

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

CAMPUS DO SERTÃO

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LARISSA COSTA CHAVES

**ANÁLISE DA AUTODEPURAÇÃO NO RIACHO CARAIBEIRINHAS ATRAVÉS DO
MODELO MATEMÁTICO DE STREETER-PHELPS**

Delmiro Gouveia – AL

2017

LARISSA COSTA CHAVES

**ANÁLISE DA AUTODEPURAÇÃO NO RIACHO CARAIBEIRINHAS ATRAVÉS DO
MODELO MATEMÁTICO DE STREETER-PHELPS**

Monografia apresentada como
requisito parcial para obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Alagoas –
UFAL, Campus do Sertão.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Pedro de
Oliveira Netto

Delmiro Gouveia – AL

2017

C397a Chaves, Larissa Costa

Análise da autodepuração no riacho Caraibeirinhas através do modelo matemático de Streeter-Phelps / Larissa Costa Chaves. – 2017.

55f.:il.

Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2017.

Orientação: Prof^a. Dr. Antonio Pedro de Oliveira Netto.

1. Autodepuração. 2. Qualidade da Água. 3. Streeter-Phelps.

CDU 628

Folha de Aprovação

AUTOR: LARISSA COSTA CHAVES

**ANÁLISE DA AUTODEPURAÇÃO NO RIACHO CARAIBEIRINHAS
ATRAVÉS DO MODELO MATEMÁTICO DE STREETER-PHELPS**

Esta trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão em 14 de junho de 2017.

Antonio Netto

Prof. Dr. Antônio Pedro de Oliveira Netto, UFAL (Orientador)

Banca Examinadora

Jose Raniery Rodrigues Cirne

Prof. Msc. José Raniery Rodrigues Cirne, UFAL (Examinador Interno)

Vinicius Costa Correia

Prof. Msc. Vinicius Costa Correia, UFAL (Examinador Interno)

Delmiro Gouveia – AL

2017

“Felizes os que confiam no Senhor [...] Porque são como as árvores plantadas junto às águas, que estende as suas raízes para o ribeiro, e não receia quando vem o calor, mas a sua folha fica verde; e no ano de sequeidão não se afadiga, nem deixa de dar fruto.”

Jeremias 17: 7-8.

A Deus, a minha mãe Maria, aos meus irmãos, e ao meu namorado Cássio pelo apoio, força nos momentos difíceis, incentivo, carinho e paciência que sempre tiveram comigo em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que com seu infinito amor e cuidado, derrama sempre grandes bênçãos em minha vida, permitindo-me sonhar os Seus sonhos.

A todos os meus professores, por compartilharem os seus conhecimentos e, em especial, ao meu orientador: professor Dr. Antônio Pedro de Oliveira Netto, pela paciência, compreensão e competência. Sua participação nesse trabalho foi indispensável, pois mostrou-se mestre em seu papel de orientar, guiando-me do início ao fim.

À minha mãe Maria Lima, que sempre esteve ao meu lado em todas as decisões, mostrando-me a importância do amor, cuidado e compreensão. Obrigada pelos seus ensinamentos, levarei os seus valores por toda a vida. Você é a minha inspiração.

Ao meu pai, pelo amor e torcida.

Aos meus irmãos, por todo amor, cuidado e união. Obrigada por estarem ao meu lado, incentivando-me a conquistar os meus objetivos, pelos inúmeros conselhos e pela torcida. Agradeço, em especial, os meus irmãos Márcio e Mailton, por sonharem este sonho comigo e permitirem que se tornasse realidade.

Ao meu namorado, meu grande amor, Cássio Neves. Obrigada por estar comigo em todas as situações e não me deixar desistir nos momentos de fraqueza. Com certeza, sem você, esta caminhada seria muito mais difícil. Obrigada por todo amor e companheirismo. Agradeço, também, aos seus pais, por todo carinho e torcida.

Às minhas cunhadas, pelo incentivo na busca deste sonho, por todo amor e compreensão.

Aos meus sobrinhos, por serem, também, minha inspiração.

Aos meus amigos, irmãos que ganhei, e tive o prazer de conviver durante a minha graduação: Valquíria Abreu, Felipe Guilherme, Patrícia Sousa, Franklin Gama, Rodrigo Carvalho e Gleidson Martins. Obrigada por compartilharem dos meus momentos difíceis e me ajudarem a conquistar os momentos de alegria. Vocês cumpriram o papel que Deus designou a vocês nessa fase da minha vida, de forma inexplicável. Vocês sempre estarão em meu coração.

À Primeira Igreja Batista de Delmiro Gouveia, por todo apoio, carinho e cuidado. Agradeço por estarem ao meu lado na caminhada da fé.

Aos que fizeram parte desta realização, parafraseando, dedico este trecho do clássico filme *Uma Mente Brilhante*: “Eu sempre acreditei em números, nas equações, na lógica que leva à razão, mas depois desta jornada eu me pergunto: o que realmente é lógica? E eu fiz a descoberta mais importante da minha carreira. É apenas nas misteriosas equações do amor que alguma lógica ou razão pode ser encontrada”. Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Nos últimos anos, um dos maiores problemas enfrentados no Brasil têm sido a gestão dos recursos hídricos, pois, em busca do desenvolvimento econômico a sociedade têm utilizado desse recurso de forma abusiva. O uso de modelos matemáticos que simulam as condições de um corpo hídrico torna-se uma ferramenta importante para quantificar a capacidade de autodepuração do mesmo. Diante disso, este estudo analisa a capacidade de autodepuração do riacho Caraibeirinhas, que possui sua nascente situada na cidade de Delmiro Gouveia-AL, recebendo ao longo do seu curso contribuições de esgotos domésticos e desaguando no rio Maxixe. Para atingir o objetivo deste estudo foram analisados quatro parâmetros da qualidade de água (pH, OD, DQO e DBO), aplicando-os no modelo matemático proposto por Streeter-Phelps e comparando-os com os parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA n°. 430/2011. A metodologia adotada teve como base pesquisas bibliográficas sobre poluição e autodepuração em corpos hídricos, experimentos nacionais e internacionais de autodepuração, levantamento de legislações existentes e projetos de pesquisas na área. Os resultados mostraram que a água do riacho Caraibeirinhas encontra-se com altas concentrações de matéria orgânica, sendo o lançamento irregular dos esgotos domésticos da comunidade ribeirinha a principal fonte de poluição. Em síntese, verificou-se que o corpo hídrico não está em conformidade com os padrões estabelecidos pela resolução CONAMA n°. 430/2011 para classe 2 de qualidade.

Palavras-Chave: Qualidade da água. Recursos hídricos. Autodepuração. Streeter-Phelps. Riacho Caraibeirinhas.

ABSTRACT

Lately, one of the biggest problems faced in Brazil has been water resources management, given that in order to achieve economic development the society has used this resource in an abusive manner. The use of mathematical models to verify water bodies quality becomes an important tool to quantify their self-purification capacity. Therefore, this study analyzes the self-purification capacity of the Caraiibeirinhas stream, which has its source is located in the city of Delmiro Gouveia-AL. In addition, this stream receives domestic sewage along its course and flows out into Maxixe river. In order to achieve main goal of this study, four water quality parameters (pH, OD, COD, and BOD) were analyzed using the mathematical model proposed by Streeter-Phelps and comparing each of them with the standard parameters established by CONAMA Resolution no. 430/2011. The methodology was based on bibliographic research about water pollution and self-purification capacity, national and international self-purification experiments, a survey of existing legislation and research projects in the area. Our results shows that Caraiibeirinhas stream has high concentrations of organic matter, which comes from the irregular launching of domestic sewage by the riverside community. In summary, we verified that the stream does not comply with the standards established by CONAMA Resolution no. 430/2011 for quality class 2.

Keywords: Water quality. Water resources. Self-purification capacity. Streeter-Phelps. Caraiibeirinhas stream.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Poluição Pontual e poluição difusa.....	20
Figura 2: Processo de autodepuração.....	23
Figura 3: Fenômenos que ocorrem no balanço de OD.....	23
Figura 4: Localização do município de Delmiro Gouveia no estado de Alagoas.....	34
Figura 5: Nascente do riacho Caraibeirinhas.....	35
Figura 6: Canal que conduz o riacho Caraibeirinhas no bairro Novo.....	36
Figura 7: Foz do riacho Caraiberinhas.....	36
Figura 8: Mapa de localização dos pontos de amostragem.....	38
Figura 9: Gráfico de relação DQO/DBO.....	39
Figura 10: pH dos pontos de amostragem.....	42
Figura 11: OD dos pontos de amostragem.....	43
Figura 12: DQO dos pontos de amostragem.....	44
Figura 13: DBO dos pontos de amostragem.....	45
Figura 14: Perfil de Oxigênio Dissolvido do riacho Caraiberinhas.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características das fontes de poluição.....	19
Tabela 2: Fases do desenvolvimento dos modelos de qualidade da água.....	27
Tabela 3: Valores de K_1 (20°C).....	28
Tabela 4: Valores de K_2 (20°C).....	29
Tabela 5: Localização dos pontos de amostragem.....	37
Tabela 6: Padrão de qualidade – Águas Doces – Classe 2.....	39
Tabela 7: Vazões dos esgotos para cada ponto de amostragem.....	41
Tabela 8: Dimensões do canal nos pontos de amostragem.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
MO	Matéria Orgânica
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OD	Oxigênio Dissolvido
PH	Potencial Hidrogeniônico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Poluição em corpos d'água	17
3.2 Autodepuração em corpos d'água	21
3.3 Modelagem Matemática	25
3.4 Modelo Streeter-Phelps	27
3.4.1 Obtenção dos dados de entrada do modelo Streeter-Phelps.....	27
3.4.1.1 Vazão de esgotos (Q_e).....	27
3.4.1.2 Oxigênio Dissolvido no rio, à montante do lançamento (OD_r).....	28
3.4.1.3 DBO_5 do esgoto (DBO_e).....	28
3.4.1.4 Coeficiente de desoxigenação (K_1).....	28
3.4.1.5 Coeficiente de reoxigenação (K_2).....	29
3.4.1.6 Velocidade do curso d'água (v).....	29
3.4.1.6 Tempo de percurso (t).....	30
3.4.2 Obtenção dos dados de saída do modelo de Streeter-Phelps.....	30
4 METODOLOGIA	34
4.1 Localização Dos Pontos De Amostragem	34
4.2 Procedimentos Metodológicos	38
4.2.1 Obtenção do OD e DQO.....	38
4.2.2 Obtenção da DBO.....	39
4.2.3 Obtenção da vazão.....	40
4.2.4 Obtenção das dimensões do canal que o riacho percorre.....	40
4.2.5 Obtenção da velocidade da água do riacho.....	40
4.3 Autodepuração	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 Vazão	41
5.2 Dimensões do canal nos pontos de amostragem	42
5.3 Indicadores de Qualidade	42
5.4 Cálculo da autodepuração pelo Modelo de Streeter-Phelps	45

5.4.1 Dados de entrada.....	45
5.4.1.1 Vazão de esgotos (Q_e).....	45
5.4.1.2 Oxigênio Dissolvido no rio, à montante do lançamento (OD_r).....	45
5.4.1.3 DBO_5 do esgoto (DBO_e).....	45
5.4.1.4 Coeficiente de desoxigenação (K_1).....	46
5.4.1.5 Coeficiente de reaeração (K_2).....	46
5.4.1.6 Velocidade do curso d'água (U).....	46
5.4.1.7 Tempo de percurso (t).....	46
5.4.2 Dados de saída.....	46
5.4.2.1 Déficit de oxigênio com a variação do tempo.....	46
5.4.2.2 Déficit máximo de oxigênio.....	47
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, um dos principais temas de discussão têm sido os recursos hídricos, não apenas entre pesquisadores, planejadores e políticos, mas também em todos os setores da sociedade. A água é utilizada para diversas finalidades, tais como: abastecimento doméstico e industrial, geração de energia, recreação, irrigação, entre outros, e está sendo cada vez mais disputada, tanto em quantidade quanto em qualidade devido, principalmente, ao desordenado crescimento populacional e as atividades industriais.

