

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ANIELLE FERREIRA DE JESUS PARDO

**USO DA LANDOLTIA PUNCTATA NO TRATAMENTO DO EFLUENTE
DE PISCICULTURA RESULTANTE DO SRA COM REATOR DE
BIOFILME AERADO EM MEMBRANA**

Ilha Solteira
2022

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANIELLE FERREIRA DE JESUS PARDO

**USO DA *LANDOLTIA PUNCTATA* NO TRATAMENTO DO
EFLUENTE DE PISCICULTURA RESULTANTE DO SRA COM
REATOR DE BIOFILME AERADO EM MEMBRANA**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
UNESP como parte dos requisitos para
obtenção do título de mestre. Especialidade:
Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais

Orientadora:

Prof. Dra. Liliane Lazzari Albertin

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P226u Pardo, Anielle Ferreira de Jesus.
Uso da landoltia punctata no tratamento do efluente de piscicultura
resultante do sra com reator de biofilme aerado em membrana / Anielle
Ferreira de Jesus Pardo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
116 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e
Tecnologias Ambientais, 2022

Orientador: Liliane Lazzari Albertin
Inclui bibliografia

1. Polimento. 2. Macrófita. 3. Biofiltro. 4. Tilápia do nilo. 5. Sistema de
recirculação.

Raiane da Silva Santos
Raiane da Silva Santos



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Uso da *Landoltia Punctata* no tratamento do efluente de piscicultura resultante do SRA com reator de biofilme aerado em membrana

AUTORA: ANIELLE FERREIRA DE JESUS PARDO

ORIENTADORA: LILIANE LAZZARI ALBERTIN

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA CIVIL, área: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela Comissão Examinadora:

Prof.^a. Dr.^a. LILIANE LAZZARI ALBERTIN (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Profa. Dra. JULIETA BRAMORSKI (Participação Virtual)
Departamento de Meio Ambiente e Desenvolvimento / Universidade Federal do Amapá - UNIFAP

Profa. Dra. ANDRÉA NOVELLI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Ambiental / Universidade Federal de Sergipe

Ilha Solteira, 16 de fevereiro de 2022

DEDICATÓRIA

À Deus e a minha família, por todo o amor e sabedoria, constituem a minha base e luz para caminhar nessa estrada, chamada Vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pelo seu amor misericordioso por mim, por me conceder o dom da vida, pelo consolo e amparo nas tribulações, todas as bênçãos concedidas e por ter me dado forças para nunca desistir.

À minha família, meus pais Leandro e Silvana e meu irmão Henrique, por todo apoio, compreensão, carinho e o amor incondicional que me deram.

À minha orientadora, professora Dr.^a Liliane Lazzari Albertin, por todo auxílio, orientação, paciência e dedicação.

Ao professor Dr. Tsunao Matsumoto, pelas contribuições na minha pesquisa. Grande colaborador deste projeto.

Ao pesquisador Dr. William Deodato Isique, grande exemplo de pesquisador e professor, por toda colaboração, ensinamentos prestados durante as análises laboratoriais.

A todos técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS/UNESP.

As minhas amigas Luiza, Gisele e Eduarda que tive o prazer de dividir minha rotina, juntas houve muitos momentos de felicidade, carinho, compreensão, apoio e conselhos.

As minhas amigas de laboratório, Andressa, Fernanda, Letícia e Juliana pelo apoio e companhia nas análises de laboratório.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

RESUMO

A piscicultura é uma atividade com crescente avanço de mercado e destaque econômico, o que aumenta o interesse pela busca de novas tecnologias de produção, diante disso, o sistema fechado de aquicultura apresenta um importante papel no desenvolvimento do setor. Os Sistemas de Recirculação para Aquicultura (SRA) são sistema de produção alternativos para regiões com limitação hídrica e física. As macrófitas ganharam destaque na eficiência de remoção de nutrientes, tornando-se uma forma de tratamento e polimento de águas residuárias, com função importante de amenizar os impactos ambientais e preservação dos recursos hídricos. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente o uso da macrófita *Landoltia Punctata* como método de tratamento do efluente gerado no SRA na produção intensiva de Tilápia - do - Nilo (*Oreochromis niloticus*) e avaliar a eficiência de remoção de nutrientes e matéria orgânica para o SRA associado a um Reator de Biofilme Aerado em Membrana (MABR). O SRA foi constituído por um Tanque de Cultivo com tilápias (13,75 kg/m³) e um Decantador de Coluna (DC) associado ao (MABR). Duas bombas em série foram responsáveis por manter a água em recirculação, primeiro elas alimentavam o DC, e em seguida o sobrenadante era descarregado para o MABR. O sistema de tratamento do efluente foi constituído por quatro tanques de 500 litros, sendo que em três dessas unidades foram inseridas macrófitas para o polimento e, um deles foi utilizado como controle. Por fim, para analisar a eficiência do tratamento das águas residuárias no SRA e no sistema de polimento, foram monitorados os seguintes parâmetros: turbidez, pH, temperatura, nitrato, condutividade, densidade de crescimento, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Sólidos Totais (ST) e Oxigênio Dissolvido (OD). Para a eficiência do SRA os resultados mostraram que as remoções médias de ST, nitrato, DQO e DBO foram de 9 %, 26 %, 43 %, e 40 % respectivamente. Para a eficiência do sistema de polimento os resultados mostraram que as remoções médias de ST, nitrato, DQO e DBO foram de 21 %, 30 %, 45 %, e 50 % respectivamente. Ambos os sistemas se mostraram efetivos na remoção dos parâmetros apresentados, contudo, o SRA com o MABR se mostrou mais eficiente no tratamento do efluente que o sistema de polimento com a macrofita *L.punctata*.

Palavras-chave: Polimento. Macrófita. Biofiltro. Tilápia do Nilo. Sistema de Recirculação.

ABSTRACT

The Pisciculture is an activity with increasing market advancement and economic prominence, which increases interest in the search for new production technologies, before that, the closed system here plays an important role in the development of the sector. Aquaculture Recirculation Systems (ARS) are alternative production systems for regions with water and physical limitations. Macrophytes gained importance due the efficiency of nutrient removal, becoming a form of treatment and polishing of wastewater, with an important function of mitigating environmental impacts and preserving water resources. Thus, the objective of this paper is to experimentally evaluate the use of the macrophyte *Landoltia Punctata* as a method of treating the effluent generated in the ARS during intensive production of Nile's Tilapia (*Oreochromis Niloticus*) and to evaluate the efficiency of removal of nutrients and organic matter for the ARS associated with a Membrane Aerated Biofilm Reactor (MABR). The ARS consisted of a Tilapia growth tank (13.75 kg/m³) and a Column Decanter (DC) associated with the MABR. Two pumps in series were responsible for keeping the water in recirculation. They first fed the DC and subsequently the supernatant was discharged to the MABR. The effluent treatment system consisted of four 500-liter tanks, three of which were inhabited with macrophytes for polishing and one was used as a control, with manual supply of 10 L/day. Finally, to analyze the efficiency of wastewater treatment in the ARS and in the polishing system, the following parameters were monitored: turbidity, pH, temperature, nitrate, conductivity, growth density, Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Demand of Oxygen (BOD), Suspended Solids (SST) and Dissolved Oxygen (DO). For the ARS efficiency, the results showed that the mean removals of ST, nitrate, COD and BOD were 9%, 26%, 43%, and 40%, respectively. For the efficiency of the polishing system, the results showed that the mean removals of ST, nitrate, COD and BOD were 21%, 30%, 45%, and 50% respectively. Both systems proved to be effective in removing the parameters presented, however, the SRA with MABR proved to be more efficient in the treatment of the effluent than the polishing system with the macrostrip *L.punctata*.

Keywords: Polishing. Macrophyte. Biofilter. Nile's Tilapia. Aquaculture Recirculation Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Taxa de crescimento anual da quantidade de produção de peixes da aquicultura.....	29
Figura 2 - Produção de tilápia em reais no Brasil.....	32
Figura 3 - Classificação taxonômica da <i>L. punctata</i>	41
Figura 4 - Imagens de <i>Landoltia punctata</i> : 1- fronde; 2- raízes; 3- vista inferior da fronde; 4- fronde filha.	42
Figura 5 - Redução da turbidez e remoção de fósforo total (PT), fósforo dissolvido (PD), nitrogênio total (NT), Nitrato ($N - NO_3$), N-nitrito ($N - NO_2$) e N- amoniacal ($N - NH_3$) pelos sistemas de tratamento de efluentes.	45
Figura 6 - Distribuição espacial microbiana no biofilme	48
Figura 7 - Aparato experimental para SRA, concomitante com MABR e DC.	51
Figura 8 – Descrição do MABR, tubo interno	52
Figura 9 – Difusor de ar.....	52
Figura 11 – Descrição do MABR – tubo externo e zona de decantação	53
Figura 12 - Membrana utilizada no sistema.....	54
Figura 13 - Soprador de ar, responsável pelo fornecimento de ar a membrana	55
Figura 14 - Tanque utilizado para o SRA no cultivo de tilápias	56
Figura 15 - Decantador de coluna associado ao SRA.....	57
Figura 16- Ilustração do aparato experimental com os tanques de polimento	58
Figura 17 - Tanques de polimento no espaço externo do Laboratório de Saneamento	59
Figura 18 – Tanque para qualificação da taxa de crescimento da macrófita <i>L.punctata</i> em diferentes períodos de cultivo	60
Figura 19 – Pontos da coleta das amostras do SRA: Sobrenadante do Decantador de Coluna (1), Saída do MABR (2), Tanque de cultivo de tilápias (3) e Efluente do tanque de cultivo de tilápia (4).....	64
Figura 20 – Ponto de coleta das amostras do tratamento de polimento: tanques 5, 6, 7 e 8	65
Figura 21 - Valores de turbidez no SRA.....	68
Figura 22 - Valores de temperatura no SRA no decorrer da pesquisa.....	70
Figura 23 - Valores de pH no SRA.....	71

Figura 24 - Valores de OD no SRA	72
Figura 25 - Valores de ST no SRA	74
Figura 26 - Valores de nitrato no SRA no decorrer da pesquisa	76
Figura 27 - Valores de DQO no SRA	78
Figura 28 - Valores de DBO no SRA ao longo dos dias	79
Figura 29 - Valores de condutividade no SRA ao longo dos dias.....	81
Figura 30 - Valores de turbidez do efluente de entrada, controle e média dos tanques de polimento.....	83
Figura 31 - Valores da temperatura do efluente de entrada, controle e média dos tanques de polimento	84
Figura 32 - Valores de pH para o efluente de entrada, controle e média dos tanques de polimento.....	86
Figura 33- Amostras em recipientes de coleta para leitura dos parâmetros	88
Figura 34- Comportamento do OD ao longo do período de análise	89
Figura 35 - Comportamento do OD ao longo do período de análise, exceto o 41° dia	89
Figura 36 - Valores de OD no efluente de entrada, controle e média dos tanques de polimento no período de 22 dias	90
Figura 37 – Valores médios de ST do efluente, tanque de polimento e tanque de controle no período de 22 dias	92
Figura 38 – Valores médios de Nitrato no efluente, tanque de polimento e tanque de controle no período de 22 dias	94
Figura 39 -Valores médios de DQO do efluente, tanque de polimento e tanque de controle no período de 22 dias	95
Figura 40 - Valores médios de DBO no efluente, tanque de polimento e tanque de controle no período de 22 dias	98
Figura 41 – Média dos valores de DBO para o SRA no período de 22 dias	98
Figura 42 - Valores médios de condutividade no efluente, tanque de polimento e tanque de controle no período de 22 dias	100
Figura 43- densidade de crescimento da macrófita para o peso fresco e seco ao longo do período da primeira análise.	101
Figura 44 – Densidade de crescimento macrófita <i>L. punctata</i> no período de 22 dias	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Impactos ambientais positivos e negativos no meio ambiente.....	34
Quadro 2 - Parâmetros, frequência e os respectivos métodos utilizados para análise.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valor de produção da aquicultura em 2018 (Mil reais) Brasil e região sudeste.....	31
Tabela 2 - Efeitos de cianobactérias tóxicas em diferentes organismos testes.....	39
Tabela 3 - O teor de $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg / L) e $\text{PO}_4\text{-P}$ (mg / L) nas águas residuais de suínos cobertas com <i>L. punctata</i>	44
Tabela 4- Enumeração e nomeação dos pontos de amostragem dos aparatos experimentais.....	62
Tabela 5 – Dados de P-valor para os pontos de amostragem do SRA.....	67
Tabela 6: Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão da turbidez para o SRA	67
Tabela 7 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem da temperatura no SRA	69
Tabela 8 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de temperatura para o SRA.....	69
Tabela 9 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem do pH no SRA	70
Tabela 10 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de pH para o SRA.....	71
Tabela 11 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de OD no SRA	72
Tabela 12 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de OD para o SRA.....	72
Tabela 13 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de ST no SRA	73
Tabela 14 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de ST para o SRA.....	73
Tabela 16 - Dados de máxima, mínima e média para eficiência de remoção dos ST	74
Tabela 17 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de nitrato no SRA	75
Tabela 18 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de nitrato para o SRA.....	75
Tabela 19 - Dados de máxima, mínima e média para eficiência de remoção do nitrato	75
Tabela 20 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de nitrato no SRA ...	76
Tabela 21 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de DQO para o SRA	77
Tabela 22 - Dados de máxima, mínima e média para eficiência de remoção para DQO no SRA.....	77

Tabela 23 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de nitrato no SRA	78
Tabela 24 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de DBO para o SRA	79
Tabela 25 - Dados de máxima, mínima e média para eficiência de remoção para DBO no SRA	79
Tabela 26 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de nitrato no SRA	80
Tabela 27 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de condutividade para o SRA.....	80
Tabela 28 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de turbidez no sistema de polimento.....	82
Tabela 29 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de turbidez no sistema de polimento	82
Tabela 30 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de temperatura no sistema de polimento	83
Tabela 31 Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão da temperatura no sistema de polimento	84
Tabela 32 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de pH no sistema de polimento.....	85
Tabela 33 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão do pH no sistema de polimento.....	85
Tabela 34 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de OD no sistema de polimento.....	87
Tabela 35- Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão do OD no sistema de polimento.....	87
Tabela 36 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de sólidos totais no sistema de polimento	91
Tabela 37 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de ST no sistema de polimento.....	91
Tabela 38 - Dados de máxima, mínima e média para eficiência de remoção dos sólidos totais.....	91
Tabela 39 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de OD no sistema de polimento.....	93
Tabela 40 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de nitrato no sistema de polimento.....	93

Tabela 41 - Dados de máxima, mínima e média para eficiência de remoção do nitrato	93
Tabela 42 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de OD no sistema de polimento.....	94
Tabela 43 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão do DQO no sistema de polimento.....	95
Tabela 44 – Dados de máxima, mínima e média para eficiência de remoção do DQO	95
Tabela 45 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de OD no sistema de polimento.....	96
Tabela 46 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão do DBO no sistema de polimento.....	97
Tabela 47 - Dados de máxima, mínima e média para Eficiência de remoção do DBO	97
Tabela 48 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de OD no sistema de polimento.....	99
Tabela 49 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão para condutividade no sistema de polimento	99
Tabela 50 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão para a densidade de crescimento	100
Tabela 51 - Taxas de Crescimento Específico e Relativo no tanque de estocagem	101
Tabela 52 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão para a densidade de crescimento	102
Tabela 53 - Taxas de Crescimento Específico e Relativo no tanque de cultivo	103
Tabela 54 – Análise comparativa de eficiência para sólidos totais.....	103
Tabela 55 - Análise comparativa de eficiência para nitrato	104
Tabela 56 - Análise comparativa de eficiência para DQO	104
Tabela 57 - Análise comparativa de eficiência para DBO	104

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

% - Porcentagem

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DC - Decantador de Coluna

DQO - Demanda Química de Oxigênio

FAO - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação

MABR - Reator de Biofilme Aerado em Membranas

OD - Oxigênio Dissolvido

pH - Potencial Hidrogeniônico

PVC - Policloreto de vinila

R\$ - Real

SRA - Sistema de Recirculação para Aquicultura

ST - Sólidos totais

NO_2^- -Nitrogênio em forma de nitrito

NO_3^- -Nitrogênio em forma de nitrato

NH_3 - Amônia livre

SO_4^{2-} - Sulfato

CO_2 - Gás carbônico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVO	20
2.1	OBJETIVO GERAL	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	21
3.1	AQUICULTURA.....	21
3.1.1	Aquicultura Continental.....	22
3.1.2	Classificação dos manejos de piscicultura.....	23
3.1.3	Impactos da aquicultura.....	25
3.2	AQUICULTURA NO MUNDO	28
3.3	POTENCIAL BRASILEIRO PARA AQUICULTURA.....	29
3.4	TILÁPIA DO NILO (<i>Oreochromis niloticus</i>)	30
3.5	DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA PISCICULTURA	33
3.6	IMPACTOS DA PISCICULTURA.....	35
3.6.1	Eutrofização.....	35
3.6.2	Nitrogênio em água	36
3.6.3	Proliferação de cianobactérias tóxicas devido a eutrofização.....	38
3.7	TRATAMENTO DE EFLUENTES	40
3.8	<i>LANDOLTIA PUNCTATA</i>	40
3.9	TRATAMENTO DE EFLUENTES COM MACRÓFITAS AQUÁTICAS.....	43
3.10	SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO PARA AQUICULTURA (SRA).....	46
3.11	REATORES DE BIOFILME AERADO POR MEMBRANA (MABR)	47
3.11.1	Layout do MABR.....	47
3.11.2	MABR no Tratamento de Efluente de Piscicultura.....	48
4	MATERIAIS E MÉTODOS	50

4.1	DESIGNER DO PRIMEIRO APARATO	50
4.1.1	Sistema de Recirculação para Aquicultura com MABR	50
4.1.2	Descrição do MABR.....	51
4.1.3	Tanque de Cultivo dos Peixes	55
4.1.4	Decantador de Coluna (DC)	56
4.2	DESIGNER DO SEGUNDO APARATO.....	58
4.2.1	Tanques de Polimento com a Macrofitas Landoltia Punctata	58
4.2.2	Produção e Caracterização da Biomassa da Landoltia Punctata	59
4.3	OPERAÇÃO DO SISTEMA	61
4.4	PARÂMETROS E FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM	62
4.5	PROCESSAMENTO DOS DADOS E ESTATÍSTICA	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
5.1	RESULTADOS PARA O SRA.....	67
5.1.1	Turbidez.....	67
5.1.2	Temperatura	69
5.1.3	Potencial hidrogeniônico (pH).....	70
5.1.4	Oxigênio Dissolvido	71
5.1.5	Sólidos Totais	73
5.1.6	Nitrato	75
5.1.7	Demanda Química de Oxigênio (DQO)	76
5.1.8	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	78
5.1.9	Condutividade.....	80
5.2	RESULTADOS PARA O SISTEMA DE POLIMENTO COM A MACRÓFITAS <i>L.PUNCTATA</i>	81
5.2.1	Turbidez.....	81
5.2.2	Temperatura	83
5.2.3	Potencial hidrogeniônico (pH).....	85

5.2.4	Oxigênio Dissolvido	87
5.2.5	Sólidos Totais	91
5.2.6	Nitrato	92
5.2.7	Demanda Química De Oxigênio (DQO).....	94
5.2.8	Demanda Bioquímica De Oxigênio (DBO)	96
5.2.9	Condutividade	99
5.2.10	Produção de Biomassa.....	100
5.3	RESULTADOS COMPARATIVOS PARA OS DOIS METODOS DE TRATAMENTO	103
5.3.1	Sólidos Totais	103
5.3.2	Nitrato	103
5.3.3	Demanda Química de Oxigênio (DQO)	104
5.3.4	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	104
6	CONCLUSÃO	106
7	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	108

1 INTRODUÇÃO

O aumento demográfico mundial e a demanda por alimentos exigem cada vez mais pesquisas que introduzam métodos para utilização da água de forma consciente, uma vez que a escassez de água está aumentando, devido ao aumento da demanda e poluição dos recursos hídricos, e em decorrência disto a degradação dos ecossistemas relacionados à água (FAO, 2018).

As águas residuárias são responsáveis por boa parte de disposição de carga poluidora no meio. Ao longo dos anos, tecnologias para a remoção de poluentes vem sendo estudadas, as quais apresentam soluções para o tratamento através de tecnologias *in situ*. (KARNA E VISVANATHAN, 2019).

Para Ekperusi *et al.*, (2019), apesar de existir vários métodos convencionais para o tratamento de água, é amplamente desejável fazer o uso de novas técnicas com base ecológica, como por exemplo a aplicação de macrófitas, que foram relatadas como eficientes para o tratamento de diferentes categorias de efluentes de águas residuais.

As macrófitas se tornaram tema de pesquisa, usadas no tratamento e polimento de efluentes, além da sua capacidade de absorção dos resíduos orgânicos, também pode ser usada como matéria prima para a produção de energia devido a sua capacidade de acumular amido, empregado como matéria-prima renovável para a produção de bioetanol (LIU *et al.*, 2018).

Para Henry-Silva e Camargo (2018) os sistemas de tratamento de efluentes por meio de macrófitas aquáticas podem ser viáveis para os aquicultores e ainda minimizam os impactos sobre os ecossistemas aquáticos. Os efluentes de aquicultura são ricos em nitrogênio, fósforo e matéria orgânica e contribuem para a eutrofização dos corpos de água receptores, além de ocasionar redução ou alteração da biodiversidade (SIQUEIRA, 2017).

A produção de peixes tem importância significativa, no âmbito de fonte alimentar e renda para inúmeras comunidades no mundo, e tem se destacado mundialmente pelo crescimento. Em 2018, a aquicultura continental produziu 51,3 milhões de toneladas de peixes para alimentação, pode se dizer também que equivale a 62,5 % da produção mundial de peixes, um crescimento de 4,6 % comparado com a produção em 2000 (FAO, 2020). Segundo o IBGE (2020) no ano

de 2018 o Brasil faturou próximo de 5 bilhões de reais em produção aquícola, desse valor 35,8% é devido a produção de tilápia, e a região sudeste representa 26,8 % dessa produção.

As diversas atividades econômicas, principalmente a piscicultura necessitam do meio aquático, é preciso de cuidado no processo de produção dessa atividade para evitar que as múltiplas utilizações da água pela humanidade não sejam afetadas a curto, médio e longo prazo, além de ser necessário que os efluentes atendam às novas demandas da legislação e à pressão dos ambientalistas, antes de ser lançado ao meio ambiente (HENRY-SILVA; CAMARGO, 2018).

No setor da piscicultura, novas técnicas foram desenvolvidas com o objetivo de proporcionar maior controle do ambiente aquático, ganho de produtividade e qualidade no cultivo de vários tipos de peixes (SIQUEIRA, 2017). Uma dessas técnicas são os Sistemas de Recirculação para Aquicultura (SRA), sistemas de criação fechados que representam uma alternativa compacta para cultivo intensivo de espécies com elevadas densidades de estocagem. O sistema não é capaz de fazer a autodepuração, pois com o tempo as características da água vão se alterando, sendo necessário então a implantação de um sistema de tratamento para manter a água em condições ideais para o cultivo da espécie desejada (ALMEIDA, 2020).

Devido a isto, faz-se o uso de biorreatores no tratamento dos efluentes de SRA, que são capazes de consumir matéria orgânica. Dentre os biorreatores com potencial de utilização tem-se: biofiltro aerado submerso, filtro biológico percolador, reator de biodiscos rotativos (RBR), reator de leito móvel com biofilme (MBBR), membranas filtrantes, biorreator com membrana (MBR) e o Reator de Biofilme Aerado em Membranas (MABR), este têm sido bem-sucedidos no tratamento de uma variedade de poluentes, águas residuais farmacêuticas, águas residuais ricas em amônia, águas residuais domésticas, como lixiviado de aterro e licor de digestão anaeróbia (KARNA; VISVANATHAN, 2019).

Diante desse contexto, o objetivo central desta pesquisa foi avaliar a eficiência do tratamento de efluentes de um SRA para produção intensiva de Tilápia - do - Nilo (*Oreochromis niloticus*) de duas maneiras, a primeira equipando o SRA com um Decantador de Coluna (DC) associado a um Reator de Biofilme Aerado em Membrana (MABR), e a segunda avaliando a eficiência de tratamento do efluente utilizando a *macrófita Landoltia Punctata* Para atingir tal objetivo, foram verificados

parâmetros que permitissem avaliar a eficiência de remoção de compostos nitrogenados e cargas orgânicas.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo central dessa pesquisa foi avaliar a eficiência de tratamento do efluente resultante do SRA para produção intensiva de Tilápia - do - Nilo (*Oreochromis niloticus*) por meio de dois tratamentos distintos, sendo eles: em a) equiparação do SRA com um Decantador de Coluna (DC) associado a um Reator de Biofilme Aerado em Membrana (MABR), e em b) avaliar a eficiência de tratamento do efluente retirado do DC, utilizando a macrófita *Landoltia Punctata* em tanques de polimento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a eficiência de remoção de nitrato, sólidos totais, DBO e DQO do efluente proveniente do DC, com utilização da macrófita *L. punctata* em tanques de polimento;
- Mensurar a densidade de produção de biomassa da macrófita *Landoltia Punctata*;
- Avaliar a eficiência de tratamento do Sistema de Recirculação para Aquicultura (SRA) com Reator de Biofilme Aerado em Membrana (MABR), com a porcentagem de redução das concentrações de nitrato, sólidos totais, DBO e DQO.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 AQUICULTURA

A aquicultura é a ciência que estuda técnicas para a produção e cultivo de organismos aquáticos, como peixes, algas, crustáceos ou moluscos, tal ciência abrange a piscicultura que consiste na criação de peixes de maneira fechada e controlada. Souza e Teixeira Filho (1985) descreveram que o objetivo da cultura de peixes tem como foco uma criação racional, alcançando o controle de crescimento e produção. A atividade produtiva se divide em diferentes modalidades: piscicultura (criação de peixes); carcinicultura (criação de camarões); malacocultura (criação de moluscos, ostras e mexilhões); ranicultura (criação de rãs); algicultura (cultivo de algas) e outras culturas de espécies com menor procura comercial, tais como a quelonicultura (criação de tartarugas e tracajás) e a criação de jacarés (SCHULTER; VIEIRA FILHO, 2018).

A produção de peixes tem importância significativa, no âmbito de fonte alimentar e renda para inúmeras comunidades no mundo. Além do mais o peixe, pelo fato de viver na água, apresenta uma série de vantagens para sua criação, por ser pecilotérmico tem baixo consumo de energia para deslocamentos, aproveitando com mais eficiência os alimentos (CASTAGNOLLI, 1996).

Para completar a produção natural de peixes e saciar a exigência mundial de pescado, devido à crescente demanda por alimento, fez-se necessário encontrar alternativas de formas para o cultivo de peixes, sendo essas voltadas à sustentabilidade econômica e ambiental. Portanto, é necessário desenvolver tecnologias de produção em grande escala, visto que, no mundo os peixes das espécies de água doce e salgada são cultivados em diferentes sistemas de produção e níveis tecnologia (ANDRADE; YASUI, 2003).

O sistema produtivo pode ser duas maneiras: Marinha e Costeira, utilizado para a produção de pescado marinho; e Continental, voltado para a produção de peixes de água doce, em alguns casos peixes de água salgada, devido as condições do solo (FAO, 2020).

3.1.1 Aquicultura Continental

FAO (2020) descreveu a aquicultura continental como sendo a criação de peixes no interior do país, sendo normalmente praticada em ambiente de água doce na maioria dos países. Em alguns países como, por exemplo, a China e o Egito, em algumas áreas onde as condições do solo e as propriedades químicas da água são inadequadas para a produção de culturas ou pastagens para produção de grãos, é praticado a aquicultura continental com água salina-alcalina em instalações adaptadas ao ambiente e também com o emprego de espécies adequadas capazes de tolerar as condições e atender as expectativas de piscicultores.

Souza e Teixeira Filho (1985) descreveram que a principal prática de piscicultura é em tanques escavados, que permite a supervisão e regulação da reprodução, alimentação, além de viabilizar e fazer o controle de crescimento, quantidade e também a manutenção do tanque.

Segundo a FAO (2020) os processos de produção da aquicultura em corpo d'água continental, como tanques escavados, cercados e gaiolas, continuam sendo o tipo de instalação mais utilizados para a produção de culturas de peixes. Souza e Teixeira Filho (1985) descreveram que a exploração de culturas de peixes sobre tanques escavados ou açudes, muitas vezes podem ser feitas em áreas que eram improdutivas devido à grande quantidade de água presente ou porque eram zonas de brejos, sem muita possibilidade de uso. SEBRAE (2014), também descreve que a criação de tilápia em tanques escavados pode trazer benefícios ao criador quando integrada a outras atividades agropecuárias, como o reaproveitamento de água, podendo ser destinada a irrigação de pastagens, pomares e hortaliças.

A criação de peixes domina a aquicultura continental, representando 91,5 % (47 milhões de toneladas) da produção total em 2018, que reflete o forte crescimento de outros grupos de espécies, como a criação de crustáceos, incluindo camarão, ástaco e caranguejos (FAO, 2020).

Os sistemas de produção de aquicultura continental passaram nos últimos anos por um progresso rápido e importante de melhoramento, permitindo maior produtividade, melhor uso dos recursos e redução do impacto ambiental (FAO, 2020).

Visto que a piscicultura se destaca dentro da aquicultura continental, serão abordadas as formas de sistema de criação.

3.1.2 Classificação dos manejos de piscicultura

A produção de peixes pode ser conduzida em sistemas diferenciados, sendo caracterizados, basicamente pelo manejo implementado, tipo de alimentação e a produtividade alcançada (CARNEIRO *et al.*, 2015)

O sistema de piscicultura é classificado em três categorias: piscicultura extensiva, semi-intensiva e intensiva. As categorias levam em consideração o grau de interferência do criador no ambiente aquícola e o nível de elementos introduzidos. Segue a definição feita por Castagnolli (1996) para as três categorias.

3.1.2.1 Piscicultura extensiva

Este tipo de piscicultura pode ser praticada em corpos d'água cuja utilização principal não é a criação de peixes, ou seja, apresenta os menores índices de produtividade, dependendo inteiramente da produção natural. Exemplos: represas hidroelétricas, açudes públicos, reservatórios de água para abastecimento urbano ou agropastoril.

