 municípios com 700 mil habitantes dos quais 44,03% lançam seus esgotos sem tratamento diretamente nos corpos d'água na sub-bacia do Piranga.

A atividade de mineração na bacia do Rio Doce ocorre desde o século XVIII com o início da exploração do ouro. Na região predominam os tipos de solo Latossolos, Argilossolos e Cambissolos, todos favoráveis a processos erosivos, segundo Crepani (2001). A área da BHRD possui um relevo montanhoso e acidentado.

O trecho escolhido para o estudo inicia-se na altura da fábrica da CENIBRA no distrito de Cachoeira Escura e finaliza-se no distrito de Pedra Corrida. Entre o ponto inicial e o final, existe a confluência do Rio Santo Antônio com o Rio Doce. O solo da sub-bacia do Santo Antônio é usado principalmente para mineração, pecuária, plantação de eucalipto, milho, cana de açúcar e café e possui 56% de suscetibilidade para erosão.

O Rio Doce possui uma extensão de 850 quilômetros, desde suas nascentes nas Serras da Mantiqueira e do Espinhaço até sua foz no oceano Atlântico no estado do Espírito Santo. O trecho de estudo possui 46 quilômetros de extensão e de acordo com a resolução CONAMA nº357 de 2005, as águas se enquadram na classe 2 nos rios de água doce, ou seja, destinado ao abastecimento para consumo, após tratamento convencional, e para a irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas, forrageiras, hortaliças, frutíferas, parques, jardins, entre outras, com oxigênio dissolvido mínimo permissível de 5 mg/L.

2.2 A autodepuração dos corpos d'água

A autodepuração tem início assim que poluentes são lançados em um corpo d'água qualquer. Segundo Von Sperling (1996), o fenômeno da autodepuração está vinculado ao restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, por mecanismos essencialmente naturais, após as alterações induzidas pelos despejos afluentes. De acordo com Andrade (2010), é decorrente da associação de vários processos de natureza física (diluição, sedimentação e reaeração atmosférica), química e biológica (oxidação e decomposição).

Segundo Braga (2005), os estágios de sucessão ecológica presentes nesse processo são fisicamente identificados por trechos, que são definidos como zonas de autodepuração. O processo de autodepuração ocorre em quatro fases distintas. Cada fase representa um ponto no corpo d'água e são denominadas zonas. A Figura 01 ilustra o processo de autodepuração.

2.3 Modelagem matemática da qualidade das águas

A modelagem matemática é uma importante ferramenta capaz de simular diversos sistemas e prever seus comportamentos. Através de um modelo é possível, de forma mais

facilitada, confirmar ou não hipóteses relacionadas a problemas mais complexos, encontrar contradições em dados ou hipóteses formuladas ou ainda prever resultados que não foram testados ou que não podem ser testados, seja por questões de custo ou por limitações da ciência. Vários modelos são utilizados atualmente. Segundo Chapra (1994), os modelos possibilitam compreender o meio ambiente e visualizá-los de forma integrada, associar as informações físicas, químicas e biológicas.

A modelagem ajuda a evitar ou reduzir gastos com experimentos e pode ser capaz de simular experimentos impossíveis de serem realizados na prática. De acordo com Bäumlé (2005), a modelagem também é capaz de simular cenários extremos e/ou futuros, estimando custos e medidas preventivas que deverão ser tomadas. Esse tipo de possibilidade é uma poderosa ferramenta para gestão de recursos naturais.

Além de caracterizar o rio, a modelagem também deve caracterizar todas as fontes de efluentes lançados em seu curso. No caso do estudo, foi necessário levar em conta o tipo de efluente da CENIBRA, o tempo de operação, o tipo de produção, a reutilização de água. Através dessa caracterização é possível diagnosticar se o efluente líquido pode ser solúvel ou com sólidos em suspensão, com ou sem coloração, orgânico ou inorgânico, com temperatura baixa ou elevada. O lançamento indevido de efluentes industriais de diferentes fontes ocasiona modificações nas características do solo e da água, podendo causar impactos.

Dessa forma, através de um modelo matemático bem calibrado, é possível determinar a qualidade das águas de um rio modelado e estipular a quantidade de efluente que ele poderá receber sem sofrer alterações significativas. Também é possível estabelecer de acordo com os resultados da modelagem, quais as possíveis medidas que poderão ser tomadas em casos de rios que necessitem de recuperação.

O modelo utilizado no estudo de autodepuração do Rio Doce foi o de *Streeter-Phelps* que possui grande aceitação no mundo científico.

2.3.1 Modelo de Streeter-Phelps

Os primeiros estudos relacionados à autodepuração de corpos d'água começaram com o modelo de *Streeter-Phelps*. Em 1925, criado por Harold Warner Streeter, engenheiro sanitário e por Earle Bernard Phelps, químico, bacteriologista e especialista sanitário, o

modelo foi desenvolvido para mapear fontes de poluição no rio Ohio nos Estados Unidos da América (EUA) e determinar os quantitativos de oxigênio a jusante de lançamentos de material orgânico. O modelo simula apenas as curvas oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO). O OD durante o percurso do rio tende a se estabilizar através da desoxigenação e reaeração. A DBO está relacionada tanto à matéria orgânica quanto ao oxigênio usado para quebrá-la. De acordo com Tucci (1998), o modelo de *Streeter-Phelps* foi elaborado para rios de regime de escoamento permanente uniforme baseado em uma descarga constante de poluentes, não prevendo a entrada de tributários ou lançamentos, demanda bentônica, sedimentação da matéria orgânica, reoxigenação proveniente da fotossíntese. Pressupõe uma mistura imediata, considerando apenas o efeito advectivo do transporte de massa e a fase carbonácea no consumo da matéria orgânica. Delloso (2009) descreve que o modelo também não leva em consideração a agitação da água assim como a velocidade de deslocamento, profundidade do canal, acidentes topográficos e ação do vento entre outros.

