



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades

unesp 


Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

DÉBORA FERNANDA SANTOS DA SILVA

**SEPARAÇÃO DE MICROALGAS CULTIVADAS EM ÁGUA NEGRA
DIGERIDA ANAEROBIAMENTE POR MEIO DA
COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO UTILIZANDO A
MORINGA OLEIFERA LAM COMO COAGULANTE NATURAL**

Bauru
2019



DÉBORA FERNANDA SANTOS DA SILVA

**SEPARAÇÃO DE MICROALGAS CULTIVADAS EM ÁGUA NEGRA
DIGERIDA ANAEROBIAMENTE POR MEIO DA
COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO UTILIZANDO A
MORINGA OLEIFERA LAM COMO COAGULANTE NATURAL**

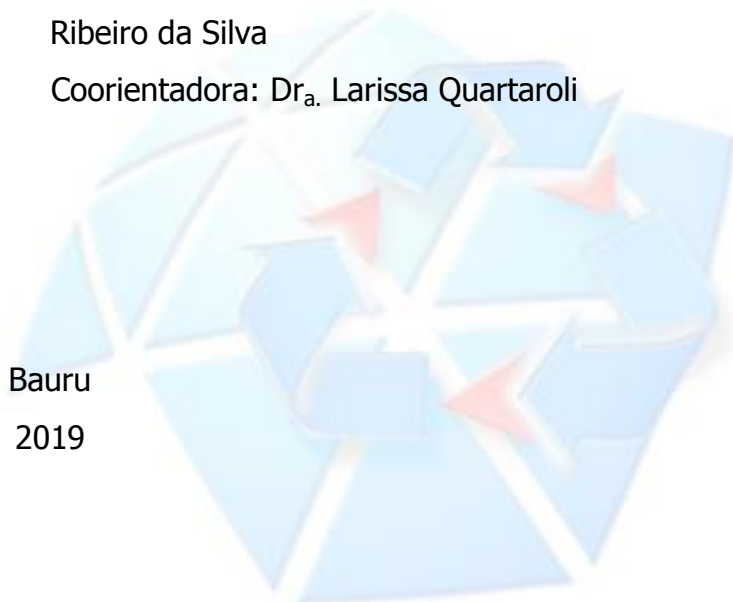
Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique Ribeiro da Silva

Coorientadora: Dr^a. Larissa Quartaroli

Bauru

2019



Silva, Débora Fernanda Santos da.

Separação de microalgas cultivadas em água negra digerida anaerobiamente por meio da coagulação/floculação e sedimentação utilizando a *Moringa Oleifera* Lam como coagulante natural / Débora Fernanda Santos da Silva, 2019

140 f. : il.

Orientador: Gustavo Henrique Ribeiro da Silva


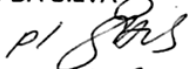

Coorientadora: Larissa Quartaroli

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Microalgas. 2. Nutrientes. 3. Coagulantes naturais. 4. *Moringa Oleifera* Lam. 5. Fertilizante orgânico. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de DÉBORA FERNANDA SANTOS DA SILVA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 12 dias do mês de agosto do ano de 2019, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE RIBEIRO DA SILVA - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP - Bauru, Prof. Dr. RODRIGO BRAGA MORUZZI do(a) Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento - DEPLAN / Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) de Rio Claro – UNESP, Prof. Dr. ANDRE LUIZ DE OLIVEIRA do(a) Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de Uberlândia, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de DÉBORA FERNANDA SANTOS DA SILVA, intitulada **SEPARAÇÃO DE MICROALGAS CULTIVADAS EM ÁGUA NEGRA DIGERIDA ANAEROBICAMENTE POR MEIO DA COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO UTILIZANDO A MORINGA OLEIFERA LAM COMO COAGULANTE NATURAL**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE RIBEIRO DA SILVA 
Prof. Dr. RODRIGO BRAGA MORUZZI 
Prof. Dr. ANDRE LUIZ DE OLIVEIRA 

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA:
DÉBORA FERNANDA SANTOS DA SILVA

DE: "SEPARAÇÃO DE MICROALGAS CULTIVADAS EM ÁGUA NEGRA Digerida ANAEROBICAMENTE
POR MEIO DA COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO UTILIZANDO A MORINGA OLEIFERA
LAM COMO COAGULANTE NATURAL."

PARA:

*Separação de Microalgas cultivadas em Água Negra Digerida
Anaerobicamente por Meio de Coagulação/Floculação e Sedimentação
Utilizando a Moringa Oleifera Lam como Coagulante Natural*

Bauru, 12 de agosto de 2019.


Prof. Dr. Gustavo Henrique Ribeiro da Silva
Orientador

AGRADECIMENTOS

Á Deus, que mediante a leitura de sua palavra sagrada me contribuiu com muita fé, força e esperança, me guiando a cada passo, sentimento e vitória. Ès o Senhor da minha vida.

Á minha família, especialmente aos meus pais, José Neto e Luzineth, por todo apoio emocional e financeiro, vocês são meus exemplos de dedicação, respeito e amor. Minhas irmãs, Bruna e Ângela, no qual encontrei alegria, amor e força para continuar essa trajetória. Assim como meu sobrinho Guilherme, que mediante a 8 anos de idade, me mostrou o que é amar a vida, o que é ser perseverante em meio às dificuldades, meu anjinho enviado por Deus.

Ao meu noivo Wilian Aprígio por todo incentivo, paciência, oração e compreensão. Pela sua presença em cada etapa, que mesmo em períodos de dificuldades, sempre me apresentou palavras de conforto e esperança, grande parte desse trabalho contou com seu apoio. Deixo meus agradecimentos aos seus pais, Ademir e Maria, meus pais de coração.

Ao meu orientador Prof. Dr. Gustavo Ribeiro e minha coorientadora Profa. Dra. Larissa Quartaroli, por toda atenção, profissionalismo e amizade firmada durante esse processo. A ação conjunta dos professores foi fundamental para meu crescimento durante todo o mestrado. Minha eterna gratidão e admiração por vocês.

Á CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de mestrado.

Á FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo financiamento do Projeto de Pesquisa Regular nº 2013/50351-4.

Ao técnico do Laboratório de Hidráulica e Saneamento, Glauco, e aos funcionários do DAE (Departamento de Água e Esgoto de Bauru) Elieni, Rafael e Gabriel, por todo apoio no desenvolvimento das metodologias referente às análises químicas. Grata pela bela amizade que firmamos, no qual expresso toda minha gratidão.

Aos funcionários da UNESP (Universidade Estadual Paulista – “Júlio Mesquita Filho”) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental: Maria, Alessandra, Célia,

Mauro, Patrícia, Larissa, Israel, Gustavo e Thiago, todos vocês foram fundamentais neste processo.

Às funcionárias Geraci e Sueli, pelas conversas e risadas diárias tanto no laboratório quanto na biblioteca, vocês transmitiam alegria ao meu dia.

Aos funcionários, professores e companheiros de projeto do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), destaco a técnica responsável Maria Teresa, aos alunos Hiago e Luan que me apoiaram na coleta e armazenamento do efluente, assim como a Letícia e a Nathalie pelo apoio de algumas análises.

Aos meus amigos e alunos de iniciação científica José Afonso e Leonardo Rosa, por todo auxílio, paciência, dedicação e amizade.

Aos amigos feitos durante o mestrado, os quais me apoiaram nessa caminhada: Jaqueline, Juliana, Ana Maria, José Eduardo, Mariana, Milena, Antônio e Hugo.

Às minhas amigas e vizinhas: Débora Ramos e Patrícia Osório, pela amizade e companheirismo nos momentos pós-laboratório.

Ao Prof. Dr. Ricardo Molto, que sempre me incentivou ingressar ao mestrado durante toda minha graduação. Assim como aos professores Rodrigo Moruzzi, Caio Nogueira e Luciano Souza por toda contribuição cedida para a elaboração desta pesquisa.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram (e são muitos) de alguma forma para que esse trabalho fosse concluído e que fizeram parte da minha vida durante o mestrado. A todos vocês o meu MUITO OBRIGADA!

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.”
(Marthin Luther King)

“O único limite para a nossa realização do amanhã serão as nossas dúvidas de hoje. Então avancemos com força e fé ativa.”
(Franklin D. Roosevelt)

RESUMO

SILVA, D. F. S. **Separação de microalgas cultivadas em água negra digerida anaerobiamente por meio da coagulação/floculação e sedimentação utilizando a *Moringa Oleifera* Lam como coagulante natural.** 2019. 136p. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual “Julio de Mesquita Filho”, Bauru, 2019.

As águas residuárias geradas pelo homem são fontes mais acessíveis e sustentáveis para a recuperação de macro e micronutrientes. A recuperação efetiva de nutrientes nas águas residuárias pode ser realizada por microalgas cultivadas em fotobiorreatores. Entretanto, o desafio enfrentado no cultivo de microalgas está direcionado as tecnologias existentes e disponíveis para a separação, que contribuem com elevados custos e baixa eficiência na remoção de microalgas. As etapas de coagulação/floculação seguido pela sedimentação apresentam ser uma alternativa atraente, se aplicados coagulantes naturais, devido à boa eficiência, baixos custos de operação e manutenção, além de garantir uma biomassa com baixa toxicidade. O objetivo da pesquisa foi avaliar a separação de microalgas, cultivadas em água negra digerida anaerobiamente, por meio de ensaios de coagulação/floculação e sedimentação utilizando a *Moringa Oleifera* Lam como coagulante natural e o teor de macro e micronutrientes presentes na biomassa seca a fim de avaliar sua aplicação como fertilizante orgânico. Foram realizados ensaios, em escala de bancada, sendo avaliado as dosagens do coagulante natural (50 a 550 mg.L⁻¹), em diferentes valores de pH (3, 5, 7 e 9) e tempo de sedimentação (15, 30, 35, 40, 45, 60 e 120 minutos). Após a etapa de separação das microalgas, a biomassa algal foi seca em estufa e analisada a quantidade de macro e micronutrientes. A dosagem ótima de coagulante foi de 475 mg.L⁻¹, o qual promoveu redução de 92% da turbidez e 86%, 92% e 85% da densidade óptica em 540, 682 e 750 nm, 55% de demanda química de oxigênio (DQO), 58% de nitrogênio total, 11% de nitrogênio amoniacal e 53% de fósforo total, em um tempo de sedimentação de 45 minutos. A biomassa de microalgas recuperada apresentou boa concentração de macro e micronutrientes para a aplicação como fertilizante orgânico composto.

Palavras-chave: Microalgas, nutrientes, coagulantes naturais, *Moringa Oleifera* Lam, fertilizante orgânico.

ABSTRACT

SILVA, D. F. S. **Separation of microalgae cultivated in black water anaerobically digested by coagulation/flocculation and sedimentation using *Moringa Oleifera* Lam as a natural coagulant.** 2019. 136p. Dissertation (Master's degree) Faculty of Engineering of Bauru, State University "Julio de Mesquita Filho", Bauru, 2019.

Wastewaters generated by mankind are a more affordable and sustainable source for macro and micronutrient recovery. The effective recovery of nutrients in wastewaters can be performed by microalgae grown in photobioreactors. However, the challenge faced in the cultivation of microalgae is directed to existing and available technologies for the separation, which contribute with high costs and low efficiency in the removal of microalgae. The coagulation/flocculation steps followed by sedimentation present an attractive alternative, if natural coagulants are applied, due to the good efficiency, low operation and maintenance costs, in addition to ensuring a biomass with low toxicity. The objective of the research was to evaluate the separation of microalgae, cultivated in anaerobically digested black water, by coagulation/flocculation and sedimentation tests using *Moringa Oleifera* Lam as a natural coagulant and the content of macro and micronutrients present in dry biomass in order to evaluate its application as an organic fertilizer. The assays were carried out on a bench scale, and the dosages of the natural coagulant (50 to 550 mg.L⁻¹) were evaluated at different pH values (3, 5, 7 and 9) and sedimentation time (15, 30, 35, 40, 45, 60 and 120 minutes). After the microalgae separation stage, the algal biomass was dried in an oven and analyzed the amount of macro and micronutrients. The optimal coagulant dosage was 475 mg.L⁻¹, which promoted a reduction of 92% in turbidity and 86%, 92% and 85% of the optical density at 540, 682 and 750 nm, 55% of chemical oxygen demand (COD), 58% of total nitrogen, 11% of ammoniacal nitrogen and 53% of total phosphorus, in a sedimentation time of 45 minutes. The recovered microalgae biomass presented a good concentration of macro and micronutrients for the application as compound organic fertilizer.

Keywords: Microalgae, nutrients, natural coagulants, *Moringa Oleifera* Lam, organic fertilizer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de fluxos de águas residuárias de uma residência.	8
Figura 2: Representação esquemática da dupla camada elétrica.....	17
Figura 3: Sementes da árvore de <i>Moringa Oleifera</i> Lam.....	22
Figura 4: Fotobiorreatores (<i>flat panel</i>) instalados no LATAR - São Carlos.....	32
Figura 5: Esquema do sistema de tratamento do presente estudo.	33
Figura 6: Etapas do preparo do coagulante natural.	34
Figura 7: Etapas dos ensaios realizados em laboratório.....	35
Figura 8: Procedimentos dos ensaios na Etapa 1.	38
Figura 9: Procedimentos dos ensaios na Etapa 2.	39
Figura 10: Procedimentos dos ensaios na Etapa 3	40
Figura 11: Sementes de <i>Moringa Oleifera</i> Lam descascadas.	44
Figura 12: Diagrama de coagulação em 15 minutos de sedimentação.	47
Figura 13: Diagrama de coagulação em 30 minutos de sedimentação.	49
Figura 14: Diagrama de coagulação em 40 minutos de sedimentação.	50
Figura 15: Eficiência de remoção da turbidez e redução da DO em 35 minutos.....	54
Figura 16: Eficiência de remoção da turbidez e redução da DO em 45 minutos.	54
Figura 17: Valores de pH após as etapas de C/F e S.....	57
Figura 18: Eficiência de remoção da cor verdadeira em 35 e 45 minutos de sedimentação...	58
Figura 19: Eficiência de remoção dos SST em 35 e 45 minutos de sedimentação.	59
Figura 20: Eficiência de remoção da DQO _{total} em 35 e 45 minutos de sedimentação.	61
Figura 21: Eficiência de remoção da DQO _{filtrada} em 35 e 45 minutos de sedimentação.	62
Figura 22: Eficiência de remoção do N - amoniacal em 35 e 45 minutos de sedimentação...	64
Figura 23: Eficiência de remoção do NTK em 35 e 45 minutos de sedimentação.	65
Figura 24: Eficiência de remoção de nitrito em 35 e 45 minutos de sedimentação.	66
Figura 25: Eficiência de remoção de fósforo total em 35 e 45 minutos de sedimentação.	67
Figura 26: Eficiência de remoção dos parâmetros, 475 mg.L ⁻¹ em 45 e 60 minutos	68
Figura 27: Eficiência de remoção da turbidez, DO _{682 nm} e cor em 45, 60 e 120 minutos.	71
Figura 28: Modelo de Regressão 1.....	111
Figura 29: Ensaios antes e depois da aplicação do coagulante natural das Etapas 1, 2 e 3. .	120
Figura 30: Secagem da biomassa de microalgas	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Metodologia, equipamentos e referências para a separação de microalgas.	36
Tabela 2: Metodologia, equipamentos e referências para a separação de microalgas.	41
Tabela 3: Caracterização do efluente proveniente de fotobiorreatores.	43
Tabela 4: Concentração de proteínas das sementes de MOL para cada etapa do trabalho.	45
Tabela 5: Comparação entre a legislação vigente sobre água de reuso e o efluente final.	73
Tabela 6: Composição química da biomassa algal quanto aos teores de nutrientes.	76
Tabela 7: Faixas de macro e micronutrientes no tecido foliar de grãos e cultura comercial. .	78
Tabela 8: Faixas de macro e micronutrientes no tecido foliar de legumes e hortaliças.	79
Tabela 9: Modelo de regressão por faixa de pH estudado.	110
Tabela 10: Análise de comparação de médias (<i>t-Student</i>), obtidas em 35 minutos.	113
Tabela 11: Análise de comparação de médias (<i>t-Student</i>), obtidas em 45 minutos.	114
Tabela 12: Resultados de avaliação do pH (3), 400 e 500 mg.L ⁻¹ e 40 minutos	115
Tabela 13: Resultados de avaliação do pH (5), 400 e 500 mg.L ⁻¹ e 40 minutos.	115
Tabela 14: Resultados de avaliação do pH (7), 400 e 500 mg.L ⁻¹ e 40 minutos	116
Tabela 15: Resultados de avaliação do pH (9), 400 e 500 mg.L ⁻¹ e 40 minutos.	116
Tabela 16: Resultados de avaliação do pH (9), 425 mg.L ⁻¹ e 45 minutos	117
Tabela 17: Resultados da avaliação do pH (7), 475 mg.L ⁻¹ e 45 minutos	117
Tabela 18: Resultados da avaliação do pH (7), 550 mg.L ⁻¹ e 45 minutos	118
Tabela 19: Resultados da avaliação do pH (7), 475 mg.L ⁻¹ e 45 minutos	119