Entre os vários inconvenientes que apresenta, além do baixo rendimento em peixes, não há um controle mais severo das espécies existentes e, também, sobre a presença ou ausência de predadores, ficando a colheita restrita praticamente à pesca de molinete e à prática de arrastão nas margens mais favoráveis destes corpos.

É difícil estimar a real produção destas criações, pois, na maioria das vezes não se tem um controle sobre o volume de água destas represas, considerando como produção apenas aquilo que se conseguiu coletar por diferentes métodos de pesca.

3.1.2.2 Piscicultura semi-intensiva

Neste sistema, existe a interferência humana na melhoria da produtividade do ecossistema aquático, fazendo-se algum controle dos peixes existentes nas

represas ou açudes, como por exemplo fornecimento de vários tipos de alimentos, como resíduos da agroindústria, restos de abatedouros, dentre outros.

No Brasil grande parte das pisciculturas semi-intensivas existentes praticam o poli cultivo, utilizando tanto espécies exóticas (carpas e tilápias) quanto espécies nativas (curimatã, trairão, pacu-caranha e o tambaqui).

É muito importante neste tipo de cultivo, que o estabelecimento seja proporcional as espécies que serão criadas, buscando adequar o número de peixes de cada espécie à produtividade do ecossistema (algas, zooplankton e ou bentos) que servirão de alimento aos peixes.

3.1.2.3 *Piscicultura intensiva*

Na piscicultura intensiva, diferente da semi-intensiva, pratica-se o monocultivo em elevada densidade, 20 a 80 peixes por m³, desta forma, o criador deve ter um controle absoluto das condições ambientais, para obter elevada produtividade.

A alimentação dos peixes da piscicultura intensiva é fornecida pelo criador, estabelecendo total dependência do sistema aos cuidados humanos, sendo necessário para que o empreendimento seja totalmente viável. A ração também deve proporcionar elevada conversão alimentar para promover um rápido crescimento. O peixe por sua vez deve alcançar alto valor de mercado, para que a atividade seja lucrativa.

Castagnolli (1996) comenta que os dois principais métodos utilizados na piscicultura intensiva mundial são: Tanques-rede e Canais com fluxo intenso ou "RACEWAYS". O primeiro deles consiste em viveiros de telas resistentes podendo ser de formato redondo, hexagonal ou retangular, com altura variando de 1,5 a 3,0 metros, são montados em grandes reservatórios de água e também nas enseadas das orlas litorâneas com profundidade média de 4,0 a 10,0 metros, amarrados em postes de concreto ou madeira ou ancorados por grandes pesos lançados ao fundo do mar ou dos lagos. O segundo método consiste em uma série de tanques de alvenaria ou concreto, paralelos e interligados com largura de 1,5 a 4,5 metros e comprimento variável, que permite a criação de peixes em altas densidades em função do elevado fluxo de água, pois permite a troca de oxigênio e a remoção de amônia e de sobras de alimento.

Carneiro *et al.*, (2015) descreveram o sistema como restrito no ponto de vista econômico, devido ao volume utilizado de água ser muito alto e por gerar uma grande carga poluidora devido às altas densidades de estocagem.

3.1.3 Impactos da aquicultura

A atividade de aquicultura por fazer uso dos recursos naturais, pode ser apontada como principal causadora de várias interferências no meio aquático, tais como modificações na qualidade da água e na biodiversidade

O Quadro 1, fornecido por Tiago, (2000 *apud* AYROZA, 2011) descreve os impactos ambientais positivos e negativos no meio ambiente, gerado por cada tipo de atividade dentro da aquicultura.

Quadro 1 - Impactos ambientais positivos e negativos no meio ambiente

SISTEMA	IMPACTO AMBIENTAL NEGATIVO	IMPACTO AMBIENTAL POSITIVO
AQUICULTURA EXTENSIVA		
1. Criação de algas macrófitas	• Possibilidade de ocupar recifes virgens; perdas devido a tempestades; competição de mercado; conflitos sociais de uso.	• Lucro financeiro; geração de empregos; produção exportável
2. Criação de moluscos bivalves (ostras, vieiras, mexilhões, berbigões)	• Risco à saúde pública e resistência ao consumo (doenças viróticas e microbianas, marés vermelhas, poluição industrial); perdas devido a tempestades; diminuição de sementes; competição de mercado especialmente para exportação; conflitos sociais de uso.	• Lucro financeiro; geração de empregos; produção exportável; aumento nutricional direto.

3. Tanques de aquicultura em áreas costeiras: tainhas; "milkfish"; camarões; tilápias	•Destruição de ecossistemas (especialmente manguezais); perda de competitividade devido à intensificação dos sistemas criação; perda de sustentabilidade com aumento de crescimento populacional; conflitos sociais de uso.	•Lucro financeiro; geração de empregos; produção exportável (camarões); aumento nutricional direto.
---	---	---

4. Tanques-rede e cercados em águas eutróficas e/ou sobre o fundo	•Exclusão de pescarias tradicionais, riscos à navegação; conflitos sociais de uso; dificuldades de gerenciamento; consumo de madeira.	•Lucro financeiro; geração de empregos; aumento nutricional.
---	---	--

AQUICULTURA SEMI-EXTENSIVA

1. Tanques de aquicultura de águas doce e estuarina (camarões e pitus, carpas, bagres, "milkfish", tainhas, tilápias)	•Água doce: riscos à saúde dos aquicultores por água contaminada com patógenos. Água estuarina: salinização e/ou acidificação do solo e/ou aquíferos. Ambas: competição de mercado (especialmente para exportação); conflitos sociais de uso.	•Lucro financeiro; geração de empregos; produção exportável (camarões); aumento nutricional direto. Preços acessíveis para alimentação e fertilização dos tanques.
---	---	--

2. Aquicultura e agricultura integradas (rizipiscicultura, gado com avipiscicultura; frutipiscicultura; outras combinações)	• Riscos à saúde dos aquicultores por água contaminada com patógenos, resistência ao consumo de produtos criados com alimentação oriunda de excreções animais; competição pelo uso dos insumos de alimentação como excreção do gado e cereais, acumulação de substâncias tóxicas de rações para o gado (metais pesados) no sedimento dos tanques; acumulação de pesticidas em peixes.	• Lucro financeiro; geração de empregos; aumento nutricional; interações sinérgicas entre agricultura, pecuária e aquicultura; reciclagem de resíduos agrícolas e outros.
3. Piscicultura utilizando efluentes de outras atividades	• Riscos à saúde dos aquicultores por água contaminada com patógenos, resistência ao consumo	• Lucro financeiro; geração de empregos; aumento nutricional direto; transformação de reservatórios de detritos em unidades produtivas e depuradoras.
4. Tanques-rede e cercados, especialmente em águas eutróficas ou ricas em bentos (carpas, bagres, "milkfish, tilápias	• Exclusão de pescarias tradicionais, riscos à navegação; conflitos sociais de uso; dificuldades de gerenciamento; consumo de madeira.	• Lucro financeiro; geração de empregos; aumento nutricional direto.

AQUICULTURA INTENSIVA

1. Tanques de aquicultura de águas doce, estuarina e marina (camarões e pitus); peixes, especialmente carnívoros (bagres, enguias, garoupas, pargos etc.)	• Drenagem/efluente com alta Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e sólidos em suspensão; competição de mercado, especialmente para exportação; conflitos sociais de uso.	• Lucro financeiro; geração de empregos; produção exportável.
---	---	---

2. Tanque-rede e cercados em corpos de água doce, estuarina e marinha (especialmente peixes ósseos carnívoros-garoupas, pargos etc., mas também onívoros como a carpa comum)	• Acumulação de sedimentos anóxico embaixo dos tanques-rede devido a fezes e restos de alimentos; competição de mercado, especialmente para exportação; conflitos sociais de uso; consumo de madeira e de outros materiais.	• Lucro financeiro; produção exportável (carnívoros possuem alto preço); uso de pouca mão de obra.
3. Outros ("raceways", silos, tanques, etc.)	• Drenagem/efluente com alta Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e sólidos em suspensão; muitos problemas locais específicos.	• Lucro financeiro; produção exportável; uso de pouca mão de obra.

Fonte: Adaptado de Bardach, TIAGO (2000 apud AYROZA, 2011).

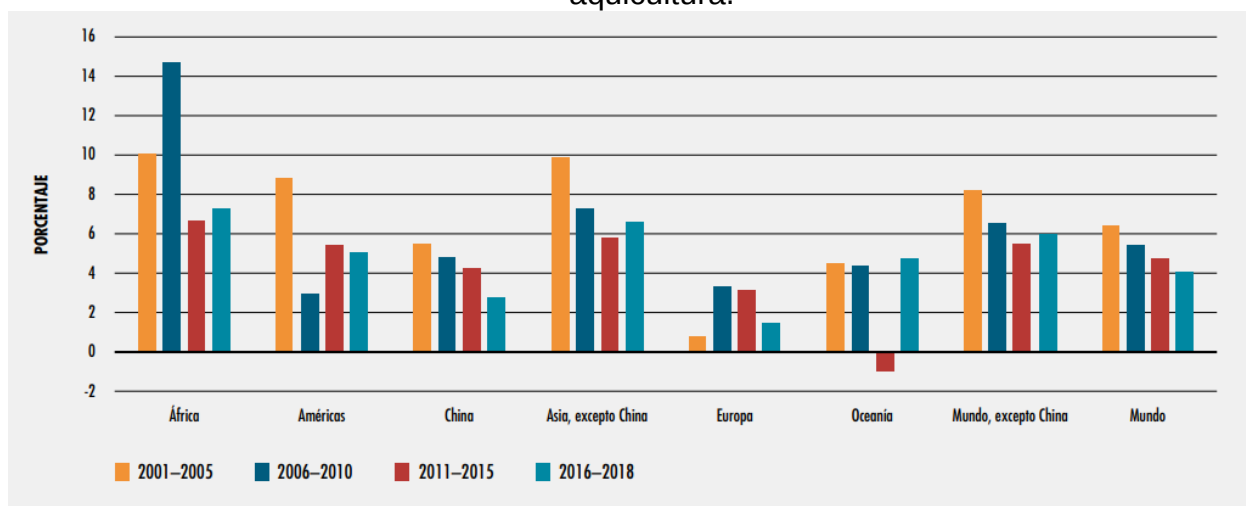
Para o controle dos parâmetros é usado a lei Resolução 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 2005) que regulamenta a classificação dos corpos hídricos e a qualidade da água para os diversos usos. A água destinada para utilização na aquicultura e atividade de pesca é enquadrada como água de classe dois, e são exigidos os seguintes padrões: máximo de 5 mg/L de DBO, 100 unidades de turbidez, 500 mg/L de sólidos dissolvidos totais, 0,05 mg/L de fósforo total, 10 mg/L de nitrato, 1 mg/L de nitrito 3,7 mg/L de nitrogênio amoniacal, pH entre 6 e 9, mínimo de 5 mg/L de oxigênio dissolvido e máximo de 1000 *Escherichia coli* em 100 mL de amostra.

3.2 AQUICULTURA NO MUNDO

Os peixes e produtos da pesca figuram como alguns dos alimentos mais comercializados no mundo. De acordo com as estatísticas mundiais da aquicultura mais recente, compilado pela FAO (2020), a produção mundial da aquicultura atingiu o recorde de 114,5 milhões de toneladas de peso vivo em 2018 com um valor total de venda na exploração de 263,6 bilhões de dólares. As estimativas apontam que a aquicultura será o setor produtor de alimentos que mais crescerá no mundo (SCHULTER; VIEIRA FILHO, 2018)

A contribuição da aquicultura global para produção mundial de pescados atingiu 46,0%. A produção aquícola mundial de animais cresceu, em média, 5,3% anual no período 2001-2018 (Figura 1), enquanto esse crescimento foi de apenas 4% em 2017 e 3,2% em 2018. A baixa taxa de crescimento recente se deve à desaceleração na China, o maior produtor, com um crescimento de produção da aquicultura de apenas 2,2% em 2017 e 1,6% em 2018, enquanto a produção do resto do mundo combinado continuou a registrar crescimento moderado de 6,7% e 5,5%, respectivamente, nos mesmos dois anos (FAO, 2020).

Figura 1 - Taxa de crescimento anual da quantidade de produção de peixes da aquicultura.



Fonte: FAO (2020)

3.3 POTENCIAL BRASILEIRO PARA AQUICULTURA

No levantamento feito pela Associação Brasileira da Piscicultura (PEIXE BR) o Brasil atingiu em 2020 cerca de 802.930 toneladas de peixes, com receita próxima de R\$ 8 bilhões, além disso é o quarto maior produtor mundial de tilápia, espécie que representa 60% da produção do país. Na América Latina, considerando somente a aquicultura, o Brasil continua sendo o segundo maior produtor, ficando atrás apenas do Chile, sétimo maior produtor mundial (SCHULTER; VIEIRA FILHO, 2018). De acordo com PEIXE BR, as exportações da piscicultura atingiram U\$S 5,6 milhões no 3º trimestre de 2021, com aumento de 71% em relação ao mesmo período de 2020.

Para Embrapa (2018) o Brasil apresenta todas as possibilidades convenientes para o desenvolvimento da atividade pesqueira e da aquicultura, uma vez que possui uma costa marítima de 8.500 km e 12% da água doce disponível no planeta.

Kirchner *et al.*, (2016), afirmam que o Brasil é um dos poucos países com tamanha disponibilidade de ambientes propícios a aquicultura, o que é uma das atividades agropecuárias com maior potencial de crescimento na atualidade. O país apresenta ótimas condições para a prática de piscicultura, fatores positivos como clima, relevo, recursos hídricos, insumos para a fabricação de ração, extensão territorial, diversidade na espécie de peixes, entre outros.

Devido a sua vasta extensão territorial o Brasil apresenta uma grande diversidade, possuindo grande potencial para a produção de espécies nativas. Segundo Embrapa (2018), 52 espécies nativas se destacam nas bacias hidrográficas brasileiras como: tambaqui, pacu, matrinhã, surubins e cachara.

Segundo SEBRAE (2016) a ração é principal insumo na produção de piscicultura, sendo então, o que mais impacta no custo do produto. A agricultura brasileira fornece a produção necessária de grãos para a produção de ração, devido aos altos índices de produtividade na região Centro-Oeste, principalmente soja e milho.

3.4 TILÁPIA DO NILO (*Oreochromis niloticus*)

O Brasil possui uma grande diversidade de espécies de peixes e se destaca por ser um dos países com tamanha variedade, e algumas delas são utilizadas para produção significativa de pescado, ou seja, na atividade de piscicultura.

A tilápia-do-nilo foi um dos primeiros peixes a serem criados em aquicultura pelos antigos egípcios (4000 anos). No início da década de 50, a tilápia surgiu como uma espécie promissora para a aquicultura ocidental, uma nova fonte de obtenção de proteína e citações de que a tilapicultura estava ganhando espaço e se tornando um dos melhores negócios para piscicultores (SCHULTER; VIEIRA FILHO, 2018).

Nogueira (2007) define a tilápia como uma espécie exótica e com grande potencial para a piscicultura, e que têm demonstrado maior viabilidade econômica, devido a conhecimento técnico disponível no campo da biologia e também aporte das técnicas de manejo. A tilápia-do-Nilo teve sua primeira introdução no Brasil em 1971 pelo DNOCS – (Departamento Nacional de Obras Contra a Seca), na busca de

fazer o povoamento de peixes nos reservatórios públicos da Região Nordeste, criou-se ações para a produção de alevinos. As companhias hidrelétricas de São Paulo e Minas Gerais também adotaram a ideia, e atribuíram a venda e distribuição a produtores rurais, devido a isso, essas práticas fizeram com que houvesse rápida disseminação da espécie nessas regiões. Na década de 90, houve difusão das técnicas de produção, geração de trabalhos de pesquisa e experimentos com espécies, surgiram então novas tecnologias de reversão sexual que proporcionou que a atividade se desenvolvesse e estruturasse (NOGUEIRA, 2007).

O estado do Paraná foi pioneiro e atribuiu à atividade uma característica empresarial, e constituir a produção. Logo o caráter comercial passou a propagar para outros estados, como, São Paulo, Ceará, Bahia, Sergipe, Alagoas e Santa Catarina, onde este último a tilapicultura se estruturou rapidamente e em São Paulo devido ao surgimento das atividades de pesque-pague, que acarretou uma demanda considerável de tilápia (NOGUEIRA, 2007).

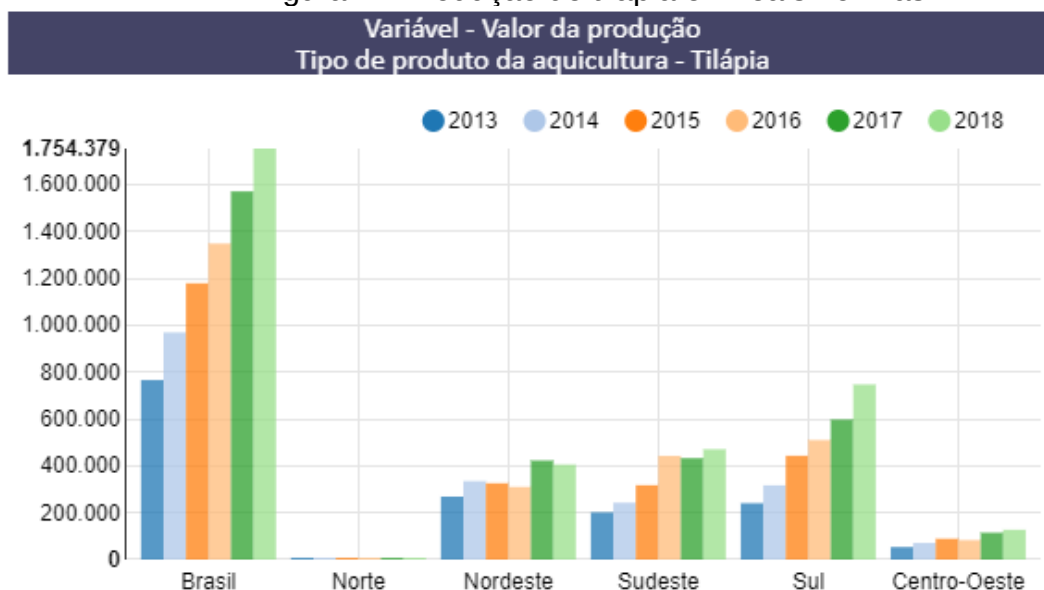
Portanto, a tilápia, uma espécie exótica, ganhou força, cresceu e obteve destaque na piscicultura se tornando a espécie mais utilizada para a produção de pescado. Segundo o IBGE (2020) no ano de 2018 o Brasil faturou próximo de 5 bilhões de reais em produção aquícola, desse valor 35,8% é devido a produção de tilápia, e a região sudeste representa 26,8 % dessa produção. A Tabela 1 a seguir apresenta o valor de produção da aquicultura em 2018 (Mil reais) para o Brasil e a região sudeste. A Figura 2 apresenta o crescimento da produção em reais de tilápia nos últimos anos no Brasil.

Tabela 1: Valor de produção da aquicultura em 2018 (Mil reais) Brasil e região sudeste

Brasil e Grande Região	Total (Mil reais)	Tilápia (Mil reais)
Brasil	4.901.336	1.754.379
Sudeste	613.130	470.801

Fonte: IBGE - Pesquisa da Pecuária 2020

Figura 2 - Produção de tilápia em reais no Brasil.



Fonte: IBGE - Pesquisa da Pecuária (2020).

A tilápia é o peixe de água doce mais cultivado no Brasil e está presente na maioria dos estados brasileiros. A SEBRAE (2016), destaca a espécie como favorável a criação de piscicultura pois é um peixe exótico, de fácil manejo e cultivado em todo o mundo. Segue pontos citados pela empresa, que expõe a tilápia positivamente para a criação.

- Fácil adaptação as diversas condições de cultivo nas diferentes regiões do país;
- Ciclo de engorda relativamente curto (seis meses em média);
- Aceitação de uma ampla variedade de alimentos;
- São resistentes a doenças, altas densidades de povoamento e baixo teor de oxigênio dissolvido;
- Desova durante todo o ano;
- Não possui espinhas em forma de “y”;
- Possui baixo nível de calorias (172 kcal por 100g de carne) e
- Possui carne saborosa saudável com baixo teor de gordura (0,9 g de 100g de carne).

Todas essas características somam fatores importantes na disseminação de sua criação pelo Brasil, justifica o título da espécie mais cultivada no país e inspira piscicultores a priorizar a espécie e investir na sua produção.

Antes de se tornar uma atividade com destaque econômico, a tilápia já estava presente em grande número de propriedades brasileiras, principalmente na região Sul e Sudeste, como importante fator de segurança alimentar. Esse peixe é capaz de se alimentar de diversas maneiras, pode ser omnívoro, herbívoro ou fitoplanctófago. Tem capacidade em filtrar os pequenos organismos presentes na água, denominados de fitoplâncton e zooplâncton e utilizá-los como alimento (SEBRAE, 2016). Essa condição fez com que os produtores apenas jogassem dejetos, de suínos, aves e bovinos, e essa adubação proporcionava uma grande produção desses microrganismos aquáticos. Hoje, em função da legislação ambiental, alguns Estados não permitem o uso de dejetos de origem animal dentro dos viveiros de criação de peixes (SEBRAE, 2016).

3.5 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA PISCICULTURA

O desenvolvimento sustentável é o uso racional e responsável dos recursos naturais, buscando atender as necessidades atuais sem comprometer as futuras gerações (BORGES *et al.*, 2015). O termo sustentabilidade está relacionado à conservação, ao ato de sustentar, conservar, manter, a ideia deste trabalho visa especialmente à preservação dos recursos naturais, controle e manutenção do uso, com a finalidade de suprir as necessidades humanas nas esferas sociais, econômicas, ecológicas, geográficas e culturais (MATOS *et al.*, 2019).

A atividade de piscicultura não se restringe somente ao “cuidar dos peixes”, mas o conhecimento de todos os aspectos internos e externos que podem interferir no seu processo de produção, e possui o desafio de se desenvolver sustentavelmente e ser capaz de garantir positivamente o âmbito social e econômico da sociedade inserida, atingindo todas as classes de produtores e assegurar a sustentabilidade em uma estrutura duradoura (SEBRAE, 2016).

De acordo com Eler e Millani (2007) as atividades produtivas, dentre elas a piscicultura, trazem benefícios sociais e econômicos para a região inserida, por outro lado, essas atividades são impactantes ao meio ambiente se forem executadas de maneira inadequada, sendo então necessário seguir um planejamento de uso dos recursos naturais seguindo os princípios básicos de alteridade sócio-ambiental,

A atividade de piscicultura possui um impacto negativo de grande potencialidade, devido à liberação de nutrientes (nitrogênio e fósforo) provenientes

da ração e dejetos dos peixes, e adjunto a antibióticos e hormônios, esse conjunto é capaz de comprometer a qualidade da água e afetar a biodiversidade local (CARDOSO *et al.*, 2016)

Para completar a produção natural de peixes e saciar a exigência mundial de pescado, devido à crescente demanda por alimento, fez-se necessário encontrar alternativas e variedades para o cultivo de peixes, essas voltadas a sustentabilidade econômica e ambiental. Cardoso *et al.*, (2016) ressaltam que essa atividade está se expandindo- no país, auxiliando na geração de trabalho e renda, assim como elevando a segurança alimentar e nutricional.

Assim, é necessário desenvolver uma tecnologia de produção em grande escala, segurando, de um lado, as importações, e aproveitando, de outro, a inserção no comércio internacional. (SCHULTER; VIEIRA FILHO, 2018). Para Resende (2009), a atividade de piscicultura necessita intensamente do meio aquático, por isso é necessário cuidado no processo de produção para evitar que as múltiplas utilizações da água pela humanidade não sejam afetadas a curto, médio e longo prazo.

É fundamental fazer a busca de um projeto que seja viável e prático no dia a dia, com alternativas de produção executáveis ao alcance do produtor, apresentando simplicidade e eficiência (RESENDE, 2009). A união de aspectos voltados à sustentabilidade faz com que o modelo de negócios planejado com esse princípio proporcione ao produtor maiores chances de sucesso no seu negócio, por criar mecanismos que vão proporcionar a longevidade nas suas atividades, principalmente a rapidez nas análises e tomada de decisões (SEBRAE, 2016).

Borges (2015), destaca é possível conciliar a preservação do meio ambiente com a distribuição de benefícios sociais e econômicos gerados pela piscicultura, e assim desenvolver uma atividade sustentável, mas é preciso que seja estimulado pelos que compõem o domínio da aquicultura nacional e baseado em questões legais.

Fazer o uso de tecnologias inovadoras aplicáveis à realidade do produtor faz com que cresça o mercado de produtos agropecuários sustentáveis e proporcione o combate às desigualdades sociais e destruição do meio ambiente e também produzir um pescado que esteja disponível, aceitável e acessível a todos os setores da sociedade (SEBRAE, 2016).

Cardoso *et al.*, (2016) ressaltam que fazer um planejamento estratégico e gestão adequada com fundamentos nos princípios de sustentabilidade, ambos serão

capazes de avaliar de maneira mais eficiente ações que possam minimizar o impacto da piscicultura na qualidade da água e contribuir como ferramenta no monitoramento de poluição hídrica.

A prática da sustentabilidade seja de curto, médio e longo prazo independente da importância e grau, é capaz de implementar equilíbrio ao negócio e se consolida quando é percebida naturalmente pelo produtor, pelos colaboradores e pelos clientes (SEBRAE, 2016).

3.6 IMPACTOS DA PISCICULTURA

3.6.1 Eutrofização

Matos *et al.*, (2016), descreveram que um grande volume de tanques-rede vem sendo instalados em reservatórios continentais brasileiros causando impactos na qualidade das águas, resultantes da sobra de ração utilizada nos cultivos e da excreção de nutrientes pelos peixes, causando a eutrofização das águas e a consequente proliferação de algas e macrófitas no corpo hídrico. Estes impactos prejudicam não somente outros usuários de águas, como também outros cultivos em áreas próximas.

Os principais impactos relacionados à aquicultura em rios, lagos e reservatórios estão ligados ao aumento do fluxo de partículas e nutrientes dissolvidos no ambiente (AZEVEDO *et al.*, 2011). A maior contribuição dos efluentes oriundos da aquicultura provém das dietas e sobras de ração não consumida durante a alimentação, que causam um aumento nas concentrações de nitrogênio e fósforo no ambiente, promovendo um processo de eutrofização artificial (TUNDISI; TUNDISI, 2008)

Em reservatórios, a capacidade de diluição dos efluentes oriundos da criação em tanques-rede dependerá, principalmente, da circulação da água do ambiente, especialmente reduzindo a concentração de oxigênio dissolvido no período noturno, que induz estresse respiratório e bioquímico nos peixes, gerando sérios riscos à saúde destes e possíveis perdas no sistema de produção (MATOS *et al.*, 2016).

A eutrofização ocorre devido ao excesso de nutrientes na água, que causa um crescimento desordenado de algas que constituem o fitoplâncton, consumindo uma

quantidade maior de oxigênio e gerando a diminuição progressiva da concentração de oxigênio dissolvido na água.

O crescimento de algas não leva apenas à competição por oxigênio dissolvido, espécies tóxicas como cianobactérias podem provocar grandes mortalidades de peixes (ELER; MILLANI, 2007).

De acordo com Tundisi e Matsumura-Tundisi (2002), os principais efeitos da eutrofização são listados a seguir:

- Anoxia (ausência de oxigênio dissolvido), que causa a morte de peixes e de invertebrados e também resulta na liberação de gases tóxicos com odores desagradáveis;
- Florescimento de algas e crescimento incontrolável de outras plantas aquáticas;
- Produção de substâncias tóxicas por algumas espécies de cianobactérias;
- Altas concentrações de matéria orgânica;
- Deterioração do valor recreativo dos reservatórios devido à diminuição da transparência da água;
- Acesso restrito à pesca e às atividades recreativas devido ao acúmulo de plantas aquáticas;
- Diminuição da biodiversidade (menor número de espécies de plantas e animais);
- Depleção do oxigênio nas camadas mais profundas e
- Diminuição da produção de peixes causada por depleção de oxigênio na coluna d'água.

A eutrofização é ainda mais agravante na região semiárida, devido à baixa disponibilidade hídrica, afetando assim a qualidade de vida das pessoas que dependem desse recurso para seu consumo e sustento (CARDOSO *et al.*, 2016).

3.6.2 Nitrogênio em água

Os peixes confinados passam por um processo de alimentação com altos níveis de proteínas, na qual parte dessas proteínas é assimilada pelo animal e convertida em proteína animal, o restante é eliminado, e o nitrogênio presente nestes resíduos pode ser excretado como nitrogênio orgânico na forma de fezes ou como amônia, que é a principal forma de excreção de nitrogênio dos peixes.

A amônia faz parte de grupo de fatores limitantes na piscicultura, por ser um resíduo nitrogenado pode atingir rapidamente altas concentrações tóxicas em sistemas intensivos, causando redução da sobrevivência, do crescimento e até mesmo a morte dos peixes (MARTINEZ *et al.*, 2006).

Mesmo em abundância na atmosfera terrestre, o nitrogênio por ser pouco reativo quimicamente, permanece livre sendo assimilado apenas por bactérias. Quando incorporado nos seres vivos, esse elemento compõe moléculas de proteína e os ácidos nucleicos das células, devido a isso é um elemento muito importante para todos os organismos. A decomposição biológica do nitrogênio é essencial para o suprimento e ciclo ambiental de formas disponíveis do elemento disponível na biota. (ZOPPAS; BERNARDES; MENEGUZZI, 2016 *apud* CHAZAL; LENS 2000). Os efeitos tóxicos da amônia presente na água para os peixes estão relacionados principalmente à forma não ionizada (NH₃), devido à facilidade com que esta molécula se difunde para dentro do peixe (MARTINEZ *et al.*, 2006).