No Brasil, o maior problema não está na quantidade de água disponível, uma vez que o país possui 12% das reservas de água doce do mundo, porém existe um grande déficit na qualidade desta água, espelho de uma gestão inadequada no passado. Assim sendo, é necessário um manejo adequado dos corpos hídricos, de forma a garantir água em qualidade desejável para suas diversas finalidades.

A qualidade de água depende de vários fatores, entre eles: a precipitação pluviométrica, pois afeta no escoamento superficial e infiltração no solo; e a interferência do homem, através de despejos de esgotos domésticos ou industriais, aplicação de defensivos agrícolas no solo, descarte de resíduos sólidos nos rios, entre outros. Porém, a interferência do homem através de despejos de esgotos domésticos ou industriais ocorre de forma mais agressiva, pois se dá de forma mais concentrada.

Quando os esgotos domésticos ou industriais são lançados *in natura* nos corpos d'água, sem receber tratamento prévio, pode-se esperar, na maioria das vezes, grandes prejuízos à qualidade da água, entre eles o declínio dos níveis de oxigênio dissolvido. Isso ocorre devido o processo de estabilização da matéria orgânica, realizado pelas bactérias decompositoras aeróbias, que utilizam o oxigênio na sua respiração. Porém, esse processo pode ser revertido através da autodepuração dos cursos d'água.

Toda matéria orgânica quando lançada em um corpo hídrico passa por um processo de neutralização, que é chamado de autodepuração e possui os seguintes procedimentos: diluição, sedimentação e estabilização química. É importante salientar que cada curso d'água possui um limite receptor de matéria orgânica, sendo indispensável o estudo a respeito da sua capacidade de autodepuração.

Inúmeras variáveis são avaliadas no processo de autodepuração, porém a análise quantitativa da concentração de oxigênio dissolvido é a mais importante para definir a condição

do curso d'água e avaliar se ele encontra-se dentro dos limites permitidos pela Resolução CONAMA 430/2011, que estabelece parâmetros que definem limites aceitáveis dos elementos naturalmente presentes na água (CONAMA, 2011).

Nesse cenário, a autodepuração pode ser analisada através da modelagem matemática, uma importante ferramenta para que se possa avaliar a qualidade atual, estimar as condições de qualidade ao longo do percurso e simular efeitos da aplicação ou diminuição da carga poluente em corpos hídricos. O principal motivo da modelagem é determinar, baseado em dados conhecidos previamente, as variações de concentração de determinada carga efluente em função do espaço e do tempo. Existem na literatura vários modelos de qualidade de água que incluem a modelagem de diversas substâncias.

Sob esse aspecto, o primeiro trabalho no campo da modelagem matemática foi desenvolvido, em 1925, por Streeter e Phelps, em um estudo sobre poluição e purificação natural do rio Ohio, aplicado ao rio Ohio, principal afluente do rio Mississipi, localizado a leste dos Estados Unidos. Eles desenvolveram equações para descrever o processo de consumo de oxigênio pela oxidação da matéria orgânica no momento em que são lançadas no corpo hídrico. O principal objetivo desse modelo é determinar os impactos e variações de concentração de certa carga de poluentes em função da posição e do tempo (STREETER E PHELPS, 1925).

Diante do exposto, a identificação das fontes poluidoras e seus impactos na qualidade de um corpo hídrico além de um planejamento racional, é indispensável para se obter diagnósticos precisos na análise da água. Ademais, essas ações podem auxiliar a administração dos recursos hídricos na prevenção dos impactos futuros através de alternativas concretas para a conservação ou recuperação de um corpo hídrico.

Nesse cenário, é possível simular situações futuras do uso da água e definir a sua melhor capacidade de assimilação e limites para a extração, de modo que haja um risco calculado em relação à degradação dos parâmetros de qualidade da água.

Portanto, o presente trabalho apresenta um estudo dos parâmetros de qualidade da água através da modelagem computacional, utilizando o método de Streeter-Phelps no Riacho Caraibeirinhas da cidade de Delmiro Gouveia – AL.

O local de estudo foi escolhido pelo fato de ser um dos principais riachos da bacia do rio Maxixe, onde o município está integralmente inserido e pela necessidade que foi observada visualmente em se analisar os parâmetros de qualidade da água e a sua capacidade de

autodepuração, uma vez que são lançados esgotos domésticos ao longo de todo o seu curso d'água.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Utilizar o modelo matemático de qualidade da água Streeter-Phelps como ferramenta para analisar a autodepuração no Riacho Carabeirinhas em Delmiro Gouveia – AL.

2.2 Objetivos Específicos

- Obter dados sobre a qualidade da água, através de pontos de monitoramento;
- Obter dados sobre as vazões dos despejos de esgotos domésticos no riacho;
- Calibrar o modelo matemático, possibilitando a simulação de oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Poluição em corpos d'água

O crescimento desordenado da população e o aumento das atividades industriais são fatores críticos que contribuem consideravelmente com a degradação ambiental. Nesse sentido, a poluição tem atingido dimensões catastróficas, sendo observada na qualidade do solo, ar e principalmente da água (KUNZ et al., 2001; RODRIGUEZ, 2001; ELLIS, 2011; ROCHA, 2014).

De acordo com Sperling (2005), o conceito de qualidade da água é amplo, pois, devido as suas propriedades de solvente e a sua capacidade de transportar partículas, a água incorpora a si diversas impurezas, as quais definem a sua qualidade. Nesse contexto, Hespanhol (2009) ressalta que o termo “qualidade da água” não está estritamente ligado a um estado de pureza, mas sim, às suas características químicas, físicas e biológicas e, de acordo com esses parâmetros, estipulam-se diversas finalidades para a água.

No Brasil, os padrões de qualidade para os corpos hídricos são implantados pela Resolução CONAMA n°. 357/2005, que estabelece parâmetros que definem os limites aceitáveis dos elementos naturalmente presentes na água e as condições e padrões de lançamento de efluentes (CONAMA, 2005). Em 2011, essa resolução foi complementada pela resolução CONAMA n°. 430/2011 (CONAMA, 2011).

Neste contexto, a legislação brasileira determina que a qualidade da água esteja de acordo com a sua finalidade de utilização. Assim sendo, a qualidade de um corpo hídrico é estabelecida com vistas aos usos principais em um sistema de classes de qualidade. Com base nessas informações, pode ser estabelecido um grau de qualidade para a água, dependendo da sua finalidade; sendo baseado em análises regionais e levando em consideração os dados socioeconômicos, o uso do solo e os usos pretendidos dos recursos hídricos. A partir dessas análises, estipula-se um grau de qualidade do corpo hídrico baseado em seu uso principal (CETESB, 2008).

Os padrões de qualidade das águas determinados na Resolução n°. 357/2005 do CONAMA estabelecem limites individuais para cada substância em cada classe (CONAMA, 2005). O conjunto de parâmetros de qualidade de água, selecionado para subsidiar a proposta de enquadramento, deverá ser monitorado periodicamente pelo Poder Público. A classificação padronizada dos corpos de água possibilita que se fixem metas para atingir níveis de indicadores

consistentes com a classificação desejada (CONAMA, 2005). A resolução n°. 430/2011, complementa esse parágrafo incluindo restrições de toxicidade a organismos aquáticos (CONAMA, 2011).

À luz disso, Menezes (2016) menciona que atualmente os cursos d'água têm tido sua qualidade prejudicada em consequência do impacto das atividades humanas, sendo esta situação visível, principalmente, em áreas populosas. Isso posto, conclui-se que as atividades humanas estão diretamente ligadas ao aumento no consumo da água.

Em adição, Teles e Silveira (2006) afirmam que o aumento por essa demanda ocasiona a geração de resíduos líquidos, que são muitas vezes lançados *in natura* nos rios, alterando suas características naturais e interferindo negativamente na qualidade da água; o que geralmente diminui a capacidade desse rio em manter comunidades biológicas.

Segundo o Relatório de Gestão dos Problemas da Poluição no Brasil, existe uma lista de problemas de poluição que causam danos catastróficos à saúde humana, à qualidade de vida e perdas ecológicas (PHILIPPI, 2006). Isso posto, alguns dos principais problemas de poluição no Brasil são: a poluição das águas superficiais em áreas urbanas, com impactos visuais, odor e restrição às atividades de lazer; gestão inadequada de resíduos sólidos, e a poluição localizada acentuada, que inclui zonas industriais com baixos níveis de controle de poluição, com impactos na população e nos ecossistemas (BANCO MUNDIAL, 1998).

O principal elemento necessário à existência da vida na terra é a água. Nesse contexto, Philippi (2006) expõe que o Brasil possui cerca de 12 % da água doce que está disponível no planeta. Porém, a distribuição dessa água não se dá de forma igualitária, sendo feita a distribuição da seguinte forma: na região sudeste, que possui quase a metade da população do país, tem acesso apenas a 6% dos recursos hídricos; e na região norte, a população possui aproximadamente 69% dos recursos hídricos. O autor citado acima alerta ainda que mesmo as regiões metropolitanas que possuem grande disponibilidade de água sofrem problemas de escassez devido à poluição dos mananciais próximos as áreas urbanas.

No Brasil, segundo Philippi (2006), desde a década de 30 foi regulamentada uma legislação para o uso dos recursos hídricos, baseado no Decreto Federal n° 24.643, conhecido como Código das Águas. Tal código visa evitar o desperdício de água e conservar os mananciais a fim de se manter os padrões de qualidade e quantidade de água.

Pereira (2004) afirma que, cada atividade emite poluentes característicos, e cada um destes contaminantes causa um efeito, com diferentes graus de poluição, conforme pode-se observar na Tabela 1.

Tabela 1: Características das fontes de poluição

FONTES	Bactéria	Nutrientes	Pesticidas/ Herbicidas	Micropoluentes Orgânicos Industriais	Óleos e Graxa
Atmosfera	-	1	3-G	3-G	-
Fontes Pontuais					
Esgoto doméstico	3	3	1	3	-
Esgoto industrial	-	1	-	3-G	2
Fontes Difusas					
Agrícolas	2	3	3-G	-	-
Dragagem	-	1	2	3	1
Navegação e portos	1	1	-	1	3
Fontes Mistas					
Escoamento Urbano e depósitos de lixo	2	2	2	2	2
Depósitos de cargas industriais	-	1	1	3	1
(1) Significância local; (2) moderada significância local/regional; (3) significância regional; (G) significância global.					

Fonte: Pereira (2004).

No Brasil, assim como em outros países em desenvolvimento, as atividades humanas vêm provocando danos à qualidade dos corpos hídricos com diversos tipos de poluição ambiental (PHILIPPI, 2006).

Nesse cenário, Tucci et al. (2001) afirmam que existem dois tipos de cargas de poluição, classificadas como: pontuais ou difusas (Figura 1). A primeira atinge o corpo hídrico de forma concentrada no espaço e se deve aos efluentes de indústrias e, esgotos domésticos e pluviais.

Ademais, as cargas difusas se devem ao escoamento rural e urbano, distribuído ao longo das bacias hidrográficas. Essa última é descarregada no manancial de forma distribuída (SPERLING, 2005).