2.3.2 Coeficientes dos modelo

O modelo utiliza três coeficientes que são ajustados segundo as características do rio estudado. Eles são o coeficiente de desoxigenação (K1), o coeficiente de decomposição (Kd) e o coeficiente de reaeração (K2).

De acordo com Von Sperling (2005), efluentes tratados são exemplos de substâncias inibidoras, pois possuem uma taxa de degradação lenta. Isso ocorre devido à estabilização vagarosa do que resta do tratamento, já que a matéria orgânica facilmente assimilada foi removida. O K1 relaciona Concentração de DBO remanescente com tempo. Representa a taxa de degradação da matéria orgânica na água. Na hipótese de não haver possibilidade de realizar amostragem da água, o K1 pode ser determinado por valores tabelados no Quadro 01.

O K1 deve ser ajustado em função da temperatura de acordo com a Equação 01 a seguir:

$$K1(T) = K1(20^{\circ}\text{C}) \times \theta^{(T - 20)} \quad \text{Equação 01}$$

Onde:

K1T= K1 a uma temperatura T qualquer (d-1);

K120= K1 à temperatura T=20°C (d-1);

T = temperatura da água (°C) e

θ = coeficiente de temperatura θ tem o valor igual a 1,047 (EPA, 1987).

O K_2 representa a reaeração do corpo d'água. Segundo Von Sperling (2007), a reaeração ocorre através de trocas de oxigênio do rio com a atmosfera e vice-versa. Quando o oxigênio do rio é consumido para a estabilização da matéria orgânica, torna-se necessária a passagem do oxigênio da atmosfera para o rio a fim de que as concentrações rio-atmosfera se equilibrem. Seus valores podem ser determinados através de valores médios tabelados, valores em função das características hidráulicas do corpo d'água ou por valores correlacionados com a vazão do curso d'água. Pode ser determinado em função da profundidade e velocidade do corpo d'água através do Quadro 02.

Como no coeficiente de desoxigenação, o coeficiente de reaeração também deve ser ajustado na temperatura local. O ajuste é feito através da Equação 02 abaixo:

$$K_2(T) = K_2(20^\circ\text{C}) \times \theta^{(T - 20)} \quad \text{Equação 02}$$

Onde:

$K_2(T)$ = K_2 a uma temperatura T qualquer (d-1);

$K_2(20^\circ\text{C})$ = K_2 a uma temperatura $T=20^\circ\text{C}$ (d-1);

T = temperatura da água ($^\circ\text{C}$);

θ = coeficiente de temperatura θ tem o valor igual a 1,047 (EPA, 1987).

O K_d indica a taxa de decaimento da DBO no rio e pode ser determinado por valores tabelados disponíveis no Quadro 01 ou através de duas equações, uma relacionada à vazão do rio e outra relacionada à profundidade. Nesse estudo foi utilizado o coeficiente relacionado à vazão já que já tínhamos os dados necessários. O K_d é obtido através da Equação 03 e o ajuste para a temperatura pode ser determinado pela Equação 04.

$$K_d = 1,8 \cdot Q^{-0,49} \quad \text{Equação 03}$$

Onde:

Q = vazão do rio (m^3/s)

K_d = coeficiente de decomposição (dia⁻¹)

$$K_d(T) = K_d(20^\circ\text{C}) \times \theta^{(T - 20)} \quad \text{Equação 04}$$

Onde:

$K_d(T)$ = K_d a uma temperatura T qualquer (d-1);

$K_d(20^\circ\text{C})$ = K_d à temperatura $T=20^\circ\text{C}$ (d-1);

T = temperatura da água ($^\circ\text{C}$) e

θ = coeficiente de temperatura.

3 METODOLOGIA

Segundo Tucci (1998), as principais características para representação dos processos em recursos hídricos são as condições hidráulicas, químicas e biológicas do meio. Além disso, as condições de escoamento do sistema determinam o tipo de estrutura básica do modelo a ser utilizado. Sendo assim, o primeiro passo foi determinar os parâmetros físicos do rio, os parâmetros de qualidade da água, a escolha do modelo. O trabalho foi realizado de forma empírica, com amostragem do Rio Doce e Rio Santo Antônio. Posteriormente, as amostras foram enviadas para o laboratório do DEMAQ-P onde foram realizados os ensaios. Após os ensaios, o modelo foi calibrado de acordo com as características do Rio Doce.

3.1 Obtenção dos parâmetros de qualidade da água

Para a obtenção dos parâmetros de qualidade da água, foram realizadas duas campanhas, uma em período chuvoso (13/05/2015 e 14/05/2015) e outra em período seco (26/08/2015) em onze seções para um trecho de estudo de quarenta e seis quilômetros. Dessa forma foi possível simular dois cenários diferentes, alta e baixa vazão. A temperatura e pH das amostras foram obtidas *in situ* através do pHmetro Portátil de Campo e Laboratório, modelo DM-2P da Digimed. Para os parâmetros oxigênio dissolvido, DBO5, DQO, fósforo total, fosfato total, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio orgânico, nitrogênio total, turbidez, coliformes totais e coliformes termotolerantes, as amostras foram preservadas e encaminhadas ao laboratório do DEMAQ-P de acordo com as técnicas recomendadas pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22ª edição (APHA, 2005).