O nitrogênio se apresenta no meio aquoso sob as formas de nitrogênio amoniacal, nitrogênio orgânico, nitrito e nitrato. A excessiva disponibilidade de nutrientes nos recursos hídricos acarreta o aumento significativo da população de algas e demais organismos fotossintetizantes, ocasionando o processo de eutrofização (BARNARD, 1973; SOUTO, 2009). A eutrofização é o processo onde ocorre o enriquecimento das águas por nutrientes, dentre eles nitrogênio e fósforo, que ocasiona o crescimento excessivo da população aquática acarretando o desequilíbrio do ambiente aquático e consequentemente a diminuição da qualidade da água e corpos hídricos. (ZOPPAS; BERNARDES; MENEGUZZI, 2016 *apud* FIGUEIRÊDO *et al.*, 2007).

O volume excessivo de cianobactérias, algas e demais plantas aquáticas ocasiona a diminuição de oxigênio dissolvido (OD), principalmente em períodos noturnos onde não acontece fotossíntese. A quantidade excessiva de seres fotossintetizantes nos períodos de iluminação solar gera grande produção de oxigênio nas camadas superiores, porém não chega as camadas inferiores por conta da demasia desses seres, ocasionando assim variações diárias e não homogeneidade na disponibilidade de OD no corpo hídrico. (ZOPPAS; BERNARDES; MENEGUZZI, 2016).

Sabendo que o processo de nitrificação depende do consumo de oxigênio, o lançamento do nitrogênio em sua forma amoniacal em um corpo d'água pode

diminuir ainda mais as concentrações de OD, causando danos sérios ao ambiente aquático (SOUTO, 2009). Além disso, a toxicidade da amônia é superior em meios de alta alcalinidade comparados a mesma quantidade de NH_3 presente em meio menos alcalino, isso devido ao fato da forma NH_3 predominar em pH alto, portanto a grande atividade autotrófica aquática (fotossíntese ou nitrificação) ou lançamento de efluentes com pH elevado pode intensificar a toxicidade da amônia (SOUTO, 2009).

Outro fator relacionado à disposição de uma das formas do nitrogênio, está relacionada ao fato de que o excesso de nitrato é prejudicial à saúde. Estudos comprovam a incidência de alguns tipos de câncer, efeitos adversos a saúde, além de causar metemoglobinemia (WARD *et al.*, 2018). Isso pois o nitrato (NO_3^-) pode ser reduzido a (NO_2^-), e que combinado com a hemoglobina do sangue, em recém-nascidos e mesmo em adultos com particular deficiência enzimática, causa essa condição, onde a hemoglobina torna-se incapaz de fixar o oxigênio e, por conseguinte, transportá-lo e disponibilizá-lo a nível celular. Motivo disso é que a metemoglobinemia é a forma de hemoglobina em que o ferro ferroso (Fe^{2+}) é oxidado a ferro férrico (Fe^{3+}), e o ferro ferroso é o responsável pela fixação do oxigênio. Além disso, o controle de nitrito é de suma importância, visto que sua reação com aminas secundárias presentes no estômago de mamíferos pode ocasionar a formação de nitrosaminas carcinogênicas (ZOPPAS; BERNARDES; MENEGUZZI, 2016 apud ALMASRI, 2007; MARCHESINI; PICCARD; MIRÓ, 2012; ZOPPAS, 2012; WARD *et al.*, 2018).

3.6.3 Proliferação de cianobactérias tóxicas devido a eutrofização

As cianobactérias tóxicas são aquelas que produzem cianotoxinas. Estas cianotoxinas ficam localizadas dentro das células das cianobactérias e são liberadas quando ocorre lise celular (destruição ou dissolução das células (WHO, 2011).

Dentre tantas cianotoxinas produzidas pelas cianobactérias a Microcistina (MC) é a principal liberada (SALMASO *et al.*, 2013), está entre as mais disseminadas pelo mundo (BURATTI *et al.*, 2017) e é a mais tóxica (WHO, 2011), por isso ela é adotada como um padrão de pesquisa para avaliação da contaminação por cianotoxinas.

Além disso, a microcistina possui degradação lenta, ou seja, quando os cursos de águas ou reservatórios não contêm um número considerável de cianobactérias, mesmo assim, podem conter concentrações elevadas dessa cianotoxina, já que, são necessários 30 dias para a degradação de aproximadamente 90% da toxina (CETESB, 2013).

Muitas pesquisas vêm sendo realizadas para compreender os efeitos das cianotoxinas em diferentes organismos testes, abrangendo diferentes níveis tróficos. (LIU *et al.*, 2018). A Tabela 2 a seguir, apresenta os danos de diferentes cianotoxinas em alguns organismos, submetidos a concentrações e tempo de exposição variados.

Tabela 2 - Efeitos de cianobactérias tóxicas em diferentes organismos testes

Organismo	Cianobactéria e/ou cianotoxina	Concentração	Exposição	Efeitos	Referências
<i>Danio rerio</i> adulto	Microcystis aeruginosa	159.000 células/ mL	96 horas	Dissolução e desprendimento de células epiteliais intestinais; desequilíbrio da microbiota no intestino, induzindo a produção de bactérias patogênicas	(QIAN <i>et al.</i> , 2019)
		440.000, 720.000 e 1.000.000 células / mL		Desordem do sistema endócrino; danos no fígado e no tecido gonadal; alterações dos níveis de hormônios sexuais; redução da taxa de fertilização e eclosão de ovos.	(LIU <i>et al.</i> , 2018)
Peixes Medaka	Planktothrix/ Microcistinas	5 µg de extrato	2 horas	Estresse oxidativo e desregulação lipídica	(MARIE <i>et al.</i> , 2012)
Peixe branco europeu	Planktothrix rubescens/ Microcistinas	2.1 e 3.3µg/mg de MC-LR	9, 24, 48, 72 horas.	Estresse fisiológico, alterações patológicas no trato gastrointestinal, fígado e rins	(ERNST <i>et al.</i> , 2006)
		0.3µg/L de MC-LR	7, 14, 21 e 28 dias	Estresse fisiológico	(ERNST <i>et al.</i> , 2007)

Fonte: Autor.

Em 2003, a morte de diferentes peixes (*reochromis niloticus*, *Plagioscion squamosissimus*, *Cichla monoculus*, *Prochilodus brevis*, *Hoplias malabaricus* e *Leporinus friderici*), em um reservatório do nordeste do Brasil foi provocada por florações de *Cylindrospermopsis raciborskii* e *Microcystis aeruginosa*. As concentrações de microcistina variaram de 0,07 a 8,73µg/L e 0,01 a 2,59µg/g, em amostras de Séston e de fígado, respectivamente (CHELLAPPA *et al.*, 2008).

A morte de diversos *Pelecanus crispus*, em 2016, no reservatório Karla, na Grécia ocorreu devido a elevadas concentrações de Micricistinas (variando entre 3,5µg/L e 22µg/L), Cilindrospermopsinas (variando entre 2,0µg/L e 7,54µg/L) e Saxitoxinas (variando entre 0,15µg/L e 2µg/L) (PAPADIMITRIOU *et al.*, 2018).

3.7 TRATAMENTO DE EFLUENTES

As fontes de produção de efluentes incluem diversas atividades humanas, como industriais, comércio, e atividades domésticas. As densidades populacionais e os recursos de água doce não são distribuídos uniformemente em todo o mundo (Khalid *et al.* 2018).

A poluição das águas residuais continua a ser um desafio significativo para a sociedade moderna, devido ao crescimento da população global e à industrialização (LU *et al.*, 2020). FAO (2020) estima que as retiradas globais de água doce são 3.928 km³ por ano e avalia que 44% (1.716 km³ por ano) dessa água seja consumida, principalmente pela agricultura e os 56% restantes (2.212 km³ por ano) são lançados no meio ambiente como águas residuais na forma de efluentes municipais e industriais.

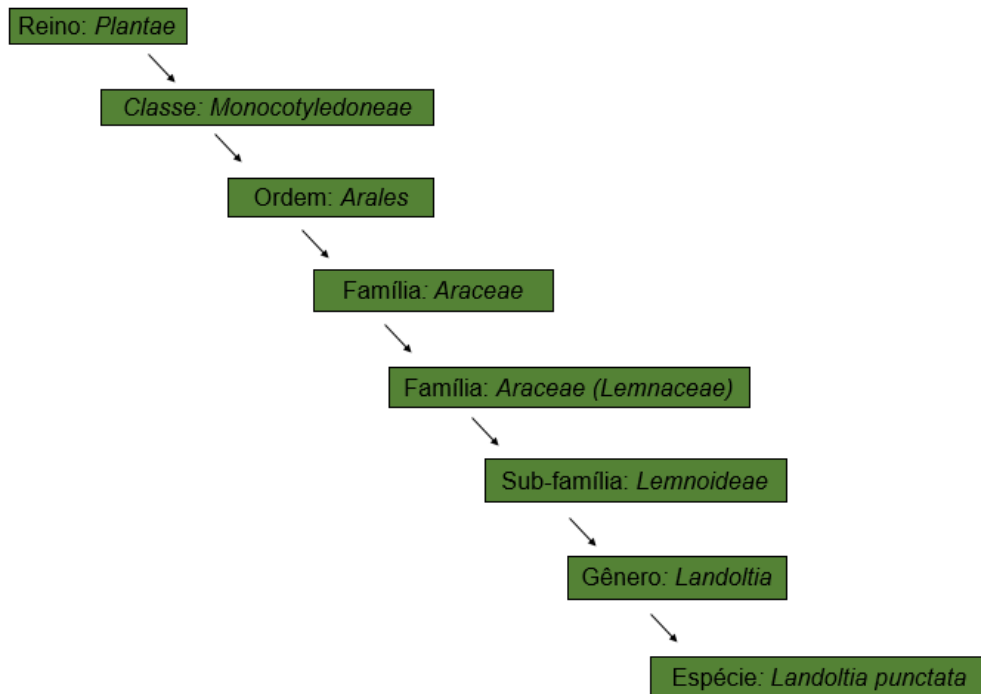
Lu *et al.*, (2020) validam que são necessários esforços contínuos para desenvolver e adaptar métodos inovadores de tratamento e gestão de águas residuais afim de proteger o meio ambiente, reduzir os riscos à saúde relacionados à água e garantir seguro fornecimento de água potável. Progressos significativos foram feitos no desenvolvimento de novas e eficientes tecnologias de tratamento de águas residuais, assim como os sistemas a serem analisados nessa pesquisa.

3.8 *LANDOLTIA PUNCTATA*

As macrófitas aquáticas pertencem a família Araceae, subfamília Lemnoideae; subfamília esta que possui 5 gêneros: Lemna, Landoltia, Spirodela, Wolffia e a Wolffia. Les e Crawford (1999) foram os responsáveis pela criação do gênero Landoltia e recebeu este nome em homenagem a Elias Landolt, pesquisador de

destaque desse grupo vegetal. A seguir a Figura 3 descreve a classificação taxonômica da espécie utilizada.

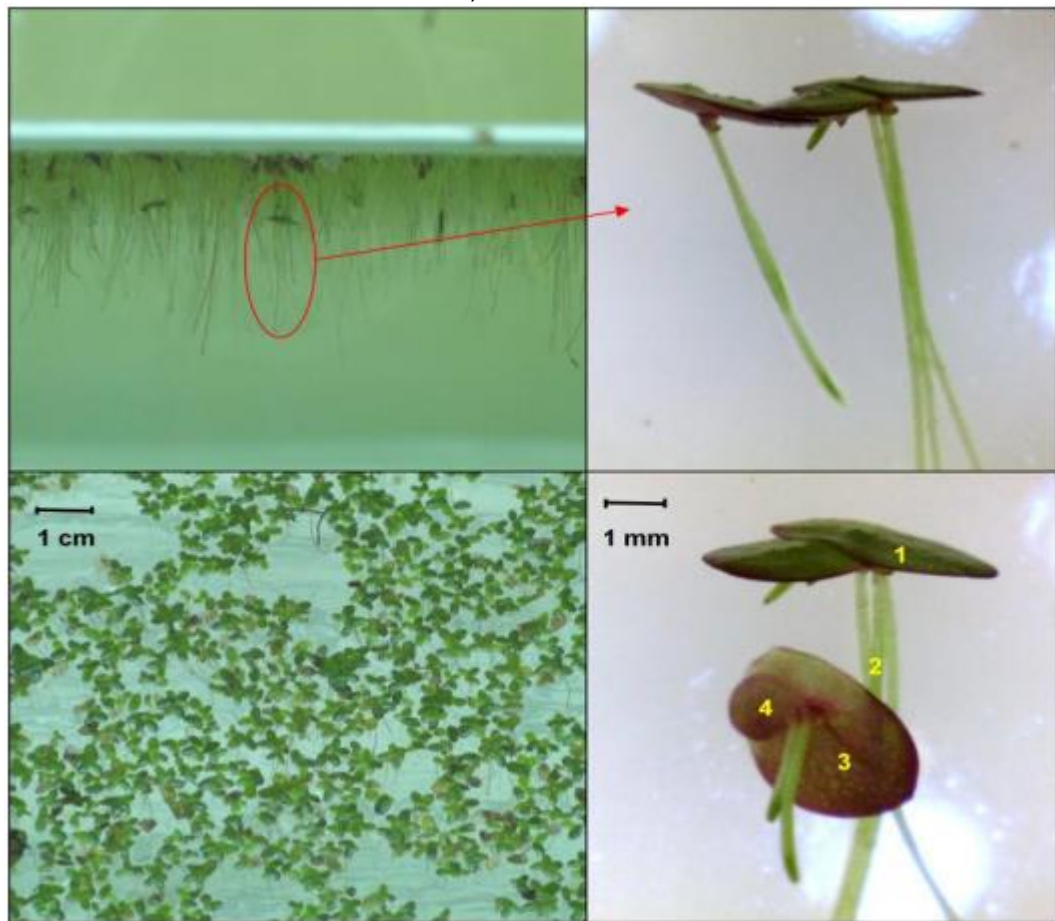
Figura 3 - Classificação taxonômica da *L. punctata*.



Fonte: Autor.

Les e Crawford (1999) descreveram as características morfológicas da *L. punctata*, esta possui raízes de 2 até 7 cm de comprimento com todas perfurando o perfilo e turions ausentes. Suas frondas são flutuantes na superfície da água, ovadas a lanceoladas, de 1,5 a 2 vezes mais longas que largas, na parte superior são brilhantes e verdes com uma série medial de papilas, abaixo lisas e vermelhas, possui de 3 a 7 veias. Flores pouco frequentes, lóculos externos da antera acima dos lóculos internos e parte superior do fruto com asa lateral. A Figura 4 mostra as características morfológicas da macrófita estudada.

Figura 4 - Imagens de *Landoltia punctata*: 1- fronde; 2- raízes; 3- vista inferior da fronde; 4- fronde filha.



Fonte: Mohedano (2012).

As macrófitas pertencentes à família Lemnaceae, são mais adaptáveis em águas paradas e de fluxo lento, podem brotar em todo o mundo, exceto nas regiões ártica e antártica (CHENG; STOMP, 2009). São pequenas plantas flutuantes vasculares que se reproduzem assexuadamente, possuem rápido crescimento e rápido aumento de biomassa (ORON, 1994). Dentre as espécies dessa família, a *L. punctata* consegue se desenvolver bem durante todos os períodos do ano, mantendo uma taxa média de $4,97 \text{ g.m.}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (MS) e atingindo um pico de $7,6 \text{ g.m.}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (MS) e menor de $1,29 \text{ g.m.}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (MS), sendo assim, quando comparadas a outras espécies estudadas a *L. punctata* apresenta valor maior (ZHAO *et al.*, 2014a).

As plantas aquáticas no nível de macrófitas são importantes organismos na produção de oxigênio, além do alto rendimento de biomassa, importante para o nível basal da cadeia alimentar, possuem eficiência no controle de qualidade da água por

realizar ciclagem de nutrientes, estabilização de sedimentos e também fornecimento de habitat e abrigo para organismos aquáticos (ZEZULKA *et al.*, 2013)

As *Lemnaceae* utilizam diferentes mecanismos na depuração de um corpo d'água eutrofizado, podem ser cultivadas na superfície de lagoas de estabilização e podem contribuir para a redução de nutrientes das águas residuais (LEBLEBICI *et al.*, 2010). A redução de nitrogênio ocorre pela absorção direta da planta (até 50 %), pela ação de microrganismos fixados nas raízes e pela volatilização da amônia (KORNER *et al.*, 1998).

A lemna cultivada em tanques de águas residuárias é capaz de converter a amônia em biomassa rica em proteína, tornando uma potente matéria prima para a produção de ração animal ou fertilização agrícola (ORON, 1994). Zhao *et al.*, (2014a) constataram que a *L. punctata* em condições de privação de nutrientes é capaz de atingir maior teor de amido (45,84%) em comparação com as outras macrófitas em estudo, produção de biomassa seca ($4,81 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$) e acúmulo de amido ($2,9 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), tornando a melhor para a produção de biomassa de amido.

Su *et al.*, (2014) descreveram a lemna como uma ótima perspectiva no âmbito de matéria-prima industrial na produção de energia alternativa, além de fazer a depuração de água contaminada ela se torna uma fonte de energia com alto teor de amido.

As lemnas crescem muito rapidamente nos primeiros 7 dias, posteriormente as taxas de crescimento se tornam relativamente baixas, os cultivos em diferentes condições climáticas também influenciam no crescimento ao longo do tempo (LIU *et al.*, 2018).

3.9 TRATAMENTO DE EFLUENTES COM MACRÓFITAS AQUÁTICAS

Efluentes são quaisquer resíduos orgânicos ou inorgânicos de atividades agrícolas, urbanas ou industriais, descartados no ambiente, tratados ou não (CYRINO *et al.*, 2010). O processo de produção dessas atividades acarreta na geração de diversos resíduos, em especial nitrogênio e fosforo, que em elevadas concentrações podem contaminar e causar a eutrofização do corpo d'água receptor.

Ekperusi *et al.* (2019) descreveram as lemnáceas como uma das macrófitas mais eficazes para a aplicação em estudos de remediação de poluentes em efluentes de águas residuais e ambiente aquático nos últimos 30 anos.

O trabalho de Verma e Suthar (2014) mostrou grande eficácia na remoção de nutrientes das águas residuárias urbanas, houve aproximadamente as remoções de 42-63 % de NO_3^- , 36-54% de SO_4^{2-} e 35-82 % de Fósforo Total, a maior eficiência registrada foi nas águas sem diluição.

As atividades humanas nos últimos anos impactaram profundamente os recursos hídricos, contribuindo significativamente para os problemas de abastecimento e qualidade da água. Muitas das atividades geram uma quantidade relevante de metais pesados, as mais comuns são: Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn e Hg. Também podem entrar no sistema aquático por meio do intemperismo de rochas e solos, essa junção de ações fez que nos últimos anos as concentrações de metais pesados em muitas partes do mundo chegassem a valores mais altos que diretrizes internacionais (SASMAZ *et al.*, 2015).

A *Lemna gibba* e *Lemna minor* foram espécies de macrófitas usadas para fazer a fitorremediação no tratamento de água contaminada por metais pesados no trabalho de Sasmaz *et al.* (2015) ambas mostraram alto potencial para remover Cu, Pb, Zn e As, as eficiências obtidas em *L. minor* L. e *L. gibba* L. são: 87 % no dia 2 e 36 % no dia 3 para o Cu; 1259 % no dia 2 e 1015% no dia 2 para Pb; 628 % no dia 3 e 382% no dia 3 para Zn; e 7070% no dia 3 e 19709% no dia 2 para As, respectivamente.

Zhao *et al.*, (2014) avaliaram a eficiência de remoção de nitrogênio e fósforo de águas residuárias de suínos utilizando a macrófita *L. punctata*. A grande maioria do $NH_4^+ - N$ e $PO_4 - P$ foi removida das águas residuais de suínos em seis ou nove dias, anulando significativamente a eutrofização das águas. A Tabela 3 a seguir, mostra a variação de concentração e remoção dos nutrientes ao longo dos dias.

Tabela 3 - O teor de $NH_4^+ - N$ (mg / L) e $PO_4 - P$ (mg / L) nas águas residuais de suínos cobertas com *L. punctata*.

Dia	$NH_4^+ - N$	Desv. P	$PO_4 - P$	Desv. P
0	51	1,37	11,2	0,74
3	17,5	0,24	10,3	1,51
6	0,54	0,06	3,5	0,66
9	0		0,05	0,02
12	0		0,05	0,01

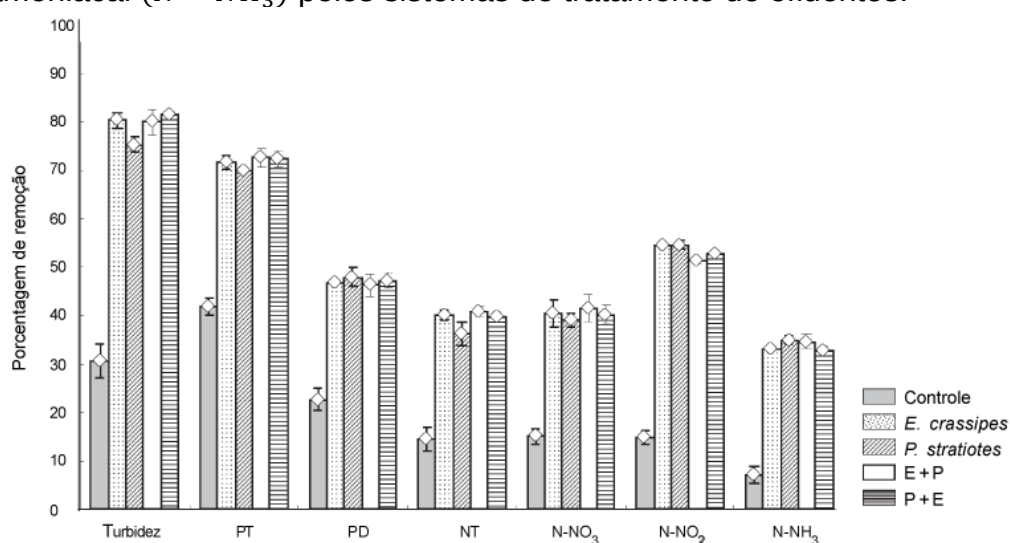
Fonte: Adaptado de (ZHAO *et al.*, 2014).

Henry-silva e Camargo (2008) trabalharam com efluente de carcinicultura, avaliaram teores de nutrientes e matéria orgânica na criação de camarões-canela

(*Macrobrachium amazonicum*) e utilizaram as macrófitas *Eichhornia crassipes* e *Pistia stratiotes*, separadas e juntas. O método de análise consistia em 5 sistemas de avaliação: controle, *E. crassipes*; *P. stratiotes*; *E. crassipes* + *P. stratiotes*; e *P. stratiotes* + *E. crassipes*. Os valores de fósforo, nitrogênio e turbidez do efluente reduziram após o efluente transpassar os sistemas com as macrófitas aquáticas.

O sistema de controle apresentou menor índice de remoção comparado aos sistemas de tratamento com as macrófitas aquáticas. Nos tratamentos com macrófitas, foram constatados os maiores valores de remoção do fósforo total (41,9 % pelo controle; 71,6 % por *E. crassipes*; 69,9 % por *P. stratiotes*; 72,5 % por *E. crassipes* + *P. stratiotes* e 72,1 % por *P. stratiotes* + *E. crassipes*) e para turbidez (30,6% pelo controle; 80,2% por *E. crassipes*; 75,2% por *P. stratiotes*; 79,8 % por *E. crassipes* + *P. stratiotes* e 81,5 % por *P. stratiotes* + *E. crassipes*). Entre as formas nitrogenadas, as maiores remoções foram verificadas para N-nitrito (14,8 % pelo controle; 54,3 % por *E. crassipes*; 54,5 % por *P. stratiotes*; 51,1 % por *E. crassipes* + *P. stratiotes*; e 52,7 % por *P. stratiotes* + *E. crassipes*) (HENRY-SILVA; CAMARGO, 2008). A Figura 5 a seguir apresenta a porcentagem de remoção dos elementos por cada tipo de sistema em análise.

Figura 5 - Redução da turbidez e remoção de fósforo total (PT), fósforo dissolvido (PD), nitrogênio total (NT), Nitrato ($N - NO_3$), N-nitrito ($N - NO_2$) e N-amoniacoal ($N - NH_3$) pelos sistemas de tratamento de efluentes.



Fonte: Adaptado de (HENRY-SILVA; CAMARGO, 2008).

Henry-Silva e Camargo (2008) afirmaram que os sistemas de tratamento com *E. crassipes* e *P. stratiotes* atingiram grande eficiência, pois os teores de nitrogênio e fósforo nos efluentes tratados foram menores que na água de abastecimento do viveiro de camarões, mostrando então que é possível reutilizar esses efluentes nas atividades de carcinicultura, ou mesmo, lançá-los nos ambientes aquáticos naturais minimizando os impactos relacionados à eutrofização artificial.

A lemna mostrou nos últimos anos seu potencial para a fitorremediação de poluentes orgânicos, metais pesados, agroquímicos, produtos farmacêuticos e produtos para cuidados pessoais, resíduos radioativos, nanomateriais, hidrocarbonetos de petróleo, corantes, toxinas e poluentes relacionados (EKPERUSI *et al.*, 2019).

3.10 SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO PARA AQUICULTURA (SRA)

Silva (2016) descreve que a aquicultura moderna utiliza recursos naturais e manufaturados, tais como: terra, água, energia, ração, fertilizantes, equipamentos e mão de obra e o uso desses recursos deve ser de forma racional para acrescentar, além do lucro, a preservação ambiental e o desenvolvimento social. A aplicação de novas técnicas visando à manutenção da qualidade da água, a sustentabilidade do cultivo e a preservação de recursos hídricos, levando em conta a rentabilidade, torna-se necessária para o desenvolvimento responsável da aquicultura (FERRI *et al* 2018). Para Rocha (2020) dentro da atividade aquícola os sistemas de recirculação destacam-se pela demanda tecnológica, e atende os quesitos da sustentabilidade dessa atividade. O sistema apresenta baixa demanda hídrica por biomassa produzida, uso racional do recurso hídrico e adequada liberação de efluentes.

Os sistemas de recirculação são geralmente constituídos por tanques para cultivo, sistemas de bombeamento e uma unidade de tratamento de água, podendo dispor de estruturas para captação de água e armazenamento (KUBITZA, 2006). Com o objetivo de melhorar a qualidade da água no sistema, biofiltros são adicionados ao conjunto, como exemplo a membrana aerada que facilita a colonização por micro-organismos responsáveis por degradar o material orgânico, amônia e outros resíduos presentes nos tanques de criação (SILVA, 2016). Os sistemas são versáteis quanto ao local de instalação, por serem de menor tamanho podem ser usados em locais com limitações de uso de água ou longe de zonas

litorâneas e ainda para o cultivo de espécies exóticas à região, podendo ser considerado um nicho de mercado em algumas situações (ROCHA, 2020)

Kubtiza (2006),descreve que as estruturas que compõem o sistema de recirculação são: tanques de cultivo; filtros mecânicos, responsáveis pela retirada de partículas grandes (geralmente $> 30\mu\text{m}$); filtros biológicos, que realizam a retirada dos compostos nitrogenados pela ação de bactérias autotróficas; decantadores, que atuam separando os resíduos sólidos, no processo de decantação da água do cultivo; aeradores, difusores ou injetores de oxigênio, responsáveis pela manutenção da concentração de oxigênio dissolvido; bombas e tubulações que servem para retornar a água para os tanques de cultivo.

Tecnologias de recirculação de água tem sido adotadas em diversos países, como alternativa ao consumo intenso da água dos sistemas tradicionais, minimizando as questões ambientais e reduzindo os resíduos por um fator de 500 a 1.000 vezes (SILVA, 2016).

Rocha (2020) descreve que os sistemas de recirculação de água tornaram se uma alternativa de aquicultura sustentável, por diminuir consideravelmente os impactos ambientais, melhorar o aproveitamento da água, volume de alimentos e medicamentos e promover maior controle sanitário na produção..

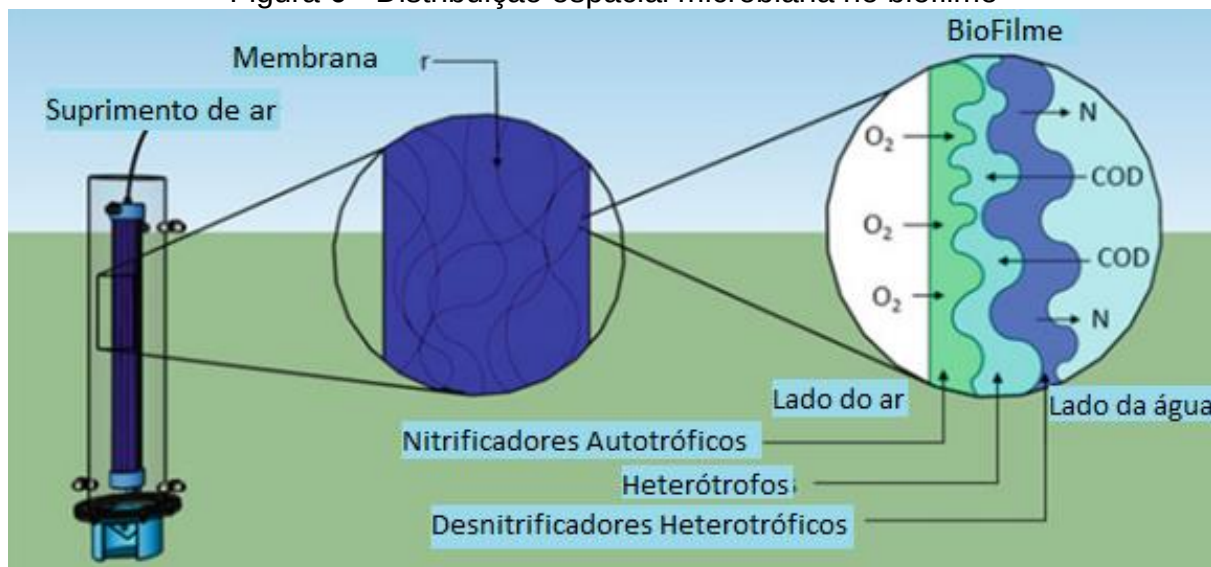
3.11 REATORES DE BIOFILME AERADO POR MEMBRANA (MABR)

3.11.1 Layout do MABR

Karna e Visvanathan (2019) descrevem o MABRs como formas avançadas de reatores biológicos de membrana que funcionam para purificar as águas residuais através de processos de degradação de poluentes assistidos por bactérias. As membranas atuam como uma fonte de suprimento de ar difuso (sem bolhas) bem como meio para fixação de biofilme. Ao contrário do convencional sistemas de membrana, onde ar/oxigênio e substrato são fornecidos da mesma direção, os sistemas MABR têm fornecimento de aeração e fornecimento de substrato a partir de direções opostas. Em uma visão microscópica, conforme descrito na Figura 6, pode-se observar que o oxigênio é fornecido a partir do lúmen da fibra da membrana

que se difunde para o exterior superfície onde ocorre a distribuição espacial microbiana.