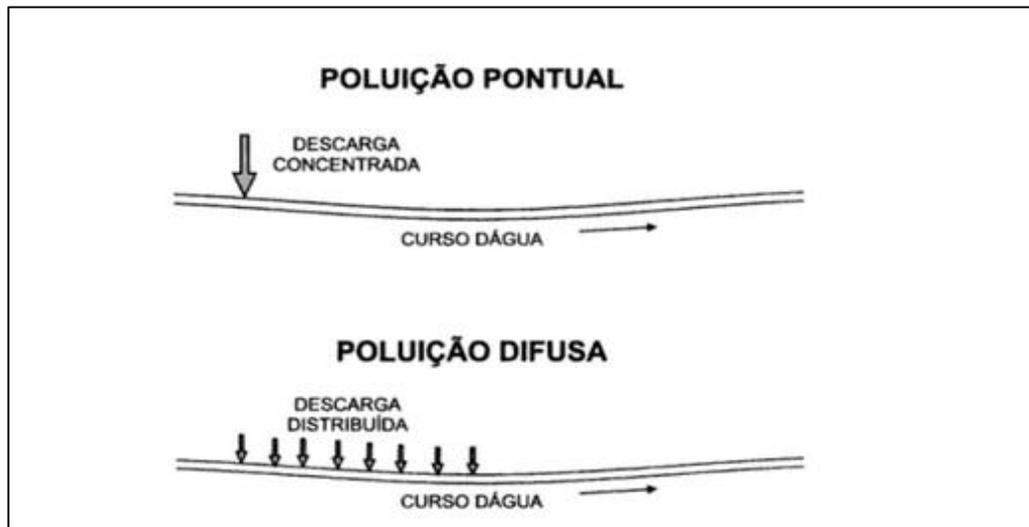


Figura 1: Poluição Pontual e poluição difusa

Fonte: Sperling (2005).

Dando continuidade, as cargas de poluição podem ser classificadas como orgânicas ou inorgânicas (SPERLING, 2005). A origem das cargas orgânicas é de restos e dejetos humanos e animais e, da matéria orgânica vegetal. As cargas inorgânicas são advindas das atividades humanas, no uso de pesticidas, nos efluentes industriais e na lavagem pelo escoamento de superfícies contaminadas, como áreas urbanas (TUCCI et al., 2001).

No que concerne às matérias orgânicas, Motta (1996) menciona que elas são causadoras da diminuição do oxigênio dissolvido (OD) na água; o que afeta a fauna e a flora aquáticas. Além disso, as matérias orgânicas podem indicar uma concentração de coliformes e outros agentes patogênicos que causam a incidência de doenças nas populações humanas via contato direto ou pela contaminação de produtos agrícolas.

Seguindo o mesmo raciocínio, Motta (1996) esclarece que concentrações elevadas de matérias inorgânicas também podem prejudicar desastrosamente aos seres humanos e aquáticos, em consequência das cargas tóxicas das atividades industriais lançadas nos corpos hídricos, entre elas, o rejeito de metais pesados.

À luz dessas considerações, torna-se notável a necessidade da busca de maiores esforços para controle dessa poluição. Uma das formas de se controlar essa poluição é estudar e conhecer a capacidade de autodepuração de cada corpo hídrico, estimando a quantidade de efluentes que cada rio é capaz de receber, sem que suas características naturais sejam prejudicadas, pois, a depender do nível de poluição dos rios, o processo de autodepuração pode ser bastante eficiente na melhoria da qualidade d'água.

3.2 Autodepuração em corpos d'água

A autodepuração é um processo natural no qual cargas poluidoras de origem orgânica, lançadas em um corpo hídrico, são neutralizadas (SPERLING, 2014; RODRIGUES, 2005; ANDRADE, 2010). Sperling (2014) menciona que esse procedimento pode ser entendido como um fenômeno de sucessão ecológica em que a busca pelas condições iniciais encontradas antes do lançamento de efluentes é realizada por mecanismos naturais.

Segundo Andrade (2010), um dos processos mais importantes da autodepuração é a decomposição da matéria orgânica através da respiração de micro-organismos aeróbios, pois, esse procedimento é responsável pelo decréscimo nas concentrações de oxigênio dissolvido na água, sendo capaz de decompor a matéria orgânica.

A quantidade de oxigênio dissolvido na água necessária para a decomposição da matéria orgânica é denominada Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO (SPERLING, 1996; CONAMA, 2005; RODRIGUES, 2005). Ou seja, a DBO é um indicativo da quantidade de oxigênio molecular requerida pelas bactérias para decomposição da matéria orgânica presente na água, e não um poluente.

Rodrigues (2005) frisa que embora o conceito de DBO não sirva como única medida para avaliação do impacto do despejo de cargas poluentes em um corpo hídrico, o parâmetro possibilita uma avaliação muito importante do estado da qualidade da água daquele meio, pois, é uma medida direta do consumo de oxigênio dissolvido (OD) no meio fluido.

A par disso, verifica-se que a autodepuração é um processo que se desenvolve ao longo do tempo e, fazendo a consideração de que a dimensão do curso d'água receptor é longitudinal, tem-se que os estágios da sucessão ecológica podem ser associados à zonas fisicamente identificáveis no rio (MENDES, 2010).

De acordo com Braga et al. (2005), após a ação dos micro-organismos decompositores, a matéria orgânica foi estabilizada ou mineralizada, pois não existem mais compostos orgânicos biodegradáveis, restando apenas água, gás carbônico e sais minerais. Somente quando a decomposição acaba e os decompositores morrem, é que começa a sobrar oxigênio e a sua concentração aumenta novamente. Essas etapas ocorrem em paralelo ao longo de todo o procedimento. No trecho afetado do rio, ocorrerão alterações das espécies presentes, da cor, turbidez e outras características da água.

Na figura 2 é possível observar as seguintes regiões (MENDES, 2010):

- **Região de águas limpas:** possui elevada concentração de oxigênio dissolvido e vida aquática em abundância. É uma região anterior ao lançamento da matéria orgânica;

- **Região de degradação:** há uma diminuição dos seres vivos. É localizada a jusante do ponto de lançamento do poluente biodegradável, havendo uma diminuição inicial na concentração de oxigênio dissolvido, sedimentação de parte do material sólido e aspecto indesejável. Nessa região, existem quantidades elevadas de bactérias e fungos;

- **Região de decomposição ativa:** é a região em que a concentração de oxigênio dissolvido atinge o valor mínimo, podendo chegar à zero em algumas situações. A quantidade de bactérias e fungos diminui. Há também uma redução ou até mesmo, eliminação dos organismos aeróbios;

- **Região de recuperação:** ocorre o aumento da concentração de oxigênio dissolvido, pois os mecanismos de reaeração predominam os mecanismos de desoxidação. Dessa forma, o aspecto do corpo hídrico melhora sucessivamente havendo uma redução na quantidade de bactérias e fungos e um aumento na quantidade de organismos aeróbios. Existe uma tendência para a proliferação de algas em consequência da disponibilidade de nutrientes, resultantes da decomposição da matéria orgânica;

- **Região de águas limpas:** é a região onde o corpo hídrico volta a apresentar condições desejadas com relação às concentrações de oxigênio dissolvido e DBO e com relação à presença de organismos aeróbios. Porém, não significa necessariamente que essa região esteja livre de organismos patogênicos.

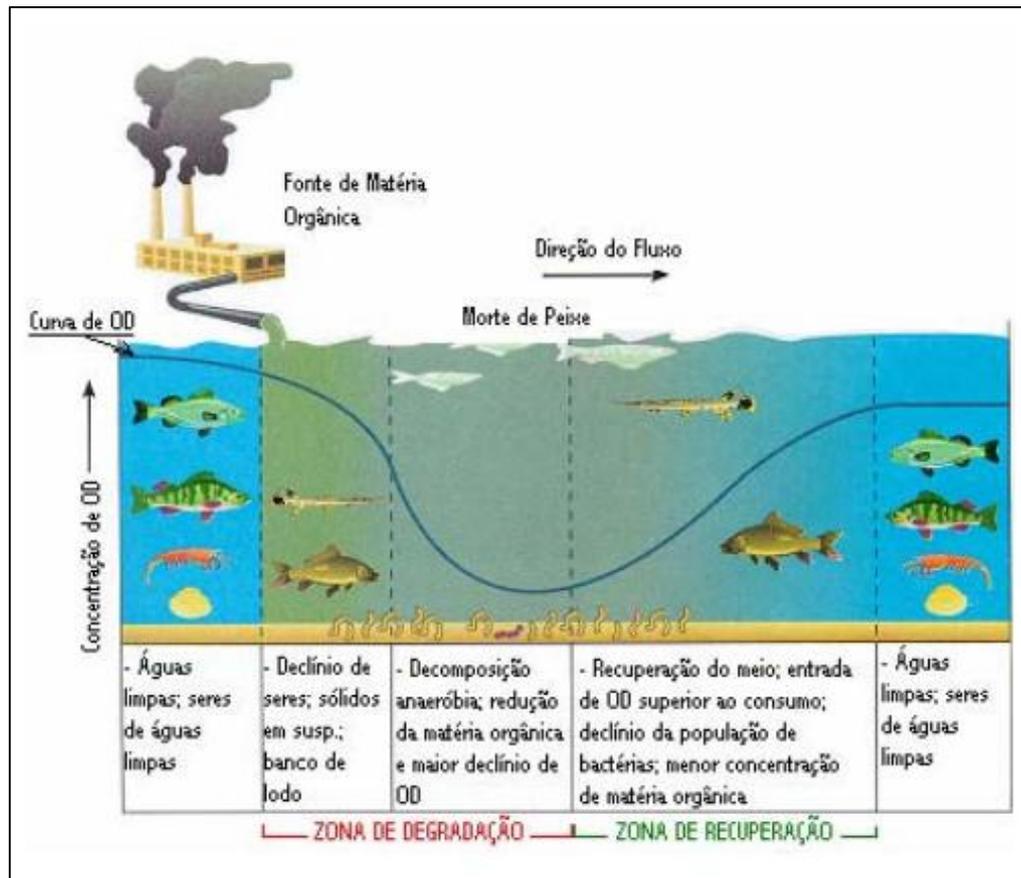


Figura 2: Processo de autodepuração

Fonte: Rodrigues (2005).

Conforme Mendes (2010), a autodepuração realiza-se por meio de procedimentos de natureza física (diluição, sedimentação e reaeração atmosférica), química e biológica (oxidação e decomposição). Nesse processo, há um balanço entre as fontes de consumo e produção de oxigênio. Conforme exemplificado na Figura 3.

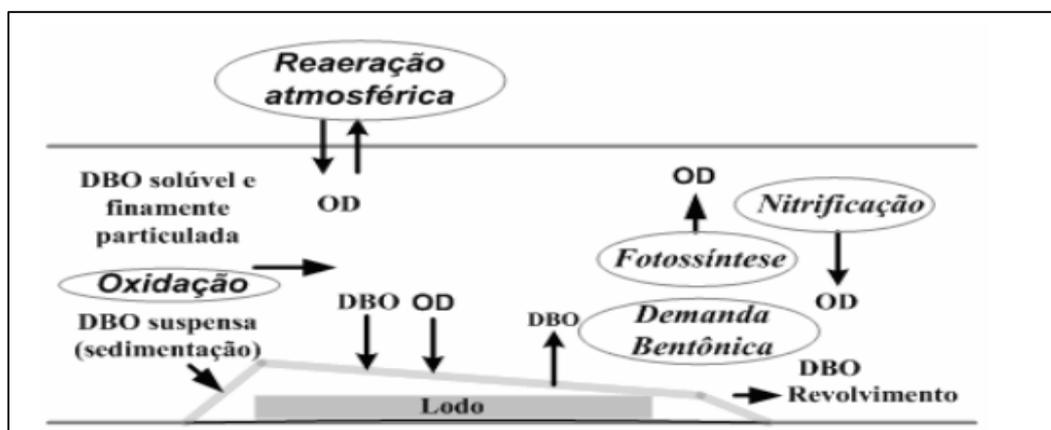


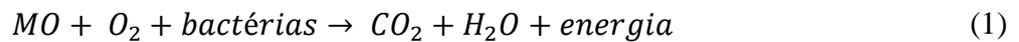
Figura 3: Fenômenos que ocorrem no balanço de OD

Fonte: Andrade (2010).