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – Sulfato de alumínio

ANS – Água negra simulada

C_0 – Concentração inicial

Ca – Cálcio

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior

CCAP – *Culture Collection of Algae and Protozoa*

C/F/S – Coagulação/Floculação/Sedimentação

CO – Carbono Orgânico

CO_2 – Dióxido de carbono

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

-COOH – Carboxila

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CV_{Bias} – Coeficiente de Variação Bias

DAE – Departamento de Água e Esgoto de Bauru

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DLVO – Derjaguin, Landau, Verwey e Overbeek

DO – Densidade óptica

DQO – Demanda Química de Oxigênio

$\text{DQO}_{\text{filtrada}}$ - Demanda Química de Oxigênio filtrada

$\text{DQO}_{\text{total}}$ - Demanda Química de Oxigênio total

$\text{DQO}_{\text{em suspensão}}$ - Demanda Química de Oxigênio em suspensão

E.coli – *Escherichia Coli*

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

E1 – Ensaio 1

E2 – Ensaio 2

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FAD – Flotação por ar dissolvido

FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo

FeCl₃ – Cloreto Férrico

FEB – Faculdade de Engenharia de Bauru

FBR – Fotobiorreator

FT – Fósforo total

GMR – Gradiente de mistura rápida

GML – Gradiente de mistura lenta

[H⁺] – Cátion de hidrogênio

H₃PO₄ - Ácido fosfórico

ITB – Instituto Trata Brasil

K – Potássio

K₂O – Óxido de potássio

LATAR – Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas

MOL – *Moringa Oleifera Lamarck*

min - Minutos

Mg – Magnésio

mg.L⁻¹ – Miligrama por litro

MS – Ministério da Saúde

N – Nitrogênio

N-amoniacal – Nitrogênio amoniacal

NaOH – Hidróxido de sódio

Na – Sódio

NBR – Associação Brasileira de Normas Técnicas

-NH₂ – Grupos Funcionais Amina

NIOO – *Netherlands Institute of Ecology*

NO₂ – Nitrito

NO₃ – Nitrato

nm – Nanômetro

NTK - Nitrogênio *Kjeldahl* Total

[OH⁻] – Hidroxila

-OH – Fosfodiéster

OMS – Organização Mundial da Saúde

ONU – Organização das Nações Unidas

PAC – Policloreto de alumínio

pH – Potencial Hidrogeniônico

PNAD – Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios

PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico

P₂O₅ – Pentóxido difósforo

S – Enxofre

SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos

SST – Sólido em Suspensão Total

SP – São Paulo

TML – Tempo de Mistura Lenta

TMR – Tempo de Mistura Rápida

TS – Tempo de Sedimentação

uC – Unidade Cor

UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

UNESP – Universidade Estadual “Julio Mesquita Filho”

USEPA – *United States Environmental Protection Agency*

UNT – Unidade nefelométrica

UV_{254nm} – Análise Ultravioleta 254 nm

USP – Universidade do Estado de São Paulo

VML – Velocidade de Mistura Lenta

VMR – Velocidade de Mistura Rápida

VS – Velocidade de sedimentação

Zn – Zinco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. Objetivo Geral.....	4
2.2. Objetivos específicos	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. Desenvolvimento sustentável	5
3.2. Sistemas centralizados e descentralizados	6
3.3. Segregação das águas residuárias	8
3.4. Tratamento anaeróbio	10
3.5. Microalgas	11
3.5.1. Cultivo de Microalgas.....	11
3.5.2. Fotobiorreatores	13
3.6. Métodos de separação de microalgas.....	14
3.6.1. Coagulação/Floculação	16
3.7. Coagulantes naturais	19
3.7.1. <i>Moringa Oleifera Lamarck (Moringa Oleifera Lam)</i>	21
3.8. Sedimentação	24
3.9. Produtos a partir da biomassa de microalgas.....	26
3.10. Reuso de efluentes	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1. Projeto de pesquisa	31
4.2. Efluente de estudo.....	31
4.3. Preparo do coagulante natural.....	33
4.4. Testes de Coagulação/Floculação e Sedimentação.....	35

4.5.	Procedimentos de ensaios	35
4.5.1.	Análises.....	36
4.5.2.	ETAPA 1: Ensaio preliminares (C/F e S) e construção dos diagramas	37
4.5.3.	ETAPA 2: Avaliação da dosagem de MOL, pH e TS baseado ensaios preliminares.....	39
4.5.4.	ETAPA 3: Seleção da dosagem ótima e Tempo de sedimentação	40
4.5.5.	ETAPA 4: Caracterização da biomassa de microalgas.....	41
4.6.	Análise estatística	41
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
5.2.	Teor de proteínas presente nas sementes de MOL	43
5.3.	ETAPA 1: Ensaio de (C/F e S) para construção dos diagramas de coagulação.....	47
5.3.1.	Diagrama de coagulação da turbidez em 15 minutos de sedimentação.....	47
5.3.2.	Diagrama de coagulação da turbidez em 30 minutos de sedimentação.....	48
5.3.3.	Diagrama de coagulação da turbidez em 40 minutos de sedimentação.....	50
5.4.	ETAPA 2: Otimização da dosagem do coagulante, pH e Tempo de sedimentação	53
5.4.1.	Turbidez e densidade óptica	53
5.4.2.	Potencial Hidrogeniônico (pH).....	57
5.4.3.	Cor verdadeira.....	58
5.4.4.	Sólidos em Suspensão Totais (SST).....	59
5.4.5.	Demanda Química de Oxigênio (DQO)	61
5.4.6.	Nitrogênio Total (NT).....	63
5.4.7.	Fósforo Total (FT)	66
5.5.	ETAPA 3: Condições ótimas das etapas de C/F e S.....	68
5.6.	ETAPA 4: Características da biomassa algal	76
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
	APÊNDICE A: ETAPA 1: REGRESSÃO LINEAR	109
	APÊNDICE B –ETAPA 1: TESTE <i>t</i> de Student.....	113

APÊNDICE C: ETAPA 1: EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO (TURBIDEZ E DO)	115
APÊNDICE D – ETAPA 2: EFICIÊNCIA APLICANDO 425, 475 E 550 mg.L⁻¹	117
APÊNDICE E – ETAPA 3: DOSAGEM ÓTIMA E TEMPO DE SEDIMENTAÇÃO..	119
APÊNDICE F - TESTE DE JARROS.....	120
APÊNDICE G – ETAPA 4: BIOMASSA DE MICROALGAS.....	121

1. INTRODUÇÃO

A humanidade tem percebido ao longo do tempo, o esgotamento das fontes de recursos essenciais para a sobrevivência do homem. Diante disso, muitos recursos essenciais estão sendo esgotados, e outras fontes não têm sido devidamente exploradas, caso comum apresentado pelo fósforo, elemento químico incluído na lista de materiais críticos pela União Europeia, devido à dificuldade de exploração e o perigo de sua dispersão como poluente ambiental (SECO et al., 2018). Por um lado, ocorre a exploração excessiva das fontes de recursos limitados, e por outro a falta de tecnologias que recupere nutrientes em fontes mais acessíveis, tais como os nutrientes que são liberados todos os dias nos nossos banheiros (FERNANDES et al., 2017). Os resíduos humanos liberados contribuem com 68% de fósforo e 82% de nitrogênio, presentes na urina e nas fezes, que se recuperados podem suprir 22% da demanda global de fósforo, além de nitrogênio, potássio, cálcio e magnésio, que podem ser aplicados para melhorar a qualidade de fertilizantes (FERNANDES et al., 2017).

Com o crescimento desenfreado da humanidade a produção agrícola tem apresentado uma demanda significativa de nutrientes para satisfazer a atual população. Muitas tecnologias têm sido continuamente aplicadas no sentido de recuperar quantidades elevadas de macro e micronutrientes, tal como o processo Haber-Bosch responsável em converter o gás natural de nitrogênio em amônia para produção de fertilizantes comerciais. O processo Haber-Bosch foi desenvolvido para incentivar o uso de fertilizantes sintéticos e tecnologias agrícolas no intuito de aumentar a produtividade e acompanhar o crescimento da população. Entretanto, com o tempo, as práticas trouxeram uma série de problemas ambientais e a diminuição do rendimento das colheitas, devido ao elevado consumo energético e a agressividade dos fertilizantes sintéticos que são aplicados no solo, inviabilizando seu uso por questões sustentáveis (CONNELLY, 2018).

No Brasil, cerca de 60% de matérias-primas utilizadas para a fabricação de fertilizantes são importadas, tal demanda poderia ser suprida se fontes secundárias como esterco de gado, biossólidos de estação de tratamento de esgoto, resíduos de processamento de cana de açúcar fossem devidamente exploradas, evitando uma futura escassez e/ou flutuações de mercado. O cultivo de microalgas em esgoto sanitário poderia complementar tal demanda, além de produzir uma biomassa de microalgas valiosa para produtividade agrícola no qual poderá promover o manejo sustentável (WITHERS et al., 2018). No entanto, para atender tais

necessidades, devem ser aplicadas tecnologias que sejam capazes de recuperar o máximo possível de nutrientes de fontes como as águas residuárias. Dentre as tecnologias utilizadas para a recuperação de macro e micronutrientes, destaca-se o cultivo de microalgas em fotobiorreatores, devido sua capacidade de fixar o dióxido de carbono por meio da fotossíntese, e utilizar as águas residuárias como fonte de nutrientes (UDOM et al., 2013).

Após assimilação de nutrientes e crescimento em ambientes artificiais outras tecnologias devem ser utilizadas para o desprendimento das células algais do seu meio de cultivo (RAWAT et al., 2011). Cerca de 20 a 60% dos custos de produção de microalgas estão direcionados à etapa de separação (GRIMA et al., 2003). A separação das microalgas pode influenciar tanto nos custos do sistema quanto na qualidade dos produtos finais, apresentando a necessidade de se aplicar um método que seja eficiente, econômico e sustentável (SINGH e PATIDAR, 2018).

As etapas de coagulação/floculação e sedimentação são eficientes e de fácil operação, porém limitado se aplicados coagulantes químicos, devido à contaminação da biomassa por sais metálicos. Nesse sentido, para manter as vantagens deste método de separação de microalgas a melhor alternativa seria a aplicação de coagulantes naturais, pois não causam danos as células algais e garante uma biomassa de microalgas com boas características para utilização em novos produtos, tal como fertilizante orgânico (VANDAMME et al., 2011; SINGH e PATIDAR, 2018).

Os coagulantes naturais comumente utilizados são o Tanino, a Quitosana, e a *Moringa Oleifera* Lam. Os taninos vegetais extraídos da *Acácia Mearnsii*, são capazes de garantir boa coagulação/floculação de microalgas, inclusive para as espécies marinhas, porém o grande desafio ainda é detalhar sua estrutura e conseguir obter uma adequada e fácil extração do composto para fabricação como coagulante em grande escala (FUAD et al., 2018; WANG et al., 2018). A quitosana é um produto natural obtido a partir da quitina de carapaças de caranguejos, camarões e lagostas. A quitosana além de não tóxica, é eficaz para amplas espécies de microalgas, e requer baixas taxas de dosagem para o tratamento de águas residuárias. Porém, sua eficiência é limitada quando aplicados às águas com alta salinidade, além de apresentar alta dependência do pH no meio (GRIMA et al., 2003; XU et al., 2013). A *Moringa Oleifera* Lam é uma das 14 espécies de plantas tropicais pertencente à família *Moringaceae* e que vem se destacando como uma alternativa sustentável para a coagulação de microalgas. As sementes de *Moringa Oleifera* Lam, além de ser um produto de fonte

renovável, gera uma biomassa com baixa toxicidade, sem causar impacto negativo ao meio ambiente (VALVERDE, 2014; HAMID et al., 2016). Estudos afirmam que as sementes de *Moringa Oleifera* Lam possuem certa quantidade de proteínas que se assemelham a atuação de polieletrólitos catiônicos que quando adicionados à água garante uma boa remoção da turbidez (GALLÃO et al., 2006).

A atual pesquisa visa avaliar a separação das microalgas, cultivadas em água negra digerida anaerobiamente, por meio de testes de coagulação/floculação e sedimentação utilizando as sementes de MOL como coagulante natural, além de avaliar a qualidade do efluente final e as características da biomassa algal para sua aplicação como fertilizante orgânico.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a eficiência do pó integral de *Moringa Oleifera* Lam como coagulante natural para a separação de microalgas cultivadas em água negra digerida anaerobiamente, por meio do processo de coagulação/floculação seguido pela etapa de sedimentação, além de avaliar a qualidade do efluente final e as características da biomassa de microalgas como fertilizante orgânico.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar a influência dos diferentes valores de pH, dosagens do coagulante e tempos de sedimentação por meio da interpretação de diagramas de coagulação;
- Determinar valores ótimos de dosagem do coagulante, pH e tempo de sedimentação, com base na eficiência, economia de insumos e na qualidade do produto final (biomassa e efluente);
- Caracterizar o teor de macro e micronutrientes presentes na biomassa de microalgas recuperada e seca a fim de avaliar seu uso como fertilizante orgânico composto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Desenvolvimento sustentável

O termo desenvolvimento sustentável é discutido desde os anos 80, construído sobre três pilares interdependentes relacionadas às questões ambientais, sociais e econômicas. A definição mais aceita para desenvolvimento sustentável foi criada pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 1987, apresentado no relatório “*Brundtland*” intitulado também por “*Nosso Futuro Comum*”, que apresenta a seguinte definição: “aquele que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades”. A ideia central é apresentar uma sociedade sustentável no qual possa promover seu desenvolvimento com preocupações ambientais, sociais e econômicas, interligados à escala local, regional e global.

Em setembro de 2015, líderes mundiais reuniram-se na sede da ONU, em Nova York, apresentaram uma nova agenda de desenvolvimento sustentável, no qual contêm 17 objetivos intercalados com metas ligadas à saúde, educação, pobreza, alterações climáticas, saneamento básico e sustentabilidade que devem ser atingidas até 2030 (ITB, 2018). Dentre os objetivos apresentados pela ONU, destaca-se o sexto objetivo cuja finalidade é assegurar a disponibilidade e a gestão do saneamento básico para todos. As metas visam o acesso de forma igualitária, à melhoria na qualidade da água e o fim da defecação a céu aberto (ONU, 2018).

Em escala global, cerca de 90 países apresentam avanço na área do saneamento básico de forma muito lenta e, portanto, podem influenciar na cobertura dos serviços para a população de forma igualitária. No Brasil, mais de 100 milhões de brasileiros não tem acesso à coleta de água residuária. Em termos percentuais, apenas 48,6% das águas residuárias geradas são coletadas, e 69,4% destas são tratadas (SNIS, 2016).

De acordo com a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD, (2015) e o Instituto Trata Brasil – ITB, (2018) apontam que em escala regional, das cinco regiões que compõe o Brasil, a região Norte (67,2%) e Nordeste (54,8%) apresenta um percentual acima de 50% dos domicílios que não possuem acesso à rede de esgoto sanitário. A região Centro-Oeste (48,5%) apresenta condições intermediárias comparadas à região Norte e Nordeste. Já as regiões Sul (28,5%) e Sudeste (13,5%) apresentam a melhor cobertura de esgotamento

sanitário do país. Porém destas coberturas existentes muitas estão em condições precárias de operação e manutenção (SUBTIL et al., 2016).

Assegurar a sustentabilidade nos próprios sistemas de tratamento de águas residuárias é de extrema importância, pois pode diminuir os impactos ambientais negativos gerados na própria fonte (DICKIN et al., 2018). Diante disso, é necessária a redução do uso inapropriado de matérias-primas e produtos, no sentido de proporcionar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos gerados (WWF, 2018). À medida que a população cresce a quantidade de águas residuárias produzidas aumentam. Neste sentido, a sociedade moderna percebeu que compostos orgânicos e inorgânicos são produtos altamente valiosos, que podem ser recuperados e reciclados de volta para a sociedade, suprimindo de forma satisfatória a atual demanda sem comprometer as necessidades das gerações futuras (FERNANDES et al., 2015).

Diante dessa perspectiva, a construção de sistemas de tratamento de esgoto doméstico de forma sustentável só é possível se realizar o fechamento dos fluxos de água, energia e material orgânico e inorgânico. Para tal, os sistemas de saneamento devem ser projetados com infraestrutura simples e acessíveis às áreas rurais, urbanas e periurbanas, com finalidade em recuperar subprodutos a partir do tratamento das águas residuárias, de forma ambientalmente segura e economicamente viável (KUJAWA-ROELEVELD e ZEEMAN, 2006; SUBTIL et al., 2016; FERNANDES et al., 2015).

Entretanto, o desafio é repensar no nosso atual sistema de tratamento de águas residuárias, cuja finalidade é fechar os ciclos de energia, água e nutrientes e apresentar as mais diversas formas de recuperação e reutilização. Caso comum pode ser observado por microalgas cultivadas em águas residuárias em sistemas abertos ou fechados denominados por fotobiorreatores. O uso de microalgas no saneamento apresenta diversas vantagens tais como a capacidade de fixar o dióxido de carbono por meio da fotossíntese, de recuperar elevadas concentrações de nutrientes presentes nas águas residuárias, e proporcionar os mais diversos tipos usos da biomassa de microalgas recuperada durante o tratamento (UDOM et al., 2013; FERNANDES et al., 2015).