Figura 6 - Distribuição espacial microbiana no biofilme



Fonte: Karna e Visvanathan (2019)

A camada interna de biofilme próxima à superfície da membrana é habitada por bactérias nitrificantes que necessitam de alta quantidade de oxigênio para seu crescimento enquanto as bactérias mais distantes no biofilme são do grupo desnitrificante que preferem crescer em ambiente anóxico. Além disso, há um conjunto de heterótrofos que utilizam constituintes de carbono para o seu crescimento e desenvolvimento, degradando assim os poluentes de carbono.

3.11.2 MABR no Tratamento de Efluente de Piscicultura

Com o objetivo de avaliar a eficiência de remoção de nitrogênio em um MABR como parte do sistema de tratamento de um SRA Freddi e Matsumoto (2019), equiparou o sistema com um Decantador de Coluna (DC) associado a MABR, para produção intensiva de Tilápia - do - Nilo. O SRA continha um tanque de cultivo com 800L e densidade de estocagem inicial de 12,52 kg/m³. O MABR foi formado por dois tubos concêntricos em PVC com volume de 120L e, no tubo interior, foi instalada um feixe de membranas de silicone, como suporte para o crescimento do biofilme. As membranas do MABR foram aeradas externamente por meio de um difusor instalado na sua base, e internamente por meio de um soprador de ar. Os parâmetros

analisados foram, Nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrito e Nitrogênio total, em um período de 74 dias. Os resultados obtidos foram satisfatórios para a remoção de nitrogênio amoniacal, apresentando uma redução média de 61%. Em contrapartida, para nitrato e nitrogênio amoniacal, a contribuição de remoções foi desprezível, mas para o nitrito, a média de remoção foi de 14%.

Almeida (2020), utilizando o mesmo aparato e dando continuidade ao trabalho de Freddi e Matsumoto (2019), teve como objetivo avaliar a eficiência do tratamento do efluente, analisando os parâmetros de pH, temperatura, turbidez, oxigênio dissolvido (OD), nitrogênio total (NT), nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato, sólidos totais (ST), fósforo total (FT) e demanda química de oxigênio (DQO). Com as análises foi possível avaliar a eficiência de remoção média de DQO, NT, nitrito, nitrato, nitrogênio amoniacal, ST e FT. que foram de 41%, 20%, 40%, 13%, 35%, 11% e 2%, respectivamente. O SRA manteve valores de pH, OD e temperatura dentro da faixa recomendada para a sobrevivência dos peixes.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de avaliar a eficiência do tratamento do efluente resultante da produção intensiva de Tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) foram instalados dois aparatos experimentais no Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP campus de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. O primeiro aparato foi composto por: SRA concomitante com MABR e DC como mostrado na Figura 7. Já o segundo aparato foi constituído por: quatro tanques de polietileno, com capacidade de 500 litros cada, instalados na parte externa do laboratório como mostrado na Figura 16. Para compreensão do sistema adotado, a seguir consta a descrição de cada unidade:

4.1 DESIGNER DO PRIMEIRO APARATO

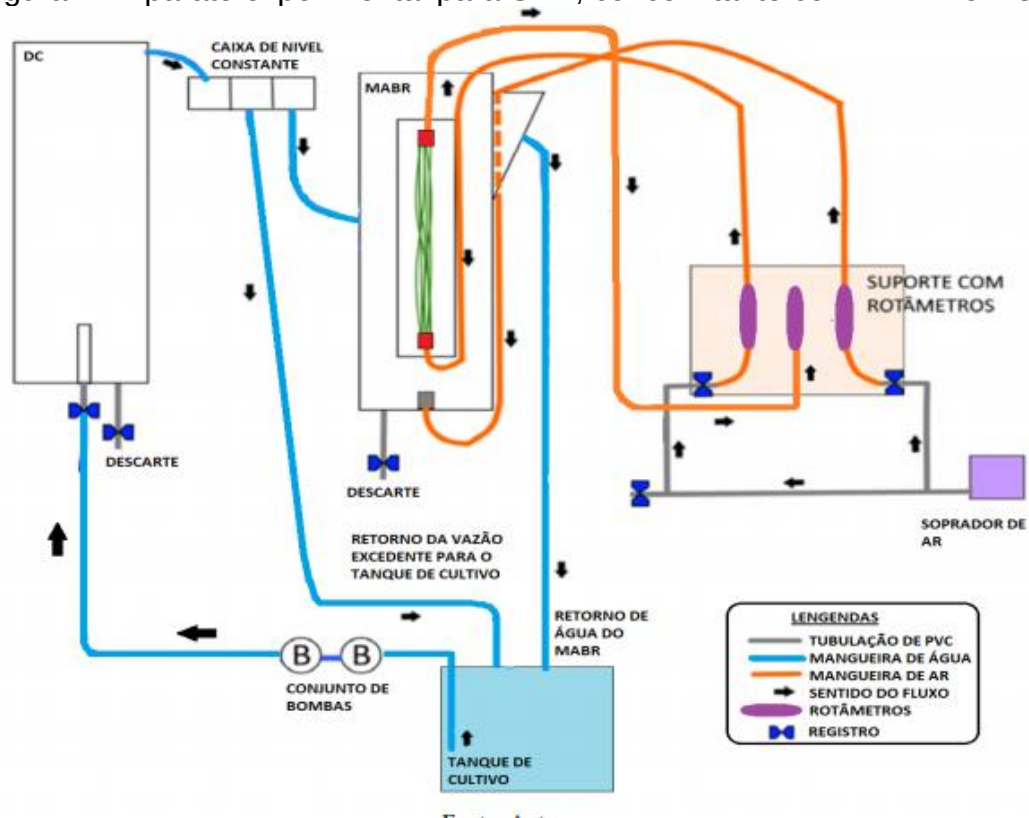
4.1.1 Sistema de Recirculação para Aquicultura com MABR

Com o objetivo de avaliar a eficiência de tratamento do SRA com o MABR, o sistema foi constituído da seguinte forma: o SRA consistia em uma caixa de nível constante, tanque de polietileno, soprador de ar, bomba para recirculação, tubulações, rotâmetros, mangueira de ar, em conjunto com DC e MABR. A Figura 7 a seguir apresenta a ilustração do aparato experimental.

Utilizou-se um tanque com capacidade de 1.000 L para o cultivo de tilápias, possuindo no fundo uma saída que acoplava uma mangueira com a função de ligar o tanque ao DC, e com a ajuda de duas bombas em série, a água era bombeada para o decantador, esse que na sua base tinha uma tubulação com altura de 30 cm do fundo, permitido que as partículas se decantassem no fundo.

O sobrenadante do decantador era descarregado na caixa de nível constante, que tinha como função direcionar 100 L/h para o MABR e o restante retornava para o tanque de cultivo dos peixes.

Figura 7 - Aparato experimental para SRA, concomitante com MABR e DC.

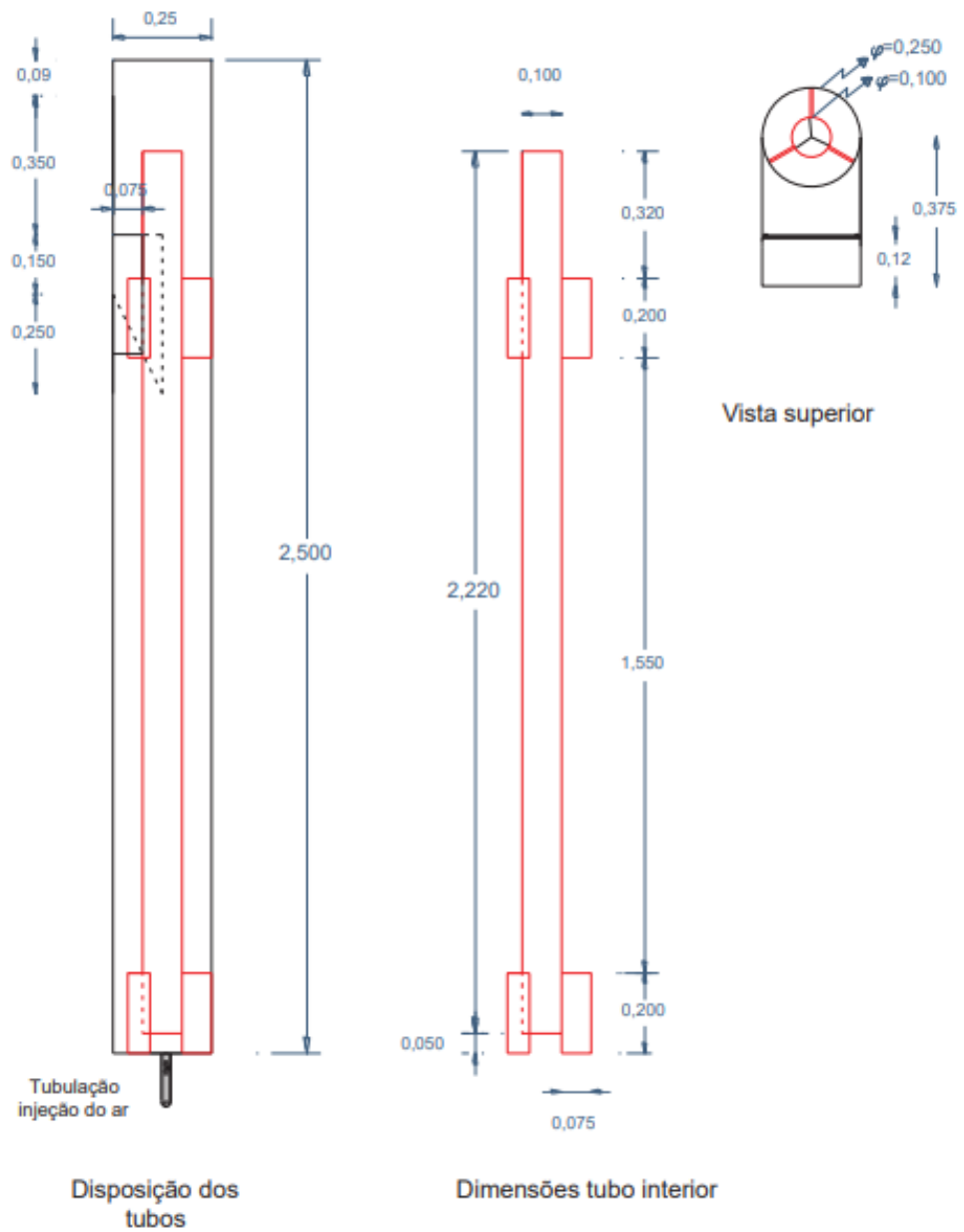


Fonte: Almeida (2020).

4.1.2 Descrição do MABR

O sistema MABR era constituído por dois tubos concêntricos de PVC, o tubo interno acomodava a (membrana) aerada, com diâmetro interno de 100 mm e 2,20 m de altura (Figura 8), e ficava posicionado 0,05 m acima do fundo do reator, fazendo com que fosse permitido o efluente circular, devido a um difusor de ar (Figura 9) que se encontra na base do reator (MAIGUAL-ENRIQUEZ, 2011).

Figura 8 – Descrição do MABR, tubo interno



Fonte: Maigual-Enríquez (2011).

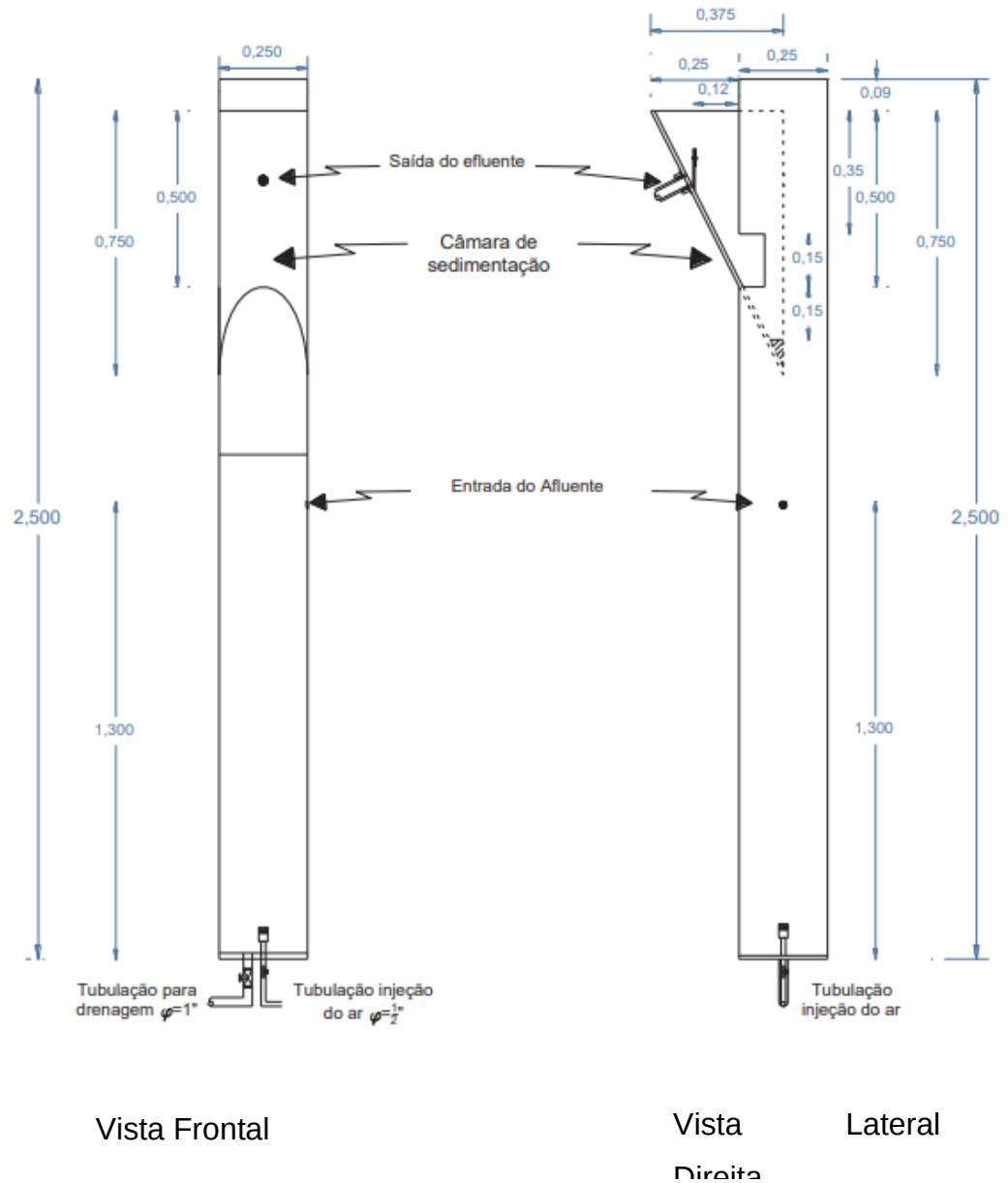
Figura 9 – Difusor de ar



Fonte: Maigual-Enríquez (2011).

O tubo externo tinha 2,50 m de altura e 250 mm de diâmetro (Figura 11), possuía uma zona de decantação com vertedouro. O reator possuía uma unidade de sedimentação construída em chapa acrílica de 10 mm de espessura e uma saída do efluente na parte superior permitindo que o efluente possa voltar ao tanque de criação, e regulada por um vertedouro em acrílico de 3,0 mm.

Figura 10 – Descrição do MABR – tubo externo e zona de decantação



Fonte: Maigual-Enríquez (2011).

O ar é injetado na base do reator e se move em fluxo ascendente, com saída no topo do tubo interior para o tubo exterior, promovendo a circulação do fluido e aeração do meio. O difusor de ar foi confeccionado com capa de PVC de 40 mm de diâmetro perfurado em seis carreiras de 36 furos com diâmetro aproximado de 1,0 mm.

A membrana é de fibra oca, agrupadas em feixe, por ser permeável ao gás age como uma fonte de suprimento de ar difuso (sem bolhas), servindo como meio para fixação do biofilme.

A membrana utilizada nessa pesquisa (Figura 12) é feita de polidimetilsiloxano (PDMS), sendo um polímero e popularmente referido como silicone, sua textura é densa, não existem poros que permitam a formação de bolhas. O oxigênio é então difundido através do silicone no biofilme, resultando em uma aeração sem a formação de bolhas, o que requer menos energia do que se o sistema se baseasse na difusão do oxigênio através de uma bolha (FREDDI ; MATSUMOTO, 2019).

Figura 11 - Membrana utilizada no sistema



Fonte: Autor.

As membranas são no formato de feixe, com 110 cm de comprimento e possuindo aproximadamente 550 fios, estima-se que tenham 0,5 mm de diâmetro externo. Sendo assim, a membrana possui uma área superficial de 0,95 m². O tubo interno acomodava o feixe de membranas, e nas suas extremidades tinha conectada uma mangueira, a extremidade inferior recebia o ar com vazão controlada por um

rotâmetro e a extremidade superior direcionava para um outro rotâmetro para medir a vazão de saída de ar do feixe de membranas. O fornecimento de ar para o sistema foi por meio do soprador de ar da marca THOMAS, modelo AP-80H como mostrado na Figura 13. O controle da vazão de ar para o feixe de membranas foi por um rotâmetro com escala de vazão até 1.000L/h como de capacidade de medição. Um outro rotâmetro, também com a capacidade de até 1.000L/h. Foi instalado na saída do feixe de membranas, para controlar a vazão de saída de ar.

Figura 12 - Soprador de ar, responsável pelo fornecimento de ar a membrana



Fonte: Autor.

4.1.3 Tanque de Cultivo dos Peixes

O trabalho foi realizado utilizando um tanque de 1000 L (Figura 14), completado aproximadamente 80% da sua capacidade com água sem cloro, sendo então o modo usado para a criação de Tilápias do Nilo. No tanque foi colocado 25 tilápias, com peso médio inicial de 549,30 g. Os peixes foram adquiridos da Piscicultura e Nutrição Canaã da cidade de Nova Canaã Paulista – SP- Brasil, que produzem tilápias por tanques rede e está localizada as margens do braço esquerdo do Córrego Ponte Pensa, afluente do rio Paraná. Os peixes foram alimentados

inicialmente com 200g/dia com ração para engorda, aproximadamente 1,5% do peso total dos peixes no tanque.

A alimentação era feita duas vezes ao dia, com 100 g de ração. Os parâmetros, pH, turbidez, temperatura e OD, eram medidos diariamente. A renovação da água acontecia a cada 20 dia de forma parcial, pois havia a retirada 40 litros de efluente, e o reabastecia o tanque com água desclorada, essa ficava reservada em um tanque com aeradores.

Figura 13 - Tanque utilizado para o SRA no cultivo de tilápias



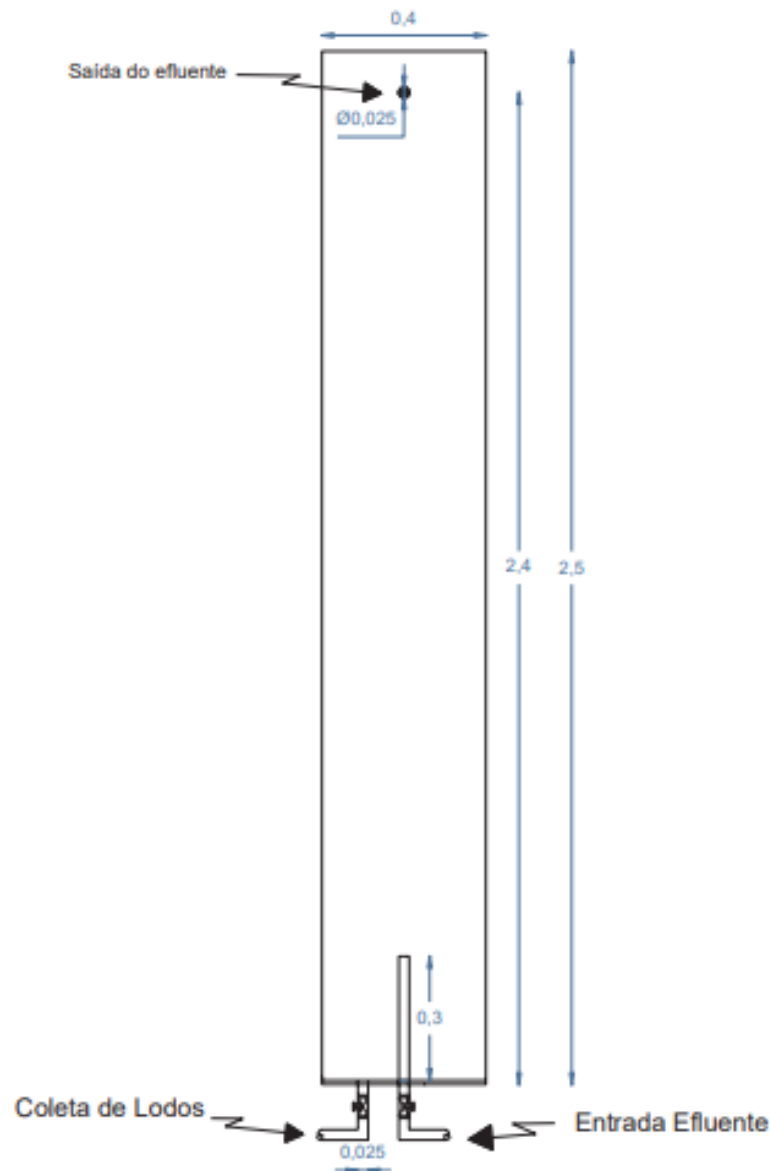
Fonte: Autor.

4.1.4 Decantador de Coluna (DC)

O DC utilizado foi construído em PVC, de formato cilíndrico, com diâmetro de 400 mm e 2,50 m de altura, como mostra a Figura 14. O DC tem a função de remover os sólidos suspensos com diâmetro maior ou igual a 0,25 mm sendo a velocidade de sedimentação adotada para dimensioná-lo de 3,8cm/s, para fezes de tilápia (MAIGUAL-ENRÍQUEZ, 2011). O efluente do tanque de cultivo alimenta o decantador pela base através das bombas em série, por uma tubulação cuja saída está a 0,30m do fundo do DC, permitindo que os sólidos decantassem. O

sobrenadante tratado saia pela parte superior em uma caixa de acrílico, essa que tinha como função destinar 100 l/h para o MABR e o restante do volume para ao tanque com tilápias. As partículas decantadas foram retiradas manualmente uma vez ao dia com a utilização de um balde, de 40 litros volume aproximado. Esse volume retirado era repostado ao tanque com água previamente desclorada em reservatórios com aeradores. A Figura 15 ilustra o detalhamento do DC utilizado.

Figura 14 - Decantador de coluna associado ao SRA



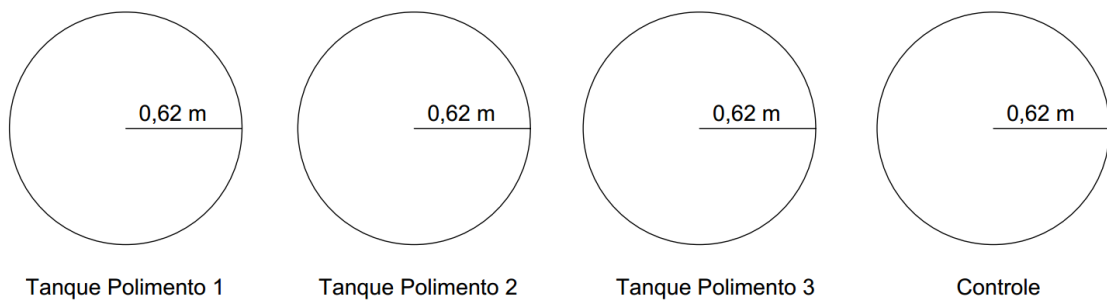
Fonte: Maigual-Enríquez (2011).

4.2 DESIGNER DO SEGUNDO APARATO

4.2.1 Tanques de Polimento com a Macrofitas *Landoltia Punctata*

Essa parte da pesquisa tem como objetivo avaliar a produção de biomassa, para manejo, futuro aproveitamento de nutrientes, introdução a novas pesquisas e revisão para possíveis aplicações, concomitante com a avaliação de eficiência de tratamento do efluente. Os tanques de polimento ficaram alocados na parte externa do Laboratório de Saneamento, como mostrado na Figura 16. Foram utilizados 4 tanques de 500 L, que recebiam uma quantidade do efluente de aproximadamente 10 litros por dia, de forma manual, proveniente da retirada de efluente do DC, os 40 litros retirados eram filtrados e divididos para cada tanque. Destes 4 tanques, 3 foram habitados pelas macrófitas *L. punctata*, com densidade inicial de 300g/m² e o outro não, sendo denominado o controle. Os tanques foram enumerados de 5 a 8 para auxiliar na coleta das amostras, da esquerda para a direita como mostrado nas Figuras 16 e 17. Os números 5, 6 e 7 foram os tanques habitados pelas macrófitas e o 8 como controle.

Figura 15- Ilustração do aparato experimental com os tanques de polimento



Fonte: Autor.

Figura 16 - Tanques de polimento no espaço externo do Laboratório de Saneamento



Fonte: Autor.

4.2.2 Produção e Caracterização da Biomassa da *Landoltia Punctata*

Com o objetivo de avaliar a produção de biomassa das macrofitas, as análises foram feitas em duas etapas, ambas com densidade superficial inicial de 250g/m^2 , sendo eles: em a) o objetivo dessa etapa foi avaliar a taxa de crescimento das macrófitas em diferentes períodos de cultivo, para assim, obter o tempo de detenção utilizado na etapa seguinte. O sistema consistia em um tanque de estocagem, dividido em 4 partes com placas de isopor, a coleta e pesagem foram feitas há cada três dias. Dessa forma, os valores obtidos de taxa de crescimento foram para 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 e 24 dias de cultivo. Esse período de cultivo abrange o tempo de experimento realizado por Cheng *et al.*, (2002), para a espécie *Lemna minor*. A secagem das macrófitas foi realizada em estufa a 50°C , para obter o valor da biomassa, em massa seca, produzida. No tanque foi realizada uma divisão com placas de isopor, conforme mostrado na Figura 18.

Figura 17 – Tanque para qualificação da taxa de crescimento da macrófita *L.punctata* em diferentes períodos de cultivo



Fonte: Autor.

E em b) o objeto da etapa foi avaliar a taxa de crescimento das macrófitas em conjunto com as análises de polimento do efluente, afim de obter a taxa de crescimento relativo e a taxa de crescimento específico. As análises foram realizadas nos tanques 5, 6 e 7, com tempo de detenção de 22 dias, conforme analisado na etapa a). Para cada período de cultivo (22 dias) realizado, uma massa úmida de 188,5 g de *L. punctata* foi inoculada inicialmente. Os valores obtidos para taxa de crescimento foram de 8, 15 e 22 dias de cultivo.

A quantificação do crescimento da *L. punctata* foi feita por meio dos parâmetros Crescimento Relativo (Matéria Seca) e Crescimento Específico (Matéria Úmida), conforme analisado por Verma e Suthar (2014).

A Taxa de Crescimento Relativo (g/m².d) foi calculada segundo a Equação 1 a seguir:

$$TB = \frac{MS}{N.A} \quad (1)$$

Onde:

MS = Matéria seca no período de cultivo (g);

N= Dias de cultivo (d);

A = Área superficial da seção de cultivo (m²).

A Taxa de Crescimento Específico (d^{-1}) foi calculada segundo Equação 2 a seguir:

$$TCE = \frac{MF}{N.D.A} \quad (2)$$

Onde:

MF= Matéria fresca no período de cultivo (g);

N= Dias de cultivo (d);

D= Densidade superficial inicial das seções (250 g.m⁻²),

A= Área superficial da seção de cultivo (m²).

4.3 OPERAÇÃO DO SISTEMA

Com base nos trabalhos feitos no mesmo sistema de SRA por Freddi e Matsumoto (2019) e Almeida (2020) foi estabelecida a vazão de ar de 450L/h no difusor, o que gerou uma velocidade de circulação no tubo externo de 6,33 cm/s. Tem-se um tanque de cultivo com volume de água de 800 L, juntamente com 400L do DC e mais 120L do MABR, totaliza-se aproximadamente 1.320 L de volume total no sistema. O decantador de coluna recebia uma vazão total de 400L/h, o MABR foi operado com uma vazão de 100L/h, o sobrenadante era lançado em uma caixa de nível constante instalada na saída do DC. A caixa direcionava os 100L/h para o reator e o excedente voltava para o tanque de cultivo. Como a vazão de operação do MABR foi de 100L/h, portanto, concluiu-se que o sistema precisa de aproximadamente 13h para tratar todo o volume, quase duas renovações completas de água durante o dia.

4.4 PARÂMETROS E FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

Para avaliar a eficiência do tratamento do SRA e do polimento do efluente, foram analisados os parâmetros mostrados pelo Quadro 2, com a suas respectivas frequências. Todas as análises foram feitas para oito pontos de amostragem descritos nas Figuras 19 e 20: Sobrenadante do Decantador de Coluna (P1), Saída do Reator de Biofilme Aerado em Membrana (P2), Tanque de Cultivo de tilápias (P3), Efluente do tanque de cultivo de tilápia (P4), Tanque de polimento com macrófitas (P5, P6 e P7), Tanque de Controle (P8), a Tabela 4 a seguir traz a nomeação dos pontos. As análises foram realizadas de acordo com o *American Public Health Association* (APHA, 1998).