Segundo Sperling (1996), os principais fenômenos que ocorrem no consumo de oxigênio são:

- **Oxidação da matéria orgânica:** esse processo é uma forma de transformar poluentes em substâncias menos agressivas ao meio ambiente, onde os elétrons das substâncias são removidos, aumentando seu estado de oxidação. Quando há oxidação total da matéria orgânica, esse fenômeno passa a ser chamado de mineralização, que gera produtos finais simples e estáveis.

Na mineralização, as responsáveis capazes de oxidar a matéria orgânica (MO) são as bactérias heterotróficas aeróbias e, ocorre como representado na equação 1.



- **Nitrificação:** é um procedimento em que a matéria orgânica é transformada em nitritos e nitratos. Nessa transformação, o oxigênio dissolvido (OD) é consumido pelas bactérias autotróficas para que seja possível a realização desse processo.

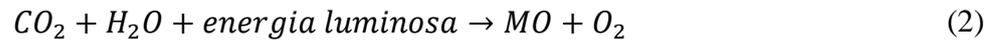
- **Demanda Bentônica:** nesse procedimento, a transformação da matéria ocorre de forma anaeróbia, pois, o oxigênio tem dificuldade de penetrar a camada de lodo depositada no fundo no corpo hídrico. Diante disso, essa conversão não consome oxigênio. Porém, a camada superficial do lodo em contato direto com a água sofre decomposição aeróbia, havendo, dessa forma, consumo de oxigênio. Quando ocorre a sedimentação dessa matéria orgânica, há uma diminuição de DBO do corpo hídrico.

Ainda segundo Sperling (1996), os principais fenômenos que ocorrem na produção de oxigênio são:

- **Reaeração atmosférica:** é considerado o principal fenômeno responsável pela inserção de oxigênio no meio aquoso. Esse procedimento ocorre na interface entre o meio líquido e gasoso, onde acontece um fenômeno físico e há uma troca de gases. Nesse momento, ocorre uma concentração elevada de oxigênio na água em estado líquido. Conforme Sperling (1996), essa troca de gases se dá fundamentalmente através de dois mecanismos – difusão molecular e difusão turbulenta.

- **Fotossíntese:** na quebra da matéria orgânica, esse é o principal processo utilizado pelos seres autotróficos.

O processo de fotossíntese, apresentado na equação 2, pode representar a maior fonte de oxigênio dissolvido em lagos e rios de movimento lento.



Segundo Sperling (1996), os seres autotróficos realizam mais quebra da matéria orgânica do que oxidação, gerando dessa forma, aumento de oxigênio no corpo hídrico.

A par disso, Costa e Teixeira (2010) afirmam que diante do cenário atual de poluição em mananciais, os estudos e procedimentos da autodepuração em rios têm ganhado relevância, se fazendo necessário o uso de ferramentas que quantifiquem direta ou indiretamente os impactos ambientais nos corpos hídricos.

Sendo assim, os modelos matemáticos utilizados para analisar a qualidade da água e a sua autodepuração, são importantes instrumentos de auxílio à gestão dos recursos hídricos, auxiliando na prevenção e controle da degradação.

3.3 Modelagem Matemática

A modelagem matemática é uma ferramenta originalmente desenvolvida para auxiliar na solução de problemas; avaliando a qualidade atual, estimando as condições da qualidade ao longo do percurso e simulando efeitos da aplicação ou diminuição da carga poluente em corpos hídricos (RODRIGUES, 2005; OPPA, 2007). Em suma, os modelos matemáticos possibilitam compreender o meio ambiente e visualizá-lo de forma integrada, pois eles associam informações físicas, químicas e biológicas (CHAPRA, 1997).

Dessa forma, a modelagem matemática é cada vez mais reconhecida por possuir instrumentos úteis para simular processos de gestão das águas, e por terem uma constante atualização para encontrar soluções de problemas novos e emergentes da poluição de água superficial (OPPA, 2007; LEMOS et al. 2015).

O primeiro trabalho no campo da modelagem de qualidade de água foi desenvolvido, em 1925, por Streeter e Phelps, em um estudo sobre poluição e purificação natural, aplicado ao rio

Ohio, principal afluente do rio Mississippi, localizado a leste dos Estados Unidos. Esse trabalho forneceu um meio capaz de determinar os níveis de Oxigênio Dissolvido (OD) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) de um determinado rio. Assim sendo, o modelo Streeter-Phelps representa o marco dos modelos que posteriormente vem sendo aperfeiçoado. (STREETER E PHELPS, 1925; OPPA, 2007; LEMOS et al. 2015; MENDES, 2010).

À luz disso, alguns autores como Chapra (1997) e Romeiro (2003), apresentam a evolução dos modelos matemáticos relacionados à qualidade da água, em algumas fases. Essas fases, classificadas a seguir, estão relacionadas tanto aos assuntos sociais quanto às capacidades computacionais de cada época.

(i) **1925 – 1960:** Considerada a primeira fase, marcada pelo modelo Streeter-Phelps. Esse modelo estima a concentração de oxigênio dissolvido (OD) em função dos coeficientes de reaeração e desoxigenação e pela demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Em meados de 60, a disponibilidade de computadores possibilitou o estudo e aplicações dos modelos para sistemas mais complexos. O foco da modelagem matemática nessa época continuou sendo o OD e a DBO. A partir da junção do modelo com a disposição de computadores foi possível avaliar o corpo hídrico como um todo;

(ii) **1960 – 1970:** O meio ambiente passou a ser visto de outra forma pela sociedade, crescendo ecologicamente. O foco dos pesquisadores nessa época passou a ser a eutrofização nos corpos hídricos. Assim, os estudos na modelagem matemática foram ampliados para simular a eutrofização e foram criados modelos para rios mais complexos;

(iii) **1970 – Atualmente:** A modelagem de qualidade da água em corpos hídricos tem como maior avanço no momento o reconhecimento da importância do transporte e destinação de substâncias tóxicas. Desse modo, começaram os estudos sobre o acúmulo dessas substâncias e sua atuação na cadeia alimentar.

Segundo Oppa (2007), a modelagem matemática empregada à qualidade da água evoluiu de forma que se tornou uma estrutura teórica unificada, capaz de resolver situações que envolvem poluentes convencionais e tóxicos. A tabela 2 apresenta as fases de desenvolvimento dos modelos de qualidade da água.

Tabela 2: Fases do desenvolvimento dos modelos de qualidade da água.

FASE	Problemas/foco	Parâmetros analisados	Sistema	Cinética
1925 – 1960 (Streeter-Phelps)	Esgoto sem tratamento e Efluente Primário	DBO/OD	Unidimensional	Linear
1960 – 1970 (Computadores)	Efluente primário e secundário	DBO/OD	Unidimensional e Bidimensional	Linear
1970 – 1977 (Biologia)	Eutrofização	Nutrientes	Unidimensional, Bidimensional e Tridimensional	Não linear
1977 - Atualmente	Elementos tóxicos	Elementos orgânicos e metais	Interações água - sedimento	Linear

Fonte: Oppa (2007).

Atualmente, são inúmeros os modelos matemáticos, e esses têm se destacado pela capacidade de representar um sistema físico sem grandes perdas, de certa forma, ajudando a comunidade científica (LEMOS et al. 2015). Podem ser citados alguns modelos importantes de simulação da qualidade da água dos rios, como: AQUASIM, BASINS, CE-QUAL-R1V1, CE-QUAL-W2, WASP7, QUAL2E (BITTENCOURT et al. (1997).

Em suma, são muitos os modelos matemáticos que avaliam a qualidade da água nos rios. A utilização adequada desses modelos decorre da escolha mais apropriada para cada situação. O objetivo da melhor alternativa é sempre auxiliar a pesquisa e gestão dos recursos hídricos (OPPA, 2007).

3.4 Modelo Streeter-Phelps

3.4.1 Obtenção dos dados de entrada do modelo Streeter-Phelps

3.4.1.1 Vazão de esgotos (Q_e)

De acordo com Hespanhol (2009), para a análise da autodepuração de um corpo hídrico, a vazão de esgotos considerada é a vazão média, sendo obtida de forma convencional,

utilizando-se dados de população, contribuição per capita, contribuição de despejos industriais e etc.

3.4.1.2 Oxigênio Dissolvido no rio, à montante do lançamento (OD_r)

De acordo com Hespanhol (2009), o teor de oxigênio dissolvido em um curso d'água, à montante do lançamento dos despejos é um produto das atividades da bacia hidrográfica.

À luz disso, a mesma autora salienta que caso não seja possível coletar amostras de água nesse ponto, pode-se estimar a concentração de OD em função do grau de poluição aproximado do curso d'água.

3.4.1.3 DBO_5 do esgoto (DBO_e)

Segundo ainda Hespanhol (2009), a concentração da DBO_5 dos esgotos domésticos brutos tem um valor médio da ordem de 300 a 350 mg/L. A DBO de esgotos domésticos podem ser estimados através da divisão entre a carga de DBO_5 e a vazão de esgotos (m^3/d). A carga de DBO_5 é estimada pelo produto da população (hab) com a carga per capita de DBO_5 , usualmente adotada como 0,054 g DBO_5 /hab.dia.

3.4.1.4 Coeficiente de desoxigenação (K_1)

Esse coeficiente, segundo Hespanhol (2009), depende das características da matéria orgânica, além da temperatura e da presença de substâncias inibidoras. Esses valores encontram-se na tabela 3.

Tabela 3 – valores de K_1 (20° C)

Origem	K_1 (dia ⁻¹)
Água residuária concentrada	0,35 – 0,45
Água residuária de baixa concentração	0,30 – 0,40
Efluente primário	0,30 – 0,40
Efluente secundário	0,12 – 0,24
Rios com águas limpas	0,09 – 0,21
Água para abastecimento público	<0,12

Fonte: Sperling (2005).

3.4.1.5 Coeficiente de reatuação (K_2)

Os valores dos coeficientes de reatuação são obtidos segundo Sperling (2005) através de valores médios tabelados, apresentados na tabela 4, ou utilizando fórmulas baseadas nas características hidráulicas do corpo hídrico, relacionando o coeficiente de desoxigenação com a profundidade e a velocidade do curso d'água.

Tabela 4 – valores de K_2 (20° C)

Corpo d'água	K_2 (dia ⁻¹)	
	Profundo	Raso
Pequenas lagoas	0,12	0,23
Rios vagarosos, grandes lagos	0,23	0,37
Grandes rios com baixas velocidades	0,37	0,46
Grandes rios com velocidade normal	0,46	0,69
Corredeiras e quedas d'água	0,69	1,15
Água para abastecimento público	>1,15	>1,61

Fonte: Sperling (2005).

3.4.1.6 Velocidade do curso d'água (v)

Segundo Sperling (2005), a velocidade do corpo hídrico pode ser estimada através de medição direta ou utilização de fórmulas hidráulicas para canais, como na equação 3. Em que precisa-se ser obtido o valor da vazão do corpo hídrico e as dimensões do canal.

$$U = \frac{Q}{(w \cdot h)} \quad (3)$$

Sendo:

Q = vazão do riacho (m³/s);

U=velocidade do curso d'água (m/s);

w = largura do canal (m);

h= profundidade do canal (m).