3.2 Obtenção dos parâmetros físicos do rio

Os parâmetros físicos do Rio Doce e do Rio Santo Antônio foram calculados em função dos dias das coletas. Os dados físicos como velocidade, profundidade, declividade e seção molhada foram obtidos na base de dados da CENIBRA, as vazões foram obtidas no site da Agência Nacional de Águas (ANA) e as imagens de satélite para os cálculos das distâncias dos trechos e confecção de mapas foram extraídas do programa computacional *Google Earth*. Os trechos do estudo foram divididos com intuito de computar todas as alterações ocorridas no rio, sendo elas físicas ou químicas, desde o lançamento do efluente da CENIBRA, oxigenação através da cachoeira até a mistura com o Rio Santo Antônio.

3.3 Calibração dos coeficientes dos modelos matemáticos

De acordo com Oppa (2007), a fim de se obter uma simulação com precisão satisfatória das características do rio, a calibração pode ser considerada como um procedimento primordial para utilização de um modelo matemático. O modelo de *Streeter-Phelps* precisa ser calibrado assim que os parâmetros físicos e de qualidade da água forem definidos no início da modelagem. Segundo Von Sperling (2007), dependendo das condições do rio estudado, os coeficientes podem ser alterados a cada trecho com o objetivo de retratar o rio mais fielmente à realidade. O Rio Doce e o Rio Santo Antônio possuem características físicas bem uniformes ao longo dos seus trechos estudados, dessa forma, seus coeficientes não se alteram de forma brusca ao longo dos seus cursos. O modelo possui seis coeficientes que serão abordados nas revisões bibliográficas.

4 DESENVOLVIMENTO, DEMONSTRAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Caracterização física do trecho estudado

O trecho de estudo possui 46 quilômetros e foi dividido em 10 sub-trechos no Rio Doce e mais um sub-trecho no Rio Santo Antônio com o objetivo de caracterizá-los conforme a Figura 02. Todos os pontos de amostragem foram georreferenciados de acordo com a Tabela 01.

Após definir os sub-trechos, as vazões e velocidades do Rio Doce nas duas campanhas foram obtidas nos arquivos da CENIBRA e no site da Agência Nacional das Águas (ANA). As vazões e velocidades do Rio Santo Antônio foram obtidas no site ANA.

4.2 Caracterização da qualidade da água

As coletas das amostras de água foram realizadas nos dias 13/05/2015, 14/05/2015 (Primeira campanha) e 26/08/2015 (Segunda campanha). Na amostragem da primeira campanha, o pH que é o parâmetro que estabelece se a água é ácida ou alcalina variou entre 7,36 e 8,81 e na segunda campanha variou entre 7,00 e 7,67 demonstrando que independente da vazão apresentada, se manteve dentro dos parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005. O oxigênio dissolvido também esteve acima dos 5mg/L estabelecido para rios classe 2 pela mesma resolução, variando entre 6,31mg/L e 7,95mg/L na primeira campanha e entre 6,30mg/L e 8,11mg/L na segunda campanha. A DBO se manteve abaixo de 2mg/L, o recomendado pela CONAMA 357, variando entre 0,9mg/L e 1,3mg/L na primeira campanha e entre 0,6mg/L e 1,5mg/L na segunda campanha. Os ensaios laboratoriais de todos os parâmetros analisados constam nas Tabelas 02 e 03 e os resultados da modelagem de oxigênio dissolvido e DBO nas Figuras 03, 04, 05 e 06. As amostragens e todos os ensaios foram feitos de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22ª edição (APHA, 2005).

4.3 Coeficientes da modelagem

O coeficiente de desoxigenação (K1) é dependente de outras características do corpo d'água como temperatura e presença de matéria orgânica. Ele simula o processo de degradação

da matéria orgânica através de bactérias aeróbias que consomem o oxigênio para realizar tal tarefa. O coeficiente de desoxigenação foi definido de acordo com a Tabela 04, para rios recebendo efluente primário.

O valor que melhor retratou a realidade do Rio Doce no trecho estudado foi 0,40. A Tabela 05 e 06 apresenta os resultados após ajustes para cada ponto à temperatura nas duas campanhas.

O coeficiente de reaeração (K_2) determina a taxa de troca de oxigênio do corpo d'água com o ambiente. Essa troca de oxigênio acontece entre os dois a ponto de se estabilizar ao saturar o corpo d'água com oxigênio. No estudo, de posse das características do corpo d'água os dois rios se enquadraram melhor na faixa de aplicação da fórmula de Churchill *et al* (1962). Para obter o K_2 foi usado o Quadro 02 e depois ajustado à temperatura pela Equação 02. As principais diferenças nos valores do K_2 entre as duas campanhas foram devidos a grande mudança ocorrida na vazão e profundidade do rio. Os valores quase dobraram como pode ser visto nas Tabelas 07 e 08.

O coeficiente de decomposição (K_d), foi determinado trecho a trecho em função da vazão pela Equação 03. Também foi ajustado de acordo com a temperatura pela Equação 04 e seus valores estão presentes nas Tabelas 09 e 10.