Tabela 4- Enumeração e nomeação dos pontos de amostragem dos aparatos experimentais

Pontos	Descrição
P1	Sobrenadante do Decantador de Coluna (DC)
P2	Saída Reator de Biofilme Aerado em Membrana (MABR)
P3	Tanque de cultivo de tilápias
P4	Efluente do tanque de cultivo de tilápia
P5	Tanque de polimento com macrófitas
P6	Tanque de polimento com macrófitas
P7	Tanque de polimento com macrófitas
P8	Tanque de controle

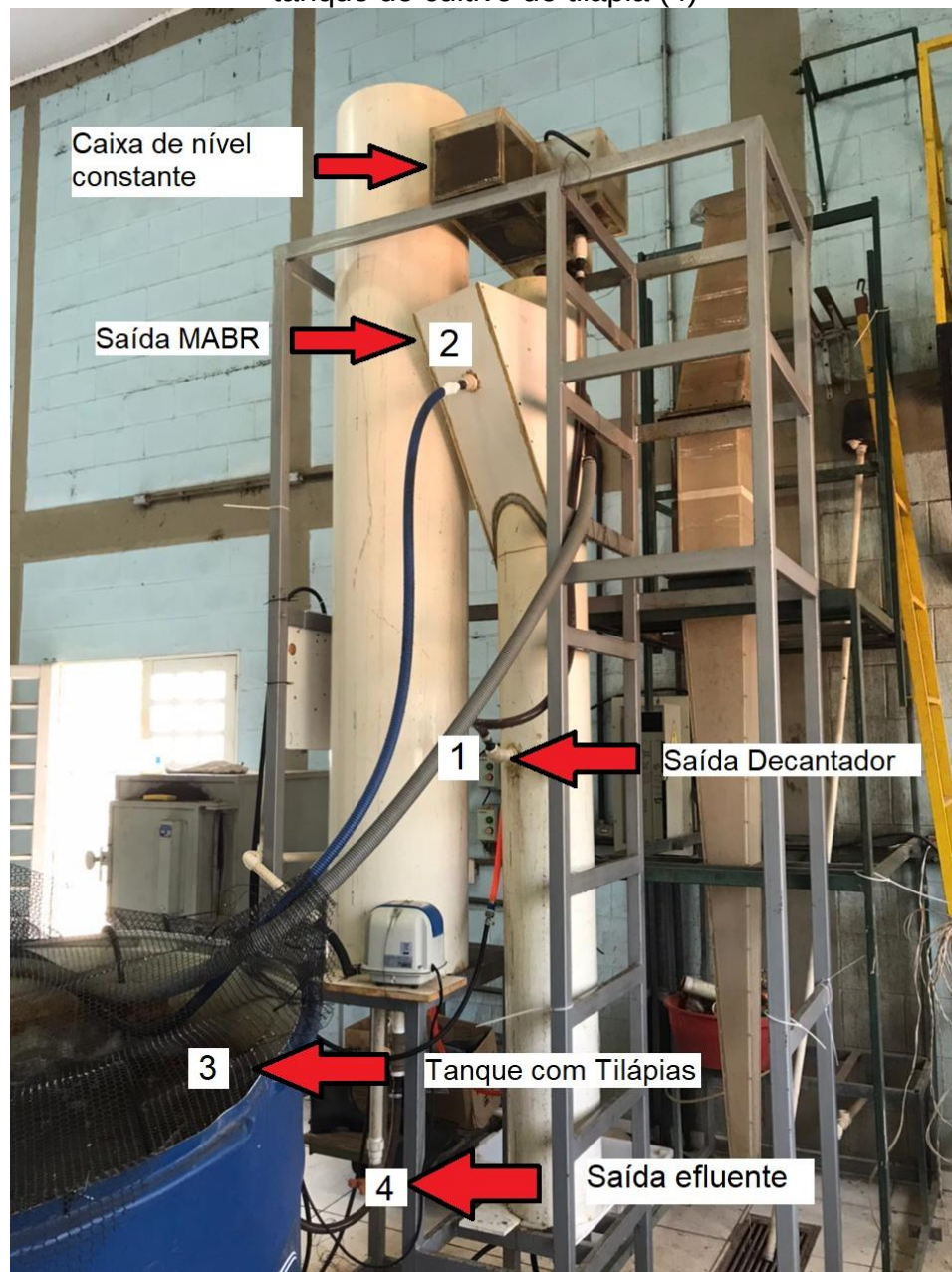
Fonte: Autor

Quadro 2 - Parâmetros, frequência e os respectivos métodos utilizados para análise

Parâmetros	Unidade	Frequência	Método
DQO	ml/L	Diário	Método do fluxo fechado - Método 5220 D
Temperatura	°C	Diário	Medidor de Oxigenio Dissolvido Digital Portátil- Modelo: MO-900 - Marca: Instruterm
Oxigênio Dissolvido	mg/L	Diário	
Turbidez	µT	Diário	Turbidímetro - Modelo: 2100AN - Marca: Hach
pH	-	Diário	pHmetro - Modelo: DM 22 - Marca: Digimed
Nitrato	mg/L	1x na semana	Método da redução de Cádmio- Método 8039
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	1x na semana	Método Gravimétrico
DBO	mg/L	1x na semana	APHA (2005)
Condutividade	µS/cm	1x na semana	Condutivímetro - Modelo mCA 150P

Fonte: Autor

Figura 18 – Pontos da coleta das amostras do SRA: Sobrenadante do Decantador de Coluna (1), Saída do MABR (2), Tanque de cultivo de tilápias (3) e Efluente do tanque de cultivo de tilápia (4)



Fonte: Autor.

A mangueira cinza tinha a saída do decantador e a mangueira azul saída do MABR, ambas com água retornando para o tanque com tilápias.

Figura 19 – Ponto de coleta das amostras do tratamento de polimento: tanques 5, 6, 7 e 8



Fonte: Autor.

4.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS E ESTATÍSTICA

Todos os dados brutos colhidos nos sistemas, de tratamento, crescimento, concentração foram armazenados e preparados para plotagem no software Microsoft Excel® 2016 assim como também para gerar todos os gráficos deste trabalho. O software foi utilizado para verificação estatística utilizando o teste t com nível de significância de 5% para amostras pareadas, para análise das médias entre os tanques com e sem a macrófita *L.punctata* e para o SRA com as médias do efluente de saída do DC e MABR com a água do tanque de criação.

Para o cálculo da eficiência de remoção de Nitrato, DQO, DBO, DQO e ST foi verificada pela diferença da concentração destes parâmetros, nos tanques de polimento e controle com o efluente de saída do DC. Para a determinação da eficiência de redução dos parâmetros foi utilizada a Equação 3 a seguir:

$$E = \frac{(C_{ef} - C_{poli})}{C_{Ef}} * 100$$

(3)

Onde:

E= Eficiência de remoção (%)

Cef = Concentração no efluente proveniente do DC (mg/L)

Epoli = Concentração nos tanques de polimento ou controle (mg/L)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A discussão dos dados colhidos será realizada em duas etapas, primeiro será analisado os resultados para o SRA, que compreende os dados do DC (P1), MABR (P2) e tanque de criação (P3). E em segundo, os resultados obtidos para o sistema de polimento, analisando então a média dos tanques de polimento com as macrófitas (P5, P6 e P7), o tanque de controle (P8) e o efluente do tanque de cultivo de tilápia (P4). Como o tanque de polimento é a média de três amostras, para as análises o chamaremos somente de Polimento (PP).

5.1 RESULTADOS PARA O SRA

5.1.1 Turbidez

Os resultados de turbidez são apresentados na Tabela 6, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Para a análise estatística, são apresentados os valores na Tabela 5 a seguir. São estatisticamente significativos quando comparado os valores MABR (P2) e valores do tanque de criação (P3), com p-valor de 0,035 e quando comparado os valores MABR (P2) com o Efluente (P4), com p-valor de 0,003.

Tabela 5 – Dados de P-valor para os pontos de amostragem do SRA

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
DC (P1) e MABR (P2)	1,70 E-01	ausente
DC (P1) e Tanque (P3)	4,33 E-01	ausente
MABR (P2) e Tanque (P3)	3,57 E-02	presente
Efluente (P4) e MABR(P2)	1,37 E -03	presente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

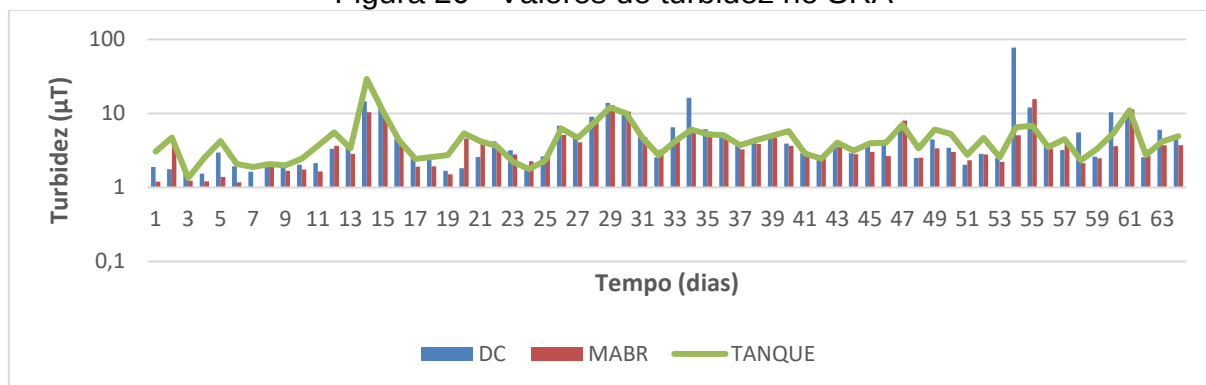
Tabela 6: Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão da turbidez para o SRA

Pontos de amostragem	Valores (μT)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
DC	77,3	1,53	5,79	$\pm 9,73$
MABR	15,6	0,99	4,03	$\pm 2,94$
TANQUE	29,2	1,34	4,76	$\pm 3,82$
EFLUENTE	1624	6,51	98,92	$\pm 226,82$

Fonte: Autor.

A Figura 21 apresenta o comportamento da turbidez ao passar dos dias. Observa-se que o valor de turbidez do Tanque de cultivo dos peixes (P3) sobressai os valores do DC (P1) e MABR (P2). Isso advém devido a remoção que acontece nestes, e também no tanque há maior presença de excreção dos peixes e resto da ração não consumida.

Figura 20 - Valores de turbidez no SRA



Fonte: Autor.

Freddi e Matsumoto (2019) e Almeida (2020), realizaram o trabalho de avaliar a eficiência de tratamento das águas residuárias da produção intensiva de tilápias em um SRA com MABR, o mesmo aparato utilizado nesta presente pesquisa. Freddi e Matsumoto (2019) obteve as médias de turbidez para a saída do DC de 4,76 uT e da saída do MABR foi de 3,66 uT, e eficiência de remoção de 84% e 25% respectivamente. Assim como também, no experimento de Maigual Enríquez (2011), executou avaliar a eficiência de tratamento das águas residuárias da produção intensiva de tilápias em um SRA com um reator aeróbio de leito fluidizado, os valores de turbidez no DC tiveram uma média de 5,97 µT e obteve uma remoção de 62,79 %.

Almeida (2020), em seu experimento obteve médias de turbidez para a saída do DC de 10,76 uT e para saída do MABR foi de 8,32 uT, e conseguiu eficiência de remoção de 38% e 20% respectivamente. Durante o experimento, a visibilidade da água era regular na maioria dos dias sendo então possível observar os peixes, e não houve mortalidade dos animais no período de coleta de dados.

5.1.2 Temperatura

Os resultados para temperatura estão apresentados na Tabela 8, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. As temperaturas dos três constituintes do SRA apresentaram diferença significativa, apenas para os valores MABR (P2) com o Efluente (P4), com p-valor de 0,028. Os valores são apresentados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem da temperatura no SRA

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
DC (P1) e MABR (P2)	2,39 E-01	ausente
DC (P1) e Tanque (P3)	8,78 E-01	ausente
MABR (P2) e Tanque (P3)	3,98 E-02	ausente
Efluente (P4) e MABR(P2)	2,87 E -02	presente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

A Tilápia - do - Nilo apresenta conforto térmico entre 27 a 32 °C (KUBTIZA, 2000a). A média da temperatura no tanque (P3) foi de 27,8 °C, e a máxima de 32°C, não ultrapassando os limites de qualidade, à vista disso, a água se encontrava em ideais condições para a sobrevivência dos peixes.

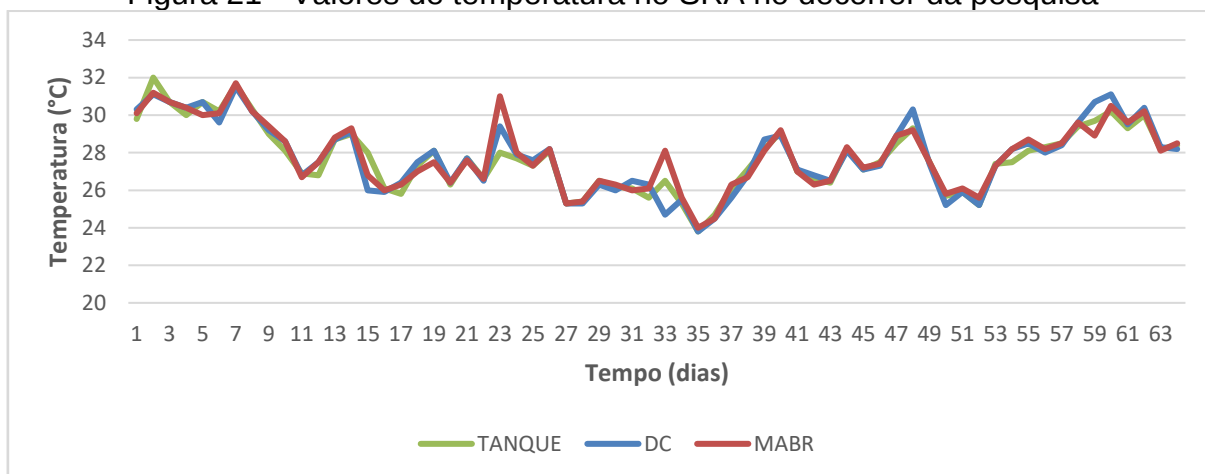
Tabela 8 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de temperatura para o SRA

Pontos de amostragem	Valores (°C)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
DC (P1)	31,5	23,8	27,82	± 1,86
MABR (P2)	31,7	24	27,87	± 1,75
TANQUE (P3)	32	23,8	27,76	± 1,75
EFLUENTE (P4)	32,7	23,8	28,2	± 2,00

Fonte: Autor.

A Figura 22 apresenta a temperatura no decorrer dos dias, pode-se observar que para todas as componentes do SRA o comportamento é similar.

Figura 21 - Valores de temperatura no SRA no decorrer da pesquisa



Fonte: Autor

Kubtza (2020b) ressalta que cultivar as tilápias sob condições de temperatura entre 23 a 32°C, são menos propensas às parasitoses e doenças, a não ser quando são submetidas à água de má qualidade, a um manejo nutricional e alimentar inadequado e a um manuseio grosseiro.

5.1.3 Potencial hidrogeniônico (pH)

Por sua vez, na Tabela 10 estão compreendidos os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Os resultados para o pH dos quatro constituintes do SRA são estatisticamente significativos, os dados são apresentados na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem do pH no SRA

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
DC (P1) e MABR (P2)	1,27 E-02	presente
DC (P1) e Tanque (P3)	4,98 E-01	ausente
MABR (P2) e Tanque (P3)	7,96 E-04	presente
Efluente (P4) e MABR(P2)	7,59 E -01	ausente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: autor

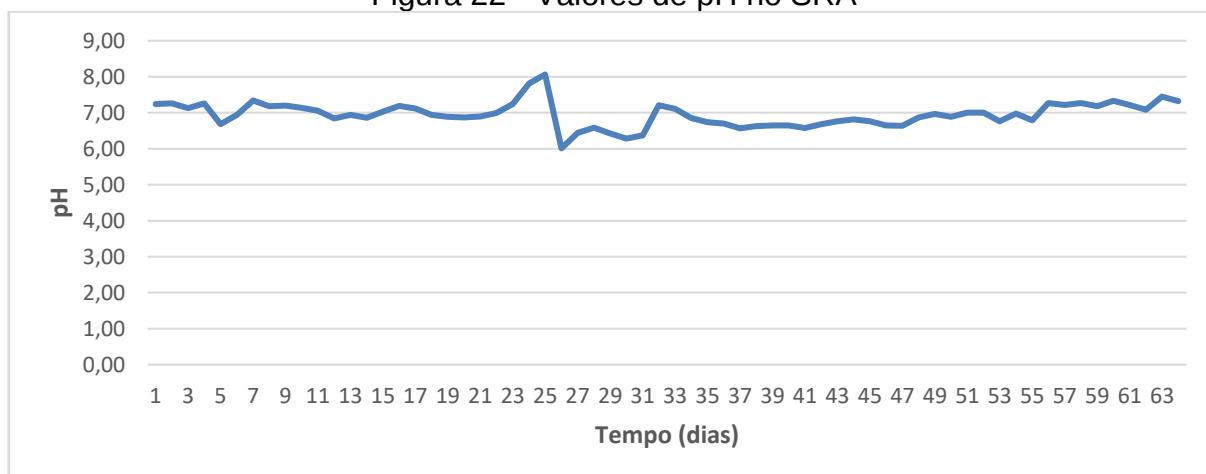
Tabela 10 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de pH para o SRA

Pontos de amostragem	Valores pH			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
DC (P1)	8,3	5,98	6,98	± 0,39
MABR (P2)	8,02	5,69	6,9	± 0,39
TANQUE (P3)	7,87	6,05	7	± 0,32
EFLUENTE (P4)	7,59	5,88	6,87	± 0,32

Fonte: Autor

A Figura 23 apresenta a média do pH no SRA no decorrer dos dias, com valor médio de 6,95 e valores máximo e mínimo de 8,3 e 5,69. A variação apresentada não causou prejuízo para os animais em cultivo. Kubtza (2020a) recomenda que o pH do tanque de cultivo deve ser mantido entre 6 a 8,5. Neste presente trabalho a média do pH no tanque (P3) foi de 7,00 sendo então ótima condição de criação.

Figura 22 - Valores de pH no SRA



Fonte: Autor.

5.1.4 Oxigênio Dissolvido

Os resultados para OD estão apresentados na Tabela 12, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Os valores de OD apresentaram diferença significativa, os dados são apresentados na Tabela 11 a seguir.

Tabela 11 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de OD no SRA

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
DC (P1) e MABR (P2)	2,30 E-01	ausente
DC (P1) e Tanque (P3)	2,50 E-12	presente
MABR (P2) e Tanque (P3)	7,83 E-13	presente
Efluente (P4) e MABR(P2)	7,10 E -02	ausente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

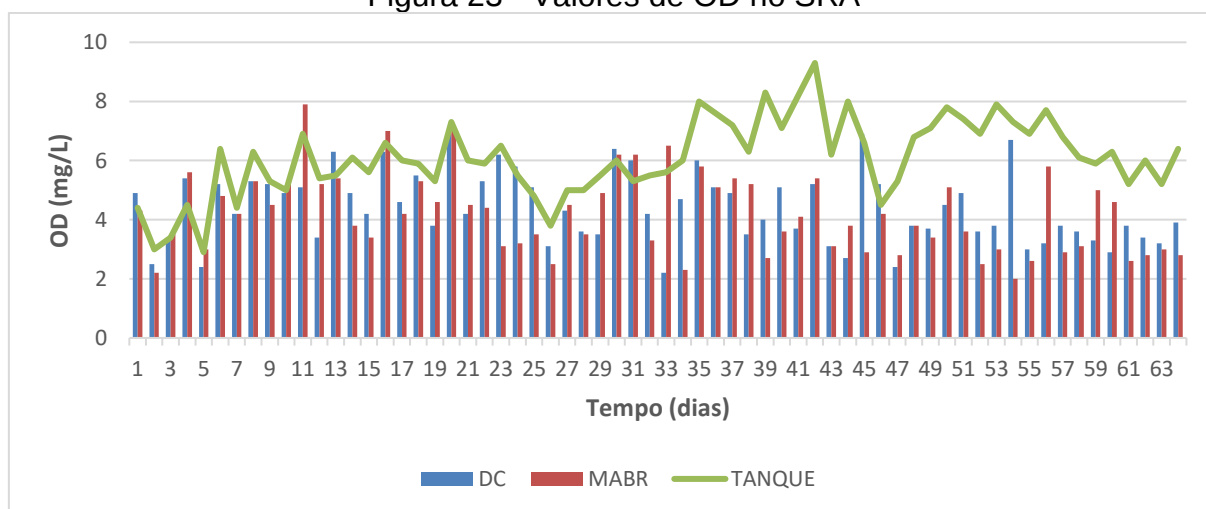
Tabela 12 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de OD para o SRA

Pontos de amostragem	Valores (mg/L)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
DC (P1)	6,9	2,2	4,4	$\pm 1,2$
MABR(P2)	7,9	2,9	4,1	$\pm 1,3$
TANQUE (P3)	9,3	2,9	5,9	$\pm 1,4$
EFLUENTE (P4)	7,1	1,2	4,5	$\pm 1,2$

Fonte: Autor.

A Figura 24 a seguir apresenta o comportamento do OD ao longo dos dias, o valor tanque de cultivo (3) sempre era maior que os outros pontos, devido ao oxigenador. Depois do 15º dia foi necessário aumentar a quantidade oxigenador devido ao calor excessivo.

Figura 23 - Valores de OD no SRA



Fonte: Autor.

Neste presente trabalho a média do OD no tanque de criação (P3) foi de 5,9 mg/L, valor considerado ideal por Kubtza (2020a), que recomenda o OD do tanque

de cultivo deve manter entre 3,5 mg/L e 6 mg/L. Sendo assim, os peixes foram mantidos em ótima condição de criação.

De acordo com a resolução N° 357 do CONAMA, para as águas doces onde ocorre pesca ou cultivo de organismos e para fins de consumo intensivo, na categoria de classe 2, o valor limite para o OD não pode ser inferior a 5 mg/L, neste trabalho o sistema SRA obteve a média de 4,8 mg/L.

5.1.5 Sólidos Totais

Os resultados para ST estão apresentados na Tabela 14, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Os dados apresentaram diferença significativa conforme detalhado na Tabela 13, apenas para os valores MABR (P2) com o Efluente (P4), com p-valor de 0,012. Como esperado a média ST foi maior no tanque de criação (P3), devido a ração e excreção dos peixes. Observando o DC e MABR, ambos tiveram uma média praticamente igual a 300 mg/L.

Tabela 13 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de ST no SRA

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
DC (P1) e MABR (P2)	8,97 E-01	ausente
DC (P1) e Tanque (P3)	8,85 E-02	ausente
MABR (P2) e Tanque (P3)	7,08 E-02	ausente
Efluente (P4) e MABR(P2)	1,20 E-02	presente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

Tabela 14 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de ST para o SRA

Pontos de amostragem	Valores (mg/L)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
DC (P1)	425	170	299	± 77
MABR (P2)	413	183	300	± 67
TANQUE (P3)	428	222	323	± 63
EFLUENTE (P4)	513	266	374	± 68

Fonte: Autor.

Quanto à eficiência de remoção dos ST os valores foram de 10% para o DC e 9% para o MABR, aproximadamente igual em comparação à encontrada no estudo de Almeida (2020), que obteve os valores de 9% e 11% respectivamente para DC e

MABR. Neste presente trabalho foi utilizado o mesmo aparato ao utilizado no estudo de Almeida (2020), este explica que tal resultado para a baixa eficiência de remoção dos ST é devido a utilização da bomba de recalque, ao mandar o efluente para o DC, a passagem pelo rotor da bomba pode ter provocado a quebra das partículas, fazendo com que as partículas ficassem mais finas e dificultando a decantação e assim foram carregadas para o MABR.

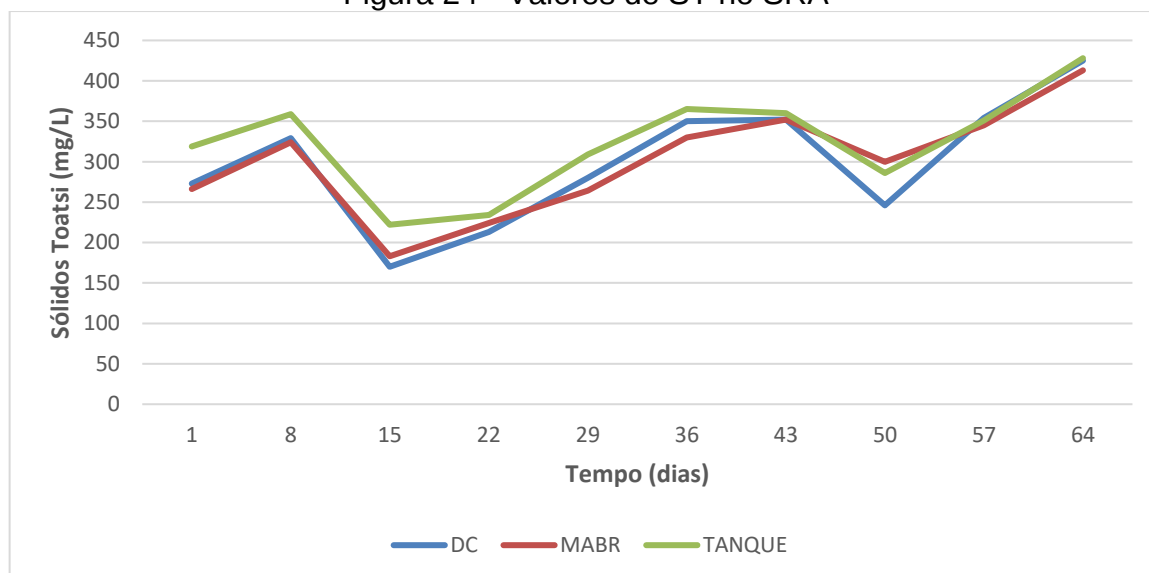
Tabela 15 - Dados de máxima, mínima e média para eficiência de remoção dos ST

Tanque	Eficiência (%)		
	Máxima	Mínima	Média
DC sobre o tanque	23,4	0,0	10,2
MABR sobre o DC	17,6	0,0	8,8
MABR sobre o efluente	50,3	3,0	20,8

Fonte: Autor.

Ainda para este parâmetro físico, a Figura 25 apresenta os valores de ST no decorrer dos dias no SRA, observa-se que a curva do tanque está a cima do DC e MABR, isso acontece devido os peixes presentes no tanque gerarem maiores quantidades de sólidos pelo processo metabólico e ração não consumida.

Figura 24 - Valores de ST no SRA



Fonte: Autor.

5.1.6 Nitrato

Os resultados de nitrato são apresentados na Tabela 18, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Os dados apresentaram diferença significativa conforme detalhado na Tabela 17.

Tabela 16 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de nitrato no SRA

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
DC (P1) e MABR (P2)	2,19 E-01	ausente
DC (P1) e Tanque (P3)	1,45 E-01	ausente
MABR (P2) e Tanque (P3)	4,08 E-01	ausente
Efluente (P4) e MABR(P2)	1,71 E-02	presente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

Tabela 17 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de nitrato para o SRA

Pontos de amostragem	Valores (mg/L)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
DC (P1)	1,5	0,8	1,25	$\pm 0,48$
MABR (P2)	2	0,7	1,35	$\pm 0,72$
TANQUE (P3)	2,8	0,8	1,56	$\pm 0,59$
EFLUENTE (P4)	5,2	1,5	2,93	$\pm 1,31$

Fonte: Autor.

Para esse parâmetro verificou-se que as eficiências de remoção média de nitrato pelo DC e pelo MABR foram de 19% e 7%, respectivamente. Valores maiores que os encontrados por Almeida (2020), DC e MABR, correspondendo a 9% e 6%, respectivamente.

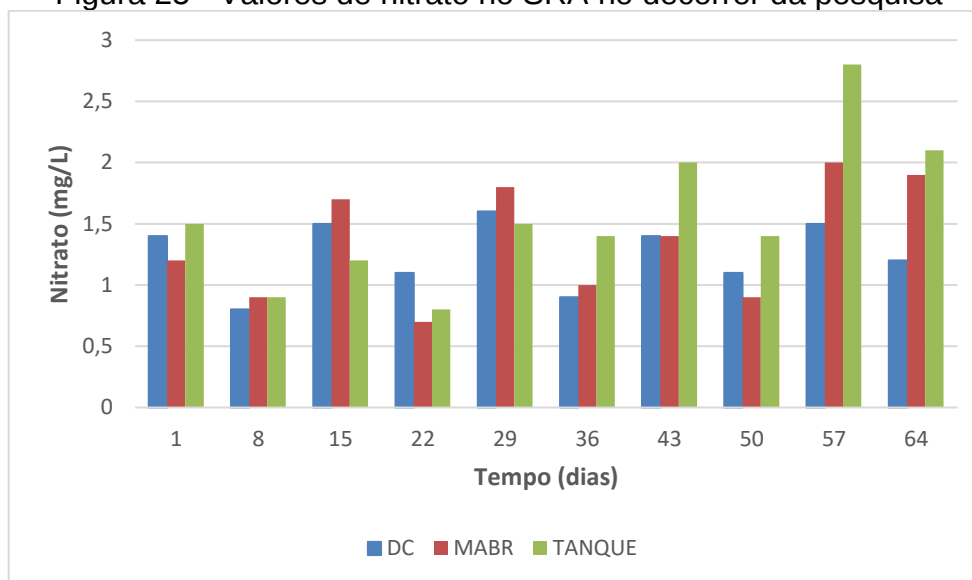
Tabela 18 - Dados de máxima, mínima e média para eficiência de remoção do nitrato

Tanque como referência	Eficiência (%)		
	Máxima	Mínima	Média
DC sobre o tanque	46,4	0,0	19,4
MABR sobre o DC	35,7	0,0	16,5
MABR sobre o efluente	79,6	0,0	51,6

Fonte: Autor.

Com uma resultante média de eficiência de 26%, os valores foram superiores aos obtidos por Freddi e Matsumoto (2019) que foram de 21,91% de remoção no SRA. Os resultados obtidos podem ser considerados satisfatórios. Os valores de nitrato no SRA estão representados na Figura 26.

Figura 25 - Valores de nitrato no SRA no decorrer da pesquisa



Fonte: Autor.

5.1.7 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Os resultados de DBO são apresentados na Tabela 21, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Os dados apresentaram diferença significativa conforme detalhado na Tabela 20, somente para MABR (P2) e efluente (P4).