3.4.1.6 Tempo de percurso (t)

No modelo de Streeter-Phelps, o tempo de percurso teórico é função da velocidade e da distância a ser vencida, obtida pela equação 4.

$$t = \frac{x}{v \cdot 86400} \quad (4)$$

Sendo:

t = tempo de percurso (dias);

x = distância percorrida (metros);

v = velocidade do curso d'água (m/s).

3.4.2 Obtenção dos dados de saída do modelo de Streeter-Phelps

De acordo com Mendes (2010) a teoria básica que rege o modelo de Streeter-Phelps é que a matéria orgânica segue uma reação de primeira ordem, em sua decomposição no corpo hídrico. Em reações de primeira ordem, a taxa de redução da matéria orgânica é proporcional à concentração de matéria orgânica presente em um dado instante de tempo. Podendo-se representar da seguinte forma:

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 \cdot L \quad (5)$$

Sendo:

L = Demanda bioquímica de oxigênio;

K_1 = Constante de desoxigenação (tabela 3).

O sinal negativo da equação 5 indica que haverá uma redução da concentração de DBO com o passar do tempo. A integração da equação 5, resulta em:

$$L = L_0 \cdot e^{-K_1 \cdot t} \quad (6)$$

Sendo,

L_0 = A demanda bioquímica de oxigênio imediatamente após o ponto de lançamento do efluente, ou seja, a quantidade total de oxigênio necessária para completa estabilização da matéria orgânica em termos de sua componente de carbono.

A quantidade de oxigênio dissolvido (OD) consumido desde o instante inicial até o instante t (DBO_t), é dado pela equação 7.

$$DBO_t = L_0 \cdot (1 - e^{-K_1 \cdot t}) \quad (7)$$

A reação de DBO que provoca um consumo de oxigênio dissolvido do corpo hídrico ocorre em paralelo com a reação de reoxigenação do mesmo, onde, por meio de processos exógenos, o oxigênio passa da atmosfera para a água. Essa troca de oxigênio ocorre por uma reação de difusão em que a taxa de transferência depende da concentração relativa do oxigênio nos dois meios da troca.

Essa transferência de oxigênio é regida também por uma reação de primeira ordem, mostrada na equação 8.

$$\frac{dL}{dt} = -K_2 \cdot D \quad (8)$$

Sendo:

D = A diferença entre a concentração de saturação do oxigênio no meio líquido e a concentração de oxigênio dissolvido na água em um dado instante;

K_2 = Constante de reoxigenação do corpo d'água (tabela 4).

Visto que o processo de redução de OD que acontece em (5) ocorre ao mesmo tempo em que o processo de aumento de OD em (8), é possível combinar as duas equações para representar a variação do déficit de oxigênio com o tempo, sendo observado na equação 9.

$$\frac{dL}{dt} = K_1 \cdot L - K_2 \cdot D \quad (9)$$

Integrando a equação 9, resulta:

$$D_t = \frac{K_1 \cdot L_0}{K_2 - K_1} \cdot (e^{-K_1 \cdot t} - e^{-K_2 \cdot t}) + D_0 \cdot e^{-K_2 \cdot t} \quad (10)$$

Sendo,

D_t = déficit de oxigênio com o tempo;

D_0 = déficit inicial de oxigênio dissolvido na água (mg/L);

L_0 = DBO no ponto de lançamento (mg/L);

K_1 = Constante de desoxigenação do rio (dia^{-1});

K_2 = Constante de reoxigenação do rio (dia^{-1}).

A equação 9 permite acompanhar a variação do déficit de OD ao longo do tempo. Porém, têm-se o interesse em saber a variação ao longo do corpo hídrico à jusante de um ponto de lançamento da matéria orgânica. Como pode ser observado na figura 2, o comportamento da curva do OD ocorre em função da distância à jusante do ponto de lançamento da matéria orgânica. O déficit máximo, como pode ser observado na mesma figura, não acontece exatamente no ponto de lançamento do efluente, mas a uma distância X_c obtida quando se iguala à zero a variação do déficit de oxigênio em relação à x . Dessa forma, têm-se:

$$\frac{dD}{dx_{x=x_c}} = 0 \rightarrow X_c = \frac{U}{K_2 - K_1} \cdot \ln \left[\frac{K_2}{K_1} \cdot \left(1 - \frac{D_0 \cdot (K_2 - K_1)}{K_1} \right) \right] \quad (11)$$

Vários autores citam o modelo de Streeter-Phelps como um modelo simples, visto que para determinação da qualidade da água por meio dele, são considerados apenas, como valores de entrada, os parâmetros de OD e DBO, além de se considerar o sistema como mistura completa. Muitos autores utilizaram o modelo de Streeter-Phelps em estudos de modelagem de autodepuração, tais como Teles e Silveira (2006), Nunes (2008) Hespanhol (2009), entre outros.

4 METODOLOGIA

4.1 Localização Dos Pontos De Amostragem

O objeto de estudo deste trabalho é o Riacho Carabeirinhas, situado na cidade de Delmiro Gouveia-AL, pelo fato de ser um dos principais riachos da bacia do rio Maxixe, onde o município está integralmente inserido.

O município de Delmiro Gouveia está localizado no extremo oeste do estado de Alagoas, limitando-se a norte com os municípios de Pariconha e Água Branca, a sul com Paulo Afonso (BA) e Canindé do S. Francisco (SE), a leste com Olho D' Água do Casado e a oeste com Jatobá (PE), Paulo Afonso e Glória (BA) (CPRM, 2005). Localizado na microrregião do Sertão Alagoano e distante 303 km da capital do estado, Maceió, o município de Delmiro Gouveia (Figura 4) apresenta uma área de aproximadamente 608km² (2,18 % de área do estado de Alagoas) e população de 48.096 habitantes, estando localizado a 256 metros de altitude (IBGE, 2016).



Figura 4: Localização do município de Delmiro Gouveia no Estado de Alagoas

Fonte: Adaptado do IBGE (2016).

O riacho Carabeirinhas percorre toda área urbana de Delmiro Gouveia - AL e possui uma extensão de 2,86 km. Sua nascente (Figura 5) fica localizada no bairro Carabeirinhas, onde o seu leito encontra-se diretamente em contato com o solo e com a vegetação. Além disso, destaca-se outras características desse local, tais como: pouca vegetação, solo do tipo arenoso, ausência de infraestrutura, falta de iluminação e mau cheiro.



Figura 5: Nascente do Riacho Caraibeirinhas

Fonte: O autor (2017).

Em seguida, o curso d'água é conduzido para o bairro Novo através de um canal retilíneo (figura 6), com paredes verticais revestidas de pedras argamassadas e fundo de concreto sem acabamento. O local possui pouca vegetação e um ambiente iluminado. Observa-se que nesse trecho, existe a predominância de casas irregulares, pois encontram-se muito próximas ao canal e possuem o lançamento de esgotos domésticos diretamente no riacho.



Figura 6: Canal que conduz o riacho Carabeirinhas no Bairro Novo

Fonte: O Autor (2017).

Por fim, o riacho Carabeirinhas tem sua foz (Figura 7) situada no bairro COHAB Nova, onde ocorre o encontro com rio Maxixe. Nessa região, o riacho volta a ter seu leito diretamente em contato com o solo e com a vegetação do local. Observa-se que embora o ambiente seja estritamente natural há uma grande contaminação da água nesse local, devido à quantidade de resíduos e mau cheiro.



Figura 7: Foz do riacho Carabeirinhas

Fonte: O autor (2017).

Além dos três bairros citados, o riacho Carabeirinhas também percorre pelos bairros Centro e COHAB Velha.

Nesse cenário, a prefeitura municipal aponta como principais problemas, as construções ilegais nas proximidades do canal e a falta de consciência popular, uma vez que, os moradores ribeirinhos utilizam o canal para jogar resíduos sólidos e o esgoto doméstico, transformando dessa forma, o riacho em um esgoto à céu aberto.

Para diagnosticar a influência do lançamento dos esgotos domésticos provenientes da comunidade ribeirinha, por meio de análise de amostras da água, foram estabelecidos três pontos de coleta, sendo o primeiro localizado na nascente do riacho (bairro Caraiibeirinhas), o segundo situado no bairro novo, e o terceiro situado na COHAB Nova, no qual esse último fica localizado na foz do corpo hídrico.

Os pontos foram definidos levando-se em conta a acessibilidade ao local (existência de estradas, pontes, etc) e os pontos de maiores vazões dos despejos domésticos.

A tabela 5 localiza os pontos de amostragem no riacho Caraiibeirinhas e a figura 8 contextualiza os pontos de amostragem.

Tabela 5: Localização dos pontos de amostragem

Ponto	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Distância em relação à jusante (m)	Localização (Bairro)	Uso predominante do solo
1	9°22'38.82"	38°0'45.81"	244	0	Caraiibeirinhas	Urbano
2	9°22'45.77"	38°0'26.60"	241	960	Novo	Urbano
3	9°23'19.11"	38°0'23.08"	215	1650	COHAB Nova	Agrícola e Urbano



Figura 8: Mapa de localização dos pontos de amostragem

Fonte: Google Earth (2017).

4.2 Procedimentos Metodológicos

A metodologia adotada para o presente trabalho teve como base pesquisas bibliográficas sobre poluição e autodepuração em corpos hídricos, experiências nacionais e internacionais de autodepuração, levantamento de legislações existentes e projetos de pesquisas na área.

4.2.1 Obtenção do OD e DQO

A priori, os parâmetros de qualidade da água – oxigênio dissolvido (OD) e demanda química de oxigênio (DQO) – dos pontos estabelecidos para análise do riacho em estudo, seriam obtidos através da sonda multiparâmetros *YSI Incorporated modelo 556* e análise laboratorial, porém essa análise tornou-se inviável devido à quebra da sonda no período da realização dos resultados, fazendo com que fossem utilizados esses dados de trabalhos já publicados. Desse modo, utilizou-se os parâmetros tabulados por Santos (2015). Essa autora analisou os parâmetros de pH e OD dos mesmos pontos mostrados na figura 8, do riacho Caraiberinhas através da sonda multiparâmetros *YSI Incorporated modelo 556*, no dia 17 de janeiro de 2014 e para a análise da DQO, as amostras foram colhidas e levadas para o Laboratório de Saneamento da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão e foi monitorada segundo método espectrofotométrico descrito pela APHA (1999). A partir da obtenção dos valores dos parâmetros, os mesmos foram analisados frente aos padrões estabelecidos na Resolução n°. 430/2011 do CONAMA, conforme indica na tabela 6, e a partir disso foi estudada a qualidade da água do riacho Caraibeirinhas.

Tabela 6: Padrão de Qualidade – Águas Doces – Classe 2

PARÂMETROS	LIMITES
pH	6 a 9
Oxigênio Dissolvido (OD)	$\geq 5\text{mg/L}$

Fonte: Resolução 430/2011 do CONAMA

4.2.2 Obtenção da DBO

Para o caso do presente estudo, não houve a análise da DBO do riacho. Segundo Von Sperling (2016), para relação DQO/DBO baixa a fração biodegradável é elevada, o que indica a utilização de tratamento biológico. Para esgotos domésticos brutos, caso desta pesquisa, a relação DQO/DBO se enquadra na faixa de 1,7 a 2,4, conforme pode ser observado pela Figura 9 que apresenta relação de biodegradabilidade em função da relação DQO/DBO.