3.2.Sistemas centralizados e descentralizados

Os atuais sistemas de saneamento são construídos para serem robustos, pois são dimensionados para lidar com as diversas alterações ocorridas na área em que foram

instalados, tais como o crescimento populacional de áreas urbanas, rurais e periurbanas. As áreas urbanas concentram a maior demanda populacional, no qual requer estações de tratamento de grande porte, tradicionalmente realizado por sistemas centralizados (SUBTIL et al., 2016; KUJAWA-ROELEVELD; ZEEMAN, 2006).

A principal característica dos sistemas centralizados está relacionada à sua instalação longe da fonte geradora, no qual requer uma extensa rede de coleta e transporte das águas residuárias, além de apresentar elevado volume de efluente a ser tratado para posterior descarte em corpo receptor. Tal característica que envolve esses tipos de sistemas inviabiliza qualquer tipo de visão de reaproveitamento dos recursos presente nas águas residuárias, devido à necessidade de um alto investimento, principalmente para áreas com população dispersa como as áreas rurais e periurbanas. Sendo assim, é possível observar que o saneamento centralizado pode contribuir com a desvalorização na recuperação dos compostos orgânicos e inorgânicos presente nas águas residuárias, e retardar alguns requisitos que envolvem o desenvolvimento sustentável (SUBTIL et al., 2016; KUJAWA-ROELEVELD; ZEEMAN, 2006; POORTVLIET et al., 2018).

Diferente da gestão aplicada pelo saneamento centralizado, os sistemas descentralizados têm se destacado por apresentarem as seguintes características: instalação próxima à fonte geradora, no qual requer uma infraestrutura mínima para coleta e transporte da água residuária, além de diminuir cerca de 60% dos custos proveniente a operação e manutenção na coleta, e contribuir com o reaproveitamento de subprodutos gerados nas estações de tratamento (JUNIOR, 2013). Sendo aplicados em várias escalas, tal como simples residências até indústrias de grande porte, não apresentando a necessidade de operação e manutenção especializada (SUBTIL et al., 2016).

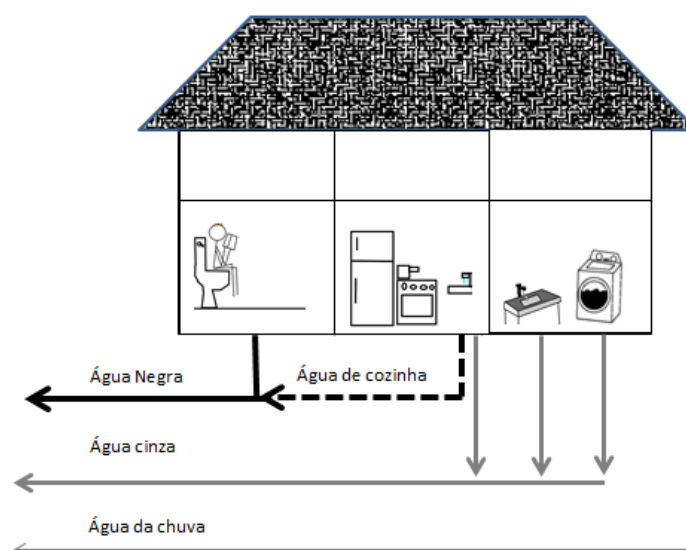
Além das vantagens ligadas a infraestrutura dos sistemas descentralizados, a forma no qual se trata o efluente também pode apresentar certos benefícios. O tratamento descentralizado apresenta dois tipos de situação: (1) o tratamento de águas residuárias domésticas totais, e o (2) tratamento de águas residuárias separadas. No sentido de realizar o fechamento dos fluxos de água, energia e material orgânico e inorgânico, a segregação das águas residuárias tem se destacado por garantir maior eficiência ao sistema de tratamento e na recuperação de tais compostos. Para tal, a segregação das águas residuárias direto da fonte torna-se uma etapa imprescindível ao tratamento descentralizado (KUJAWA-ROELEVELD e ZEEMAN, 2006).

3.3. Segregação das águas residuárias

As águas residuárias domésticas podem ser divididas em: água negra, água cinza e água pluvial. Em termos percentuais as águas residuárias totais são compostas por aproximadamente 70% de água cinza, e os outros 30% são destinados às águas negras e águas pluviais. A água cinza é proveniente das águas de banho, lavagem e cozinha, já a água negra é oriunda da mistura de fezes, urina e água de descarga. A água negra apesar de compor a menor parcela do volume total das águas residuárias, apresentam alta carga orgânica, elevada concentração de microrganismos patogênicos e de nutrientes (METCALF e EDDY, 1991; KUJAWA-ROELEVELD; ZEEMAN, 2006; WENDLAND, 2009).

Um adulto saudável que apresenta quantidade de nutrientes equilibrada no corpo pode excretar diferentes concentrações de nutrientes e, portanto, a quantidade de nutrientes que irá compor as fezes e urina varia conforme o tipo de alimentos ingeridos. Em média uma pessoa produz 50 L/hab.ano de fezes e 500 L/hab.ano de urina. A água negra é composta em média por 90% de nitrogênio, 77% de fósforo e 57% de matéria orgânica (DQO), além da elevada concentração de patógenos, hormônios e resíduos farmacêuticos (KUJAWA-ROELEVELD; ZEEMAN, 2006; DE GRAAF, 2010). Na Figura 1 estão apresentados os tipos de fluxos da água residuária presente em uma residência.

Figura 1: Tipos de fluxos de águas residuárias de uma residência.



Fonte: Adaptado de KUJAWA-ROELEVELD & ZEEMAN, (2006).

Portanto, é importante que os sistemas contribuam com menor volume possível de água de descarga, a fim de diminuir a diluição da urina e das fezes. A elevada diluição da água negra pode acarretar em elevado volume a ser tratado, armazenado e transportado para seu destino final. Portanto, limitar a diluição da água negra proporciona uma redução de aproximadamente 25% do consumo de água nas residências (condições holandesas). Os sanitários convencionais utilizam 6 a 12 litros de água nas descargas, o que apresenta elevado consumo de água apenas na descarga das águas residuárias. Uma pesquisa realizada na Holanda aponta a possibilidade de investir no país sistemas a vácuo, a fim de diminuir o consumo de água destinada a descarga de águas residuárias. Vasos sanitários a vácuo podem consumir de 0,8 a 2 litros de água por descarga, sendo uma alternativa atrativa se comparados aos sanitários convencionais (KUJAWA-ROEVELD e ZEEMAN, 2006; DE GRAAFF, 2010).

A segregação das águas residuárias domésticas (água negra) e a aplicação de sistemas descentralizados em diversas escalas e locais, apresentam relação direta entre a diminuição da exploração de recursos finitos, pois apresentam serem fontes mais acessíveis para recuperação de diversos compostos orgânicos e inorgânicos, tais como macro e micronutrientes (SUBTIL et al., 2016; FERNANDES et al., 2015). O fósforo é um nutriente primário vital para toda a cadeia alimentar, estando diretamente ligada à sobrevivência do homem. No entanto, esse macronutriente apresenta grande exploração na agricultura como fertilizante, no qual consome 85% das reservas de rochas fosfatadas, e abrange as estimativas que apontam o esgotamento destas reservas para os próximos 50 - 100 anos. Caso todo o fósforo presente nas excretas humanas fosse recuperado, aproximadamente 22% da demanda de fósforo do mundo seria atendida (MIHELICIC, 2011; VOORTHUIZEN et al., 2008).

O nitrogênio assim como o fósforo é um nutriente importante para a produção de fertilizantes, e tal nutriente pode ser obtido predominantemente pelo processo Haber-Bosch. O processo Haber-Bosch foi desenvolvido para incentivar o uso de fertilizantes sintéticos e tecnologias agrícolas no intuito de aumentar a produtividade e acompanhar o crescimento da população. Tal processo é capaz de sintetizar cerca de 80-90% do nitrogênio (N) para a produção de fertilizantes e aumentar de forma considerável os alimentos consumidos no mundo. Parte do N sintetizado também é utilizada na indústria química para a produção de nylon, plásticos, explosivos e suplementos de animais. Embora, o processo Haber Bosch apresenta vantagens na produtividade agrícola, seu uso exige cerca de 70% do consumo total

de energia do mundo, e tais práticas podem apresentar sérios problemas ambientais e econômicos (MATASSA et al., 2015). Portanto, a busca por fontes mais acessíveis e sustentáveis que visam reduzir tais impactos negativos tem sido constatemente investigado na comunidade científica, dentre elas destacam-se as águas residuárias, sendo uma alternativa que visa minimizar os efeitos indesejáveis e permite um melhor gerenciamento do ciclo de nutrientes (SOUZA et al., 2018).

A China é o maior produtor e consumidor de fertilizantes fosfatados do mundo, e as águas residuárias produzidas neste país apresentam alta concentração de fósforo, que se recuperado podem suprir aproximadamente 5,5% do consumo de fertilizantes sintéticos, além de diminuir de forma considerável sua dispersão como poluente. Em 2050, estima-se que a produção agrícola precisará ser aumentada em 70% para satisfazer as necessidades de 9,1 bilhões de pessoas, e as águas residuárias como fonte de nutrientes podem ser uma alternativa ecologicamente atraente (ZHOU et al., 2016).

Para atender essas necessidades, devem ser aplicadas tecnologias que sejam capazes de recuperar o máximo possível de nutrientes de fontes como as águas residuárias. Dentre as tecnologias utilizadas destacam-se o tratamento anaeróbio, por ser ótima tecnologia que permite converter o metano gerado pela decomposição da matéria orgânica em energia e calor. Já os nutrientes conservados na água negra podem ser recuperados por microalgas cultivadas em fotobiorreatores, seguido por processos físico-químicos para a separação das microalgas do seu meio de cultivo e, portanto, na recuperação de diversos compostos de alto valor (DE GRAFF, 2010).

3.4. Tratamento anaeróbio

O tratamento descentralizado de águas residuárias não apresenta apenas uma vantagem para a recuperação de compostos orgânicos e inorgânicos valiosos para reuso, mas também possibilita reduzir a complexidade dos atuais processos de tratamento, dispondo de tecnologias eficientes, de fácil aplicação e de baixo custo (OPHER e FRIEDLER, 2016). O tratamento anaeróbio de efluentes não é um conceito novo, e vem sendo continuamente aplicado devido à boa eficiência e o baixo custo em sua implantação e operação, apresentando vantagens principalmente para países em desenvolvimento que buscam investimentos para área do saneamento (KHAN et al., 2011). A digestão anaeróbia desempenha papel fundamental como tecnologia empregada no tratamento da água negra, no qual garante boa

remoção da matéria orgânica, e uma melhoria no ciclo de carbono e nutrientes, devido à conservação e a possibilidade de utilização dos recursos produzidos durante a digestão, além de levar economia a todas as etapas do tratamento (WENDLAND, 2009; VANEECKHAUTE et al., 2018; KUJAWA-ROELEVELD e ZEEMAN, 2006).

O reator *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) apresenta ser uma boa tecnologia para decomposição da matéria orgânica, sendo empregado mundialmente devido sua eficiência no tratamento de vários tipos de águas residuárias. O reator UASB foi desenvolvido na década de 70, pelo Professor Gatze Lettinga e sua equipe, para o tratamento de efluentes com elevada carga orgânica. A eficiência de remoção da matéria orgânica nesses tipos de reatores pode chegar de 40 a 75% da DQO e 45 a 85% da DBO (LEGNER, 2015; CHERNICHARO, 2007; KHAN et al., 2015). O reator UASB além de garantir a remoção da matéria orgânica, apresenta a capacidade de gerar subprodutos como o metano e o dióxido de carbono que podem ser aproveitados para outros fins, aplicando a visão da economia circular (KHAN et al., 2015; CHENICHARO, 2007).

Além da remoção da matéria orgânica, o reator conserva elevada quantidade de nitrogênio e fósforo presentes nas águas residuárias (DE GRAAFF, 2010). No entanto, para a recuperação de tais nutrientes é necessário ser implantado uma etapa pós-tratamento em reator UASB, e entre as várias tecnologias utilizadas têm se destacado o cultivo de microalgas em fotobiorreator, pois garante o tratamento terciário do efluente final e o crescimento rápido e econômico da biomassa de microalgas (LOURENÇO, 2006; MAHAPATRA et al., 2014).

3.5. Microalgas

3.5.1. Cultivo de Microalgas

As algas representam um grupo de organismos com características distintas que engloba indivíduos conhecidos por macroalgas e microalgas (JANKOWSKA et al., 2017). As macroalgas são organismos multicelulares, eucarióticos, que apresentam ramos, raízes e folhas bem definidos. Este primeiro grupo de organismo são classificadas como algas marrons, vermelhas e verdes. Já as microalgas são organismos autotróficos, unicelulares, que utilizam luz natural, água e dióxido de carbono para seu crescimento (SCHWEDE et al., 2013). Microalgas apresentam tamanhos diversos que podem chegar à escala de nano a

milímetro. Além disso, a estrutura destes tipos de algas não é diferenciada, por não apresentarem em sua estrutura raízes, caule e folhas definidos (JANKOWSKA et al., 2017).

Dentro da área da ecologia, as microalgas fazem parte dos produtores primários de energia, no qual são responsáveis por aproximadamente 60% de toda energia da cadeia alimentar (RAVEN, 2001; CHISTI, 2007). As microalgas ainda podem ser divididas em dois grupos distintos, tais como o grupo dos procariontes e dos eucariontes. Para as microalgas procariontes destacam-se as algas azuis, cloroxibactérias, cianobactérias ou cianófitas. As microalgas eucariontes são chamadas de algas verdes ou clorófitas (BARSANTI et al., 2018).

Em relação à nutrição, as microalgas podem ser separadas como fotoautotróficas, heterotróficas ou mixotróficas. Microalgas fotoautotróficas dependem da fotossíntese e utilizam como fonte de energia a luz solar e o dióxido de carbono para seu desenvolvimento. As células algais heterotróficas consomem moléculas orgânicas para obter suas necessidades energéticas. Já as células algais mixotróficas obtêm energia tanto da fotossíntese e em raras vezes a partir de fontes de carbono disponíveis no meio (ANDRADE et al., 2014).

Fatores biológicos, físicos e químicos devem estar em equilíbrio para o adequado crescimento das microalgas. Compreender como as microalgas se comportam em relação à alteração da temperatura, luz natural ou artificial, dióxido de carbono e nutrientes é de grande relevância, no sentido de aperfeiçoar as fases de crescimento (TOMASELLI, 2000; RIBEIRO e MARIANO, 2013). Desde então, diversas pesquisas têm sido voltadas para a escolha de espécies de microalgas que possuam rápida adaptação em águas residuárias, tais como espécies que sejam tolerantes a elevada temperatura, alta densidade, além da capacidade de crescer com nutrição mixotrófica (CHRISTENSON e SIMS, 2011; ANDRADE et al., 2014; ALCÁNTARA et al., 2015).

Dentre as diversas microalgas existentes as cepas do gênero *Chlorella sp.* tem se destacado por apresentarem diversos benefícios ao tratamento das águas residuárias. A *Chlorella sp.* apresenta formato esférico, elipsoidal ou ovóide, mas também podem ser reniformes (com cavidades voltadas para baixo) com pouca assimetria. São células com diâmetro entre 2 a 12 μm ; no qual se reproduz de forma assexuada por meio da formação de autoesporos. Tais microalgas podem ser encontradas em águas doces, marinhas, solos e em associação simbiótica com líquens (ANDRADE et al., 2014).

A espécie *Chlorella Sorokiniana* foi nomeada em homenagem ao seu primeiro isolador, o Dr. Constatine Sorokin, que a isolou em 10 de junho de 1951 nos Estados Unidos.

Esta espécie apresenta as seguintes características: são tolerantes as altas temperaturas na faixa de 38-42 °C, tolerante a elevada intensidade luminosa, além de possuir grande habilidade em utilizar diferentes fontes de carbono para seu crescimento (DE BASHAN et al., 2008; KIM et al., 2013; MORITA et al., 2000). O cultivo de diferentes espécies de microalgas em ambientes artificiais pode ser realizado em fotobiorreatores, diferenciado entre si pelo tipo de sistema empregado para o cultivo, tais como fotobiorreatores de sistema aberto e os fotobiorreatores de sistema fechado.

A *Chlorella Sorokiniana* adapta-se com facilidade em ambientes artificiais como os fotobiorreatores e apresentam capacidade de assimilar fósforo e nitrogênio em concentrações significativas em águas residuárias (DE BASHAN et al., 2008, SHRESTHA, 2013).