Tabela 19 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de nitrato no SRA

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
DC (P1) e MABR (P2)	8,10 E-01	ausente
DC (P1) e Tanque (P3)	4,00 E-01	ausente
MABR (P2) e Tanque (P3)	3,00 E-01	ausente
Efluente (P4) e MABR(P2)	2,02 E-03	presente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

Tabela 20 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de DQO para o SRA

Pontos de amostragem	Valores (mg/L)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
DC (P1)	98	7	43,3	± 23,88
MABR (P2)	96	9	39,2	± 28,21
TANQUE (P3)	115	15	51,2	± 28,18
EFLUENTE (P4)	207	53	122	± 42

Fonte: Autor.

Para a Tabela 22 são apresentados os valores de eficiência para a remoção do DQO.

Tabela 21 - Dados de máxima, mínima e média para eficiência de remoção para DQO no SRA

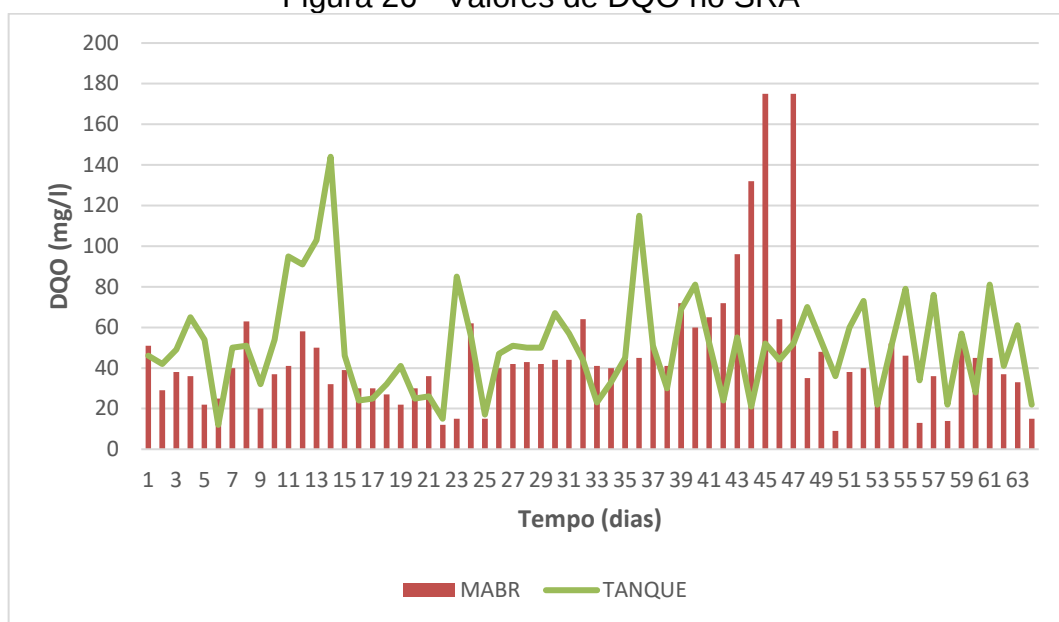
Referência	Eficiência (%)		
	Máxima	Mínima	Média
DC sobre o tanque	68,2	0,0	22,1
MABR sobre o DC	72,1	0,0	21,4
MABR sobre o efluente	95,6	0,0	67,0

Fonte: Autor.

Na Figura 27, podemos observar a ascendência da curva do tanque (P3) sobre o reator (P2), neste o efeito é devido aos dois processos de purificação que a água passou, pelo DC e o próprio MABR. O reator só atingiu valores superiores no período em que a bomba de recalque danificou e o sistema trabalhou somente com recirculação no MABR.

Em seu experimento Almeida (2021) encontrou eficiência média para remoção de 30% para o DC e 15% para o MABR, com médias de 80,6 mg/L e 66,7 mg/L respectivamente, foram maiores que os obtidos neste trabalho de 39,2 mg/L e 51,2 mg/L. Com eficiência resultante de 43%, pode-se concluir que o SRA mostrou ser eficaz na remoção da DQO.

Figura 26 - Valores de DQO no SRA



Fonte: Autor.

5.1.8 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Os valores de DBO dos quatro constituintes do SRA apresentaram diferença significativa somente para os valores do efluente (P4) e do MABR (P2). Os resultados de DBO são apresentados na Tabela 24, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Os dados apresentaram diferença significativa conforme detalhado na Tabela 23.

Tabela 22 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de nitrato no SRA

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
DC (P1) e MABR (P2)	3,16 E-01	ausente
DC (P1) e Tanque (P3)	7,94 E-01	ausente
MABR (P2) e Tanque (P3)	6,43 E-01	ausente
Efluente (P4) e MABR(P2)	6,53 E -03	presente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

Tabela 23 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de DBO para o SRA

Pontos de amostragem	Valores (mg/L)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
DC (P1)	7,81	1,95	4,10	± 1,88
MABR (P2)	10,75	0,98	3,44	± 2,83
TANQUE (P3)	7,81	0,97	3,90	± 2,03
EFLUENTE (P4)	12,69	2,05	7,07	± 3,58

Fonte: Autor.

Na Tabela 25 são apresentados os resultados para eficiência de remoção do DBO para SRA.

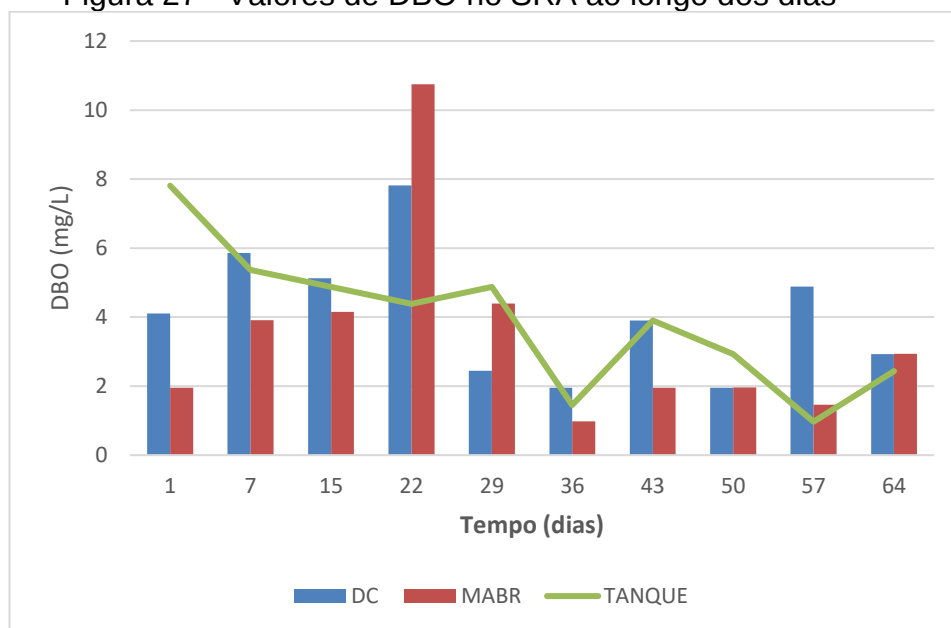
Tabela 24 - Dados de máxima, mínima e média para eficiência de remoção para DBO no SRA

Referência	Eficiência (%)		
	Máxima	Mínima	Média
DC sobre o tanque	49,9	0,0	13,1
MABR sobre o decantador	70,0	0,0	27,5
MABR sobre o efluente	92,3	0,0	57,1

Fonte: Autor.

O valor médio resultante para a remoção de DBO no SRA foi 40 %, sendo o valor inferior ao obtido por Maigual-Enríquez (2011), com 48,01%.

Figura 27 - Valores de DBO no SRA ao longo dos dias



Fonte: Autor.

5.1.9 Condutividade

Os valores de condutividade dos três constituintes do SRA não apresentaram diferença significativa. Os resultados são apresentados Tabela 27, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Para a análise estatística, são apresentados os valores na Tabela 26 a seguir. São estatisticamente significativos quando comparado os valores MABR (P2) e valores do tanque de criação (P3), e comparação dos valores do DC (P1) e Tanque de criação (P3).

Tabela 25 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de nitrato no SRA

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
DC (P1) e MABR (P2)	6,44 E-01	ausente
DC (P1) e Tanque (P3)	6,42 E-03	presente
MABR (P2) e Tanque (P3)	1,92 E-02	presente
Efluente (P4) e MABR(P2)	9,43 E-02	ausente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

Tabela 26 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de condutividade para o SRA

Pontos de amostragem	Valores (mg/L)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
DC (P1)	434,1	270,4	352,7	± 55,2
MABR (P2)	429,9	283,2	353,9	± 50,1
TANQUE (P3)	425,2	262,2	346,4	± 55,5
EFLUENTE (P4)	439,6	268,0	362,2	± 59,4

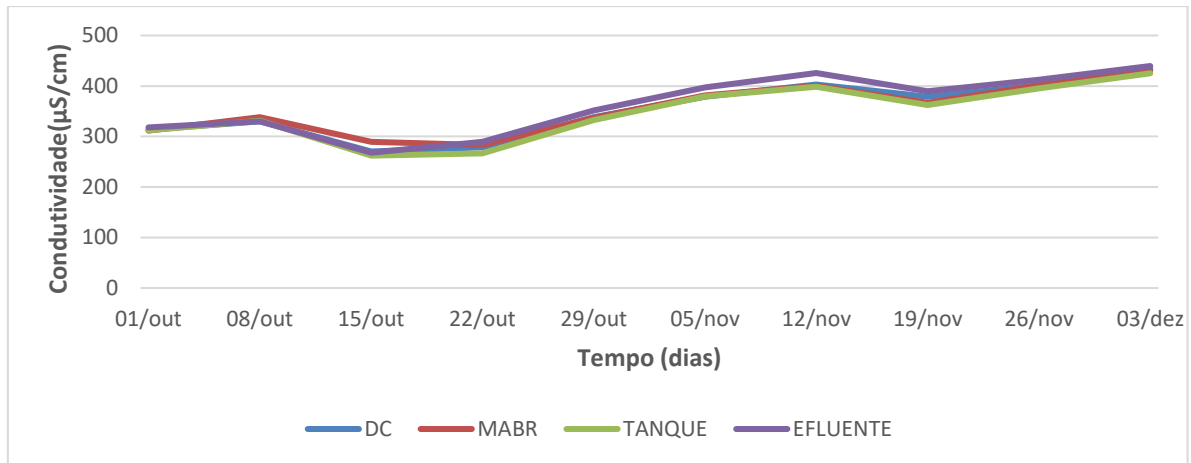
Fonte: Autor.

Pela Figura 29, podemos observar que a condutividade elétrica se comportou de forma semelhante em todos os tratamentos, com valores crescentes em função do tempo, Biagioni (2021) explica que a condutividade mede a presença de íons em solução, ao longo do tempo pode haver a formação de cátions e ânions, supostamente, devido à formação dos compostos nitrogenados gerados pelos peixes e resíduos da ração no sistema fechado.

Comparando os resultados com o trabalho de Maigual-Enríquez (2011), constata-se grande proximidade de valores, este apresentou média de 374 $\mu\text{S}/\text{cm}$,

mínima de 272 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e máxima de 489 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valores que não interferiram no crescimento dos peixes e no correto funcionamento do sistema.

Figura 28 - Valores de condutividade no SRA ao longo dos dias



Fonte: Autor.

O sistema operou entre o valor mínimo de 262 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e máximo de 434 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dentro da faixa ideal para a piscicultura de 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, recomendada por Souza (2000). É possível dizer que os valores de condutividade registrados durante a pesquisa foram satisfatórios.

5.2 RESULTADOS PARA O SISTEMA DE POLIMENTO COM A MACRÓFITA *L.PUNCTATA*

5.2.1 Turbidez

Os resultados de turbidez são apresentados na Tabela 29, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. No sistema de polimento os resultados para turbidez não foram estatisticamente significativos, descrito na Tabela 28.

Tabela 27 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de turbidez no sistema de polimento

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
Efluente (P4) e Polimento (PP)	6,91 E-01	ausente
Efluente (P4) e Tanque de controle (P8)	2,73 E-01	ausente
Tanque de controle (P8) e Polimento (PP)	1,44 E-01	ausente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

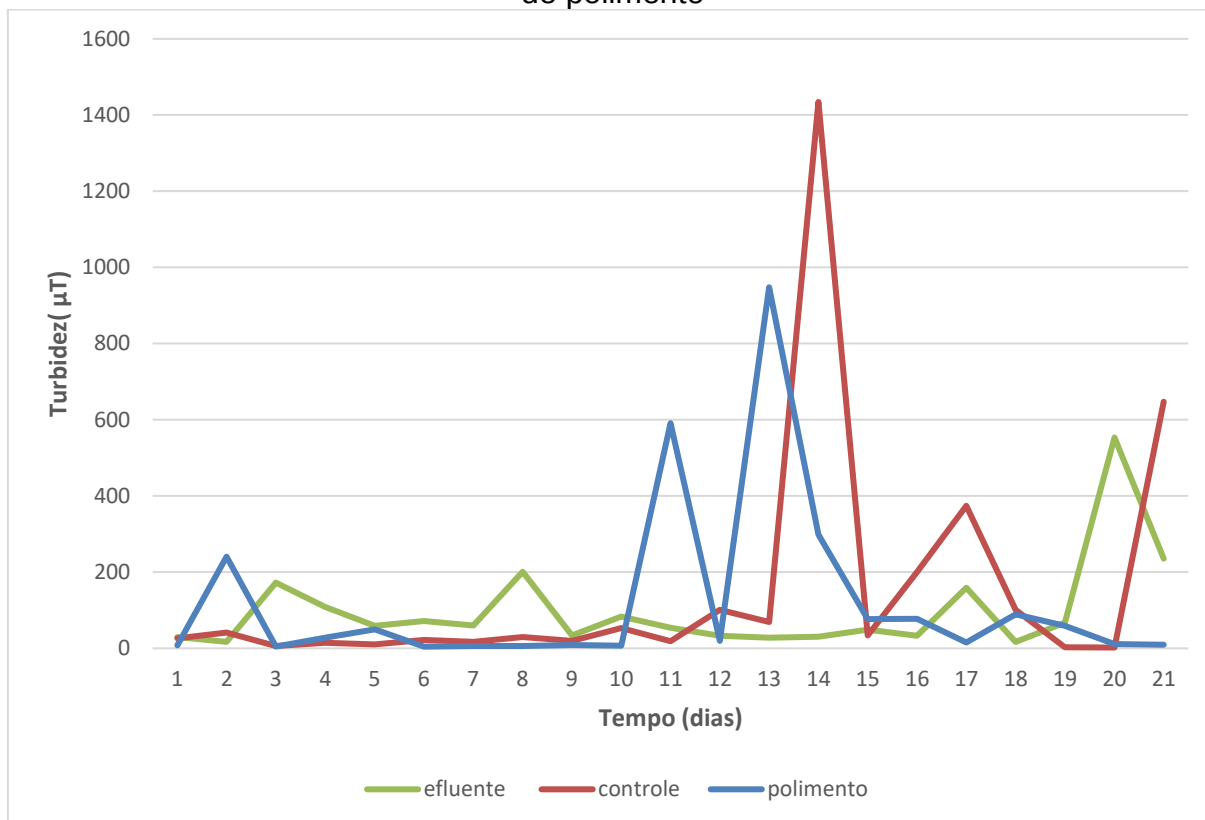
Tabela 28 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de turbidez no sistema de polimento

Pontos de amostragem	Valores (μT)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
EFLUENTE (P4)	1624	4,59	98,92	$\pm 226,82$
POLIMENTO (PP)	2801	2,24	124,08	$\pm 431,09$
CONTROLE (P8)	1700	2,08	194,29	$\pm 667,35$

Fonte: Autor.

Quanto a este parâmetro físico nas amostras de polimento (PP) e controle (P8), observou-se que a turbidez aumentava conforme ia passando os dias de cada ciclo, chegando até mesmo em valores impossíveis de leitura pelo turbidímetro. Isso aconteceu devido a proliferação de algas no sistema, deixando a água na coloração esverdeada. Em uma superfície aquática contendo macrófitas, é muito importante que a cobertura da mesma se mantenha densa para proteger a entrada de luz e, assim, impedir o aparecimento de algas e outras plantas, prevenindo, assim, uma futura competição com as mesmas (POPA *et al.*, 2017). No item 5.2.10 é analisado a mortalidade de macrófitas no decorrer das análises e aponta no 15º dia como a menor densidade de crescimento. Analisando a Figura 30 é possível observar que se aproximando ao 15º dia ouve uma grande elevação nos valores de turbidez no polimento e controle.

Figura 29 - Valores de turbidez do efluente de entrada, controle e média dos tanques de polimento



Fonte: Autor.

5.2.2 Temperatura

Os resultados para temperatura estão apresentados na Tabela 31, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Os valores para temperatura apresentaram diferença significativa, conforme detalhado na Tabela 30.

Tabela 29 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de temperatura no sistema de polimento

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
Efluente (P4) e Polimento (PP)	1,33 E-11	presente
Efluente (P4) e Tanque de controle (P8)	7,60 E-14	presente
Tanque de controle (P8) e Polimento (PP)	5,20 E-09	presente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

Tabela 30 Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão da temperatura no sistema de polimento

Pontos de amostragem	Valores (°C)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
EFLUENTE (P4)	32,7	23,8	28,2	± 2,0
POLIMENTO (PP)	36,6	24,3	30,5	± 3,0
CONTROLE (P8)	38,9	24,1	31,9	± 3,9

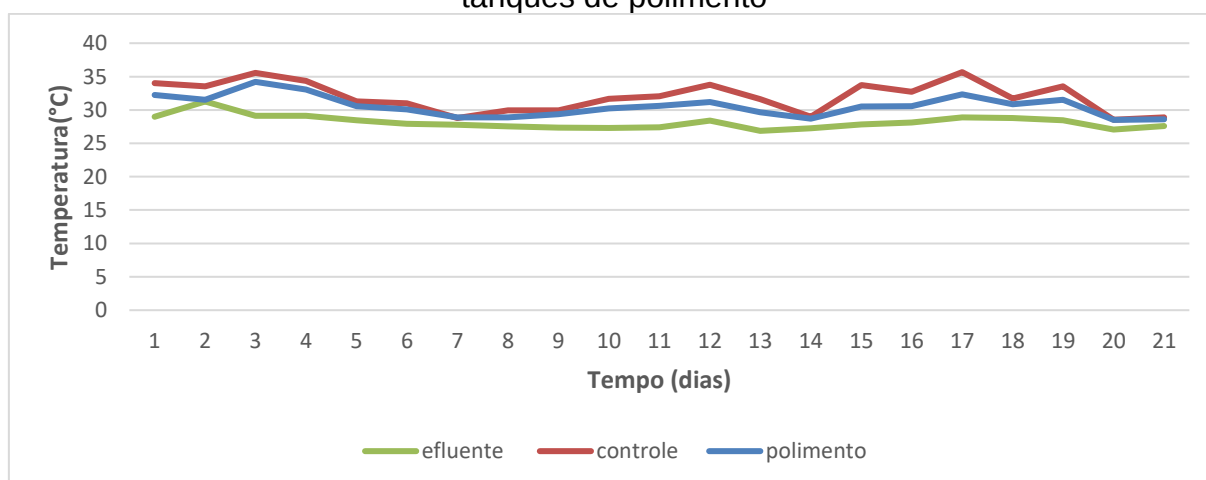
Fonte: Autor.

Observa-se que a média da temperatura do polimento (PP) é 30,5 °C, menor que a do controle (P8) de 31,9 °C, isso é devido à sombra criada pela macrófita sobre a água, que ajudou a proteger a água da insolação e assim manter a temperatura um pouco mais estável.

No trabalho de Biagioni (2021), a temperatura da água no tanque de polimento se manteve na média de 26,4°C em um sistema de estufa que amenizou em média 3,5°C, neste presente trabalho o experimento ficou em ambiente externo, isso explica o alto valor da média de 30,5°C.

A seguir a Figura 31 mostra os dados ao longo dos dias da pesquisa, observa-se que a temperatura do efluente manteve-se constante, o polimento alcançou a temperatura sempre menor que o controle, como já citado isso ocorreu devido à sombra criada pela macrófita na superfície da água.

Figura 30 - Valores da temperatura do efluente de entrada, controle e média dos tanques de polimento



Fonte: Autor.

Para as bactérias nitrificantes, a faixa ideal para o crescimento está compreendida entre 17-34°C (BIAGIONI, 2021). A queda da temperatura para valores inferiores à faixa ideal diminui a produtividade das bactérias na conversão da amônia em nitratos devido à redução das taxas metabólicas (SOMERVILLE *et al.*, 2014). O sistema de polimento obteve a média de 30,5 °C, dentro da faixa considerada ideal.

5.2.3 Potencial hidrogeniônico (pH)

Os resultados para pH estão apresentados na Tabela 33, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Os valores para pH apresentaram diferença significativa, conforme detalhado na Tabela 32.

Tabela 31 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de pH no sistema de polimento

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
Efluente (P4) e Polimento (PP)	7,67 E-15	presente
Efluente (P4) e Tanque de controle (P8)	4,64 E-24	presente
Tanque de controle (P8) e Polimento (PP)	4,06 E-11	presente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

Tabela 32 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão do pH no sistema de polimento

Pontos de amostragem	Valores pH			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
EFLUENTE (P4)	7,59	5,88	6,87	0,32
POLIMENTO (PP)	9,17	6,35	8,09	0,67
CONTROLE (P8)	9,78	6,9	7,55	0,65

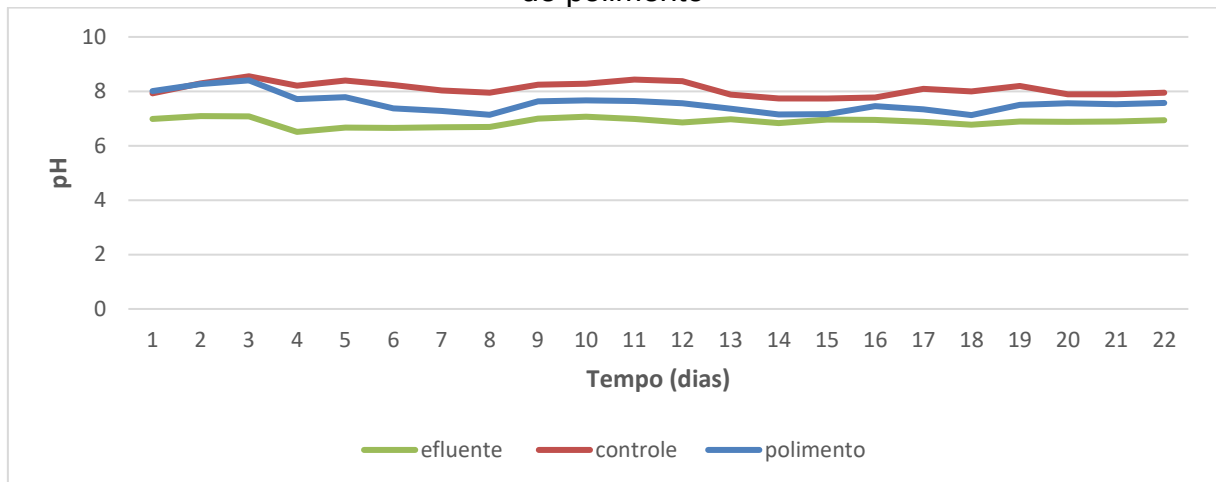
Fonte: Autor.

Biagioni (2021), em sua pesquisa obteve uma média de 7,9 para o efluente de piscicultura utilizando *L.punctata* como polidora, valor próximo ao obtido neste presente trabalho de 8,09. No trabalho de Zanetone Filho (2019) foi feito o polimento de esgoto doméstico utilizando a *L.punctata* e obteve média de 7,42.

A Figura 32 a seguir mostra o comportamento do pH ao longo dos dias de pesquisa. Observa-se que o pH do controle e do polimento aumentou em relação ao pH de entrada do efluente, isso ocorre devido a decomposição anaeróbia que

acontece no fundo do tanque e gera como subprodutos o CO_2 que, ao subir, é liberado pela atmosfera ou consumido pelas algas, durante o dia quando as algas consomem o CO_2 faz com que o pH se eleve até valores superiores a 9 (NUVOLARI, 2011).

Figura 31 - Valores de pH para o efluente de entrada, controle e média dos tanques de polimento



Fonte: Autor.

Segundo Tyson *et al.*, (2004), uma faixa de pH entre 6,5 e 7 é o recomendado para sistemas de aquaponia, o qual aumenta a disponibilidade de nutrientes para as plantas e melhora suas taxas de absorção. Nuvolari (2011) constatou em sua pesquisa que o pH mais alcalino afetou negativamente o desenvolvimento das plantas. Nesta pesquisa, em momentos que houve um aumento brusco na temperatura externa, ocorreu a diminuição da taxa de crescimento das macrófitas, e também o aumento do pH, tal como supracitado.

As bactérias nitrificantes são predominantemente aeróbicas e sua faixa de pH ótimo encontra-se entre 7,0 e 8,0 (CARNEIRO, *et al.*, 2015). Assim sendo, um pH abaixo de 6,0 pode impactar a atividade das bactérias nitrificantes e prejudicar o ciclo de conversão da amônia em nitrato, deixando assim o sistema instável (BIAGIONI, 2021). A posto disso, conclui que o sistema permaneceu dentro dos valores aceitáveis para este parâmetro.

5.2.4 Oxigênio Dissolvido

Os resultados para oxigênio dissolvido estão apresentados na Tabela 35, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Os valores de OD apresentaram diferença significativa conforme detalhado na Tabela 34.

Tabela 33 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de OD no sistema de polimento

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
Efluente (P4) e Polimento (PP)	2,90 E-01	ausente
Efluente (P4) e Tanque de controle (P8)	6,35 E-07	presente
Tanque de controle (P8) e Polimento (PP)	4,68 E-04	presente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

Tabela 34- Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão do OD no sistema de polimento

Pontos de amostragem	Valores (mg/L)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
EFLUENTE (P4)	7,1	1,2	4,5	± 1,2
POLIMENTO (PP)	17,4	1,7	4,9	± 2,7
CONTROLE (P8)	18,3	1,4	6,7	± 2,8

Fonte: Autor.

Analisando os resultados, observa-se que o polimento (PP) obteve o valor máximo de 17,4 mg/L e o controle (P8) obteve o valor máximo de 18,3 mg/L, valores considerados altos para o sistema, podendo ser explicado como um possível erro de leitura pois os valores foram coletados no mesmo dia, outra hipótese é a coloração da água no dia da análise, a Figura 33 a seguir apresenta a visualização da cor das amostras, podendo verificar a coloração esverdeada das mesmas no sistema de polimento.

Figura 32- Amostras em recipientes de coleta para leitura dos parâmetros



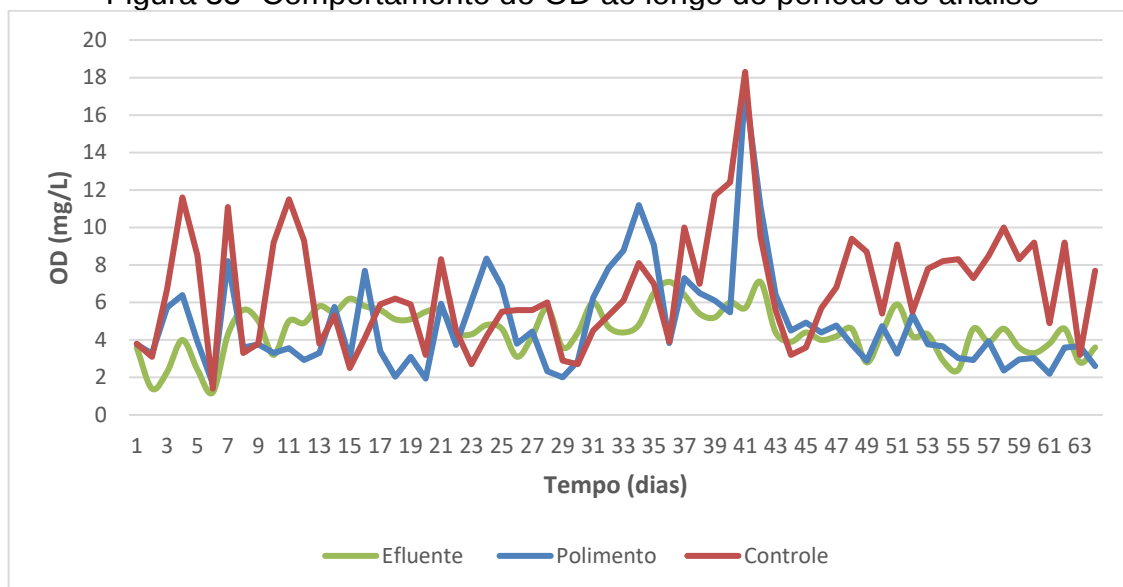
Fonte: Autor.

Sobre a possibilidade de erro de leitura, a Figura 34 a seguir mostra o comportamento do OD ao longo dos dias de análise, já a Figura 35 traz o mesmo gráfico porem sem o dia considerado como erro. Observa se na Figura 34 que somente no 41° houve o pico no valor de leitura.

No trabalho desenvolvido por Assunção (2011), foi utilizado a macrófita *Eichhornia crassipes* no polimento de efluentes proveniente de viveiro de criação de pacu (*Piaractus mesopotamicu*), obteve o valor máximo de 9mg/L e a média de 6,6mg/L.