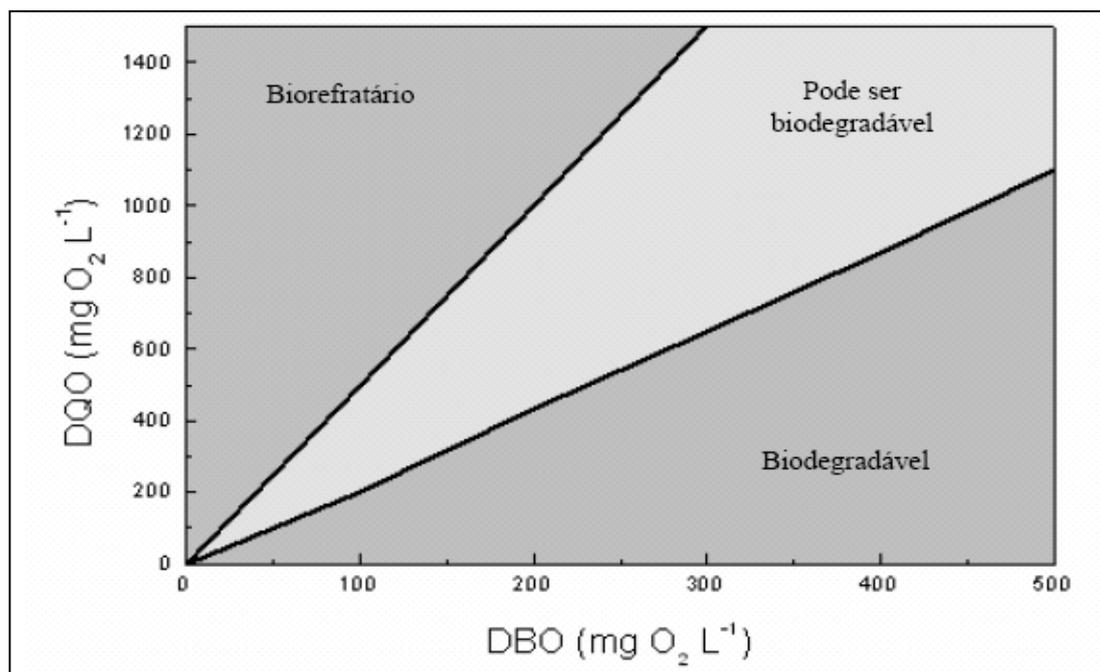


Figura 9: Gráfico de relação DQO/DBO

Fonte: Sperling (2016).

Pelo presente gráfico podemos identificar as seguintes correlações:

- $DQO/DBO < 2,5$ facilmente biodegradável;
- $2,5 < DQO/DBO < 5$ cuidado na escolha do processo biológico;

- DQO/DBO > 5 pouca chance de sucesso.

4.2.3 Obtenção da vazão

Pelo mesmo motivo já citado no item 4.2.1, a vazão utilizada neste trabalho será baseada em trabalhos também já publicados. Desse modo, utilizou-se a vazão encontrada por Cardoso (2015). Esse autor utilizou equações deduzidas nas literaturas para estimar as vazões médias de contribuição dos esgotos domésticos do riacho Caraiibeirinhas. O autor selecionou 12 pontos para estudo em sua pesquisa, dentre eles os três da figura 8. O autor pretendia com esses dados analisar a capacidade de escoamento do sistema de esgoto da cidade de Delmiro Gouveia – AL.

4.2.4 Obtenção das dimensões do canal que o riacho percorre

Para a obtenção dessas medidas foi utilizada uma visita *in loco* e utilizada uma trena metálica para realização da medição.

4.2.5 Obtenção da velocidade da água do riacho

Segundo Carvalho (2008), como o canal que está sendo estudado trata-se de um canal que também recebe águas pluviais, a velocidade do riacho pode ser expressa através da equação 4.

4.3 Autodepuração

Para o estudo da autodepuração do riacho Caraiibeirinhas foi utilizado o modelo de Streeter-Phelps, descrito no item 3.4. Este modelo é utilizado para prever o déficit da concentração de oxigênio em um rio, causada pela descarga de águas residuárias, neste caso, esgotos domésticos provenientes da população ribeirinha do riacho.

A autodepuração foi verificada nos pontos críticos do riacho, ou seja, onde há maiores vazões de descarte irregular de esgoto doméstico, que contribui negativamente para os parâmetros de qualidade do corpo hídrico.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Vazão

Para o cálculo da contribuição de esgoto foi utilizada a equação 12.

$$Q_{esgoto} = Q_{dom} + Q_{inf} + Q_{ind} \quad (12)$$

Sendo:

Q_{dom} = vazão de contribuição do esgoto doméstico;

Q_{inf} = vazão de infiltração de rede;

Q_{ind} = vazão de despejos industriais.

Segundo Cardoso (2015) para o cálculo das vazões dos pontos 1, 2 e 3 da figura 8, foram consideradas as vazões de esgoto doméstico e de infiltração da rede, e as vazões advindas de despejos industriais foram desprezadas, uma vez que, não existem indústrias ao redor do riacho Caraibeirinhas.

Para determinar as vazões, Cardoso (2015) estimou a população de cada área de drenagem a partir de um valor encontrado para a densidade demográfica de aproximadamente 7520 hab/km². Foi admitido um consumo per capita de 220 L/hab.dia. E por fim, foi estimada a vazão de infiltração com a ajuda do software *Google Earth Pro* e utilizando a equação 13, considerando uma taxa de infiltração de 0,5 L/s.

$$Q_{inf} = 0,5 * L \quad (13)$$

Sendo:

L = comprimento da rede de coleta, em Km.

As vazões dos pontos escolhidos para análise encontram-se na tabela 7.

Tabela 7: vazões dos esgotos para cada ponto.

Ponto	População (hab.)	Q_{dom} (L/s)	Extensão da rede (Km)	Q_{inf} (L/s)	Q_{esgoto} (L/s)
1	3622	13,28	9	4,5	17,78
2	13543	49,65	33,77	16,88	66,54
3	17819	65,34	44,46	22,23	87,57

Fonte: Adaptado de Cardoso (2015).

Por fim, a vazão do rio estimada por Cardoso (2015) para um tempo de retorno de 5 anos foi 48,84 m³/s.

5.2 Dimensões do canal nos pontos de amostragem

Através de medição *in loco* foram obtidas as seguintes dimensões.

Tabela 8: Dimensões do canal nos pontos de amostragem

Ponto	Largura do canal (m)	Profundidade (m)
1	5,60	0,75
2	4,50	1,60
3	9,55	2,20

Fonte: O Autor (2017).

5.3 Indicadores de Qualidade

Potencial Hidrogeniônico (pH)

A figura 10 apresenta os valores de pH da água do riacho Caraibeirinhas para os pontos de amostragem.

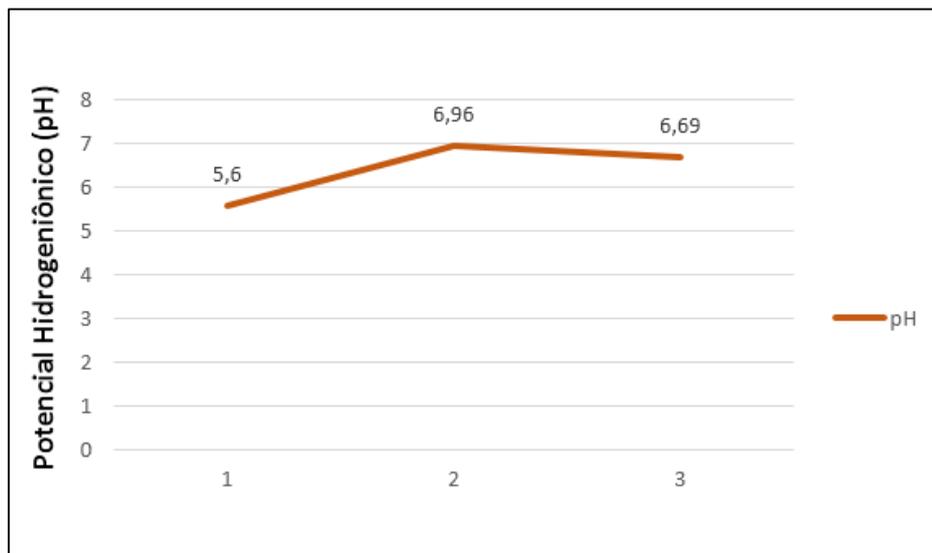


Figura 10: pH dos pontos de amostragem

Fonte: Adaptado de Santos (2015).

Pode-se verificar que, mesmo com a carga de matéria orgânica lançada no riacho pelos esgotos domésticos, o pH dos pontos de amostragem 2 e 3 estão dentro do padrão estabelecido

pela Resolução n° 430/2011 do CONAMA, que estipula valores de pH entre 6 e 9 para águas doces de classe II.

Embora a amostra do primeiro ponto de coleta esteja fora do limite estabelecido pela Resolução, pode-se afirmar que as águas do riacho Carabeirinhas possuem boas condições para o tratamento biológico de esgoto, uma vez que esse valor é justificado devido ao fato da água estar parada no ponto de coleta, ocasionado pela concentração de matéria orgânica e pelo fato de ser um valor aproximado do permitido, levando em consideração margens de erros permitidas em medições *in loco*.

Oxigênio Dissolvido (OD)

A figura 11 apresenta a concentração de oxigênio dissolvido para os pontos de amostragem do riacho Carabeirinhas.

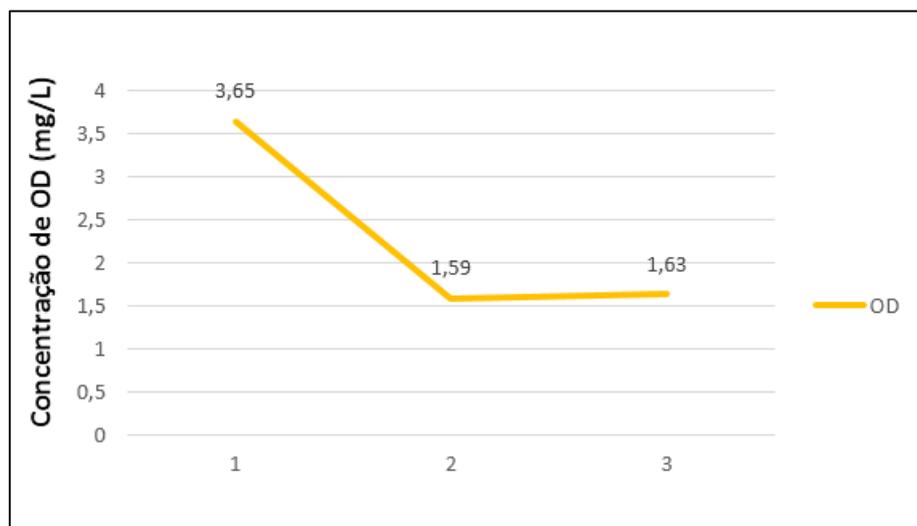


Figura 11: OD dos pontos de amostragem

Fonte: Adaptado de Santos (2015).

Pela Resolução 430/2011 CONAMA, para os rios de classe 2, o valor do oxigênio dissolvido, não pode ser inferior a 5 mg/L. Nas amostras analisadas, o valor de oxigênio dissolvido nos pontos 1, 2 e 3 foram 3,65mg/L, 1,59mg/L e 1,63mg/L, respectivamente, ou seja, abaixo do limite mínimo estabelecido para este parâmetro. Este fato pode ter ocorrido porque estes pontos se localizam exatamente onde os esgotos domésticos são despejados, interferindo na concentração de oxigênio dissolvido devido à deposição de matéria orgânica na água, que começa a ser degradada, contribuindo para esta redução.

Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A figura 12 apresenta os valores da demanda química de oxigênio para os pontos de amostragem do riacho Caraiibeirinhas.

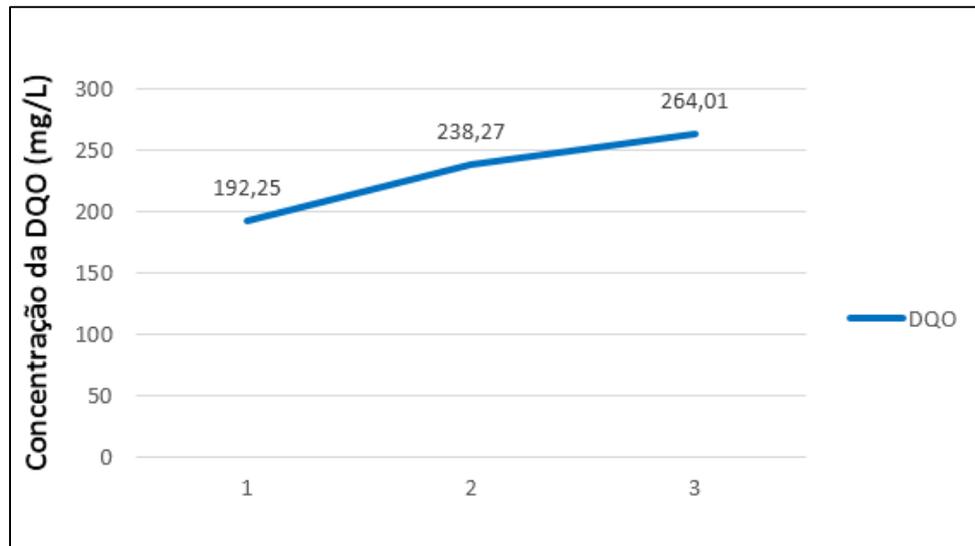


Figura 12: DQO dos pontos de amostragem

Fonte: Adaptado de Santos (2015).

A DQO traduz, indiretamente, a quantidade de matéria orgânica presente no corpo d'água. Esse parâmetro é inversamente proporcional ao oxigênio dissolvido da amostra, ou seja, a medida que o valor do oxigênio diminui, a DQO aumenta. Dessa forma, observa-se que os valores da DQO possui relação direta com os valores do OD. Nesse interim, pode-se verificar que, como o OD não está de acordo com o valor estipulado pela Resolução do CONAMA, conseqüentemente a DQO não satisfaz aos padrões de qualidade aceitáveis.

Demanda Bioquímica de Oxigênio

A figura 13 representa os valores da demanda bioquímica de oxigênio, estimada, para os pontos de amostragem do riacho Caraiibeirinhas. Foi adotada uma relação DQO/DBO igual a 2, conforme figura 9, situada dentro do intervalo característico de águas contaminadas por esgoto doméstico.

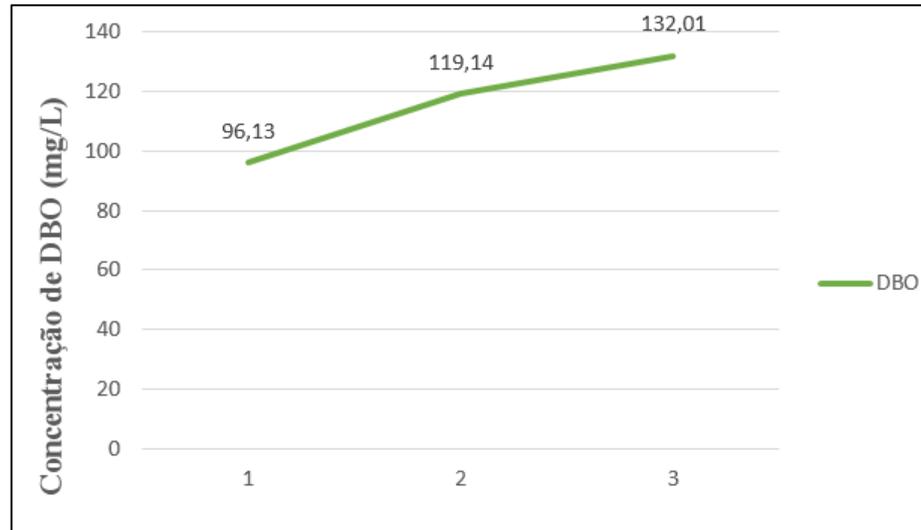


Figura 13: DBO dos pontos de amostragem

Fonte: O Autor (2017).

5.4 Cálculo da autodepuração pelo Modelo de Streeter-Phelps

5.4.1 Dados de entrada

5.4.1.1 Vazão de esgotos (Q_e)

- Ponto de Amostragem 1: 17,78 L/s
- Ponto de Amostragem 2: 66,54 L/s
- Ponto de Amostragem 3: 87,57 L/s

5.4.1.2 Oxigênio Dissolvido no rio, à montante do lançamento (OD_r)

- Ponto de Amostragem 1: 3,65mg/L
- Ponto de Amostragem 2: 1,59mg/L
- Ponto de Amostragem 3: 1,63mg/L

5.4.1.3 DBO_5 do esgoto (DBO_e)

- Ponto de Amostragem 1: 96,13 mg/L
- Ponto de Amostragem 2: 119,14 mg/L
- Ponto de Amostragem 3: 132,01mg/L

5.4.1.4 Coeficiente de desoxigenação (K_1)

Segundo a tabela 3, e por se tratar de um efluente secundário o riacho em estudo, considera-se o valor do coeficiente de desoxigenação igual a 0,24.

5.4.1.5 Coeficiente de reoxigenação (K_2)

Segundo a tabela 4, e se tratando de um rio vagaroso e raso, considerou-se o coeficiente de reoxigenação igual a 0,37.

5.4.1.6 Velocidade do curso d'água (U)

Como demonstrado abaixo, através da equação 3, obteve-se uma velocidade de 2,32 m/s.

$$U = \frac{Q}{(w \cdot h)}$$

$$U = \frac{48,84 \text{ m}^3/\text{s}}{(9,55 \text{ m} \cdot 2,20 \text{ m})}$$

$$U = 2,32 \text{ m/s}$$

5.4.1.7 Tempo de percurso (t)

Como demonstrado abaixo, através da equação 4, obteve-se um tempo de percurso de 0,0142 dias.

$$t = \frac{x}{v \cdot 86400}$$

$$t = \frac{2860}{2,32 \cdot 86400}$$

$$t = 0,0142 \text{ dias}$$

5.3.2 Dados de saída

5.3.2.1 Déficit de oxigênio com a variação do tempo

Através da aplicação dos dados de entrada, obtidos no item 5.3.1, na equação 10, estima-se o déficit de oxigênio que ocorre em cada ponto de amostragem, após o lançamento da matéria orgânica.

- Ponto de Amostragem 1:

$$D_t = \frac{0,24.96,13}{0,37 - 0,24} \cdot (e^{-0,24.0,0142} - e^{-0,37.0,0142}) + 3,65 \cdot e^{-0,37.0,0142}$$

$$D_t = 3,65$$

- Ponto de Amostragem 2:

$$D_t = \frac{0,24.119,14}{0,37 - 0,24} \cdot (e^{-0,24.8,23.10^{-5}} - e^{-0,37.8,23.10^{-5}}) + 1,59 \cdot e^{-0,37.8,23.10^{-5}}$$

$$D_t = 1,58$$

- Ponto de Amostragem 3:

$$D_t = \frac{0,24.132,01}{0,37 - 0,24} \cdot (e^{-0,24.8,23.10^{-5}} - e^{-0,37.8,23.10^{-5}}) + 1,63 \cdot e^{-0,37.8,23.10^{-5}}$$

$$D_t = 1,62$$

5.3.2.2 Déficit máximo de oxigênio

Através da aplicação dos dados de entrada obtidos no item 5.3.1 na equação 11, estima-se a distância onde ocorre o déficit máximo de oxigênio em cada ponto de amostragem, após o lançamento da matéria orgânica.

- Ponto de Amostragem 1:

$$\frac{dD}{dx_{x=x_c}} = 0 \rightarrow X_c = \frac{2,32}{0,37 - 0,24} \cdot \ln \left[\frac{0,37}{0,24} \cdot \left(1 - \frac{3,65 \cdot (0,37 - 0,24)}{0,24} \right) \right]$$

$$X_c = -36,82 \text{ m}$$

- Ponto de Amostragem 2:

$$\frac{dD}{dx_{x=x_c}} = 0 \rightarrow X_c = \frac{2,32}{0,37 - 0,24} \cdot \ln \left[\frac{0,37}{0,24} \cdot \left(1 - \frac{1,59 \cdot (0,37 - 0,24)}{0,24} \right) \right]$$

$$X_c = 5,05 \text{ m}$$

- Ponto de Amostragem 3:

$$\frac{dD}{dx_{x=x_c}} = 0 \rightarrow X_c = \frac{2,32}{0,37 - 0,24} \cdot \ln \left[\frac{0,37}{0,24} \cdot \left(1 - \frac{1,63 \cdot (0,37 - 0,24)}{0,24} \right) \right]$$

$$X_c = -30,55 \text{ m}$$

Analisando os dados de saída do método de Streeter-Phels, pode-se verificar que a concentração de oxigênio dissolvido no riacho Carabeirinhas, nos pontos de lançamento dos esgotos domésticos encontram-se abaixo do mínimo permitido pela resolução CONAMA 430/11, que é de 5,0mg/L, em todos os pontos de amostragem. Pode-se ainda verificar que a concentração de OD decai ao longo do percurso do riacho, verificando-se que o riacho não está conseguindo depurar a carga de esgoto que é lançada em suas águas pelos despejos domésticos, uma vez que, a tendência desse parâmetro é aumentar ao longo do curso d'água como mostra o gráfico da figura 2.

Nota-se que durante a aplicação dos parâmetros nas equações do modelo matemático obteve-se alguns valores negativos. É importante ressaltar que essas concentrações não tem significado físico e o modelo não é válido nestas condições. Uma solução para este acontecimento em trabalhos futuros seria a coleta dos parâmetros de mais pontos ao longo do riacho, como seria feito inicialmente, para que se obtivesse um perfil mais amplo do oxigênio dissolvido. Porém, nesse trabalho não foi possível a realização dessa coleta devido a um problema com a sonda multiparâmetros que seria utilizada para medição dos dados necessários. Nesse caso, para que fosse possível obter o perfil de oxigênio dissolvido em função da distância, ao invés de se utilizar negativos obtidos pelas equações de Streeter-Phels das distâncias, utilizou-se as medidas dos pontos de coleta.

Diante do exposto, é necessário adotar medidas de controle ambiental, uma vez que, em toda a extensão do riacho Carabeirinhas ocorrem concentrações de oxigênio dissolvido inferiores à mínima permissível. Portanto, deverá ser investigada, dentro das alternativas disponíveis, qual seria a melhor solução técnica e econômica, para conseguir aumentar os níveis de oxigênio dissolvido, objetivando atingir a qualidade desejável para a água. Dentre as alternativas, está: a implantação de uma estação de tratamento de esgoto na cidade que atenda todos os bairros, evitando o despejo irregular de esgotos domésticos no riacho.

O perfil do maior déficit de concentração de oxigênio dissolvido (OD), em função da distância crítica de percurso apresenta-se na figura 14.