5 CONCLUSÃO

Após a obtenção das características do Rio Doce e Rio Santo Antônio, o modelo foi escolhido, calibrado e por fim obtido o resultado.

Os trechos foram definidos de acordo com alterações importantes nas características físicas, químicas e biológicas do rio. Os onze pontos de monitoramento e coleta de amostras foram distribuídos ao longo dos quarenta e seis quilômetros do curso em estudo.

O Rio Doce foi um bom exemplo para ser estudado. O trecho em estudo contou com as principais alterações que um corpo d'água pode sofrer. Lançamento de esgotos domésticos, lançamentos de efluentes industriais, deságue de outros rios, trechos sem matas ciliares, criação de gado no entorno, silvicultura, dragagens, barramentos e cachoeiras foram todas as características capazes de influenciar na qualidade da água do Rio Doce encontradas no trecho estudado.

Após a calibração da primeira amostragem realizada no dia 13/05/2015 e da segunda calibração realizada em 26/08/2015, todos os resultados dos 17 parâmetros analisados (temperatura, pH, oxigênio dissolvido inicial, oxigênio dissolvido final, DBO, DQO, fósforo

total, fosfato total, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, nitrogênio kjeldahl, nitrogênio orgânico, nitrogênio total, turbidez, coliforme total, coliforme termotolerante) foram satisfatórios de acordo com os padrões estabelecidos na Resolução CONAMA 357/05 e estão listados nas tabelas Tabela 02 e Tabela 03.

Os resultados foram bem satisfatórios devidos principalmente a dois fatores, o tratamento do efluente feito pela CENIBRA e a grande vazão do Rio Doce em comparação às vazões de todos os lançamentos ocorridos durante o percurso estudado. Dessa forma o rio pôde exercer seu poder de autodepuração e em nenhum momento sofreu com as cargas de efluentes lançadas em seu curso. Antes mesmo do último sub-trecho do estudo, o rio já estava depurado, apresentado as mesmas características do sub-trecho inicial.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação – referências – elaboração. Rio de Janeiro, RJ: [s.n], 2002. 24p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação – citação em documentos – apresentação. Rio de Janeiro, RJ: [s.n], 2002. 7p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação – trabalhos acadêmicos – apresentação. Rio de Janeiro, RJ: [s.n], 2002. 6p.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **APHA**: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington, D.C, 1998.

BÄUMLE, A. M. B. **Avaliação de benefícios econômicos da despoluição hídrica: efeitos de erros de calibração de modelos de qualidade da água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

BRAGA et al **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2ª Ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2005.

BRASIL - **Lei das Águas** nº9.433 97 de 08 de janeiro de 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm> . Acesso em 12 de novembro de 2015.

BRASIL. Resolução CONAMA nº357 de 17 de março de 2005. **Classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Brasília, DF. 17 mar. 2005.

CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J.; TAO, H. **QUAL2K: A Modeling Framework for simulating river and stream water quality: documentation and user manual**. Version 2.07. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, 2007. 42p.

CHAPRA, S.C. **Surface water-quality modeling**. New York: McGraw Hill, 1997.

Comitê de Bacias Hidrográficas Piracicaba. Disponível em:
<<http://www.cbhpiracicaba.org.br>>. Acesso em 15 de setembro de 2015.

Comitê de Bacias Hidrográficas Santo Antônio. Disponível em:
<<http://www.cbhdoce.org.br>>. Acessado em 16 de setembro de 2015.

DELLOSSO, E. P. **Avaliação da Qualidade da água do rio Monjolinho utilizando o modelo QUAL-2E**. São Carlos, 2009.

EPA, United States Environmental Protection Agency. **Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling**. 2. Ed. Athens, 1985. 455 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em:
<<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>>. Acessado em 15 de setembro de 2015.

IMHOFF, KLAUSR e IMHOFF, KARL. **Manual de tratamento de águas residuárias**. Tradutor: Engenheiro Max Lothar Hess. Editora Edgard Blucher LTDA, 1996 São Paulo. Publicação 1985.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Disponível em:
<<http://www.igam.mg.gov.br>>. Acessado em 15 de setembro de 2015.

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

MOURÃO JR, P. R. **Aplicação do Modelo de Autodepuração de Qualidade das Águas QUAL-UFMG: Estudo de Caso Sub-bacia do Rio Piracicaba**. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade Sócio-econômica e Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

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

PERIN, L. T. **Uso do Modelo QUAL-UFMG no estudo da qualidade da água e da capacidade de Autodepuração do Rio Km119**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

Revista eletrônica Viver Mais. Disponível em
<<http://viverminas.com.br/plus/modulos/listas/?tac=noticias-ler&id=335#.Vfqk6Onsk5g>>. Acessado em 17 de setembro de 2015.

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

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3 ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2002. 943p.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Associação Brasileira de Recursos Hídricos (UFRS/ABRH). Porto Alegre, 1998.