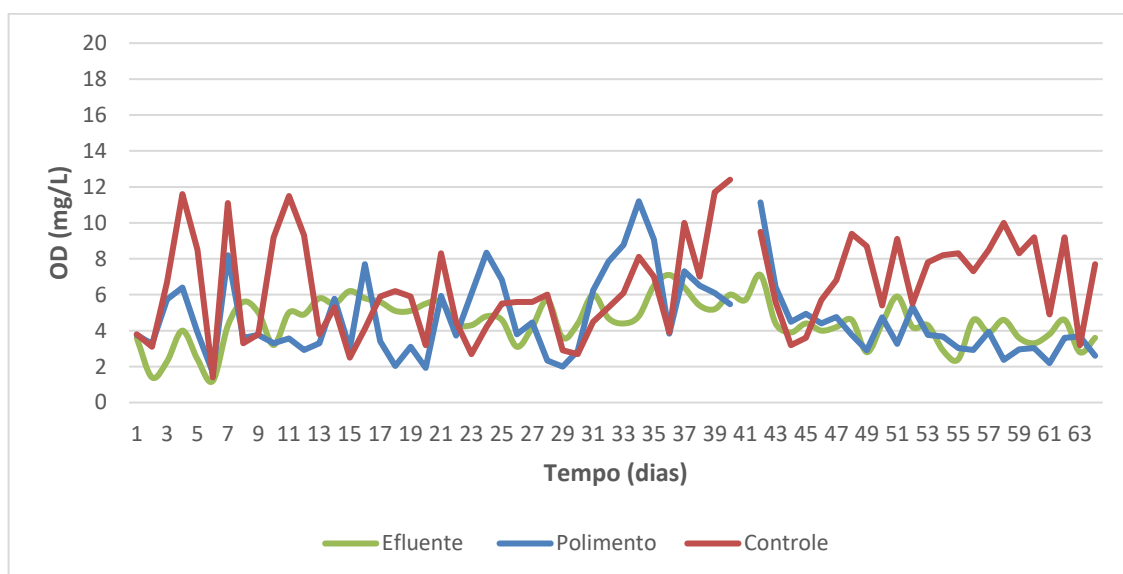
Mohedano *et al.*, (2012) em seu trabalho de tratamento de efluente de dejetos de suínos com a macrófita *L.punctata*, os valores para concentração de oxigênio dissolvido subiu de 0,0 para 3,0 mg/L, em média nos tanques de polimento.

Figura 33- Comportamento do OD ao longo do período de análise



Fonte: Autor.

Figura 34 - Comportamento do OD ao longo do período de análise, exceto o 41º dia



Fonte: Autor.

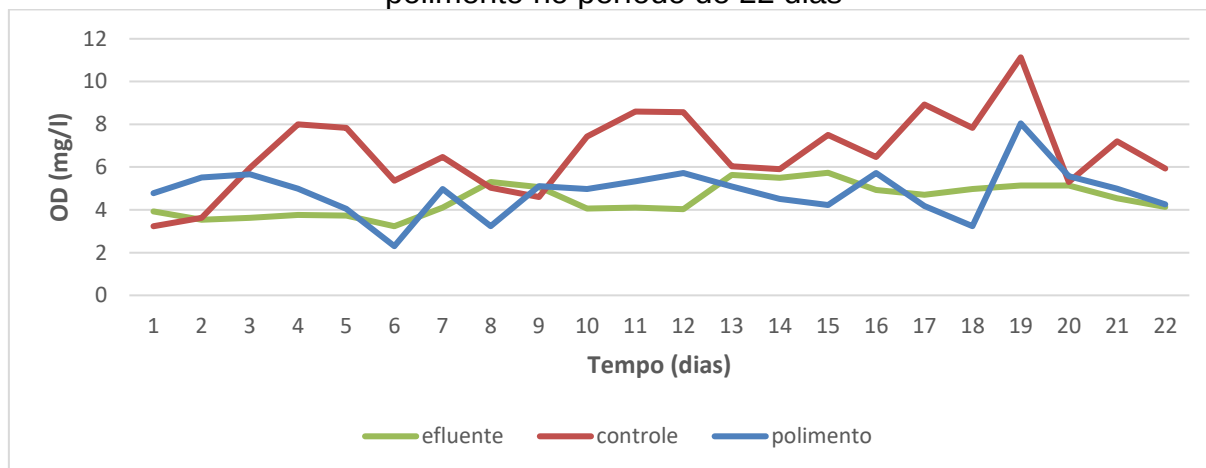
Popa *et al.*, (2017) explicam que as algas são as principais concorrentes das macrófitas na disputa de nutrientes e espaço para crescimento, e indicam que a superfície da água deve sempre se encontrar suficientemente densa de planta, para cobrir toda a área superficial e assim suprimir o crescimento de algas. Posto isso, a coloração esverdeada pode ser devido a proliferação de algas que afetou o sistema, devido a letalidade das plantas que abriu um espaço livre na superfície nos tanques

de polimento, a mortalidade pode ter sido causada por um tipo de pulgão que habitou a superfície das plantas.

Nuvolari (2021) explica que, devido a presença de algas nos tanques de polimento e controle pode haver um aumento na produção de oxigênio, e consequentemente aumentando os níveis de OD nos tanques. A concentração de OD no efluente pode ser relacionada à fotossíntese realizada pelo fitoplâncton (HENRY-SILVA; CAMARGO, 2008).

A Figura 36 a seguir mostra a concentração média para OD no período de 22 dias.

Figura 35 - Valores de OD no efluente de entrada, controle e média dos tanques de polimento no período de 22 dias



Fonte: Autor.

Para uma boa eficiência de nitrificação Rakocy *et al.*, (2006) ressaltam que é de grande importância para as bactérias nitrificantes presentes no filtro biológico e das raízes das plantas que a quantidade de oxigênio dissolvido na água deve ser sempre superior a 4 mg/L. Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois o sistema de polimento atingiu a média de 4,9 mg/l. De acordo com a resolução CONAMA N° 357 (BRASIL, 2005) a concentração mínima de oxigênio dissolvido para água de classe dois é de 5 mg.L⁻¹

Analisando os estudos citados anteriormente, nenhum apresentou comentários sobre a proliferação de algas, neste trabalho pode estar relacionado com as características do meio de cultivo utilizado e condições climáticas.

5.2.5 Sólidos Totais

Os resultados para sólidos totais estão apresentados na Tabela 37, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Os valores para sólidos totais apresentaram diferença significativa, conforme detalhado na Tabela 36.

Tabela 35 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de sólidos totais no sistema de polimento

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
Efluente (P4) e Polimento (PP)	1,27 E-02	presente
Efluente (P4) e Tanque de controle (P8)	4,98 E-01	ausente
Tanque de controle (P8) e Polimento	7,96 E-04	presente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

Tabela 36 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de ST no sistema de polimento

Pontos de amostragem	Valores (mg/L)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
EFLUENTE (P4)	513	266	374	± 68
POLIMENTO (PP)	413	244	300	± 45
CONTROLE (P8)	509	246	331	± 75

Fonte: Autor.

Na Tabela 38 são apresentados os resultados para eficiência de remoção dos sólidos totais nos dois sistemas, polimento e controle.

Tabela 37 - Dados de máxima, mínima e média para eficiência de remoção dos sólidos totais

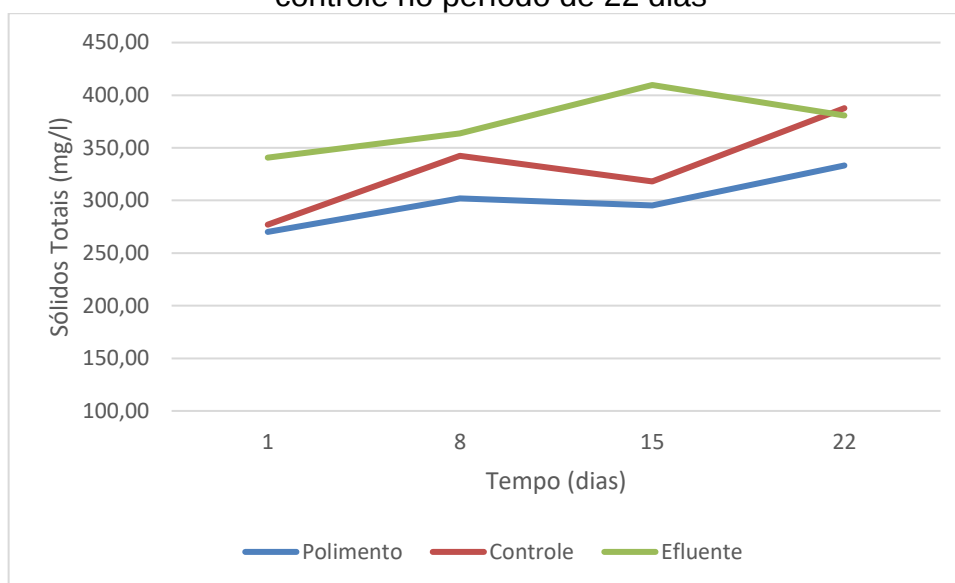
Efluente	Eficiência (%)		
	Máxima	Mínima	Média
POLIMENTO	36	0	21
CONTROLE	40	0	19

Fonte: Autor.

A remoção média de sólidos totais pelo polimento (PP) foi de 21% de eficiência, inferior em comparação à encontrada no estudo de Zanetone Filho (2019) de 40,08% e ao de Trolezi *et al.*, (2018) de 48,50%. Tal resultado pode ser explicado

pela grande quantidade de algas que atingiu o sistema, Dalu e Ndamba (2003) afirmam que quando uma grande quantidade de algas se decompõe, a concentração de sólidos suspensos tende a aumentar no efluente, o que pode estar relacionado com o aumento gradativo das concentrações de sólidos totais com o passar do tempo. Na Figura 37 é possível observar que houve um aumento de sólidos totais no polimento e no controle ao passar dos dias, ocorrência como descrita por Dalu e Ndamba (2003).

Figura 36 – Valores médios de ST do efluente, tanque de polimento e tanque de controle no período de 22 dias



Fonte: Autor.

Como esperado o valor média de ST para o efluente foi maior entre os demais, e o polimento apresentou menor valor, devido ao tratamento com as macrófitas.

5.2.6 Nitrato

Os resultados para nitrato estão apresentados na Tabela 40, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Os resultados para os valores de nitrato foram estatisticamente significativos para Tanque de controle (P8) e Polimento, como detalhado na Tabela 39.

Tabela 38 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de OD no sistema de polimento

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
Efluente (P4) e Polimento (PP)	2,00 E-01	ausente
Efluente (P4) e Tanque de controle (P8)	3,54 E-01	ausente
Tanque de controle (P8) e Polimento (PP)	4,26 E-02	presente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

Tabela 39 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão de nitrato no sistema de polimento

Pontos de amostragem	Valores (mg/L)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
EFLUENTE (P4)	5,2	1,5	2,93	$\pm 1,31$
POLIMENTO (PP)	4,9	0,97	2,27	$\pm 1,03$
CONTROLE (P8)	8	0,7	3,58	$\pm 2,02$

Fonte: Autor.

Na Tabela 41 são apresentados os resultados para eficiência de remoção do nitrato nos dois sistemas, polimento e controle.

Tabela 40 - Dados de máxima, mínima e média para eficiência de remoção do nitrato

Efluente como poluidor	Eficiência (%)		
	Máxima	Mínima	Média
POLIMENTO	70	0	30
CONTROLE	58	0	4

Fonte: Autor.

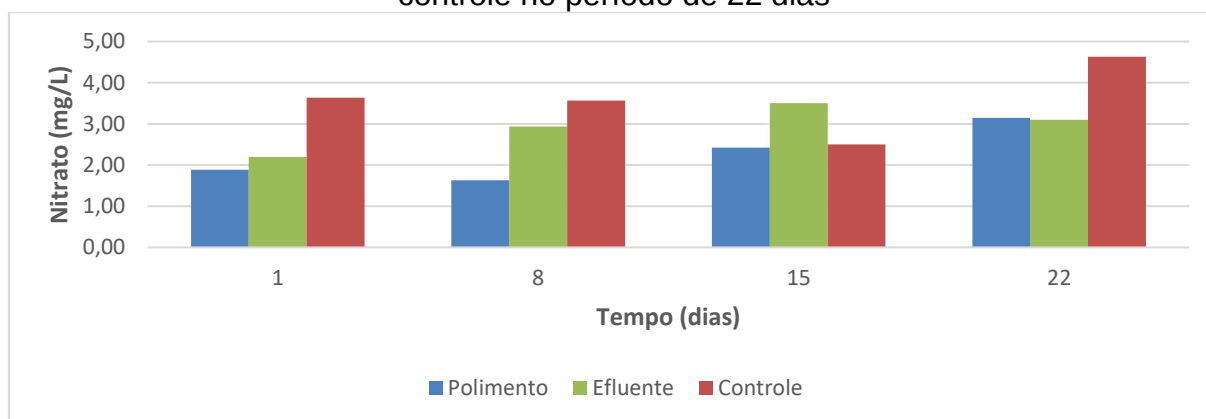
Neste presente trabalho a eficiência média de remoção de nitrato pelo polimento foi de 30%, valor próximo ao encontrado nos estudos de Zanetone Filho (2019) e Trolezi *et al.*, (2018) de 28,38% e 30,90% respectivamente.

No trabalho realizado por Dalu e Ndamba (2003), utilizando lagoas de estabilização de águas residuárias com aplicação da macrófita aquática lamnáceas da espécie *Lemna minor*, conseguiram uma eficiência de remoção máxima de 60%, valor que se aproxima ao resultado encontrado neste trabalho de 70%.

Na Figura 39 são apresentados os resultados do sistema de polimento para nitrato, observa-se que o polimento obteve a menor média, Carneiro *et al.*, (2015) explica que tal feito é devido a assimilação das macrófitas e também à ação de bactérias desnitrificantes, presentes nos biofilmes criados nas paredes dos tanques

ou mesmo nas raízes da *L.punctata*, as principais bactérias são dos gêneros Nitrosomonas e Nitrobacter, que realizam a conversão da amônia (NH_3) em nitrito (NO_2^-) e este em nitrato (NO_3^-). Ao consumir esses nutrientes, as plantas, juntamente com as bactérias, desempenham uma importante função na filtragem biológica da água, garantindo até mesmo uma condição adequada para a criação de peixes.

Figura 37 – Valores médios de Nitrato no efluente, tanque de polimento e tanque de controle no período de 22 dias



Fonte: Autor.

5.2.7 Demanda Química De Oxigênio (DQO)

Os resultados para DQO estão apresentados na Tabela 43, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Os valores de DQO do efluente (P4) e polimento (PP) apresentaram diferença significativa com p-valor de $7,43 \times 10^{-3}$, a Tabela 42 a seguir detalha para os outros dados.

Tabela 41 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de OD no sistema de polimento

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
Efluente (P4) e Polimento (PP)	7,43 E-03	presente
Efluente (P4) e Tanque de controle (P8)	6,60 E-01	ausente
Tanque de controle (P8) e Polimento (PP)	1,70 E-01	ausente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

Tabela 42 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão do DQO no sistema de polimento

Pontos de amostragem	Valores (mg/L)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
EFLUENTE (P4)	207	53	122	± 42
POLIMENTO (PP)	129	15	60	± 34
CONTROLE (P8)	391	19	106	± 100

Fonte: Autor.

Na Tabela 44 são apresentados os resultados para eficiência de remoção para DQO nos sistemas, polimento e controle.

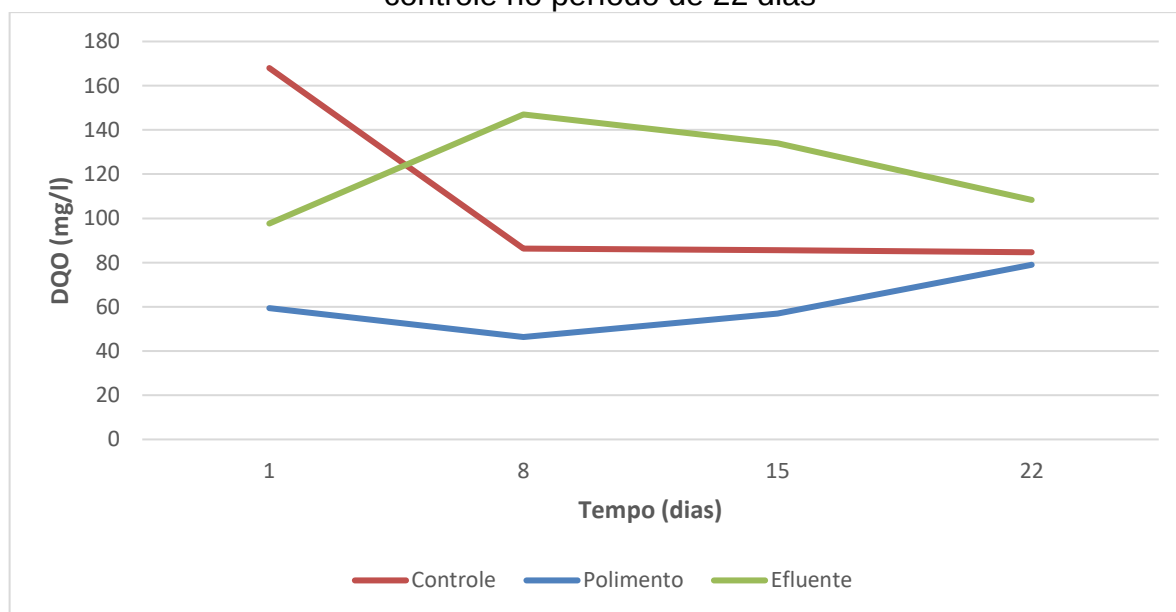
Tabela 43 – Dados de máxima, mínima e média para eficiência de remoção do DQO

Efluente como referência	Eficiência (%)		
	Máxima	Mínima	Média
Polimento	92	0	45
Controle	91	0	36

Fonte: Autor.

Na Figura 39 são apresentados os resultados do sistema de polimento para DQO no período de 22 dias.

Figura 38 -Valores médios de DQO do efluente, tanque de polimento e tanque de controle no período de 22 dias



Fonte: Autor.

Como esperado os valores de DQO para o efluente (P4) foram maiores, devido a carga orgânica proveniente dos excrementos dos peixes e sobra da ração. Assim

como os valores para controle (P8) foram maiores que o de polimento (PP). Nos resultados encontrados por Zanetone Filho (2019), o sistema obteve a média de eficiência de 59,08%, já o trabalho realizado por Garcia (2015) obteve a média de 54,45% em sistema de fluxo contínuo de efluente doméstico com a macrófita *L.punctata*.

Para Lima (2018), os resultados para remoção de matéria orgânica foram mais satisfatórios, obteve-se uma eficiência 74 % para o parâmetro em análise com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 10 dias, o trabalho foi realizado em lagoa de águas residuárias contando com a macrófita *Lemna minor* para polimento.

Mohedano (2004), em experimento utilizando a *L. punctata* para o polimento de efluente de piscicultura, obteve uma redução de 91% de DQO em 26 dias de TDH.

O presente trabalho apresentou redução máxima de DBO de 92%, superior ao encontrado por Gardia (2015) de 88,12% e para a média o valor de eficiência foi idêntico ao obtido por Trolezi *et al.*, (2018) de 45,40%, resultado satisfatório.

5.2.8 Demanda Bioquímica De Oxigênio (DBO)

Os resultados para DBO estão apresentados na Tabela 46, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Os resultados para os valores de DBO foram estatisticamente significativos, como detalhado na Tabela 45.

Tabela 44 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de OD no sistema de polimento

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
Efluente (P4) e Polimento (PP)	8,00 E-03	presente
Efluente (P4) e Tanque de controle (P8)	1,90 E-01	ausente
Tanque de controle (P8) e Polimento (PP)	2,50 E-02	presente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

Tabela 45 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão do DBO no sistema de polimento

Pontos de amostragem	Valores (mg/L)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
EFLUENTE (P4)	12,69	2,05	7,07	± 3,58
POLIMENTO (PP)	5,70	2,52	5,37	± 0,87
CONTROLE (P8)	12,21	1,09	4,89	± 2,75

Fonte: Autor.

Na Tabela 47 são apresentados os resultados para eficiência de remoção para DBO nos sistemas, polimento e controle.

Tabela 46 - Dados de máxima, mínima e média para Eficiência de remoção do DBO

Efluente como referência	Eficiência (%)		
	Máxima	Mínima	Média
Polimento	75	0	50
Controle	60	0	28

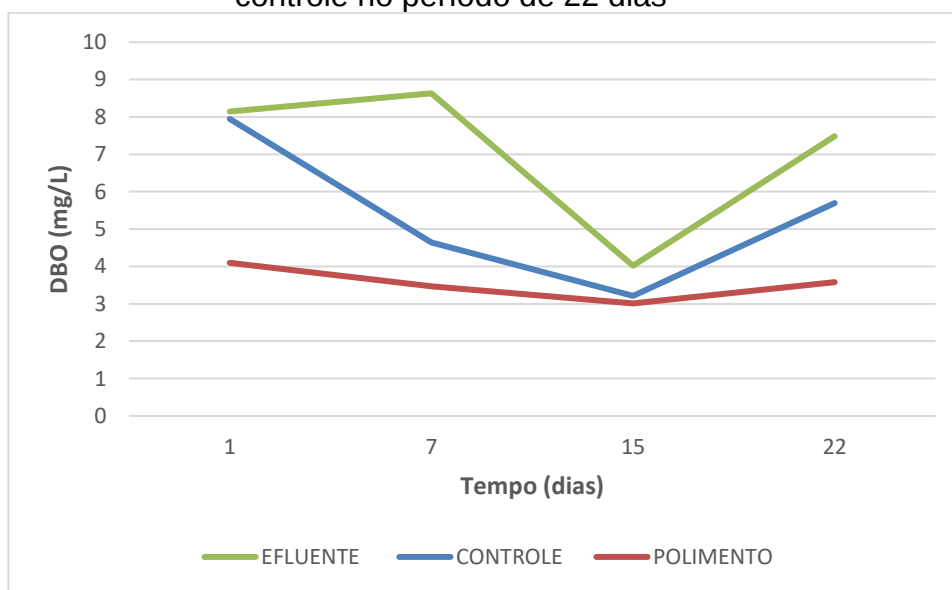
Fonte: Autor.

Assim como na análise do DQO, os resultados obtidos para esse parâmetro foram como desejados, a média de remoção para o polimento (PP) quando comparado ao do controle (P8) foi aproximadamente a 2x o valor deste, alcançando então o valor de 50% de eficiência. Assim como, o resultado foi próximo ao obtido por Zanetone Filho (2019) de 50,84% e inferior comparado aos trabalhos de Garcia (2015) que atingiu 67,74%, ao de Lima (2018) com 71% e Trolezi *et al.*, (2018) que obteve 61,30%.

Diante do exposto, nota-se que o sistema poderia ter assumido maiores valores para a remoção, sabe-se que, próximo à região das raízes das plantas é a área que apresenta maior concentração de OD, local que estimula a oxidação aeróbia da matéria orgânica e, portanto, a redução da DBO, porém, se houver a retirada de plantas e a redução do tempo de detenção, podem prejudicar a eficiência de remoção da matéria orgânica (DALU; NDAMBA, 2003). Apesar disso, durante o desenvolvimento da pesquisa, os tanques de criação das plantas foram habitados por uma praga de pulgão, evento que causou o enfraquecimento e eliminação das plantas, afetando o rendimento de depuração.

A Figura 40 a seguir mostra o comportamento do DBO no período de 22 dias, observa-se que no 15º dia houve um decaimento para os três constituintes do sistema. O motivo se deve ao decaimento da concentração do DBO do efluente, este que é proveniente do SRA. A Figura 34 apresenta a média de concentração de DBO para o SRA no período de 22 dias.

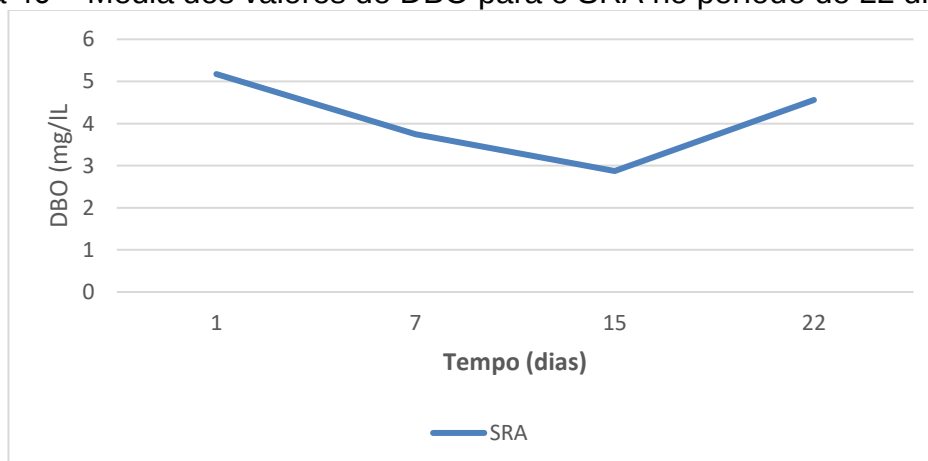
Figura 39 - Valores médios de DBO no efluente, tanque de polimento e tanque de controle no período de 22 dias



Fonte: Autor.

Observamos na figura 40 o decaimento da concentração de DBO no sistema ao 15º dia, sustentando o pressuposto que houve o decaimento devido o efluente sofrer o decaimento da concentração de DBO.

Figura 40 – Média dos valores de DBO para o SRA no período de 22 dias



Fonte: Autor.

De acordo com a resolução N° 357 do CONAMA, para as águas doces em que ocorre pesca ou cultivo de organismos e para fins de consumo intensivo, na categoria de classe dois, o valor exigido para o DBO é de até 5 mg/L, neste trabalho o sistema chegou a obter a mínima de 2,52 mg/L e a média de 5,37 mg/L. Como citado, o sistema poderia ter obtidos valores mais satisfatórios e em sequência, menor média, sendo possível se enquadrar na classificação.

5.2.9 Condutividade

Os resultados para condutividade estão apresentados na Tabela 49, compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para esse parâmetro. Os valores obtidos não foram estatisticamente significativos, os dados foram detalhados na Tabela 48 a seguir.

Tabela 47 - Dados de P-valor para os pontos de amostragem de OD no sistema de polimento

Pontos comparativos	P-valor	Diferença significativa
Efluente (P4) e Polimento (PP)	3,17 E-01	ausente
Efluente (P4) e Tanque de controle (P8)	1,55 E-01	ausente
Tanque de controle (P8) e Polimento (PP)	8,41 E-02	ausente

*parâmetros indicam diferenças significantes entre os valores quando, $p < 0,05$ (teste t)

Fonte: Autor.

Tabela 48 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão para condutividade no sistema de polimento

Pontos de amostragem	Valores ($\mu\text{S/cm}$)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
EFLUENTE (P4)	439,6	268,0	362,2	$\pm 59,4$
POLIMENTO (P4)	413,7	230,3	333,2	$\pm 57,9$
CONTROLE (P4)	396,6	233,4	318,8	$\pm 53,5$

Fonte: Autor.

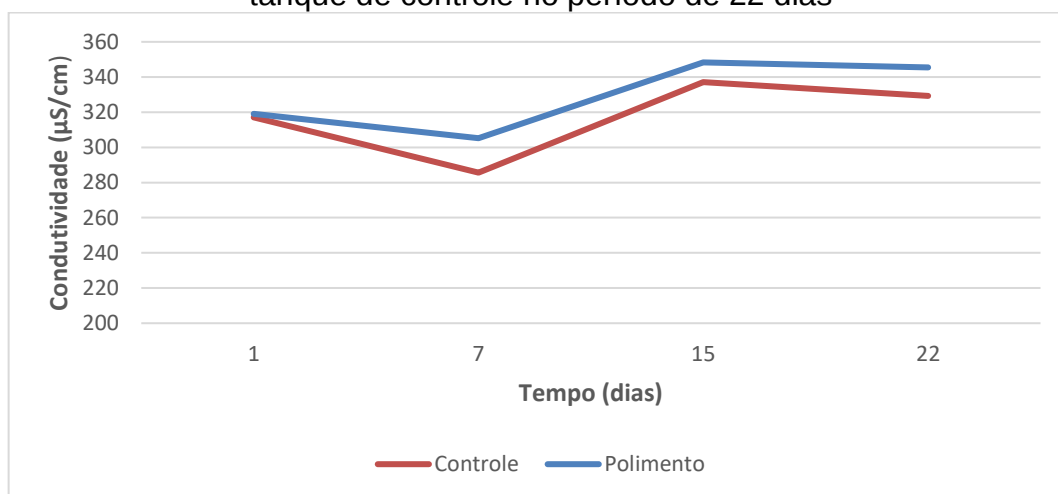
A condutividade é a indicação da quantidade de íons minerais presente na água, porém o parâmetro não fornece uma indicação de quais íons podem estar submersos (DALU; NDAMBA, 2003).

Anjos (2017), monitorou em sua pesquisa o polimento de efluente doméstico em tanque de recirculação habitado com macrófita *L.punctata*, para o parâmetro

obteve valor médio de 476 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Neste presente trabalho a média alcançada foi de 333,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Pela Figura 42, podemos observar o crescimento da condutividade ao longo do tempo, indicando elevada quantidade de matéria orgânica em decomposição (CARNEIRO *et al.*, 2015).

Figura 41 - Valores médios de condutividade no efluente, tanque de polimento e tanque de controle no período de 22 dias



Fonte: Autor.

5.2.10 Produção de Biomassa

Para a avaliação da produção de biomassa, as análises foram feitas em duas etapas. A primeira consistiu em avaliar a taxa de crescimento das macrófitas utilizando somente um tanque de estocagem, dividido em 4 partes, que teve como ponto de partida densidade superficial de 250 g/m^2 , com coleta e pesagem a cada três dias. A Tabela 50 a seguir compreende os valores de média, máxima, mínima e desvio padrão para a densidade de crescimento da macrófita nos estados seco e fresco.

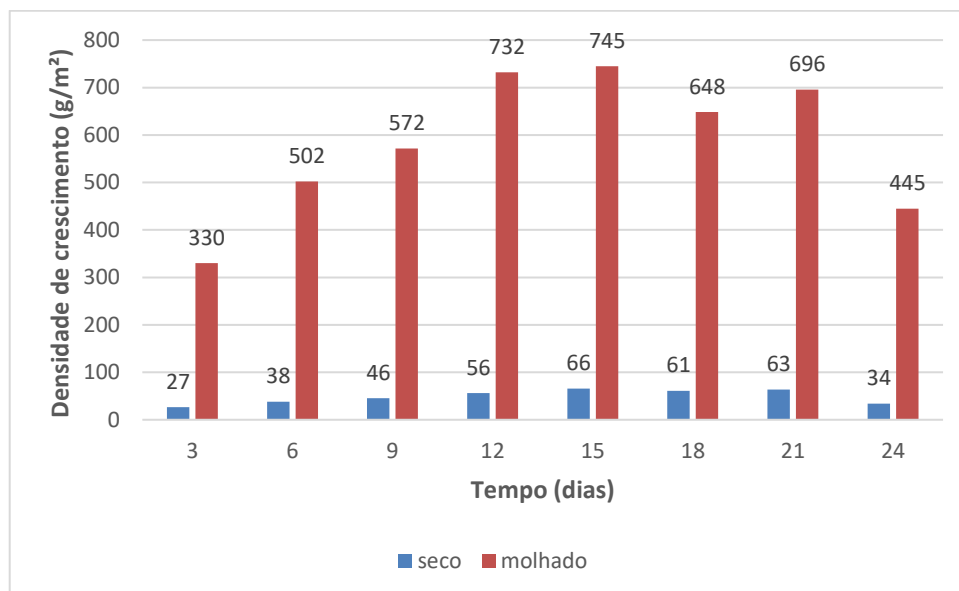
Tabela 49 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão para a densidade de crescimento

Situação	Valores (g/m^2)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
Fresca	745	330	584	$\pm 148,94$
Seca	66	27	49	$\pm 14,81$

Fonte: Autor.