3.5.2. Fotobiorreatores

O cultivo de microalgas em águas residuárias pode ser realizado em sistemas abertos e fechados. Os sistemas abertos de grande porte são denominados por fotobiorreatores abertos, tais como os “*raceway ponds*”. Os sistemas abertos assemelham-se aos habitats naturais das microalgas, sendo tanques com profundidade entre 15 e 20 cm e com pás mecânicas que promovem a aeração da cultura (PULZ, 2001).

Cultivos de microalgas em sistemas abertos apresentam alta produção de biomassa de microalgas, baixo custo de produção e boa gestão operacional. Entretanto, estes tipos de sistemas apresentam alta taxa de evaporação, variação na temperatura, elevada salinidade, alteração do pH, baixa eficiência na absorção de CO₂, além de constante contaminação por microrganismos. Outro fator de impacto está relacionado à água pluvial em excesso, no qual aumenta a diluição e afeta o crescimento das microalgas, sendo necessárias coberturas transparentes que não interfira a passagem de luz e permita que ocorra a fotossíntese sem que a produtividade seja reduzida (ANDRADE et al., 2014).

Diferentemente do cultivo das microalgas em sistemas abertos, o sistema fechado apresenta diversas vantagens devido ao maior controle de fatores como temperatura, pH, e interferentes externos (LOURENÇO, 2006; ANDRADE et al., 2014; MATA et al, 2010). Para tal, os fotobiorreatores fechados minimizam o contato com o ambiente externo, além de apresentar menor área para instalação e operação, por ser um reator mais compacto, apresenta menor perda por evaporação, poucos problemas relacionados com a contaminação por microrganismos, menor diluição do meio de cultura, e a possibilidade de obter microalgas

com boas características para reaproveitamento devido ao seu maior controle do processo (LOURENÇO, 2006; PULZ, 2001; XU et al., 2013).

Dos fotobiorreatores fechados, o tipo *flat panel*, apesar de apresentar a necessidade de um sistema de resfriamento otimizado para manter o ambiente, destaca-se em diversas vantagens, tais como uma grande área superficial iluminada, no qual apresenta menor caminho óptico para a passagem da luz, pequena área para instalação e operação, além do baixo consumo energético, garantindo uma alta produtividade para as diversas espécies de microalgas cultivadas (ANYANWU et al., 2018).

Após o cultivo de microalgas em fotobiorreatores, tecnologias devem ser empregadas para a separação das microalgas. A separação refere-se o desprendimento de algas do seu meio de crescimento. O método de separação além de depender da fisionomia, densidade, tamanho das células algais, tem grande dependência ao produto final e a forma permissível da biomassa de microalgas recuperada, para tal é imprescindível que seja bem avaliado o método utilizado para o desprendimento das células algais (UDUMAN et al., 2009; SINGH e PATIDAR, 2018).

3.6. Métodos de separação de microalgas

A etapa de separação envolve processos físico-químicos, e a melhor técnica deve ser independente da espécie a ser cultivada, que apresente baixo consumo energético, e que permita a diminuição de produtos químicos aplicados no tratamento, a fim de não danificar os produtos a serem extraídos e utilizados para outros fins (UDUMAN et al., 2009; RAWAT et al., 2011).

Atualmente, vários métodos têm sido comercialmente disponíveis para a separação de microalgas baseadas em processos mecânicos, elétricos ou químicos tais como: a centrifugação, filtração, flotação, eletrocoagulação/eletrofloculação e coagulação/floculação precedida da etapa de sedimentação (GRIMA et al., 2003; SINGH e PATIDAR, 2018). Os métodos comumente utilizados na separação de microalgas são:

- **Centrifugação:** é um método eficiente para a separação das microalgas por ser uma tecnologia rápida e universal, que consiste em submeter às microalgas em altas rotações e aumentar a taxa de sedimentação. Neste método não se aplica produtos químicos, sendo

possível conservar as características das células algais. No entanto, necessita de grande demanda energética, o qual torna o processo oneroso (KADIR et al, 2018; PAPAZI et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2012).

- **Filtração:** método simples que consiste em passar as microalgas por meio poroso. Sendo eficaz apenas para células relativamente grandes, tais como as microalgas do gênero *Arthrospira sp.* A filtração apesar de ser um eficiente método para a separação das microalgas, em alguns casos apresenta ser incapaz de separar microalgas de pequenos diâmetros; o que limita muito as espécies de microalgas a serem cultivadas (PAPAZI et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2012).
- **Flotação por ar dissolvido:** método comumente empregado que utiliza bolhas de ar entre 10 a 100 µm de diâmetro. A FAD consiste na dissolução do ar na massa líquida sob alta pressão. Após a queda da pressão são liberadas microbolhas de ar responsáveis em mover as células algais para a superfície. Porém, bolhas grandes quebram facilmente os flocos e diminuiu a eficiência de remoção das microalgas do sistema de cultivo, além de apresentar alta demanda energética para tratamento em grande escala, e diminuir drasticamente a eficiência de separação (PARK et al., 2011; SINGH e PATIDAR, 2018).
- **Eletrocoagulação/Eletrofloculação:** baseia-se na eletrólise do soluto para a produção das bolhas de ar por meio de algumas reações químicas. Eletrodos à base de ferro e alumínio, muitas vezes em aço inoxidável e reativo, liberam íons de alumínio e ferro que reagem com as superfícies das células algais. Porém, a necessidade constante de regular o ânodo leva a contaminação da biomassa por metais liberados pelo aparelho (VANDAMME et al., 2011; UDUMAN et al., 2009; ANDRADE et al., 2014).
- **Coagulação/Floculação e Sedimentação:** apresenta ser um método de separação rápido e de fácil operação. A maioria das microalgas apresenta carga negativa em sua superfície, densidade próxima ao da água e sedimentação natural lenta. A separação das microalgas ocorre pela aplicação de coagulantes que desestabiliza as cargas negativas das células algais, e facilita o contato célula-célula para a formação de densos flocos. No entanto, este método pode ser limitado se aplicados coagulantes químicos, devido à contaminação da

biomassa por sais metálicos, além de gerar elevado custo ao sistema de separação. Neste sentido, para manter as vantagens deste método quanto na separação de microalgas a melhor alternativa seria a aplicação de coagulantes naturais, pois não causam danos as células algais e garante uma biomassa de microalgas com boas características para utilização. Por tais fatores, este método vem se destacando na separação de microalgas se comparados aos demais (VANDAMME et al., 2011; ABDELAZIZ et al., 2013; SINGH e PATIDAR, 2018).

3.6.1. Coagulação/Floculação

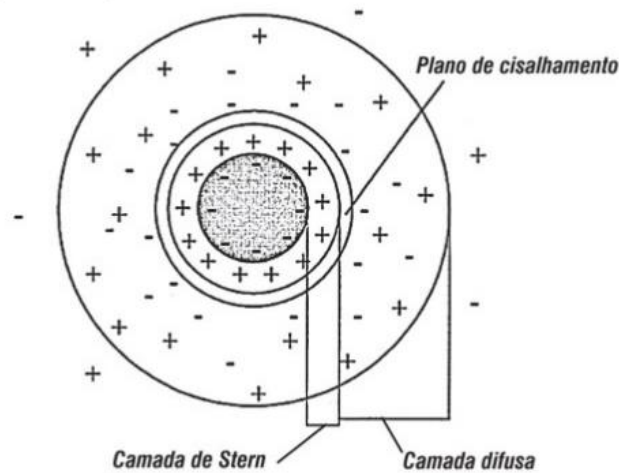
A pequena dimensão das partículas coloidais, bactérias, protozoários ou plânctons presentes nas águas residuárias apresentam baixa velocidade de sedimentação, e torna-se imprescindível a coagulação nas estações de tratamento. Este processo ocorre em unidades de mistura que pode ser mecanizada ou hidráulica dependendo de uma série de fatores, destacam-se a vazão a ser tratada e as condições disponíveis de manutenção e operação dos sistemas (DI BERNADO, 2005).

A coagulação consiste na desestabilização das partículas e enquanto a floculação realiza a agregação das partículas neutralizadas por meio da colisão entre as mesmas, dando origem á formação de densos flocos para a sedimentação (FRANCISCO, 2016; CHEN et al., 2011; WAN et al., 2015; GUTIÉRREZ et al., 2015). Na etapa de sedimentação, a separação sólido-líquido é causada por forças gravitacionais sendo que a taxa de sedimentação é determinada pela Lei de Stokes. No caso das microalgas a velocidade de sedimentação é diretamente proporcional à densidade e ao raio das células algais, além das características no meio em que se encontram (VANDAMME et al., 2013).

A maioria das microalgas apresentam cargas negativas em pH neutro (7), devido a presença de carboxila (-COOH), ácido fosfórico (H_3PO_4), fosfodiéster (-OH) e grupos funcionais amina (-NH₂). Para manter a neutralidade elétrica das partículas, íons de cargas opostas da solução são atraídos para sua superfície, e os demais íons de mesma carga acabam por serem repelidos. Perto da superfície da célula forma uma densa camada de íons denominada por Camada de Stern. A interação entre íons de mesma carga e íons de cargas contrárias que se movem entorno da superfície é conhecida como camada difusa. A junção entre a camada de Stern e a camada difusa é conhecida por dupla camada elétrica

(VANDAMME et al., 2013). Na Figura 2 está apresentado esquema da dupla camada elétrica presente em uma partícula.

Figura 2: Representação esquemática da dupla camada elétrica.



Fonte: Daltin, 2011.

Sendo assim, as cargas das partículas em suspensão podem ser determinadas pelo pH quanto pelo potencial zeta, o qual possibilita observar o potencial elétrico da microalga no final da camada difusa. A interação entre as partículas carregadas é apresentada pela teoria DLVO, nomeada assim pelos desenvolvedores: Derjaguin, Landau, Verwey e Overbeek. Esta teoria descreve a interação dos colóides e as forças de atração denominada por força de Van der Waals, e pelas forças de repulsão em termos de energia e distância entre as partículas (VANDAMME et al., 2013).

Portanto, para potencial zeta alto (>25 mV, positivo ou negativo), ocorre à repulsão elétrica entre as partículas, o que apresenta um ambiente estável em suspensão. O processo de coagulação/floculação visa converter o potencial zeta a valores próximos à zero, e influenciar na aproximação entre as partículas até chegar uma distância em que serão atraídos pelas forças de Van der Waals. Vandamme et al., (2013) apontam que as microalgas apresentam potencial zeta tipicamente negativo dentro de uma faixa de -10 a -35 mV, no qual comprova que a maioria das cargas presente nas superfícies das microalgas são negativas.

A coagulação pode ser considerada como o resultado individual ou combinada da ação de quatro mecanismos distintos, sendo: a compressão da camada difusa, a adsorção e neutralização de cargas, a adsorção e formação de pontes e a varredura.

- **Compressão da Camada Difusa:** esse mecanismo ocorre devido à grande quantidade de aplicação de coagulante, capaz de adsorver a superfície das microalgas com finalidade de desestabiliza-las. Como a maioria das cargas presentes na superfície das microalgas é carregada negativamente, a grande concentração de cargas positivas colabora com a compressão da dupla camada de íons formada na superfície das microalgas, ocorrendo à diminuição no raio da esfera mantendo-a eletricamente neutra, e, portanto menor repulsão entre as células algais (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; FRANCISCO, 2016; ROSELET et al., 2015).
- **Adsorção e neutralização de cargas:** esse mecanismo assemelha-se ao mecanismo da camada difusa, devido à finalidade de desestabilizar as cargas presente nas superfícies das microalgas, a principal diferença está relacionada à baixa dosagem de coagulante, porém deve ser levada em consideração a relação estequiométrica entre quantidade de coagulante a ser aplicado e a concentração de partículas presente no meio líquido. Nesse mecanismo a reversão das cargas pode ocorrer facilmente devido à excessiva dosagem do coagulante (DI BERNARDO; DANTAS, 2005, CHEN et al., 2011; GUTIÉRREZ et al., 2015; FRANCISCO, 2016).
- **Varredura:** O mecanismo de varredura está interligado com a quantidade de coagulante, o pH de coagulação e a concentração de íons presente no meio líquido. A dosagem do coagulante na maioria das vezes independente da concentração das células algais. Os flocos gerados possuem grandes dimensões, e, portanto, são mais estáveis se comparados aos flocos gerados no mecanismo de neutralização de cargas. (DI BERNARDO; DANTAS, 2005, DUAN e GREGORY, 2003; FRANCISCO, 2016; ROSELET et al., 2015).
- **Adsorção e formação de pontes:** mecanismo realizado por meio de compostos orgânicos e sintéticos capazes de agir como coagulantes classificados como catiônicos e

aniônicos. Em geral, polímeros que são compostos de cadeias longas, podem ser adsorvidos na superfície das microalgas, sendo que partes dos segmentos livres faz ligação entre as demais partículas promovendo uma espécie de pontes entre elas (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; ROSELET et al., 2015; VANDAMME et al., 2013; FRANCISCO, 2016).

3.7. Coagulantes naturais

Os coagulantes comumente aplicados em sistemas de tratamento são coagulantes químicos e polímeros sintéticos, tais como o cloreto férrico (FeCl_3), o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), e o policloreto de alumínio (PAC). Portanto, as aplicações destes compostos inorgânicos podem contaminar a biomassa com sais metálicos, e produzir águas residuárias tóxicas, além de apresentar condições inaceitáveis para reutilização de subprodutos gerados (AHMAD et al., 2011; GRIMA et al., 2003; VANDAMME et al., 2013). Diante disso, é possível observar que a seleção do coagulante a ser aplicado é de grande relevância, pois o ideal é aplicar produtos de baixo custo, não tóxico, eficazes em baixas doses e extraídos de recursos renováveis (AHMAD et al., 2011; VANDAMME et al., 2013).

Neste sentido, diversos estudos científicos têm sido voltados para a aplicação de coagulantes naturais, por serem produtos biodegradáveis, eficientes, economicamente viáveis, e que não agridem ao meio ambiente (WAN et al., 2015; METCALF e EDDY, 2003; VANDAMME et al., 2013, BAHARUDDIN et al., 2016). Os coagulantes naturais comumente utilizados são o Tanino, a Quitosana, o Amido catiônico, o Quiabo (*Hibiscus esculentus*) e a *Moringa Oleifera* Lam, descritos a seguir:

- **Tanino:** os taninos vêm de metabólitos secundários de plantas, tais como: casca, frutos, folhas e sementes. O tanino presente na casca pode ser extraído de árvores como *Acácia*, *Castanea* e *Schinopsis* (YANG, 2010). Os compostos presentes nas cascas são modificados por processos físico-químicos, devido à introdução de um grupo amina em sua estrutura química, sendo possível garantir suas propriedades coagulantes (MORENO et al., 2015). O coagulante preparado a partir de taninos vegetais é caracterizado por ser catiônico, de baixo peso molecular, com coloração escura e elevada viscosidade (TANAC, 2013). O país que mais se destaca em relação a maior concentração de árvores tanantes do mundo, é o Brasil, que vêm explorando cada vez mais o uso do tanino como

coagulante natural para o tratamento de água de abastecimento e águas residuárias (PEREIRA, 2015; WANG et al., 2018). Estudos apontam que os taninos vegetais extraídos da *Acácia Mearnsii*, são capazes de garantir uma boa coagulação/floculação de microalgas inclusive para as espécies marinhas. Alguns autores apontam que o mecanismo predominante após aplicação do coagulante tanino é o da neutralização de cargas e formação de pontes (FUAD et al., 2018; WANG et al., 2018).

- **Quitosana:** é um produto natural obtido da quitina de carapaças de caranguejos, camarões e lagostas, não tóxico eficaz para amplas espécies de microalgas, e que requer baixas taxas de dosagem para o tratamento de águas residuárias, sendo considerado o segundo biopolímero mais abundante do mundo (GRIMA et al., 2003; RENAULT et al., 2009). A quitosana apresenta alta carga catiônica, com longas cadeias poliméricas, no qual fornece uma remoção satisfatória das células algais devido á presença do grupo funcional amina, sendo possível adsorver fortemente as superfícies das microalgas a fim de desestabiliza-las. Os mecanismos predominantes para as características destes coagulantes são o da adsorção e formação de pontes e adsorção e neutralização de cargas (AHMAD et al., 2011).
- **Amido catiônico:** obtido por fontes naturais (milho, trigo, batata, arroz e mandioca) a partir da adição de grupos quaternários de amônio, apresentam boa eficiência na floculação de microalgas. Os amidos catiônicos, não alteram o pH significativamente, e são menos tóxicos se comparados com a quitosana. Porém, sendo pouco aplicado como coagulante, por competir com usos mais prioritários, tais como seu consumo como alimento (VANDAMME et al., 2010).
- **Quiabo (*Hibiscus esculentus*):** botanicamente conhecido como *Hibiscus esculentus*, coagulante aniônico que consiste no uso do fruto maduro e seco. Os polissacarídeos que compõe o fruto são solúveis em água que apresentam a capacidade de aglomerar as células algais. O *Hibiscus esculentus* apresenta eficiência semelhante aos demais coagulantes naturais, comumente aplicados para o tratamento de águas residuárias domésticas, industriais e da água bruta para abastecimento público. Porém, assim como os amidos catiônicos seu uso compete como com usos mais prioritários, tais como seu

consumo na alimentação, podendo limitar seu uso como coagulante natural (AGARWAL et al., 2001; FAROOQ et al., 2013).