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

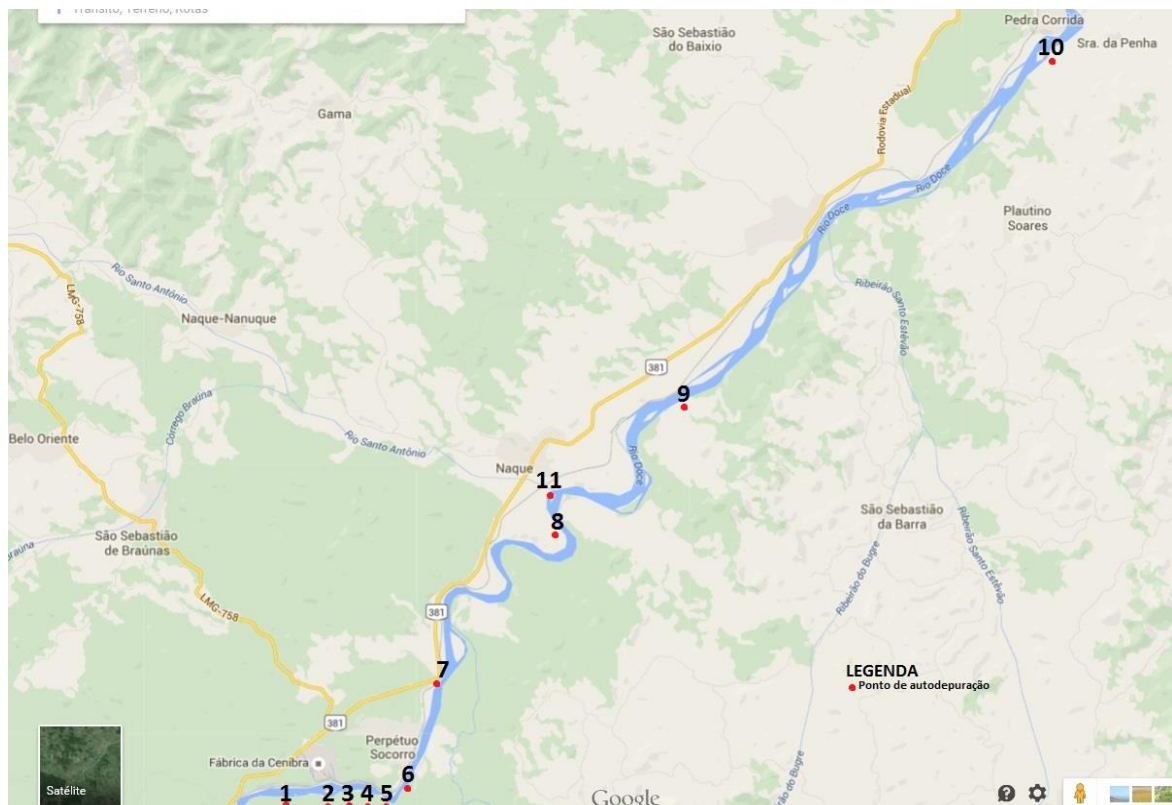
VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. v. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3º ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 2005. v. 1. 452 p.

Tabela 01 – Seções transversais de monitoramento de qualidade da água

SEÇÃO	DESCRIÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE
1	Rio Doce - 200m a montante da captação da Cenibra	19° 19' 40,025" S	42° 23' 55,436" W
2	Rio Doce - 100m a jusante do emissário da Cenibra	19° 19' 37,659" S	42° 23' 16,192" W
3	Rio Doce - 250m a jusante do emissário da Cenibra	19° 19' 39,033" S	42° 23' 0,347" W
4	Rio Doce - 550m a jusante do emissário da Cenibra	19° 19' 23,164" S	42° 21' 56,035" W
5	Rio Doce - 1400m a jusante do emissário da Cenibra	19° 17' 41,026" S	42° 21' 18,278" W
6	Rio Doce - 1100m a jusante da Cachoeira Escura	19° 19' 23,164" S	42° 21' 56,035" W
7	Rio Doce - 5,3 km a jusante da Cachoeira Escura	19° 19' 45,073" S	42° 22' 26,199" W
8	Rio Doce - 600m a montante da foz do Rio Santo Antônio	19° 14' 36,170" S	42° 19' 13,364" W
9	Rio Doce - 7,1 km a jusante da foz do Rio Santo Antônio - Montante de Periquito	19° 14' 12,675" S	42° 18' 29,242" W
10	Rio Doce - 25,5 km a jusante da foz do Rio Santo Antônio - em Pedra Corrida	19° 5' 47,776" S	42° 9' 28,250" W
11	Rio Santo Antônio - 600m a montante da sua foz no Rio Doce	19° 13' 56,419" S	42° 19' 37,294" W

Fonte: Autor, 2015.