Para a Figura 43, mostra os dados para a densidade de crescimento da macrófita no peso fresco e seco ao longo do período da primeira análise.

Figura 42- densidade de crescimento da macrófita para o peso fresco e seco ao longo do período da primeira análise.



Fonte: Autor.

Em seguida, a Tabela 51 apresenta os valores das taxas de crescimento específico e relativo no tanque de cultivo.

Tabela 50 - Taxas de Crescimento Específico e Relativo no tanque de estocagem

Taxa de crescimento	Dias								Média	Desv.P
	3	6	9	12	15	18	21	24		
Relativo (g/m².d)	8,94	6,33	5,08	4,67	4,39	3,39	3,02	1,42	4,65	± 2,27
Específico	0,44	0,33	0,25	0,24	0,20	0,14	0,13	0,07	0,22	± 0,12

Fonte: Autor.

Zanetoni Filho (2019), atingiu para o período de 6 dias de cultivo o maior valor médio de taxa de crescimento relativo, sendo de 3,17 g/m².d para uma densidade superficial inicial de 350 g/m². Após esse período de cultivo, observou-se uma diminuição no valor médio dos mesmos, com os menores valores sendo de 2,01 a 2,34 g/m². d, entre os períodos de cultivo de 15 a 24 dias. A menor taxa de crescimento relativo foi para o período de 18 dias, chegando a um valor de 1,90 g/m².d

Um estudo realizado por Chen *et al.*, (2018), utilizando esgoto doméstico como meio de cultivo de um sistema *wetland* mostrou que uma cultura de *L. punctata*, durante 16 dias, apresentou uma das mais altas taxa de crescimento, chegando a um valor médio de 6,04 g/m².d

A segunda etapa foi conjunta com a análise de polimento do efluente, realizado nos tanques 5, 6 e 7. Para cada período de cultivo (22 dias) realizado teve como ponto de partida densidade superficial de 250 g/m². A Tabela 52 a seguir apresenta a média dos valores obtidos de taxa de crescimento para 8, 15 e 22 dias de cultivo.

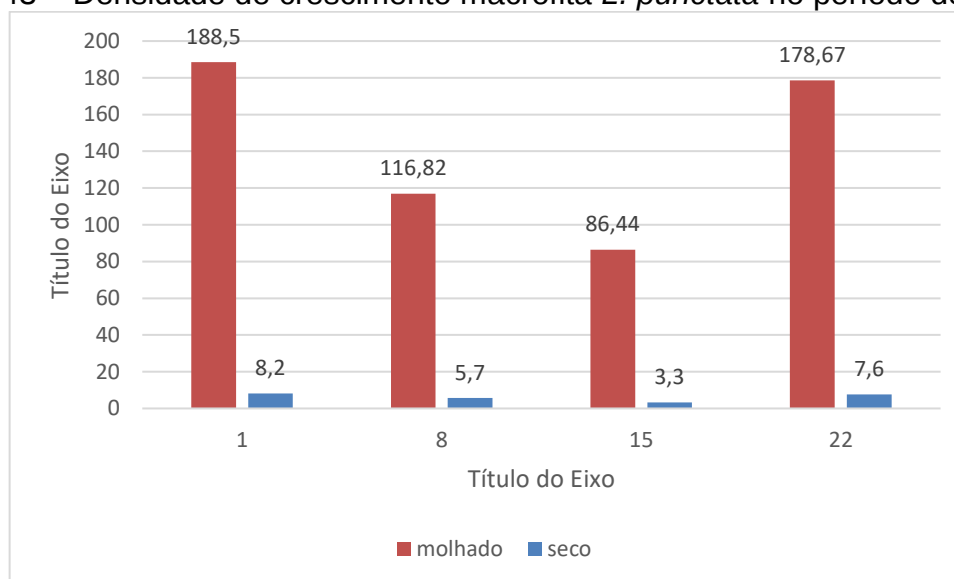
Tabela 51 - Dados de média, máxima, mínima e desvio padrão para a densidade de crescimento

Situação	Valores (g/m ²)			
	Máxima	Mínima	Média	Desv. P
Fresca	178,7	86,4	127,0	± 47
Seca	7,6	3,3	5,5	± 2,15

Fonte: Autor.

A Figura 44 mostra o a média da densidade de crescimento da biomassa obtida nos tanques de polimento, a massa de entrada foi de 188,5 g de *L. punctata*.

Figura 43 – Densidade de crescimento macrófita *L. punctata* no período de 22 dias



Fonte: Autor.

Em seguida, a Tabela 53 apresenta os valores das taxas de crescimento específico e relativo no tanque de cultivo.

Tabela 52 - Taxas de Crescimento Específico e Relativo no tanque de cultivo

Taxa de crescimento	Dias			Média	Desv.P
	8	15	22		
Relativo (g/m ² .d)	0,71	0,22	0,35	0,42	± 0,25
Específico	0,06	0,02	0,03	0,04	± 0,02

Fonte: Autor.

Observa-se que houve decaimento da densidade superficial, diferente da primeira análise que houve o crescimento no passar dos dias. Analisando os estudos citados anteriormente, não houve menção sobre tal ocorrência.

5.3 RESULTADOS COMPARATIVOS PARA OS DOIS METODOS DE TRATAMENTO

Os resultados apresentados a seguir são um comparativo entres os dois sistemas de tratamento. Para o SRA será analisando somente o tratamento do MABR (P2) sobre o efluente (P4) e para o sistema de tratamento com a *L.Punctata* será analisado o polimento (PP) com o efluente (P4).

5.3.1 Sólidos Totais

Os resultados para sólidos totais estão apresentados na Tabela 53 a seguir.

Tabela 53 – Análise comparativa de eficiência para sólidos totais

Referência	Eficiência (%)		
	Máxima	Mínima	Média
MABR sobre o efluente	50,3	3,0	20,8
Polimento sobre o efluente	35,7	0,0	20,7

Fonte: Autor.

Avaliando os sistemas, ambos obtiveram média aproximadamente iguais.

5.3.2 Nitrato

Os resultados para nitrato estão apresentados na Tabela 54 a seguir.

Tabela 54 - Análise comparativa de eficiência para nitrato

Referência	Eficiência (%)		
	Máxima	Mínima	Média
MABR sobre o efluente	79,6	0,0	51,6
Polimento sobre o efluente	70,1	0,0	29,9

Fonte: Autor.

Analizando os resultados apresentados, o MABR obteve a média de 51,6%, maior que o valor obtido pelas macrofitas de 29,9%, conclui-se que o SRA com MABR foi mais eficiente no tratamento para nitrato que o sistema de polimento com a *L.punctata*.

5.3.3 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Os resultados para DQO estão apresentados na Tabela 55 a seguir.

Tabela 55 - Análise comparativa de eficiência para DQO

Referência	Eficiência (%)		
	Máxima	Mínima	Média
MABR sobre o efluente	95,6	0,0	67,0
Polimento sobre o efluente	92,1	0,0	45,4

Fonte: Autor.

Assim como no nitrato, o resultado apresentado pelo MABR foi maior que o apresentado pelas macrofitas, com média de 67% e 45,4% respectivamente, conclui-se que o SRA com MABR foi mais eficiente no tratamento para DQO que o sistema de polimento com a *L.punctata*.

5.3.4 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Os resultados para DBO totais estão apresentados na Tabela 56 a seguir.

Tabela 56 - Análise comparativa de eficiência para DBO

Referência	Eficiência (%)		
	Máxima	Mínima	Média
MABR sobre o efluente	92,3	0,0	57,1
Polimento sobre o efluente	75,4	0,0	51,0

Fonte: Autor.

Por fim, para o tratamento de DBO, o SRA com MABR também foi mais eficiente que o sistema de polimento com a *L.punctata*, apresentando a média de 57% e 51% respectivamente.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos durante a avaliação do SRA permitem concluir que:

- Os parâmetros básicos como pH, temperatura, OD, condutividade e turbidez para o tanque de cultivo dos peixes obtiveram as médias de 7, 27,8°C, 5,9 mg/l, 346,4 $\mu\text{S/cm}$ e 4,76 μT respectivamente, dentro dos intervalos considerados ideais para a sobrevivência dos peixes, segundo a revisão bibliográfica.
- A densidade de estocagem do pescado inicial foi de aproximadamente 13,75 kg/m^3 e final de 15,40 kg/m^3 , resultando em um crescimento de 12,2% em 63 dias.
- A eficiência de remoção do DBO para o SRA foi de 40% e média de 3,90 mg/L para o tanque, encontrando se dentro dos padrões de lançamento de efluentes segundo a legislação Brasileira resolução N° 357 do CONAMA, que determina o valor limite de 5mg/L.
- Para o nitrato a média foi de 1,56 mg/L e para o ST a média foi 323 mg/L, dentro do limite aceitável para os padrões de lançamento de efluentes segundo resolução N° 357 do CONAMA, que determina os de valores de limite de 10 mg/L e 500 mg/L, respectivamente.

Os resultados obtidos durante a avaliação do Sistema de Polimento permitem concluir que:

- As médias de concentração para os parâmetros OD e DBO no tanque de polimento foram 4,9 mg/L e 5,37 mg/L respectivamente, valores próximos dos limites de lançamento de efluentes segundo a resolução N° 357 do CONAMA.
- Para o nitrato a média foi de 2,27 mg/L, valor dentro do limite aceitável para os padrões de lançamento de efluentes segundo resolução N° 357 do CONAMA, que determina os de valores de limite de 10 mg/L.
- Quanto ao PH, obteve a média de 8,09 , valor dentro do limite aceitável para os padrões de lançamento de efluentes segundo resolução N° 357 do CONAMA, que determina o intervalo de 6 a 9.

- Quanto a turbidez, obteve a média de 124,08 μT , resultado maior do existente na bibliografia. A proliferação de algas prejudicou a leitura e assim não obtendo um resultado satisfatório.
- Para a temperatura, no tanque de polimento o sombreamento da macrófita foi importante para a proteção de insolação, obtendo a média de 30,5°C menor que o tanque de controle.

Quanto a eficiência dos tratamentos, os resultados apresentados pelo SRA com MABR foram mais satisfatórios que o sistema de polimento com a macrofita *L.punctata*.

7 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Com base nos resultados recomenda-se que para estudos futuros sejam feitas análises com mais parâmetros de qualidade como: Amônia, Nitrogênio Total, Nitrogênio Amoniacal, Nitrito e Fosforo Total, para avaliar com mais objetividade a eficiência de tratamento das macrófita.

Recomenda-se verificar a influência da recirculação no meio de cultivo para avaliação das taxas de crescimento, produção de biomassa e eficiência de tratamento

Recomenda-se novos estudos analisando a influência da densidade superficial adotada para avaliação da eficiência de tratamento dos tanques e características operacionais no crescimento, também como a carga de nutrientes.

Recomenda-se também realizar estudos microbiológicos para avaliar as características e o crescimento dos microrganismos presentes no biofilme, e avaliar o desempenho do reator MABR associado a outros tipos de pré-tratamentos diferentes do DC.

Recomenda-se realizar estudo sobre a possibilidade de criação de um sistema aguaponico, associando o SRA com uma parte constituinte de macrófitas ou outra planta.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. C. R. **Sistema de recirculação para aquicultura com reator de biofilme aerado em membrana na produção intensiva de tilápia**. 2020. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2020.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. American Water Works Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th. ed. [S. l.], 2005.

ANDRADE, D. R; YASUI, G. S. O manejo da reprodução natural e artificial e sua importância na produção de peixes no brasil. **Revista Brasileira Reprodução Animal**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 166-172, 2003.

ASAE. **Nutrient removal from swine lagoon liquid by lemna minor 8627**. Niles Road: American Society Of Agricultural And Biological Engineers, 2002. 45 v. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=9953>. Acesso em: 10 abr. 2020.

ASSUNÇÃO, A. W. A. **Tratamento de efluentes de piscicultura utilizando sistema tipo wetland povoado com espécies de macrófitas aquáticas de três tipos ecológicos diferentes**. 2011. 64 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Centro de Aquicultura, Jaboticabal, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/86737>. Acesso em: 30 ago. 2019.

AZEVEDO, P.A. *et al.* Estimation of waste outputs by a rainbow trout cage farm using a nutritional approach and monitoring of lake water quality. **Aquaculture**, Amsterdam, v. 311, p. 175-186, 2011.

BARNARD, James L. Biological Denitrification. **Water Pollution Control**, London, v. 6, n. 72, p. 705-720, jan. 1973. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/292639275_Nutrient_removal_in_biological_systems. Acesso em: 30 ago. 2019.

BIAGIONI, R. C; **Desempenho produtivo e qualidade da água em um sistema de aquaponia contendo tilápias em diferentes densidades de cultivo, alfaces e macrófitas aquáticas**. 2021. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Planejamento e Uso de Recursos Renováveis, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/14959/TESE%20Renata%20Cassemiro%20Biagioni.pdf?sequence=1>. Acesso em: 07 jan. 2022.

BURATTI, Franca M. *et al.* Cyanotoxins: producing organisms, occurrence, toxicity, mechanism of action and human health toxicological risk evaluation. **Archives of Toxicology**, New York, v. 91, n. 3, p.1049-1130, 21 jan. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00204-016-1913-6>.

CARNEIRO, P. C. F. *et al.* **Produção integrada de peixes e vegetais em aquaponia. Comunicado Técnico 189.** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 23 p. Disponível em: <https://hortelao.com.br/wp-content/uploads/2018/10/33891281.pdf> Acesso em: 10 dez. 2020.

CASTAGNOLLI, N. **Aqüicultura para o ano 2000.** Brasília: CNPq, 1996. 95 p.

CEDERGREEN, Nina; MADSEN, Tom Vindbaek. Nitrogen uptake by the floating macrophyte *Lemna minor*. **New Phytologist**, Cambridge, v. 155, n. 2, p. 285-292, ago. 2002. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00463.x>.

CETESB (São Paulo). **Manual de cianobactérias planctônicas:** legislação, orientações para o monitoramento e aspectos ambientais. Disponível também em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em: 10 março. 2019.

CHENG, Jiayang *et al.* Nutrient recovery from swine lagoon water by *Spirodela punctata*. **Bioresource Technology**, Essex, v. 81, n. 1, p. 81-85, jan. 2002. DOI: BV. [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00098-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00098-0).

CHEN, G. *et al.* Duckweed systems for eutrophic water purification through converting wastewater nutrients to high-starch biomass: comparative evaluation of three different genera (*Spirodela polyrhiza*, *Lemna minor* and *Landoltia punctata*) in monoculture or polyculture. **Rsc Advances**, Cambridge, v. 8, n. 32, p.17927-17937, 2018.

CHENG, JAY J.; STOMP, ANNE-M. Growing Duckweed to Recover Nutrients from Wastewaters and for Production of Fuel Ethanol and Animal Feed. **Clean - Soil, Air, Water**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 17-26, jan. 2009. <http://dx.doi.org/10.1002/clen.200800210>.

CYRINO, E.C. *et al.* Tópicos Especiais em Piscicultura de Água Doce Tropical Intensiva. **Sociedade Brasileira de Aqüicultura e Biologia Aquática (Aquabio)**. Jaboticabal, 2010.

DALU, J. M.; NDAMBA, J. Duckweed based wastewater stabilization ponds for wastewater treatment (a low cost technology for small urban areas in Zimbabwe). **Physics and Chemistry of The Earth**, Oxford, v. 28, n. 20-27, p.1147-1160, jan. 2003.

EKPERUSI, A. O. *et al.* Application of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of chemicals in the environment: state and future perspective. : State and future perspective. **Chemosphere**, Oxford, v. 223, p. 285-309, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.025>.

ELER, Márcia Noélia; MILLANI, Thiago José. Métodos de estudos de sustentabilidade aplicados a aquicultura. **Revista Brasileira de Zootecnia**, São Carlos, v. 36, p. 33-44, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Pesca e aquicultura**. Nota técnica. Portal Embrapa (Versão 3.59.4) p01, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-pesca-e-aquicultura/nota-tecnica>. Acesso em: 29 abr. 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Aquicultura: manejo e aproveitamento de efluentes. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, nov. 2013. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/972692/1/Doc95.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2020.

ERNST, B *et al.* Physiological stress and pathology in European whitefish (*Coregonus lavaretus*) induced by subchronic exposure to environmentally relevant densities of *Planktothrix rubescens*. **Aquatic Toxicology**, Amsterdam, v. 82, n. 1, p.15-26, 20 abr. 2007. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.aquatox.2007.01.007>.

FANG, Yun Ying *et al.* Ammonium and Nitrate Uptake by the Floating Plant *Landoltia punctata*. **Annals of Botany**, London, v. 99, n. 2, p. 365-370, 4 jan. 2007. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcl264>.

FREDDI, L. A.; MATSUMOTO, T. Análise da remoção de nitrogênio de um reator de biofilme aerado em membrana. 2017. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL (ABES), 2019. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. 2018. The State of World Fisheries and Aquaculture. 227 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture. 243p.

GARCIA, D. C.; **Avaliação de lagoas de lemnáceas no polimento de esgoto doméstico e produção de biomassa**. 2015. 75 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/123655>.

HENRY-SILVA, G. G.; CAMARGO, A. F. M. Impacto das atividades de aquicultura e sistemas de tratamento de efluentes com macrófitas aquáticas – relato de caso. **Boletim do Instituto de Pesca**, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 163-173, nov. 2018. ISSN 1678-2305. Disponível em: <https://www.pesca.sp.gov.br/boletim/index.php/bip/article/view/782>. Acesso em: 29 abr. 2020.

HENRY-SILVA, G. G.; CAMARGO, A. F. M. Tratamento de efluentes de carcinicultura por macrófitas aquáticas flutuantes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 37, n. 2, p. 181-188, fev. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-35982008000200002>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Pesquisa da Pecuária 2020. Disponível em : <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3940#resultado> Acesso em: 10 out. 2020.

KARNA, D.; VISVANATHAN C. From conventional activated sludge process to membrane-aerated biofilm reactors: scope, applications, and challenges. *In*: BUI, XT., CHIEMCHAISRI, C.; FUJIOKA, T.; VARJANI, S. (ed) **Water and wastewater treatment technologies: energy, environment, and sustainability**. Singapore: Springer, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-3259-3_12

KIRCHNER, R. M; Análise da produção e comercialização do pescado no Brasil. Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, RR. **Revista Agro@mbiente On-line**, [s. l.], v. 10, nº 2, p. 168 - 177, abril - junho, 2016.

KÖRNER, S.; LYATUU, G. B.; VERMAAT, J. E. The influence of *Lemna gibba* L. on the degradation of organic material in duckweed-covered domestic wastewater. **Water Research**, Londres, v.32, n. 10, p. 3092-3098, 1998.

KUBITZA, F. Qualidade da água na produção de peixes: parte I. **Panorama da Aquicultura**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 45, p. 36-41, 1998.

KUBITZA, F. Tilápias: parte I. **Panorama da aquicultura**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 59, p. 44-53, maio/junho, 2000a.

KUBITZA, F. Tilápias: Parte II. **Panorama da aquicultura**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 60, p. 31-53, julho/agosto, 2000b.

KUBITZA, F. Tilápia em água salobra e salgada: uma boa alternativa de cultivo para estuários e viveiros litorâneos. **Panorama da aquicultura**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 88, p. 14-18, março/abril, 2005.

KUBITZA, F. A evolução da tilapicultura no Brasil: produção e mercado. **Panorama da Aquicultura**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 76, mar./abr. 2015.

LANDOLT, E. **Investigação bio sistemática sobre a família das lentilhas: a família das Lemnaceae: um estudo de monografia**. Instituto Geobotanischen ETH, Stiftung Rubel, Zurichbergstrasse, 1986.

LEBLEBICI, Z. *et al.* Growth and Lead Accumulation Capacity of *Lemna minor* and *Spirodela polyrrhiza* (Lemnaceae): interactions with nutrient enrichment. : Interactions with Nutrient Enrichment. **Water, Air, & Soil Pollution**, [s. l.], v. 214, n. 1-4, p. 175-184, 13 abr. 2010. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-010-0413-1>.

LIU, Y. *et al.* **The effects of photoperiod and nutrition on duckweed (*Landoltia punctata*) growth and starch accumulation**. China: Industrial Crops And Products, 2018. 115 v. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669018301389#bib0205>. Acesso em: 09 abr. 2020.

LIU, G. *et al.* Reproductive and endocrine-disrupting toxicity of *Microcystis aeruginosa* in female zebrafish. **Chemosphere**, Oxford, v. 192, p.289-296, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.167>.

LU, D. *et al.* Recent advances in membrane aerated biofilm reactors. **Critical Reviews In Environmental Science And Technology**, [s. l.], v. 51, n. 7, p. 649-703, 9 mar. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10643389.2020.1734432>.

NOGUEIRA, S. C. **O Sistema Agroindustrial de Tilápias na Região Noroeste do Estado de São Paulo**: características das transações e formas de coordenação. 2008. 126 f. Tese (Doutorado em Ciências Sociais, Desenvolvimento e Agricultura). Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Departamento de Desenvolvimento, Agricultura e Sociedade, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MAIGUAL-ENRIQUEZ, Y. A. **Utilização de reator aeróbio de leiteo fluidizado com circulação em tubos concêntricos no tratamento de águas residuárias da produção intensiva de tilapia com recirculação da água tratada**. 2011. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

MARIE, B. *et al.* Effects of a toxic cyanobacterial bloom (*Planktothrix agardhii*) on fish: Insights from histopathological and quantitative proteomic assessments following the oral exposure of medaka fish (*Oryzias latipes*). **Aquatic Toxicology**, Amsterdam, v. 114-115, p. 39-48, jun. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquatox.2012.02.008>.

MARTINEZ, C.B.R. *et al.* **Toxicidade e efeitos da amônia em peixes neotropicais**. In: CYRINO, J. E. P.; URBINATI, E. C. Tópicos especiais em biologia aquática e aquicultura. Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática, 2006. p. 81-95

MATOS, F. T. *et al.* **Monitoramento de qualidade de água das atividades aquícolas em reservatórios continentais brasileiros**. Palmas: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/157277/1/CNPASA-2016-dc32.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2019.

MOHEDANO, R. A. **Uso de macrófitas lemnáceas (*Landoltia punctata*) no polimento e valorização do efluente de suinocultura e na fixação de carbono** **Mostrar registro completo**. 2012. 270 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/94053>. Acesso em: 11 ago. 2021.

MOHEDANO, R. A. **Tratamento de efluente e produção de alimentos, em cultivos de tilápias (*Oreochromis niloticus*), através da macrófita aquática *Lemna valvidiana* (Lemnaceae)**: uma contribuição para a sustentabilidade da aquicultura. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

MOHEDANO, R. A. *et al.* High nutrient removal rate from swine wastes and protein biomass production by full-scale duckweed ponds. **Bioresource Technology**, Essex, v. 112, p.98-104, maio 2012.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário**: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola. São Paulo: Blucher, 2011.

ORON, Gideon. Duckweed culture for wastewater renovation and biomass production. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 26, n. 1-2, p. 27-40, set. 1994.

RESENDE, Emiko Kawakami de. Pesquisa em rede em aquicultura: bases tecnológicas para o desenvolvimento sustentável da aquicultura no Brasil. *aquabrazil*. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 38, p. 52-57, jul. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-35982009001300006>.

SALMASO, Nico *et al.* Strict coupling between the development of *Planktothrix rubescens* and microcystin content in two nearby lakes south of the Alps (lakes Garda and Ledro). **Annales de Limnologie - International Journal Of Limnology**, Paris, v. 49, n. 4, p.309-318, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/limn/2013064>.

SASMAZ, M. *et al.* The potential of *Lemna gibba* L. and *Lemna minor* L. to remove Cu, Pb, Zn, and As in gallery water in a mining area in Keban, Turkey. **Journal of Environmental Management**, London, v. 163, p. 246-253, nov. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.029>.

SCHULTER, E. S; VIEIRA FILHO, J. E. R. **Evolução da Piscicultura no Brasil**: diagnóstico e desenvolvimento da cadeia produtiva de tilápia. Rio de Janeiro: Ipea, 2017.

SCHULTER, E. P.; VIEIRA FILHO, J. E. R. Desenvolvimento E Potencial Da Tilapicultura No Brasil. **Revista de Economia e Agronegócio**, Viçosa, MG, v. 16, n. 2, p. 177-201, 2018. DOI: 10.25070/rea.v16i2.554. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/rea/article/view/7830>. Acesso em: 19 jan. 2021.

SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS – SEBRAE. **Criação de tilápias em tanques escavados**. Natal: Sebrae, 2014.

SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS – SEBRAE. Criando modelo de negócios sustentáveis: piscicultura. Distrito Federal, 2016. Disponível em: [https://bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/f9ac70e2eed74a5977a2505a29a19f97/\\$File/9969.pdf](https://bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/f9ac70e2eed74a5977a2505a29a19f97/$File/9969.pdf). Acesso em: 18 maio 2020.

SIQUEIRA, T. V. AQUICULTURA: A NOVA FRONTEIRA PARA AUMENTAR A PRODUÇÃO MUNDIAL DE ALIMENTOS DE FORMA SUSTENTÁVEL. **Ipea**: boletim regional, urbano e ambiental, Brasil, v. 17, p.53-60, 2017. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/8142/1/BRU_n17_Aquicultura.pdf. Acesso em: 02 nov. 2019.

SICHE, Raul *et al.* Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Revista Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 10, n. 2, p. 137-148, 2007.

SOMERVILLE, C *et al.* Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. **FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper**, n. 589, p. I, 2014. Disponível em: Acesso em: 28 nov. 2021.

SOUSA, E. Ceci. P. M. de; TEIXEIRA FILHO, ALCIADES, R. **Piscicultura fundamental**. São Paulo: Ampub Comercial, 1985.

SOUZA, R. A. L. de. **Apostila de manejo e qualidade da água na piscicultura**. Brasília, DF: Eletronorte, 2000. 25 p.

SOUTO, G. D. B. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros: estudo de remoção de nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar (“stripping”)**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

STOMP, Anne-marie. The duckweeds: a valuable plant for biomanufacturing. : A valuable plant for biomanufacturing. **Biotechnology Annual Review**, [s. l.], p. 69-99, 2005. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s1387-2656\(05\)11002-3](http://dx.doi.org/10.1016/s1387-2656(05)11002-3).

SU, H. *et al.* Use of Duckweed (*Landoltia punctata*) as a Fermentation Substrate for the Production of Higher Alcohols as Biofuels. **Energy & Fuels**, Washington, v. 28, n. 5, p. 3206-3216, 28 abr. 2014. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ef500335h>.

QIAN, H. *et al.* Effects of different concentrations of *Microcystis aeruginosa* on the intestinal microbiota and immunity of zebrafish (*Danio rerio*). **Chemosphere**, Oxford, v. 214, p.579-586, jan. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.156>.

TROLEZI, L. M *et al.* Polimento de esgoto doméstico, em uma lagoa de *landoltia punctata*, com recirculação do efluente e reaproveitamento da biomassa para compostagem. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 29., 2018, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo: Aesabesp, 2019. p. 1-12.

TYSON, R.V. *et al.* Reconciling water quality parameters impacting nitrification in aquaponics: the pH levels. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society, Flórida**, v. 117, n. 1, p. 79-83. 2004. Disponível em: . Acesso em: 30 nov. 2021

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 632 p.

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Lagos e reservatórios – Qualidade da água: O impacto da eutrofização**. (tradução), v. 3. São Paulo: UNEP/IETC/ILEC/IIIE, 2002.

URBINATI, E. C.; CARNEIRO, P. C. F. Práticas de manejo e estresse dos peixes em piscicultura. **Tópicos especiais em piscicultura de água doce tropical intensiva**. 171-193, 2004.

VERMA, R.; SUTHAR, S. Synchronized urban wastewater treatment and biomass production using duckweed *Lemna gibba* L. **Ecological Engineering**, Oxford, v. 64, p. 337-343, mar. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.055>.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Editora da Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 243 p.

WARD, Mary *et al.* Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. **International Journal of Environmental Research And Public Health**, [s. l.], v. 15, n. 7, p.1557-1557, 23 jul. 2018. MDPI AG. DOI <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph15071557>.

ZANETONI FILHO, J. A. **Cultivo de *landoltia punctata* na remoção de desreguladores endócrinos e no polimento de esgoto sanitário em lagoa com recirculação**. 2019. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2019.

ZEZULKA, Stepán *et al.* **Lemna minor exposed to fluoranthene: Growth, biochemical, physiological and histochemical changes**. Universidade Masaryk: Toxicologia Aquática, 2013. 141 v. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166445X1300132X?via%3Di> hub. Acesso em: 09 abr. 2020.

ZHAO, Zhao *et al.* The influence of duckweed species diversity on biomass productivity and nutrient removal efficiency in swine wastewater. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 167, p. 383-389, set. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.031>.

ZHAOa,Y. *et al.* Pilot-scale comparison of four duckweed strains from different genera for potential application in nutrient recovery from wastewater and valuable biomass production. **Plant Biology**, Chichester, v. 17, p. 82-90, 18 jun. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/plb.12204>

ZOPPAS, F. M.; BERNARDES, A. M.; MENEGUZZI, Á. Parâmetros operacionais na remoção biológica de nitrogênio de águas por nitrificação e desnitrificação simultânea. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 21, n. 1, p.29-42, mar. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41520201600100134682>.