Diversos países em desenvolvimento apresentam diferentes espécies de plantas que podem ser aplicadas como coagulante natural. Tais espécies podem ser aplicadas de forma simples e tradicional, ou mesmo após alguma modificação em sua estrutura química em laboratório (PEREIRA, 2015). Estudos realizados por Jahn (1986), apresentam algumas espécies de vegetais que possuem propriedades coagulantes, tais como a família da *Acanthaceae*, *Anacardiaceae*, *Annonaceae*, *Araceae*, *Cactaceae*, *Capparidaceae*, *Malvaceae*, *Moringaceae*, *Papilionideae* e a *Tiliaceae*. Das plantas citadas destacam-se a família *Moringaceae*, devido à boa eficiência na remoção da turbidez de águas de abastecimento e águas residuárias, no qual também apresentam uma boa distribuição pelo mundo.

Na família da *Moringaceae*, as espécies *Moringa Oleifera* Lam e a *Moringa Stenopetola* se destacam por apresentarem as melhores propriedades coagulantes se comparadas às demais espécies (LÉDO, 2008). Nesta pesquisa buscou avaliar a espécie *Moringa Oleifera* Lam como coagulante natural. Por ser uma espécie amplamente distribuída, e que apresenta boas condições de adaptação nas diferentes regiões do Brasil, mas também facilmente encontrada em outros países do mundo, tais como: a Índia, Egito, Filipinas, Tailândia, Malásia, Paquistão, Singapura, Jamaica e Nigéria, sendo uma matéria-prima de fácil acesso (PEREIRA, 2015).

3.7.1. *Moringa Oleifera* Lamarck (*Moringa Oleifera* Lam)

A origem exata desta espécie é relativamente difícil de apresentar, devido à disseminação em diversos lugares do mundo. No entanto, muitos trabalhos apresentam que a *Moringa Oleifera* Lam é originária do norte da Índia, mas em específico em Agra e Oudh, localizados no sul do Himalaia (FOIDL et al., 2001; MORTON, 1991, MORENO et al., 2016). Em 1950 a espécie *Moringa Oleifera* Lam foi introduzida no Brasil pelo estado do Maranhão como planta ornamental (AMAYA et al., 1992).

O cultivo da *Moringa Oleifera* Lam não requer nenhum tipo de pré-tratamento antes da germinação e apresenta ser facilmente cultivada (RANGEL, 1999). Pode-se propagar em locais com baixa pluviometria e solos bem drenados, podendo chegar entre 5 a 12m de altura (HDRA, 2002; PRINCE, 2002; ABALIWANO et al., 2008). Tal espécie produz frutos de

30 cm de comprimento, que são facilmente abertos quando estão maduros. Nos frutos é possível encontrar sementes com cascas arredondadas com três asas equidistantes. As sementes sem a casca possuem cor branca e são macias quando recém-colhidas (LORENZI et al., 2003). A partir das sementes de *Moringa Oleifera Lam* pode-se obter um óleo de excelente qualidade que se assemelha ao azeite de oliva, devido seu alto teor lipídico (NDABIGENGESERE et al., 1995). O óleo extraído das sementes pode ser aplicado na fabricação de perfumes e/ou como lubrificante de máquinas (PRINCE, 2002).

Na agricultura, as sementes são aplicadas como adubo orgânico para melhorar a fertilidade do solo, sendo aplicadas também como *spray* foliar para o cultivo de culturas como: cebola, pimenta, soja, milho e melão (PRINCE, 2002). As sementes que são destinadas para a área do saneamento, podem ser aplicadas como coagulante natural, por apresentarem propriedades coagulantes quanto na remoção de partículas em suspensão, bactérias, metais e células algais presente nas águas residuárias, além de garantir um lodo com características satisfatórias para reaproveitamento (OKUDA et al., 2001; GHEBREMICHAEL et al., 2005; PRINCE, 2002; MORENO et al., 2016; HAMID et al., 2016). Na Figura 3 estão apresentados um exemplo de uma árvore *Moringa Oleifera Lam* e um exemplo de suas sementes.

Figura 3: Sementes da árvore de *Moringa Oleifera Lam*



Fonte: Própria autora.

O preparo das sementes de *Moringa Oleifera Lam* como coagulante natural, pode ser realizado de diversas formas, tais como: pó integral, pó desengordurado, em solução aquosa e solução salina (BINA et al., 2010). As sementes devem apresentar as seguintes características: cor branca, boa textura e consistência, sem a presença de umidade, fungos e bactérias, para obter um bom coagulante natural. Para tal, as sementes destinadas ao preparo do coagulante devem ser recém-colhidas, devido ser um produto biodegradável e poder diminuir suas

propriedades coagulantes ao longo do tempo (BORBA, 2001; VALVERDE, 2014; KATAYON et al., 2006).

A *Moringa Oleifera* Lam vem se destacando como uma alternativa sustentável para a coagulação de microalgas. As sementes de *Moringa Oleifera* Lam, além de ser um produto de fonte renovável e de baixo custo, gera uma biomassa com baixa toxicidade, sem causar impacto negativo ao meio ambiente (VALVERDE, 2014; HAMID et al., 2016). Estudos afirmam que as sementes possuem certa quantidade de proteínas que se assemelham a atuação de polieletrólitos catiônicos, pH isoelétrico entre 9 e 10, quando adicionadas à água garante uma boa remoção da turbidez (GALLÃO et al., 2006; TEIXEIRA et al., 2012; BAPTISTA et al., 2017). A proteína bruta é o composto encontrado em maior quantidade nas sementes (GALLÃO et al., 2006), sendo dividida em globulina, albumina e prolamina como os principais constituintes de cargas positivas que causam a desestabilização das partículas presentes nas águas residuárias (BAPTISTA et al., 2017). Diversos trabalhos apresentam que as sementes de *Moringa Oleifera* Lam são compostas de 23 a 40% de proteínas (SINGH et al., 2011; CAMACHO et al., 2017).

Entretanto, a *Moringa Oleifera* Lam tem apresentado ser um coagulante obtido por fontes naturais, que apresenta baixa toxicidade, preparo e aplicação de forma simples e barata. Estas opções podem contribuir com a sustentabilidade nos sistemas de tratamento de águas residuárias, principalmente para a separação de microalgas cultivadas em fotobiorreatores, pois além de garantir a separação das células contribui na recuperação de uma biomassa, matéria prima para a obtenção de novos produtos (VALVERDE, 2014; ANDRADE et al., 2014; TEIXEIRA et al., 2012).

O mecanismo de coagulação em que as sementes de *Moringa Oleifera* Lam podem atuar tem sido amplamente discutido pela comunidade científica. No estudo apresentado por Gassenschmidt et al., (1195) conduziram experimentos cromatográficos do pó desengodurado das sementes de *Moringa Oleifera* Lam, a fim de avaliar o teor de proteína e o mecanismo de coagulação atuante no tratamento da água. Concluíram que a atividade floculante da proteína catiônica estimada foi comparada ao um polímero catiônico de base de poliacrilamida. Os derivados de poliacrilamida catiônica de alto peso molecular aplicados para o tratamento da água predomina o mecanismo de adsorção e neutralização de cargas.

O estudo sobre o mecanismo de coagulação discutido por Okuda et al., (2001) realizaram o preparo do coagulante de *Moringa Oleifera* Lam em base salina e em água. As

partículas em suspensão presente na água sintética foram avaliadas pelo potencial zeta. Concluíram que o mecanismo de coagulação não seria a compressão da dupla camada difusa e também não seria a adsorção e neutralização de cargas, pois apesar da aplicação da dosagem ideal, o potencial zeta era muito baixo para ocorrer à neutralização de cargas. Os autores afirmam que após a aplicação do coagulante salino era formado uma estrutura semelhante a uma rede por componentes orgânicos não proteícos, e que o mecanismo predominante seria a coagulação por varredura.

No estudo apresentado por Alsharaa et al. (2016) avaliaram o coagulante de *Moringa Oleifera* Lam, preparado em solução aquosa e aplicados em água bruta para a remoção de microrganismos patogênicos. Afirmaram que ambos os mecanismos de adsorção e neutralização de cargas e o de varredura, podem ocorrer simultaneamente devido baixo peso molecular (6,5 kDa) do coagulante e alta carga positiva (pI acima de 9,6) do material absorvente.

Por outro lado Basulto et al., (2018) apontam que as propriedades coagulantes da semente para a remoção de sólidos, coloides, fungos e bactérias estão relacionados aos vários tipos de proteínas existentes nas sementes, que podem ser melhoradas pela adição de outros cátions, em alguns casos peptídeos e outros compostos orgânicos, tais como taninos, terpenos e alcaloides. A forma no qual se prepara o coagulante pode interferir de certa forma, pois os autores constataram que o valor do potencial zeta aumentou para extratos concentrados e diminuiu para extratos filtrados. O mecanismo predominante para a remoção dos poluentes em águas residuárias são adsorção e neutralização de cargas e para componentes orgânicos não proteicos o mecanismo proposto foi de varredura.

Os estudos voltados ao mecanismo de coagulação têm grande importância, pois além de apresentar uma melhor análise da dosagem, pH e velocidade de sedimentação na etapa de remoção dos sólidos em suspensão, contribui com uma melhor interpretação dos resultados e na eficiência nas etapas de coagulação/floculação e sedimentação (ALSHARAA et al., 2016; BASULTO et al., 2018)

3.8. Sedimentação

A sedimentação é um processo físico onde atua a ação da gravidade, no qual proporciona o movimento descente de partículas precedidas das etapas de coagulação e floculação, em meio líquido de menor massa específica (DI BERNANDO E DANTAS,

2005). Sendo assim, esse processo de separação, não apresenta dispêndio energético nem elevado investimento operacional (ANDRADE e FILHO, 2014).

A etapa de sedimentação pode remover cerca de 60% de sólidos em suspensão e 75% de bactérias, além de matéria orgânica coloidal, substâncias tóxicas de origem orgânica e inorgânica e microrganismos em geral, tais como microalgas cultivadas em efluentes sanitários (VALVERDE, 2014; ANDRADE e FILHO, 2014; LIBÂNIO, 2005).

A morfologia (tamanho e forma da célula) e a carga de superfície (potencial zeta) das microalgas podem afetar diretamente o comportamento das etapas de floculação-sedimentação. As etapas de floculação-sedimentação além de ser uma ótima tecnologia para separação de microalgas podem remover cerca de dois terços ou mais de água presentes na biomassa, contribuindo seu uso em novos produtos (CHATSUNGNOEN et al., 2016).

Os sedimentadores comumente utilizados são tanques cilíndricos, cuja finalidade é facilitar a separação das substâncias particuladas. O espessamento e a clarificação são processos da sedimentação e o equipamento usado para as duas técnicas são semelhantes, diferenciados entre si apenas pelo produto no qual se deseja obter. A fase mais diluída é destinada para os clarificadores e a mais concentrada para os espessadores (ANDRADE e FILHO, 2014; MCCABE et al., 1998).

A sedimentação por processos diluídos (clarificadores) é descrita pela Lei de Stokes, no qual relata que a velocidade de sedimentação é proporcional à diferença da densidade de partículas esféricas e o meio líquido. Se elevar ao quadrado a densidade das partículas esféricas, isso resultaria em valores inversamente proporcionais à viscosidade dinâmica do líquido (ANDRADE e FILHO, 2014).

O comportamento físico da matéria pode interferir diretamente na etapa de sedimentação, tal como a separação de microalgas. A *Chlorella vulgaris* em condições normais apresentam diâmetro de 5 μm , porém se cultivadas em ambientes onde possuem deficiência nutritiva se agrupam com mais sete células formando uma colônia estável e diâmetro de 17 μm , modificando a velocidade de sedimentação no meio (SILVA, 2013; ANDRADE e FILHO, 2014).

A sedimentação por gravidade apresentar ser uma boa técnica de separação de microalgas, mas deve ser levado em consideração o comportamento físico da matéria a ser removida. A eficiência de remoção das partículas pela aplicação de coagulantes (orgânicos ou inorgânicos) e a redução drástica do tempo de sedimentação podem influenciar no

agrupamento das microalgas e, portanto, na etapa de sedimentação (ANDRADE e FILHO, 2014).

3.9. Produtos a partir da biomassa de microalgas

As microalgas têm sido foco de inúmeras investigações biotecnológicas, devido sua importância econômica, nutricional e ecológica. As principais etapas do processamento da biomassa de microalgas envolvem cultivo, separação e extração de metabólitos (RIZWAN et al., 2018). A biomassa de microalgas apresenta pigmentos, carboidratos, proteínas e lipídeos, que variam conforme o gênero e espécie cultivada, e quando recuperados podem ser usadas para produzir inúmeros produtos (ANDRADE et al., 2014; ZAMALLOA et al., 2011).

A biomassa de microalgas cultivadas em águas residuárias pode ser recuperada e aplicada como matéria-prima para a produção de biocombustíveis, ração animal, biofertilizantes e bioplásticos (MOHD et al., 2017), apresentados a seguir:

- **Biocombustíveis:** microalgas apresentam capacidade de armazenar quantidades significativas de lipídeos. As microalgas têm a capacidade de armazenar cerca de 20-50% de trigliceróis, produzidos em lagoas abertas, apresentando quantidade suficiente para sua produção como biocombustível, além de contribuir com redução significativa de gases que provocam o efeito estufa em comparação aos combustíveis fósseis e, portanto, diminuir a exploração de fontes de recursos finitos (MOHD et al., 2017; CAPORGNO, et al., 2015; KEFFER e KLEINHEINZ, 2002).
- **Ração animal** as microalgas possuem carboidratos, proteínas e nutrientes necessários para o crescimento animal e, portanto, a biomassa também pode ser destinada como alimento para animais. Destaca-se o uso como ração para peixes, visto que representam 17% do consumo mundial em termos de proteínas (MOHD et al., 2017; NAIK, et al., 2010; PULZ et al., 2004).
- **Biofertilizantes:** a biomassa de microalgas pode ser processada como fertilizantes para plantas, com finalidade de contribuir na melhoria da composição mineral do sistema solo-planta. O uso da biomassa de microalgas como fertilizante pode diminuir custos com fertilizantes sintéticos, e proporcionar a reciclagem de nutrientes nos solos. Como

biofertilizantes as microalgas podem atuar juntamente com macroalgas para promover o crescimento de plantas, sendo as microalgas as responsáveis na fixação de nitrogênio, tais como a *Anabaena sp.*, *Scytonema sp.*, *Aulosira sp.*, *Tolypothrix sp.* e *Plectonema sp.*, principais gêneros utilizadas como biofertilizantes. Estudos com a *Chlorella sorokiniana* devem ser feitos para que tal espécie seja incluída na lista das demais microalgas já aplicadas para essa finalidade (MOHD et al., 2017; HAYIM, et al., 2011; PULZ et al., 2004).

- **Bioplásticos:** cepas de microalgas verdes (*Chlorella sp*) têm a capacidade de produzirem amido, que contribui em sua transformação como bioplásticos. A digestão enzimática do amido pode ocasionar a lise celular e extrair a glicose das células algais, no qual permite a plastificação das células algais. A produção de amido pode ser influenciada tanto pela concentração de CO₂, quanto pela temperatura e a intensidade luminosa (MATHIOT et al., 2019).
- **Compostos bioativos:** Compostos ativos também conhecidos por metabólitos de microalgas podem produzir recursos primários e secundários. Os metabólitos primários são usados para o crescimento, tais como: carboidratos, lipídeos e proteínas. Os metabólitos secundários não são usados para o crescimento das células algais, geralmente servem para o mecanismo de defesa das células algais. Os metabólitos secundários podem ser utilizados como suplementos farmacêuticos e alimentícios, tais como esteróis, proteínas, enzimas e ômega (MOHD et al., 2017; MUELLER-FUEGA, 2000; MAADANE et al., 2015).

Neste contexto, tanto o método de separação, quanto o método de extração de metabólitos da biomassa algal, devem seguir os mesmos objetivos, ou seja, aplicar métodos eficientes, sustentáveis e com baixo custo para o adequado tratamento, com finalidade de obter uma boa matéria-prima para o preparo de novos produtos. Além do aproveitamento da biomassa de microalgas, a água residuária tratada também pode ser reutilizada para os diversos fins. A reutilização da água negra tratada irá depender do nível do tratamento e a qualidade do efluente final obtido.

O objetivo da presente pesquisa é avaliar a biomassa de microalgas recuperadas como fertilizante. Segundo Wuang et al., (2016), a efetiva aplicação de fertilizantes sintéticos em culturas agrícolas requer baixa mão de obra, com finalidade de fornecer disponibilidade imediata de nutrientes. Porém, a elevada aplicação de fertilizantes sintéticos no solo apresenta excessiva emissão de gases causadores do efeito estufa e elevada degradação do solo, além de aumentar a poluição das águas pelo excesso de nutrientes, denominada por eutrofização. Ao contrário dos fertilizantes químicos, a aplicação de fertilizantes orgânicos implica na diminuição de tais efeitos negativos. Os fertilizantes orgânicos provenientes de microalgas são compostos por alta concentração de macro e micronutrientes, que contribuem com uma quantidade de nutrientes suficientes para o cultivo de inúmeras culturas, além de apresentar manejo sustentável na área agrícola.