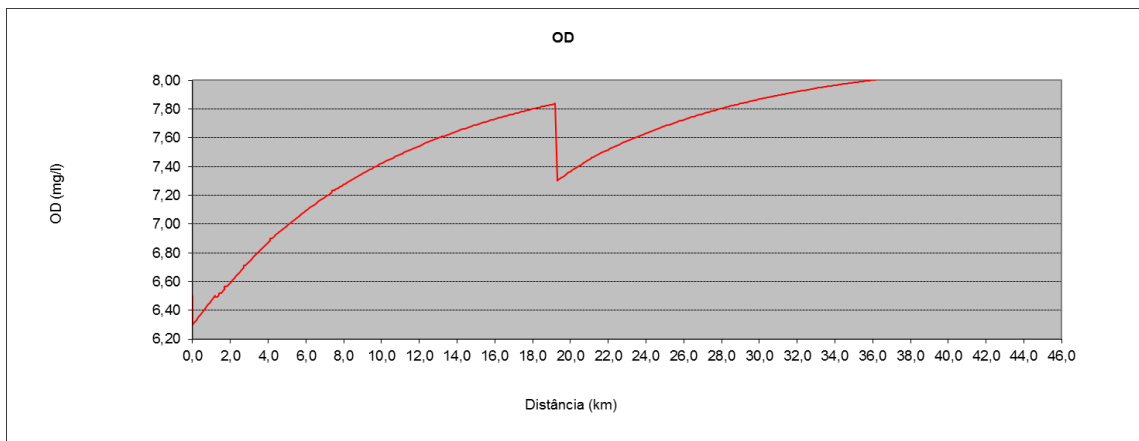
Figura 02 – Mapa da Área de Estudo



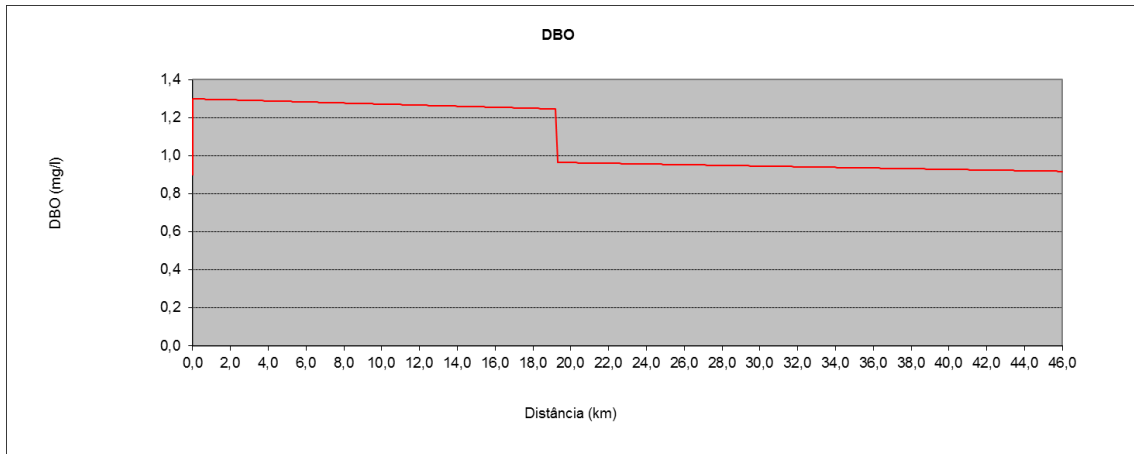
Fonte: Adaptado do Google, 2015.

Figura 03 – Valores de oxigênio dissolvido modelados na primeira campanha

Fonte: Autor, 2015.

Figura 04 – Valores de oxigênio dissolvido modelados na segunda campanha

Fonte: Autor, 2015.

Figura 05 – Valores de DBO modelados na primeira campanha

Fonte: Autor, 2015.

Figura 06 – Valores de DBO modelados na segunda campanha

Fonte: Autor, 2015.

Tabela 02 – Ensaios Físico-químicos do Rio Doce e Rio Santo Antônio para amostragem do dia 13 e 14/05/2015

		Pontos de Amostragem										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Data da Amostragem		13/5	13/5	13/5	13/5	13/5	13/5	14/5	13/5	13/5	13/5	13/5
Hora da Amostragem		10:00	10:30	10:45	11:08	11:49	13:58	08:55	15:05	16:32	17:40	15:55
Temperatura	°C	23,30	23,50	23,80	24,10	24,60	24,80	24,60	25,60	25,30	25,40	25,20
pH		8,55	8,55	7,36	7,41	8,42	8,33	8,31	7,75	7,94	8,81	8,53
Oxigênio Dissolvido Inicial	mgO ₂ /L	6,30	6,40	6,50	6,20	6,40	7,60	6,80	7,00	7,00	7,10	6,70
Oxigênio Dissolvido Final	mgO ₂ /L	5,31	5,57	5,47	4,89	4,63	6,20	6,09	6,30	6,77	6,51	6,35
DBO	mgO ₂ /L	1,00	0,90	1,00	1,30	1,80	1,40	0,70	0,70	0,20	0,60	0,30
DQO	mgO ₂ /L	NQ	NQ	NQ	NQ	NQ	NQ	1,50	NQ	NQ	NQ	NQ
Fósforo Total	mgP/L	0,09	0,1	0,11	0,08	0,1	0,08	0,07	0,08	0,03	0,04	0,04
Fosfato Total	mgPO ₄ /L	0,28	0,31	0,34	0,25	0,31	0,25	0,21	0,25	0,09	0,12	0,12
Nitrato	mgN/L	NQ	NQ	NQ	NQ	1,17	NQ	NQ	1,14	1,21	1,16	NQ
Nitrito	mgN/L	0,008	0,008	0,007	0,007	0,007	0,005	0,008	0,006	0,003	0,003	0,005
Nitrogênio Amoniacal	mgN/L	0,15	0,14	0,17	0,13	0,21	0,14	0,12	0,09	NQ	0,09	0,11
Nitrogênio kjeldahl	mgN/L	0,87	0,88	0,79	0,78	0,93	0,67	0,74	0,60	0,47	0,55	0,49
Nitrogênio Orgânico	mgN/L	0,72	0,74	0,62	0,65	0,72	0,53	0,62	0,51	0,47	0,46	0,38
Nitrogênio Total	mgN/L	0,878	0,888	0,797	0,787	2,107	0,675	0,748	0,606	1,683	1,713	0,495
Turbidez	NTU	41,3	42	52,4	31,2	41,3	33,8	24,4	37,8	34,2	37,4	25,3
Coliforme Total	UFC/100ml	85000	65000	63000	66000	65000	55000	40000	23000	3000	2000	7000
Coliforme Termotolerantes	UFC/100ml	19000	20000	17000	13000	14000	8000	18000	10000	1000	3000	1000

Fonte: Laboratório DEMAQ-P, 2015.