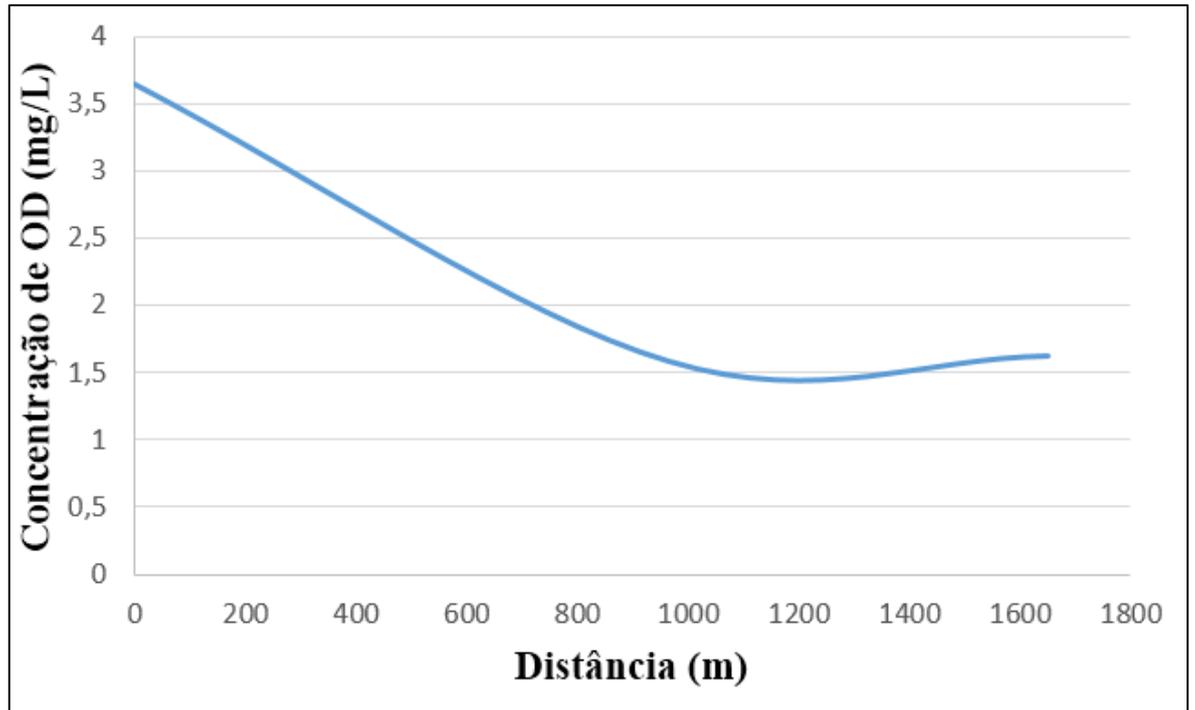


Figura 14: Perfil de Oxigênio Dissolvido do riacho Caraibeirinhas

Fonte: O Autor (2017).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos realizados neste trabalho tiveram o objetivo de diagnosticar a autodepurção das águas do riacho Caraiibeirinhas, na cidade de Delmiro Gouveia – AL, por meio da obtenção dos parâmetros de qualidade (pH, OD, DBO e DQO) e aplicação no modelo matemático de Streeter-Phelps, buscando indicadores de qualidade que refletissem resumidamente as suas alterações, e além disso, comparar estes resultados com os padrões exigidos pela legislação.

Verificou-se por meio da comparação dos resultados dos parâmetros analisados com os exigidos pela Resolução CONAMA n.º. 430/2011, que todos os pontos avaliados não apresentam condições para o enquadramento do riacho Caraiibeirinhas como classe 2 de qualidade. Os valores encontrados dos parâmetros analisados permitem classifica-los como corpo de água doce de classe 4, que pode ser destinado à navegação e à harmonia paisagística.

Dando continuidade, a partir dos parâmetros obtidos durante a pesquisa verificou-se que a presença de poluição proveniente dos esgotos domésticos estão alterando de maneira drástica as características biológicas do riacho Caraiibeirinhas. Podendo observar que em nenhum ponto há a concentração mínima, exigida por norma, de oxigênio dissolvido, significando que o riacho está totalmente comprometido, tornando a qualidade do corpo hídrico classificada como péssima.

Ao utilizar-se das equações matemáticas deduzidas por Streeter e Phelps para avaliar a evolução das condições de qualidade da água ao longo do percurso hídrico, a poluição do riacho se confirmou, uma vez que, houve uma disparidade nos valores de cada parâmetro, ao longo do tempo e espaço. Deste modo, mesmo fazendo a equivalência de vazões, a carga de poluentes continuou alterada, podendo-se concluir que os trechos analisados encontram-se em situações críticas, comprometendo a qualidade da água, mostrando que o problema está no lançamento irregular de matéria orgânica, através de despejos de esgotos domésticos.

À luz dessas considerações, VON SPERLING (2005) mostra que deve-se considerar que um corpo hídrico esteja depurado quando seus parâmetros estão nos intervalos exigidos por norma. Neste caso, comparando-se os valores obtidos através da análise de parâmetros do riacho Caraiibeirinhas com os previstos na resolução CONAMA 430/2011 para rios doces de classe 2, verificou-se que os valores práticos estão em desconformidade com os exigidos, concluindo-se que o riacho ainda não está depurado na sua foz, e que de alguma forma pode comprometer a qualidade do rio Maxixe, onde ocorre o seu deságue.

Nesse interim, os resultados obtidos dessa pesquisa mostraram que as águas do riacho Caraibeirinhas da cidade de Delmiro Gouveia-AL, encontram-se poluídas e não possui autodepuração, sendo o lançamento irregular dos esgotos domésticos da comunidade ribeirinha a principal fonte de poluição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, N. L. Autodepuração dos corpos d'água. **Revista da Biologia**, São Paulo, v. 5, p.16-19, 30 dez. 2010.
- APHA (1999). Standart Methods for the examination of water and wastewater. 19th edition. New York American public health association.
- Banco Mundial. Brasil: A gestão dos problemas da poluição. A agenda ambiental marrom – Volume I: relatório de política, 1998.
- BRANCO, S. M. **Hidrobiologia Aplicada à Engenharia Sanitária**. São Paulo, CETESB, 1978.
- CARDOSO, L. P. L. **avaliação quantitativa do sistema misto de saneamento de Delmiro Gouveia - AL: estudo de caso riacho Caraiibeirinhas**. Delmiro Gouveia-AL: UFAL, 2015.
- CHAVEZ, D. T. C. **Metodologia para avaliar a poluição na Baía de Paracas (Peru)**. 2009. 202 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução n° 430/2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em 20/10/16.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: Diagnóstico do município de Delmiro Gouveia, estado de Alagoas**. Organizado [por] João de Castro Mascarenhas, Breno Augusto Beltrão, Luiz Carlos de Souza Junior. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.
- DINIZ, L. T. **Efetivação das Metas de Qualidade de Águas Superficiais no Brasil**. 2006. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- ELLIS, E. C. Anthropogenic transformation of the terrestrial biosphere. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, London, v.369, n.1938, p.1010-1035, 2011.
- HESPANHOL, K. M. H. **Monitoramento e diagnóstico da qualidade da água do ribeirão Morangueiro**. 2009. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Disponível em: <<http://cod.ibge.gov.br/WUZ>>. Acesso em: 20 de abril de 2017.
- LEITÃO, S. M. **A visão da Água: O Desafio do Milênio**. Ecolatina 2001. Belo Horizonte, MG, 2001.
- LEITE, D. J.; TEXEIRA, D. Aplicação de Modelo de Autodepuração para Avaliação da Qualidade da Água do Rbeirão do Ouro, Araraquara - SP. **Revista UNIARA**, Araraquara, v. 13, n. 1, p.49-62, jul. 2010.

- LEMOS, W. E. D.; SOUZA, F. A.; SALES, F. A. T. C. Valoração dos serviços ambientais a partir de uma abordagem quantitativa: aplicação ao Rio Jaguaribe. **Rdae**, [s.l.], v. 63, n. 198, p.38-54, 2015. Editora Cubo Multimídia.
- MENDES, D. A. R. **Aplicação do Modelo QUAL2Kw para Avaliação de Cargas Pontuais do Rio Itapanhaú**. 2010. 206 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- MENDES, F. E. **Avaliação de programas de controle de poluição atmosférica por veículos leves no Brasil**. 2004. 179 f. Tese (Doutorado) - Curso de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- MENEZES, J. P. C. **Efeito das atividades antrópicas na bacia do Ribeirão Vermelho (Lavras, MG) sobre o ecossistema aquático**. 2016. 103 f. Tese (Doutorado) - Curso de Sistemas Agrícolas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE DO BRASIL SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. **Avaliação das Águas do Brasil**. Brasília, DF, 2002.
- NUVOLARI, A. **Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. São Paulo, Edgar Blucher, 520 p., 2003.
- OLIVEIRA, T. M. **Diagnóstico da qualidade físico-química e biológica dos afluentes da bacia do alto rio Pirapó**. Dissertação (Mestrado) – UEM, Maringá, PR, 2004.
- OPPA, L. F. **Utilização de Modelo Matemático de Qualidade da Água para Análise de Alternativas de Enquadramento do Rio Vacacaí Mirim**. 2007. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- PEREIRA, Edilaine Regina. **Qualidade da água residuária em sistemas de produção e de tratamento de efluentes de suínos e seu reuso no ambiente agrícola**. 2006. 130 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2006.
- PHILIPI, C. T. **Avaliação de um Sistema de Reuso de Água: O caso de um parque temático**. 2006. 56 f. Tese (Doutorado) - Curso de Saúde Pública, Faculdade de Saúde Pública, São Paulo, 2006.
- PIZELLA, D.G. **Análise da sustentabilidade ambiental do sistema de classificação das águas doces superficiais**. 2006. 159f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- RICCIARDONE, P.; PEREIRA, O. S.; PEREIRA, C. S. S. Avaliação da Capacidade de Autodepuração do Rio das Mortes no Município de Vassouras/RJ. **Revista Eletrônica TECCEN**, Vassouras -R J, v. 4, n. 3, p.63-76, dez. 2011.
- ROCHA, C. I. O. **Plano diretor de drenagem urbana em cidades planejadas: premissa de zoneamento baseado no risco de contaminação da água subterrânea**. 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Recursos Hídricos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

RODRIGUES, R. **SSD RB - Sistema de suporte a decisão proposto para a gestão qualitativa dos processos de outorga e cobrança pelo uso da água.** 2005. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

RODRÍGUEZ, M. P. **Avaliação da qualidade da água da bacia do alto Jacaré-Guaçu/SP (Ribeirão do Feijão e Rio do Monjolinho) através de variáveis físicas, químicas e biológicas.** 2001. 147f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2001.

SANTOS, A. S. **Poluição ambiental no riacho Caraibeirinha, Delmiro Gouveia-AL: uma experiência de ensino de geografia.** Delmiro Gouveia-AL: UFAL, 2015.

SOUSA, A. F. S. **Diretrizes para implantação de sistemas de reúso de água em condomínios residenciais baseadas no método APPCC - Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle: Estudo de Caso Residencial Valville I.** 2008. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SPERLING, V. M. (2005). **M. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias.** 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG.

SPERLING, V. M. (2014). **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 4 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG.

STREETER, H. W.; PHELPS E. B. (1925). **A Study of the Pollution as Natural Purification of the Ohio River.** Public Health Bulletin, 146. Washington D.C: U.S. Public Health Service.

TELES, R. B.; SILVEIRA, A. (2006). **Autodepuração de escoamentos naturais de água Estudo de caso: aplicação de modelagem matemática em um trecho do Ribeirão Preto.** Ribeirão Preto-SP. In: XXX - Congresso da Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - AIDIS 2006, 2006, Punta del Este. XXX – Congreso da Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – AIDIS.