3.10. Reuso de efluentes

O reuso de água está relacionado ao tratamento de efluentes com possibilidade de sua aplicação em outros usos menos exigentes, tal prática é bastante antiga, mas que vem sendo investigada continuamente para melhor operação e sofisticação do sistema (METCALF e EDDY, 2003). O reuso de água pode ocorrer de forma direta e indireta, por meio de ações planejadas ou não, além de serem destinadas para fins potáveis e não potáveis. Moruzzi (2008) relata em seu estudo às definições dos diferentes tipos de reuso e suas respectivas finalidades, tais definições foram elaboradas pela Organização Mundial de Saúde (OMS) em 1973, descritos a seguir:

- **Reuso indireto:** é usada diversas vezes para uso tanto doméstico quanto industrial. Após o uso, as águas são descarregadas em águas superficiais ou subterrâneas, apresentando maior diluição, sendo utilizada novamente a jusante. Tal reuso apresenta a necessidade da autodepuração do corpo de água, na maioria dos casos com finalidade de degradar os poluentes que foram descartados com o esgoto *in natura* (WHO, 1973).
- **Reuso direto:** devem ser aplicadas tecnologias apropriadas no sentido de manter a qualidade do efluente conforme a qualidade do uso requerido. Para tal, deve-se realizar um bom planejamento para o uso da água residuária tratada destinada as áreas tais como a irrigação, indústria, recarga de aquífero e água potável (WHO, 1973).

- **Reciclagem interna:** reuso destinadas as instalações industriais, constituído por um sistema fechado, no qual a reposição da água é realizada por outra fonte, e o consumo de água destinada para os processos e operações de tratamento.

Além do reuso de água ser dividido de forma direta e indireta, podem ser subdivididos em reuso potável e reuso não potável. O reuso não potável pode ser destinado para os seguintes fins: agrícolas, industriais, recreacionais, domésticos, manutenção de vazões, aquicultura e recargas de aquíferos subterrâneos (WHO, 1973). Segundo o Programa de Pesquisas em Saneamento Básico - PROSAB (2006), também sugerem o termo reuso controlado, o qual apresenta o ponto de vista sanitário, sustentável e economicamente viável.

Dentro dos diversos tipos de reusos existentes, o reuso direto planejado para fins agrícolas, sendo esse um fim não potável, tem se destacado no sentido de contribuir com a diminuição da aplicação direta de água potável, pois segundo a ONU cerca de 70% do consumo de água, em escala mundial é destinada a agricultura, e o elevado consumo de água no setor agrícola se comparados ao setor urbano e industrial, estão relacionados à precariedade dos sistemas de irrigação, acarretando grandes perdas econômicas e ambientais (LANZA, 2018).

Embora o reuso seja visto como uma boa solução para a escassez da água, são poucos países que adotaram tal prática em larga escala, destacam-se os EUA, Israel e a Austrália. Os países que tem aplicado com efetividade o reuso da água são: Japão, África do Sul, Tunísia e México (SOUSA, 2008; SALGOT, 2018). Segundo Sousa (2008), no Brasil somente a partir de 28 de novembro de 2005 que foi implantada uma resolução federal do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), sob o número 54, com finalidade de estabelecer modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática do reuso direto não potável da água. Já a Associação Brasileira de Normas técnicas (NBR - 13.969), no item 5.6, apresenta um resumo sobre o reuso local, no qual as águas residuárias domésticas podem ser reutilizadas para fins não potáveis, desde que seja de forma segura (ABNT, 1997).

Entretanto, toda a legislação, diretrizes e normas existentes são básicas para projetos mais complexos. Nesse sentido, muitos projetos de reuso de água aplicados no Brasil, são de pequena escala e direcionados diretamente ao setor urbano. Moruzzi (2008), em seu estudo apresenta diferentes experiências em nível internacional de reuso da água direcionado ao setor agrícola, os quais apresentaram diversas aplicações da água de reuso destinadas tanto para a

aplicação de fins ornamentais quanto para irrigação. Nesse sentido, é possível observar uma grande variação nas diferentes demandas e critérios de aplicação da água de reuso, devido as diferentes características sócio-econômicas, geográficas e políticas de gestão apresentada por cada país.

Diante de todos os fatos expostos, o uso adequado de águas residuárias tratadas direcionadas para a irrigação se faz necessário um adequado tratamento antes mesmo de sua aplicação, já que a maioria das tecnologias utilizadas para tratamento da água residuária no Brasil são desenvolvidas para lançamento em corpos d'água ou direcionadas ao uso urbano e industrial com fins não potável. Para tal, a fim de garantir a qualidade para sua aplicação nos mais diferentes usos, devem ser utilizadas tecnologias de tratamento que visam diminuir características indesejáveis, tais como a elevada concentração de sólidos, matéria orgânica e patógenos presente no efluente (SOUSA et al., 2005).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Projeto de pesquisa

O trabalho é parte integrante do projeto FAPESP/NWO processo de número 2013/50351-4 intitulado por “*Recovering Nutrients and Carbon from Concentrated Black Water: A Sustainable Decentralized Approach for Wastewater Treatment*”, desenvolvido em parceria com as seguintes Instituições de Ensino: a Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB/UNESP), a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) e o *Netherlands Institute of Ecology* (NIOO / *Wageningen University*).

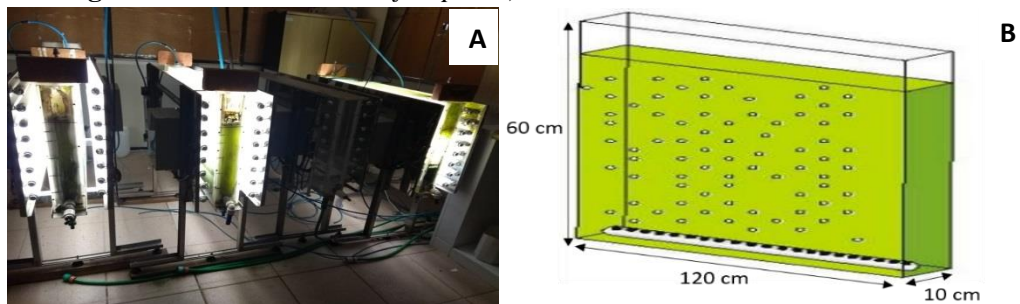
O presente estudo visa avaliar a separação das microalgas cultivadas em água negra pré-tratada em reator UASB, seguido pela secagem da biomassa de microalgas a fim de caracterizá-la. Para tal, foram realizadas medições das variáveis físico-químicas. Toda parte experimental da separação e secagem das microalgas foram realizadas no Laboratório de Hidráulica e Saneamento, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FEB-UNESP), Campus Bauru, São Paulo.

4.2. Efluente de estudo

No Brasil, não se realiza a segregação da água negra, portanto foi utilizada para o estudo uma água negra simulada (ANS), realizada pela mistura de dejetos suínos e esgoto doméstico, a fim de obter proporções de carga orgânica e de nutrientes (fósforo e nitrogênio) próxima das características reais, se caso as águas residuárias totais geradas no Brasil fossem segregadas. Os dejetos suínos eram fornecidos por uma granja localizada na Fazenda Santa Ignácio de Loila no município de Brotas (22°04’09,84” S e 47°58’37,74” O à 752m de altitude) (SLOMPO, 2018). O esgoto doméstico foi obtido da Estação de Tratamento de Esgoto de Monjolinho (ETE), do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos (SAAE), São Paulo. O esgoto doméstico e os dejetos suínos eram encaminhados para um tanque de equalização em escala piloto, no qual se realizava a mistura e proporcionava uma água residuária com características similares à água negra, denominada no presente estudo por ANS.

A ANS foi digerida anaerobiamente em reator UASB mesofílico, em escala piloto. Em seguida, a ANS previamente tratada foi encaminhada para fotobiorreatores (FBR) operado em regime batelada, com capacidade útil de 50L cada. Os fotobiorreatores utilizados na pesquisa em questão são tipo *flat panel*, sendo estes instalados no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), São Paulo. Na Figura 4 estão apresentados os fotobiorreatores utilizados no estudo.

Figura 4: Fotobiorreatores (*flat panel*) instalados no LATAR - São Carlos.



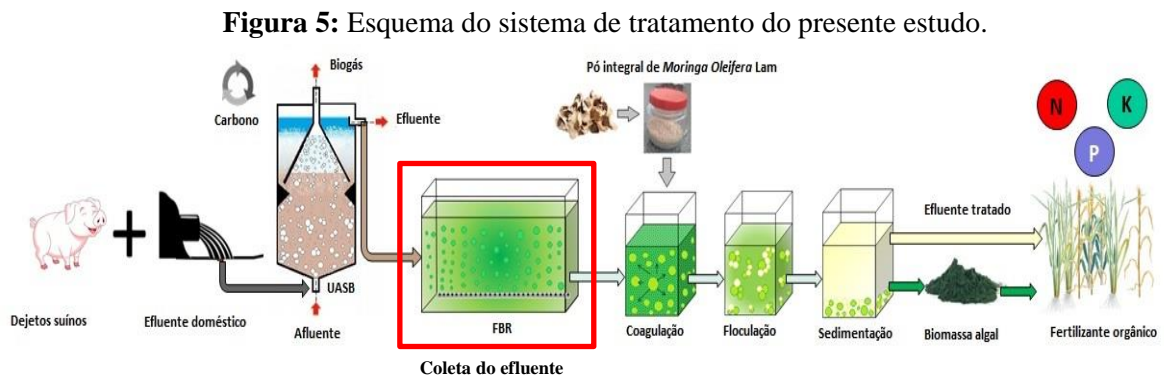
Fonte: Própria autora (A); Sueitt, 2016 (B).

Os fotobiorreatores (FBRs) foram construídos em acrílico, com capacidade total de 64 L, composto por 16 lâmpadas fluorescentes tubulares de 40W e 120 cm de comprimento, apresentando área iluminada de $0,72 \text{ m}^2$ em ambos os lados do reator (instalados 8 lâmpadas em cada lateral), além do caminho óptico de 10 mm. O fotoperíodo utilizado foi de 12 horas, apresentando intensidade luminosa de $196 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$, valor medido dentro do FBR, cuja finalidade era proporcionar intensidade luminosa adequada para o crescimento das microalgas (SLOMPO, 2018).

Os FBRs foram instalados na sala de reatores do LATAR, cuja finalidade era evitar luz externa, além de realizar controle da temperatura ambiente (25°C), por ar condicionado. A inoculação assim como o monitoriamento das fases de crescimento das microalgas foi realizada pelo mestrando Hiago Francisco Schiano da Silva. A microalga inoculada foi a *Chlorella sorokiniana* 211/8k adquirida pela Culture Collection of Algae and Protozoa – (CCAP), Oban, Escócia (SLOMPO, 2018).

No LATAR, a ANS pré-tratada coletada após operação dos fotobiorreatores era homogeneizada e armazenada em bombonas de 20 L previamente higienizadas, mantidas em câmara fria em temperatura de 4°C . Após o armazenamento do volume total de ANS destinada aos testes de separação, a amostra foi encaminhada para o Laboratório de

Hidráulica e Saneamento da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB/UNESP) para realização dos testes de jarros. O sistema de tratamento utilizado na presente pesquisa está esquematizado na Figura 5.



Fonte: Própria autora.

Foi encaminhado cerca de 220 L de ANS, pré-tratada em fotobiorreatores, para o Laboratório de Hidráulica e Saneamento da UNESP, no qual o efluente foi novamente homogeneizado, armazenado em bombonas de 20L, e mantidos refrigerados (7°C). A finalidade dessa etapa era manter um efluente homogêneo e avaliar a eficiência dos testes de separação, assim como caracterizar e avaliar os subprodutos gerados (efluente e biomassa de microalgas).

4.3.Preparo do coagulante natural

O preparo do coagulante natural em pó integral com granulometria específica foi realizado conforme metodologia proposta por Valverde (2014). Os lotes de sementes de *Moringa Oleifera* Lam (MOL) utilizados neste estudo foram obtidos de uma Associação de Recuperação Florestal, localizado no município de Penápolis, São Paulo. No Laboratório de Hidráulica e Saneamento (FEB/UNESP), as sementes foram armazenadas em sacos plásticos devidamente fechados e acondicionados em refrigerador em temperatura de 7 °C.

Para o preparo do coagulante natural eram selecionadas em média 150 sementes saudáveis. Tais sementes eram previamente descascadas, trituradas em liquidificador industrial (Bermar/modelo BM47 800W) durante 3 minutos e homogeneizada em peneira (Bertel /Tyler 35 mesh) com abertura de 425 mm/μm. Em seguida o pó foi levado para

estufa de recirculação de ar (Nova Ética) em temperatura de 60°C, por um período de 10 minutos. O pó integral com granulometria específica foi mantido em frascos de vidro devidamente fechado e acondicionado em dessecador até o momento de sua aplicação no efluente. Na Figura 6 estão apresentadas as etapas do preparo do coagulante natural das sementes de MOL.

Figura 6: Etapas do preparo do coagulante natural.



Fonte: Própria autora.

Conforme recomendações propostas por Valverde (2014) optou-se em utilizar o coagulante natural por um período máximo de 7 dias. Por ser um produto biodegradável o processo natural de degradação das sementes podem ocorrer, e, portanto optou-se em preparar o coagulante nos dias em que eram realizados os testes de separação. Foi realizado simultaneamente ao preparo do coagulante a análise do teor de proteínas em diferentes tempos de armazenamento, a fim de investigar a eficiência das sementes aplicadas como coagulante natural. Ao longo de todo o período experimental; a fração de proteínas presente nas sementes de MOL foi mensurada. A análise de proteínas foi realizada conforme metodologia proposta pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005), sendo aplicado o método macro *Kjeldahl* (4500 – B). Foi separada uma alíquota de 0,5 g do pó integral das sementes de MOL e determinado à quantidade de nitrogênio orgânico total

presente nas sementes do lote de estudo, conforme proposto pela *Association of Official Analytical Chemists - AOAC*, (2000).

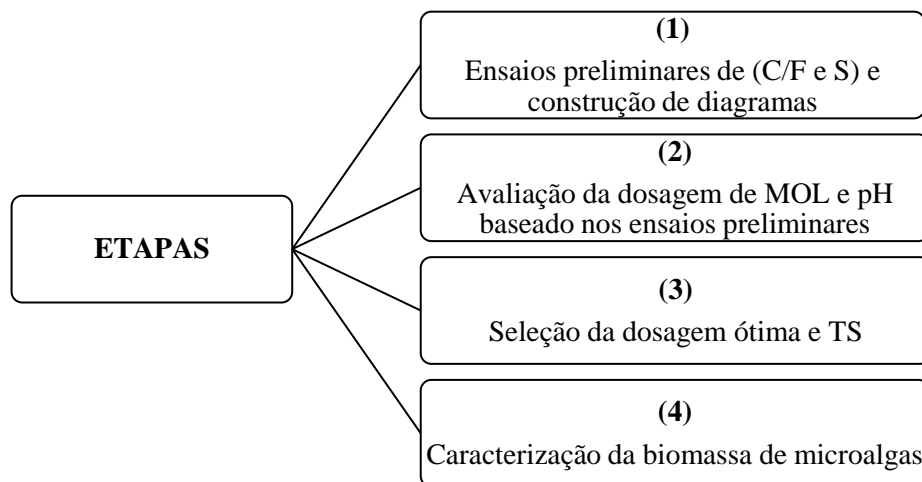
4.4. Testes de Coagulação/Floculação e Sedimentação

Os ensaios de coagulação/floculação e sedimentação (C/F e S) foram realizados em equipamento *Jar Test* (PoliControl modelo FlocControl IV), providos de 6 jarros em acrílico transparente com capacidade de 2L e 6 hastes misturadoras em aço inox reguláveis. O equipamento possui um painel eletrônico para regular a velocidade de rotação das hastes. Para a realização dos ensaios os seguintes parâmetros operacionais foram fixados, tais como: velocidade de mistura rápida (VMR) de 150 rpm (Gradiente de mistura rápida – GMR = 138 s^{-1}), tempo de mistura rápida (TMR) de 3 minutos, velocidade de mistura lenta (VML) de 30 rpm (Gradiente de mistura lenta – GML = 18 s^{-1}), tempo de mistura lenta (TML) de 20 minutos, conforme proposto por Camacho et al. (2017), Nishi et al. (2011), Teixeira et al. (2012), Moreti (2014), Hamid (2016), Freitas (2013). Os autores utilizaram as sementes de *Moringa Oleifera* Lam como coagulante natural para remoção de diferentes espécies de microalgas e cianobactérias sendo avaliado por meio de testes de (C/F e S), aplicando diferentes velocidades e tempo de mistura conforme as características do efluente de cada estudo.

4.5. Procedimentos de ensaios

Este trabalho foi dividido em quatro etapas, apresentadas na Figura 7.