Tabela 03 – Ensaio Físico-químicos do Rio Doce e Rio Santo Antônio para amostragem do dia 26/08/2015

		Pontos de Amostragem										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Data da Amostragem		26/8	26/8	26/8	26/8	26/8	26/8	26/8	26/8	26/8	26/8	26/8
Hora da Amostragem		09:34	10:29	10:07	10:11	10:17	11:38	13:13	14:00	15:08	16:30	14:30
Temperatura	°C	24,10	25,60	26,30	25,50	26,60	26,80	25,50	27,60	26,80	26,80	26,00
pH		7,10	7,15	7,00	7,27	7,28	7,67	7,41	7,54	7,26	7,55	7,45
Oxigênio Dissolvido Inicial	mgO ₂ /L	6,50	6,50	6,60	6,50	7,00	8,20	8,40	7,70	8,40	7,80	8,40
Oxigênio Dissolvido Final	mgO ₂ /L	6,00	5,89	5,78	4,92	6,23	7,69	7,96	6,68	7,05	6,71	7,63
DBO	mgO ₂ /L	0,50	0,60	0,80	1,50	0,70	0,50	0,50	1,00	1,30	1,10	0,70
DQO	mgO ₂ /L	5,3	3	15,9	2,8	4,4	8,7	14,70	8,1	3,1	5	0,9
Fósforo Total	mgP/L	0,06	0,12	0,09	0,08	0,07	0,08	0,08	0,14	0,04	0,06	0,07
Fosfato Total	mgPO ₄ /L	0,18	0,35	0,26	0,25	0,2	0,23	0,23	0,41	0,12	0,17	0,2
Nitrato	mgN/L	1,32	1,37	1,35	1,37	1,35	1,38	1,37	1,37	NQ	NQ	NQ
Nitrito	mgN/L	0,029	0,022	0,027	0,024	0,023	0,02	0,02	0,014	0,002	0,006	NQ
Nitrogênio Amoniacal	mgN/L	0,4	0,39	0,39	0,39	0,36	0,39	0,38	0,26	0,19	0,18	0,14
Nitrogênio kjeldahl	mgN/L	0,75	0,71	0,73	0,68	0,66	0,74	0,72	0,71	0,33	0,54	0,26
Nitrogênio Orgânico	mgN/L	0,35	0,32	0,34	0,29	0,30	0,35	0,34	0,45	0,14	0,36	0,12
Nitrogênio Total	mgN/L	2,099	2,102	2,107	2,074	2,033	2,140	2,110	2,094	0,332	0,546	0,260
Turbidez	NTU	3,97	19,7	10,5	10,2	8,35	9,19	7,87	22,4	10,2	5,19	9,22
Coliforme Total	UFC/100ml	24000	55000	7000	26000	74000	29000	60000	54000	23000	12000	19000
Coliforme Termotolerantes	UFC/100ml	8500	12000	2000	9000	11000	8500	2000	1000	500	0	0

Fonte: Laboratório DEMAQ-P, 2015.

Tabela 05 – Valores do K1 para amostragem realizada em 13/05/2015

Ponto	Temperatura da amostra	Valor do K1	Valor do K1 ajustado
1	23,3	0,4	0,465461796
2	23,5	0,4	0,469757126
3	23,8	0,4	0,476274557
4	24,1	0,4	0,482882411
5	24,6	0,4	0,494099856
6	24,8	0,4	0,498659461
7	24,6	0,4	0,494099856
8	25,6	0,4	0,517322549
9	25,3	0,4	0,51024341
10	25,4	0,4	0,512592293
11	25,2	0,4	0,50790529

Fonte: Própria, 2015.

Tabela 06 – Valores do K1 para amostragem realizada em 26/08/2015

Ponto	Temperatura da amostra	Valor do K1	Valor do K1 ajustado
1	24,1	0,4	0,482882411
2	25,6	0,4	0,517322549
3	26,3	0,4	0,53422485
4	25,5	0,4	0,51495199
5	26,6	0,4	0,541636709
6	26,8	0,4	0,546634989
7	25,5	0,4	0,51495199
8	27,6	0,4	0,567093634
9	26,8	0,4	0,546634989
10	26,8	0,4	0,546634989
11	26	0,4	0,526914417

Fonte: Própria, 2015.

Tabela 07 – Valores do K2 para amostragem realizada em 13/05/2015

Ponto	Temperatura da amostra	Valor do K2	Valor do K2 ajustado
1	23,3	4,05	4,712800684
2	23,5	4,05	4,756290904
3	23,8	4,05	4,822279889
4	24,1	4,05	4,889184408
5	24,6	4,05	5,002761039
6	24,8	4,05	5,048927044
7	24,6	4,05	5,002761039
8	25,6	4,05	5,237890808
9	25,3	4,05	5,166214525
10	25,4	4,05	5,18999697
11	25,2	4,05	5,14254106

Fonte: Própria, 2015.

Tabela 08 – Valores do K2 para amostragem realizada em 26/08/2015

Ponto	Temperatura da amostra	Valor do K2	Valor do K2 ajustado
1	23,3	7,2	8,378312327
2	23,5	7,2	8,455628274
3	23,8	7,2	8,572942025
4	24,1	7,2	8,691883392
5	24,6	7,2	8,893797403
6	24,8	7,2	8,9758703
7	24,6	7,2	8,893797403
8	25,6	7,2	9,31180588
9	25,3	7,2	9,184381378
10	25,4	7,2	9,22666128
11	25,2	7,2	9,142295218

Fonte: Própria, 2015.

Tabela 09 – Valores do Kd para amostragem realizada em 13/05/2015

Trecho	Temperatura da amostra	Valor do Kd	Valor do Kd ajustado
1→2	23,40	0,17	0,198731925
2→3	23,60	0,17	0,200565844
3→4	24,00	0,17	0,204284609
4→5	24,30	0,17	0,207118863
5→6	24,70	0,17	0,21095913
6→7	24,70	0,17	0,21095913
7→8	25,10	0,17	0,214870601
8→9	25,40	0,14	0,179407303
9→10	25,40	0,14	0,179407303

Fonte: Própria, 2015.

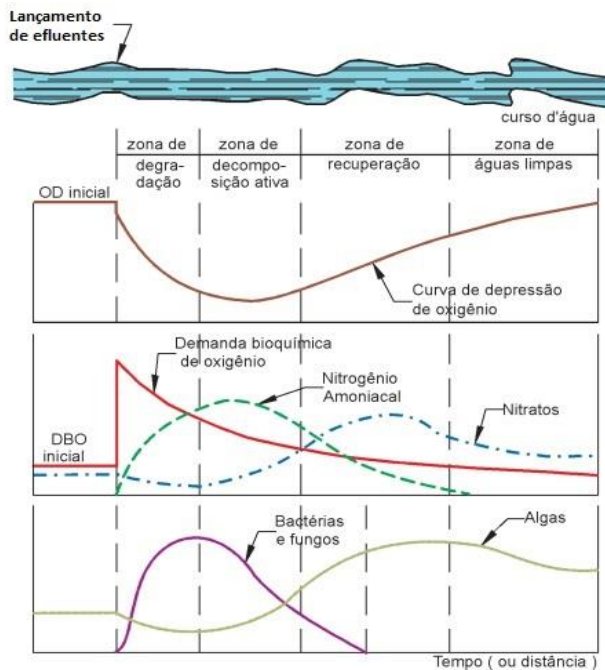
Tabela 10 – Valores do Kd para amostragem realizada em 26/05/2015

Trecho	Temperatura da amostra	Valor do Kd	Valor do Kd ajustado
1→2	24,80	0,24	0,299195677
2→3	25,90	0,24	0,314699943
3→4	25,90	0,24	0,314699943
4→5	26,00	0,24	0,31614865
5→6	26,70	0,24	0,326478066
6→7	26,10	0,24	0,317604027
7→8	26,50	0,24	0,32349284
8→9	27,20	0,20	0,278385175
9→10	26,80	0,20	0,273317495

Fonte: Própria, 2015

ANEXOS

Figura 01 – Autodepuração de corpos d'água



Fonte: Adaptado de Mota, 1995.

Quadro 01 - Valores típicos de K1 para as diferentes características dos corpos d'água

Valores típicos dos coeficientes de remoção de DBO (K_1 , K_s , K_d e K_r) (base e, 20°C)							
Origem	Rios rasos				Rios profundos		
	K_1 (laborat)	Decomp. K_d	Sediment. K_s	Remoção K_r (= K_s+K_d)	Decomp. K_d	Sediment. K_s	Remoção K_r (= K_s+K_d)
Curso d'água recebendo esgoto bruto concentrado	0,35-0,45	0,50-1,00	0,10-0,35	0,60-1,35	0,35-0,50	0,05-0,20	0,40-0,70
Curso d'água recebendo esgoto bruto de baixa concentração	0,30-0,40	0,40-0,80	0,05-0,25	0,45-1,05	0,30-0,45	0,00-0,15	0,30-0,60
Curso d'água recebendo efluente primário	0,30-0,40	0,40-0,80	0,05-0,10	0,45-0,90	0,30-0,45	0,00-0,05	0,30-0,50
Curso d'água recebendo efluente secundário	0,12-0,24	0,12-0,24	-	0,12-0,24	0,12-0,24	-	0,12-0,24
Curso d'água com águas limpas	0,08-0,20	0,08-0,20	-	0,08-0,20	0,08-0,20	-	0,08-0,20

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

Fonte: Von Sperling (2007).

Quadro 02 - Valores típicos de K₂ em função da velocidade e profundidade

Valores do coeficiente K ₂ segundo modelos baseados em dados hidráulicos do curso d'água (base e, 20°C)		
Pesquisador	Fórmula	Faixa de aplicação aproximada
O'Connor & Dobbins (1958)	$3,73 \cdot v^{0,5} H^{-1,5}$	0,6m ≤ H < 4,0m 0,05m/s ≤ v < 0,8m/s
Churchill <i>et al</i> (1962)	$5,0 \cdot v^{0,97} H^{-1,67}$	0,6m ≤ H < 4,0m 0,8 m/s ≤ v < 1,5m/s
Owens <i>et al</i> (apud Branco, 1978)	$5,3 \cdot v^{0,67} H^{-1,85}$	0,1m ≤ H < 0,6m 0,05 m/s ≤ v < 1,5m/s
Notas: V: velocidade do curso d'água		

Fonte: Von Sperling (2007).