Figura 7: Etapas dos ensaios realizados em laboratório.



4.5.1. Análises

Antes de cada etapa foi realizada a caracterização físico-química do efluente de estudo. O desempenho dos tratamentos foi avaliado com base na remoção dos seguintes parâmetros: turbidez, densidade óptica (DO) (540, 682 e 750 nm), DQO, nitrogênio amoniacal (N-amoniacal), Nitrogênio Total *Kjeldahl* (NTK) e fósforo total (FT) (APHA, 2005). Todas as análises foram realizadas em triplicata, de acordo com os procedimentos recomendados no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). Os métodos analíticos empregados para a realização dos ensaios de coagulação/floculação e sedimentação estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Metodologia, equipamentos e referências para as etapas de separação de microalgas.

PARÂMETROS	MÉTODOS E EQUIPAMENTOS
Turbidez (UNT)	Método 2130 B - turbidímetro HACH 2100N
Cor verdadeira (uC)	Método 2120 C - turbidímetro POLICONTROL Ap2000
DO (nm)	Metodologia Kliphuis et al. (2010) - Espectrofotômetro HACH - DR 2500
SST (mg.L⁻¹)	Método 2540 D - Gravimétrica – Filtração em membrana (1,2 µm)
DQO (mg.L⁻¹)	Método 5220 D (Refluxo fechado) – Espectrofotômetro HACH - DR 2500
pH	Método 4500 H ⁺ B – pHmetro Orion – 210 ^a
Temperatura (°C)	Método 2550 B - Termômetro de mercúrio
NTK (mg.L⁻¹)	Método Kjeldahl – 4500 B - Espectrofotômetro HACH/ DR 2500
N-amoniacal (mg.L⁻¹)	Método 4500 – NH ₃ D (Eletrodo íon seletivo) – Multiparâmetro HQ40D HACH
NO₂ (mg.L⁻¹)	Método 4500 B (Clorimétrico) - Espectrofotômetro HACH - DR 2500
NO₃ (mg.L⁻¹)	Método 8171 (Redução de Cádmi) e Método HACH 10020 (Tubo de ácido cromotrópico) – kit da HACH – DR 2500
FT (mg.L⁻¹)	Método 4500 PD (Cloreto Estanoso) - Espectrofotômetro HACH - DR 2500
Tempo de Sedimentação	Cronômetro

As densidades ópticas (540, 682 e 750 nm) foram realizadas por método espectrofotométrico, segundo a metodologia proposta pelos autores Kliphuis et al. (2010), Ugwu et al., 2007 e Ruiz et al., 2011. As análises das densidades ópticas eram realizadas simultaneamente com a turbidez. Foram separados 25 mL da amostra transferidos para cubetas de vidro com tampa de rosca e lidas em espectrofotômetro (DR 2500), em três comprimentos de onda (540, 682, 750 nm). O resultado foi obtido após dispersão e absorção da luz emitida pelos aparelhos, apresentando as seguintes características:

- DO₅₄₀ (540 nm): ocorre a dispersão da luz pelas algas;

- DO_{685} (685 nm): ocorre a dispersão e absorção pela clorofila-*a*;
- DO_{750} (750 nm): ocorre a absorção máxima pelas algas.

A razão entre DO_{682} e DO_{540} é uma medida relativa da quantidade de clorofila-*a* por célula. A turbidez e densidade óptica foram analisadas simultaneamente, para apresentar resultados mais confiáveis da concentração da suspensão algal. O uso da avaliação da DO foi aplicado a fim de verificar melhor a eficiência de remoção das células algais em suspensão, com a possibilidade da construção e avaliação de gráficos de barras de erros, avaliando a diminuição da concentração de algas em suspensão presente na amostra, a fim de fazer comparações mais apropriadas, já que a avaliação da turbidez pode ser afetada pela concentração de outras substâncias do meio extracelular influenciando a avaliação da eficiência de floculação (TEIXEIRA et al., 2017). A eficiência de redução da DO, foi realizado pela razão entre a DO inicial e a DO final, isto é, avaliada após as etapas de coagulação, floculação e sedimentação.

As análises da Demanda Química de Oxigênio (DQO) foram divididas em DQO total, filtrada e suspensa, conforme a metodologia citada, sendo possível definir:

- DQO total: amostras brutas, que apresenta o valor total da matéria orgânica, sem a necessidade de passar pela filtração;
- DQO filtrada: amostras brutas filtradas em membranas com porosidade de 1,2 μm ;
- DQO suspensa: valor calculado, a fração suspensa é obtida pela diferença entre a DQO total e a DQO filtrada.

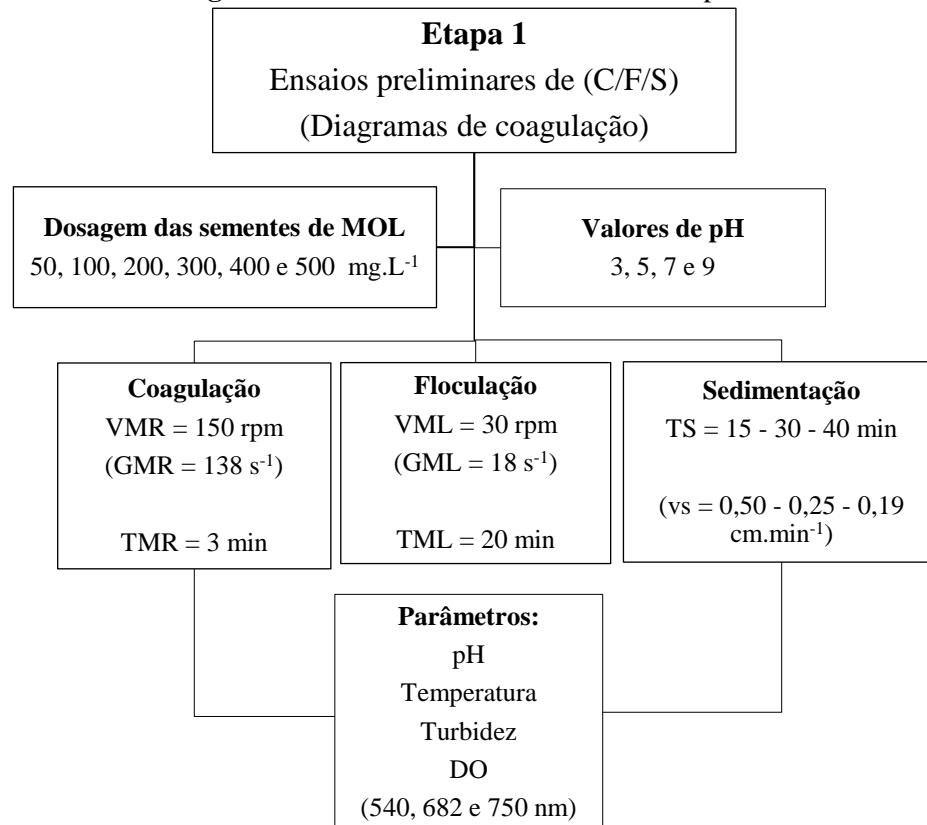
Nessa pesquisa não foi realizado análise quantitativa da influência de aplicação das sementes de MOL em água, com finalidade de avaliar o acréscimo de matéria orgânica acrescida no efluente do estudo, a avaliação foi realizada pela remoção média obtida da demanda química de oxigênio bruta, suspensa e filtrada.

4.5.2. ETAPA 1: Ensaios preliminares (C/F e S) e construção dos diagramas

A finalidade dessa etapa do estudo foi criar diferentes ambientes em termos de aplicação do coagulante natural, pH e tempo de sedimentação a fim de avaliar as primeiras condições ótimas de separação das microalgas a partir dos ensaios de C/F e S. Na Etapa 1 foram realizados ensaios preliminares variando a dosagem de coagulante (50, 100, 200, 300, 400 e 500 mg.L^{-1}), valor de pH do efluente (3, 5, 7 e 9) e tempos de sedimentação (15, 30 e

40 minutos), sendo avaliadas as seguintes velocidades de sedimentação (0,50, 0,25 e 0,19 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$) conforme proposto por Cassini et al. (2017), Moreti, (2014), Teixeira et al. (2012), Konradt et al. (2007). Para o ajuste do pH foi aplicado ácido sulfúrico (P.A – ACS / PM 98,8%) e solução de hidróxido de sódio (NaOH / 8M). Na Figura 8 estão apresentadas as variáveis avaliadas na Etapa 1.

Figura 8: Procedimentos dos ensaios na Etapa 1.



Os resultados foram analisados no software *Oringin 8.6 Surface*, sendo assim plotados os diagramas de coagulação. Para a elaboração dos diagramas o eixo "x" foi destinado aos valores de pH e o eixo "y" destinado as dosagens do coagulante natural. A partir da interpolação dos pares de valores (pH *versus* dosagem de MOL) foi possível construir regiões ótimas para a interpretação da remoção da turbidez, que podem ser comparadas conforme o tempo de sedimentação estudado. Todas as análises foram realizadas em triplicata e de acordo com os procedimentos recomendados pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

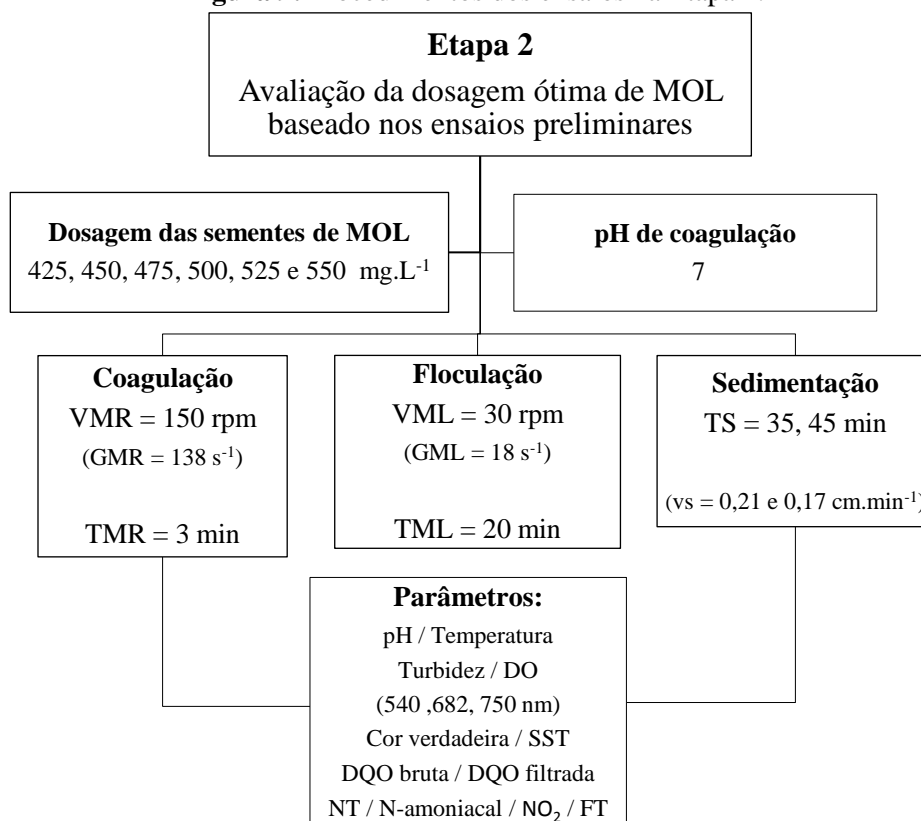
Nessa etapa ainda realizou-se a análise de regressão linear e ajuste pelo método dos mínimos quadrados, a fim de otimizar os vários ensaios realizados em laboratório, cuja

finalidade foi avaliar os dados da pesquisa e diminuir a quantidade de reagentes e tempo gasto nessa etapa do estudo, e contribuir com novos planejamentos experimentais (APÊNDICE A).

4.5.3. ETAPA 2: Avaliação da dosagem de MOL, pH e Tempo de sedimentação baseado nos ensaios preliminares

Nessa etapa, depois de conhecida as regiões de eficiência de separação das microalgas em termos de dosagens, pH e tempo de sedimentação, delimitou-se novos ensaios de C/F e S, com as faixas de dosagem e tempo de sedimentação obtidos após ensaios em laboratório. Na Etapa 2 foi determinado a dosagem ótima de coagulante, baseado nos melhores resultados obtidos na Etapa 1. Foi variado as dosagens de coagulante (425, 450, 475, 500, 525 e 550 mg.L⁻¹), os tempos de sedimentação (35 e 45 minutos) e as velocidades de sedimentação (0,21 e 0,17 cm.min⁻¹), mantendo o pH neutro. Como a finalidade era avaliar a biomassa algal como fertilizante orgânico, foi mantido a partir da Etapa 2 valor de pH igual a 7. Nessa etapa foram analisados os seguintes parâmetros de controle: pH, turbidez, DO (540, 682 e 750 nm), cor verdadeira, SST, DQO, DQO filtrada, NTK, N_{amoniacal}, nitrito (NO₂) e FT. Na Figura 9 estão apresentadas as variáveis avaliadas na Etapa 2.

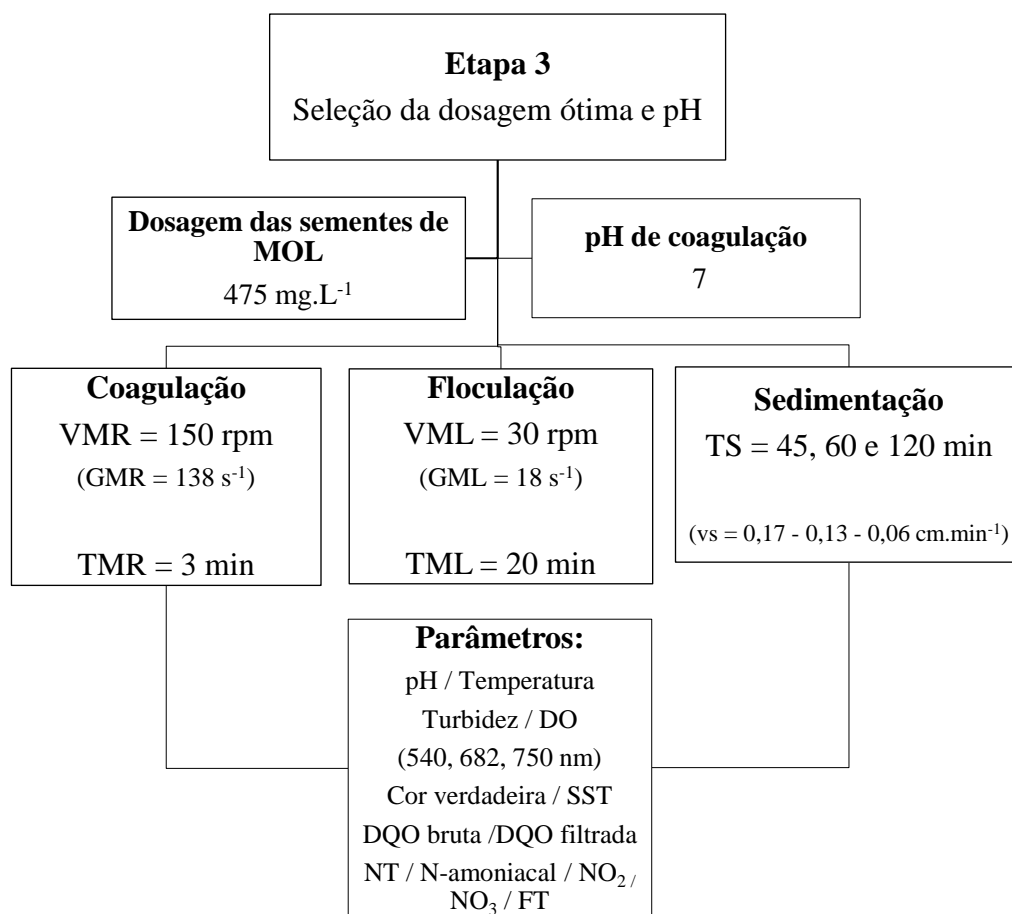
Figura 9: Procedimentos dos ensaios na Etapa 2.



4.5.4. ETAPA 3: Seleção da dosagem ótima e Tempo de sedimentação

Na Etapa 3 reproduziu-se o melhor resultado obtido na Etapa 2. Nessa etapa foram analisados os mesmos parâmetros de controle apresentados na Etapa 2. O objetivo da Etapa 3 foi avaliar a dosagem ótima do coagulante de MOL em diferentes tempos de sedimentação (45, 60 e 120 minutos), o pH foi mantido em neutro (pH=7). Na Figura 11 estão apresentadas as variáveis que foram analisadas na Etapa 3.

Figura 10: Procedimentos dos ensaios na Etapa 3



4.5.5. ETAPA 4: Caracterização da biomassa de microalgas

Após avaliação de todas variáveis ótimas das etapas de (C/F e S) no decorrer do trabalho, a biomassa de microalgas recuperada foi encaminhada para o processo de secagem e o efluente tratado caracterizado. Os flocos de microalgas sedimentados foram transferidos para bandejas de polietileno e encaminhado para estufa com recirculação de ar (Nova Ética) em temperatura média de 60°C com 50% de recirculação de ar. Em seguida a biomassa seca foi caracterizada pelos seguintes parâmetros: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), zinco (Zn), sódio (Na), enxofre (S), e o carbono orgânico, conforme proposto por Malavolta et al., (1997). A fim de avaliar a composição de macronutrientes primários presentes na amostra. Na Tabela 2 estão apresentados os nutrientes a serem avaliados na caracterização da biomassa de microalgas.

Tabela 2: Metodologia, equipamentos e referências para as etapas de separação de microalgas.

Parâmetros	Métodos e equipamentos
Nitrogênio (N)	Digestão sulfúrica (N-total); semi-microkjeldahl; Espectrofotômetro VIS
Fósforo (P)	Digestão Nitro-perclórica; metavanadato de amônio; Espectrofotômetro VIS
Potássio (K)	Digestão Nitro-perclórica; metavanadato de amônio; Espectrofotômetro de Absorção Atômica
Cálcio (Ca)	Digestão Nitro-perclórica; metavanadato de amônio; Espectrofotômetro de Absorção Atômica
Magnésio (Mg)	Digestão Nitro-perclórica; metavanadato de amônio; Espectrofotômetro de Absorção Atômica
Zinco (Zn)	Digestão Nitro-perclórica; metavanadato de amônio; Espectrofotômetro de Absorção Atômica
Sódio (Na)	Digestão Nitro-perclórica; metavanadato de amônio; Espectrofotômetro de Absorção Atômica
Enxofre (S)	Digestão Nitro-perclórica; metavanadato de amônio; turbidimetria do sulfato de bário; Espectrofotômetro VIS
Carbono orgânico	Forno Mufla

4.6. Análise estatística

Em todas as etapas do trabalho foram utilizadas de ferramentas estatísticas a fim de validar as informações obtidas em laboratório. Foi utilizado o teste de comparação de médias, Teste *t* de *Student* com 95% de confiança ($p\text{-valor} < 0,05$), a fim de realizar a comparação de médias e verificar as variáveis que apresentam diferença significativa (MILLER e MILLER, 1993). O planejamento experimental de cada etapa foi especificado a seguir:

As sementes de MOL por ser um produto biodegradável podem diminuir suas propriedades coagulantes (proteínas) conforme o tempo de armazenamento. E nesse sentido foram realizados 15 ensaios do teor proteínas ao longo das etapas do trabalho, todos os ensaios foram realizados em triplicata.

ETAPA 1: Para avaliação da remoção dos parâmetros de controle: turbidez e DO_{682} interpretados a partir da construção de diagramas de coagulação, o delineamento fatorial nessa etapa da pesquisa foi de $(7 \times 4 \times 3 \times 3)$ devido os seguintes fatores: seis dosagens do coagulante de MOL mais o branco, quatro valores de pH, três tempos de sedimentação, sendo todos os ensaios realizados em triplicata. Para tal, foram realizados 252 ensaios destinados à avaliação da Etapa 1.

ETAPA 2: Para avaliação da faixa de dosagem de 425 a 550 $mg.L^{-1}$, 35 e 45 minutos de sedimentação, referente ao processo de separação das microalgas, sendo os seguintes parâmetros de controle avaliados: temperatura, pH, turbidez, densidade óptica (540, 682 e 750 nm), cor verdadeira, sólidos em suspensão, nitrogênio total e fósforo total. O delineamento fatorial da Etapa 2 foi de $(7 \times 1 \times 2 \times 3)$, os quais apresentam os seguintes fatores: seis dosagens do coagulante natural mais o branco, um único valor de pH, dois tempos de sedimentação, sendo todos os ensaios realizados em triplicata. Para a Etapa 2 foram necessários 42 ensaios.

ETAPA 3: Para a avaliação das condições ótimas do método de separação das microalgas foram avaliados tais parâmetros de controle: temperatura, pH, turbidez, densidade óptica (540, 682 e 750 nm), cor verdadeira, sólidos em suspensão, nitrogênio total e fósforo total. O delineamento fatorial da Etapa 3 foi de $(2 \times 1 \times 3 \times 3)$, devido tais fatores: uma dosagem do coagulante natural e o branco, um valor de pH, três tempos de sedimentação, ensaios realizados em triplicata. Na Etapa 3 foi realizado um total de 18 ensaios.

ETAPA 4: Destinada a avaliação da biomassa de microalgas seca, foram realizados dois ensaios para a avaliação dos seguintes parâmetros de qualidade: pH, nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), zinco (Zn), sódio (Na), enxofre (S), e o carbono orgânico.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização da ANS

Na Tabela 3 estão apresentadas as características dos efluentes utilizados para os ensaios das Etapas 1, 2 e 3.

Tabela 3: Caracterização do efluente proveniente de fotobiorreatores.

Parâmetros	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
pH	7,1 ± 0,1	7,2 ± 0,1	7,5 ± 1
Temperatura (°C)	25 ± 0,1	24 ± 0,1	20 ± 2
Turbidez (UNT)	214 ± 1	168 ± 1	130 ± 3
Cor verdadeira (uC)	221 ± 1	298 ± 1	220 ± 11
DO 540 nm	2,8 ± 1	2,7 ± 1	2,2 ± 1
DO 682 nm	3,2 ± 1	3,2 ± 1	2,7 ± 1
DO 750 nm	2,3 ± 1	2,3 ± 1	1,8 ± 1
DQO bruta (mg L ⁻¹)	648 ± 52	823 ± 52	750 ± 52
DQO filtrada (mg L ⁻¹)	128 ± 4	166 ± 1	175 ± 1
NTK (mg L ⁻¹)	114 ± 15	190 ± 9	121 ± 9
N-amoniaco (mg L ⁻¹)	11 ± 1	15 ± 1	19 ± 1
FT (mg L ⁻¹)	48 ± 7	55 ± 14	38 ± 14
SST (mg.L ⁻¹)	433 ± 19	367 ± 39	300 ± 39

Segundo Yang (2010), as sementes de MOL apresentam boa eficiência por via sedimentação quando as águas variam de 50 a 500 (UNT), sendo possível remover até 99% da turbidez inicial. Tal característica é encontrada na ANS de estudo, no qual apresenta turbidez inicial de 214 (UNT) para a Etapa 1. Os elevados valores de turbidez, densidade óptica, cor verdadeira e SST são indicativos da alta concentração de microalgas associados no efluente. A razão entre a DO_{680nm} e a DO_{540nm} é uma medida relativa da quantidade de clorofila-*a* presente nas células algais, onde valores acima de 1,0 apontam células saudáveis (KLIPHUIS et al, 2010). Quando calculada essa razão nos efluentes das Etapas 1, 2 e 3, todas foram acima de 1,0, indicando a presença de células de microalgas integras.

5.2. Teor de proteínas presente nas sementes de MOL

As sementes de MOL utilizadas no presente trabalho apresentam diâmetro de 1cm/semente e massa de aproximadamente 216 mg/semente. Na Figura 11 estão apresentadas as sementes utilizadas no preparo do coagulante natural.

Figura 11: Sementes de *Moringa Oleifera* Lam descascadas.



Fonte: Própria autora.

Segundo Araujo (2010) e Pereira (2015) apontam em seus estudos que a árvore *Moringa Oleifera* Lam pode produzir em média de 1.000 á 6.000 vagens de 30 á 40 cm. As vagens podem fornecer em média 16 sementes, e, portanto durante um ano é possível produzir 24.000 sementes a cada árvore, quantidade suficiente para manter sua produção como coagulante natural.

As características presentes nas sementes de MOL utilizadas na pesquisa em questão apresentaram vantagens pelo seu tamanho e qualidade. Foi possível observar que apenas 4 sementes de MOL eram suficientes para tratar 2L de efluente, fornecendo economia em seu preparo e eficiência na aplicação como coagulante natural. Além das propriedades físicas, foram avaliadas as propriedades químicas das sementes no sentido de verificar o teor de proteínas presente no lote de estudo.

Segundo Katayon et al., (2006), as sementes de MOL, por ser um produto biodegradável podem diminuir suas propriedades coagulantes conforme o tempo de armazenamento, por estarem ligados a fatores como: temperatura, pH, umidade, microrganismos, os quais podem interferir diretamente na sua atuação como coagulante. O lote de sementes separado para este estudo apresentou em média 27% de proteína bruta, valor dentro da faixa citada na literatura.

Muitas pesquisas têm sido voltadas em avaliar a variação da concentração de proteínas presentes nas sementes de MOL. Camacho et al., (2017) analisaram o teor de proteínas antes de sua aplicação como coagulante natural. Foi separada uma alíquota de 0,5 g das sementes em pó integral e em pó desengordurado. O teor de proteínas foi determinado pelo método macro *Kjeldahl*, sendo o valor de nitrogênio obtido multiplicado pelo fator de conversão (proteína = NTK(%) x 6,25), no qual foi possível obter 40,2% ± 1 de proteínas em pó integral e 41,7% ± 2 a 42,9% ± 1 de proteínas em pó desengordurado. Os autores concluíram que o pó integral das sementes de MOL apresentou teor de proteínas similar ao pó desengordurado.

Portanto, foi possível verificar que os métodos de extração de proteínas das sementes não apresentam diferença significativa ($p=0,05$). Para tal, acredita-se que o melhor método de preparo do coagulante deve ser aquele que envolva poucas etapas e contribua com um processo menos dispendioso. Na Tabela 4 estão apresentados os valores de proteínas obtidos a cada etapa do trabalho e seus respectivos períodos de armazenamento.

Tabela 4: Concentração de proteínas das sementes de MOL para cada etapa do trabalho.

Etapas	NTK (mg.L⁻¹)	Proteínas (%)	Período de armazenamento (meses)
0	37,3	23 ± 7	0
1	41,2	27 ± 3	3
2	39,4	25 ± 2	6
3	50,4	32 ± 7	10
4	-	-	-

No início do experimento, as sementes em estudo apresentaram um teor de proteína bruta de 23% ±7. Ao longo do experimento, o teor de proteína das sementes foi de 27% ±3, 25% ±2 e 32% ±7, após os 3, 6 e 10 meses de armazenamento, respectivamente. As sementes de MOL utilizadas na pesquisa, além de reportarem uma quantidade de proteínas satisfatória, não apresentaram diferença significativa ($p=0,05$) ao longo dos 10 meses de armazenamento. O coagulante a base de MOL apresentou vantagem devido a estabilidade da propriedade coagulante influenciando em maior período de aplicação no tratamento.

No estudo realizado por Valverde, (2014) realizaram nove métodos de preparo do coagulante de MOL, sendo: pó integral (Tyler 32 e 48), pó desengordurado (Tyler 32 e 48), em solução integral aquosa, solução integral salina e solução desengordurada salina. Concluíram que tanto o pó integral quanto o pó desengordurado com granulometria específica, não apresentaram diferença significativa ($p=0,05$) na remoção da turbidez, cor aparente e UV_{254nm}. No caso do coagulante na forma de pó desengordurado, quanto menor o tamanho das partículas das sementes de MOL menor era a eficiência no processo de coagulação/floculação. Os coagulantes preparados em solução aquosa e salina apresentaram baixa eficiência para água que apresentavam baixa turbidez.

Já o trabalho realizado por Teixeira et al. (2017) avaliaram os diferentes diâmetros dos grãos das sementes de MOL preparados como coagulante natural. Para tal, analisaram os

grãos com granulometrias de 175 e 860 μm , e observaram que não houve diferença significativa ($p=0,05$) na eficiência de remoção dos sólidos em suspensão para ambos os tamanhos dos grãos avaliados. Concluíram que, se manter apenas a trituração das sementes garantindo um coagulante com variedade no tamanho dos grãos, não influenciariam na eficiência das sementes aplicadas como coagulante, apenas apresentaria diminuição de mais uma etapa direcionada ao preparo do coagulante.

No mesmo trabalho apresentado por Teixeira et al. (2017), os autores apontam que a etapa de aquecimento pode influenciar no preparo do coagulante e, portanto, na sua eficiência. Tais autores afirmam que as sementes podem diminuir cerca de 50% na eficiência de remoção da turbidez. Os autores Ghebremichael et al. (2005) apresentam uma faixa de resistência das sementes ao aquecimento, apresentando temperatura entre 60 a 100 °C por período de tempo entre 0,5 a 5 horas, nessas condições a propriedade coagulante das sementes permaneceriam constante até sua aplicação como coagulante. Nessa presente pesquisa, foi utilizado no preparo do coagulante temperatura de 60°C por 10 minutos, dentro da faixa citada na literatura. E conforme a avaliação do teor de proteínas do lote de estudo, foi possível observar que a etapa de aquecimento do pó integral das sementes de MOL não influenciou na diminuição da eficiência de remoção da turbidez e das densidades ópticas (540, 682 e 750 nm), trazendo maior benefício quanto a aplicação desse tipo de coagulante.

Teixeira et al. (2017), ainda avaliaram lotes de sementes de MOL de diferentes regiões e climas, a fim de avaliar se as sementes colhidas em distintos locais poderiam interferir diretamente na eficiência da floculação. Para tal, utilizaram no estudo sementes adquiridas do estado do Paraná, localizado no sul do Brasil, que apresenta clima subtropical úmido, e sementes do estado de Sergipe, localizado no semiárido brasileiro de clima tropical. Observaram que os lotes de sementes avaliados não apresentaram diferença significativa e, portanto, não interferiram na eficiência de floculação promovida pela MOL. Os autores ainda afirmam que as condições de colheita e armazenamento realizados em distintos lugares, não alteram a eficiência da floculação, apontando assim a concentração de proteínas existentes nas sementes de MOL é relativamente estável mesmo colhida de diferentes locais. As sementes utilizadas nessa presente pesquisa foram obtidas do estado de São Paulo, e apresentaram 27% de proteínas, que mantiveram constante durante 10 meses. Além do valor obtido está dentro da faixa de 23 a 40%, citada por diversos autores, não implicaram no teor de proteínas presente nas sementes obtidas de diferentes locais. Vale ressaltar que foi avaliado o valor de

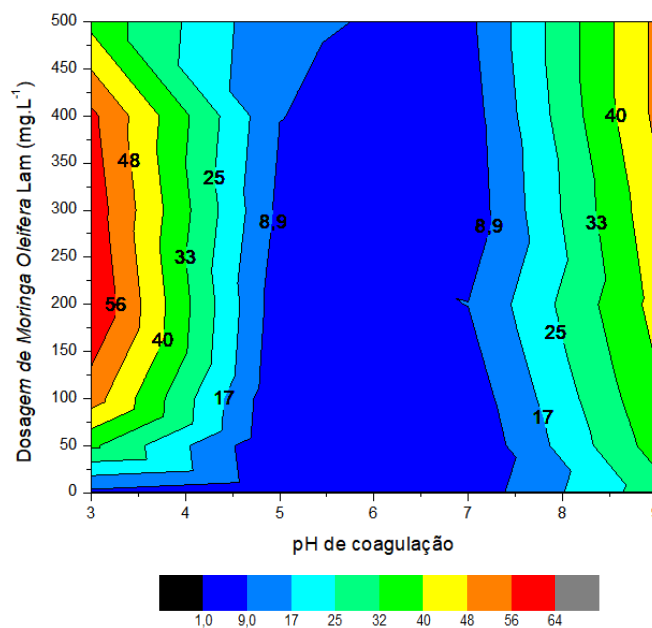
proteína bruta presente no lote do estudo, não se fez a distinção dos tipos de proteínas presentes nas sementes de MOL (SINGH et al., 2011; CAMACHO et al., 2017).

5.3. ETAPA 1: Ensaios de (C/F e S) para a construção dos diagramas de coagulação

5.3.1. Diagrama de coagulação da turbidez em 15 minutos de sedimentação

Nas Figuras 12, 13 e 14 estão apresentados os diagramas de coagulação para os tempos de sedimentação 15, 30 e 40 minutos, respectivamente. Nos diagramas foram apresentados as dosagens do coagulante pelos valores de pH, a fim de avaliar as eficiência de remoção da turbidez. Para a leitura dos diagramas, a cor azul apresenta os resultados de menor eficiência e a cor vermelha para os resultados de maior eficiência na remoção do parâmetro de controle. Os números destacados em cada curva do diagrama apresentam a porcentagem de remoção da turbidez.

Figura 12: Diagrama de coagulação em 15 minutos de sedimentação.



Na Figura 12 foi possível observar que os valores de pH entre 5 e 7,5 apresentaram apenas 9% na remoção da turbidez, em 15 minutos de sedimentação, sendo a menor eficiência observada para a separação das microalgas. Em ambiente ácido (pH igual a 3), para dosagens do coagulante entre 150 a 400 mg.L⁻¹, a eficiência média de remoção da turbidez foi de 60%.

Para ambiente alcalino, com pH igual a 9 e dosagens entre 400 e 500 mg.L⁻¹ a eficiência de remoção da turbidez chegou a 40%.

As células inoculadas para a assimilação de nutrientes na água negra digerida anaerobiamente foi à espécie *Chlorella sorokiniana*. Tais microalgas são capazes de restaurar sua carga superficial negativa após a coagulação, por apresentar grande quantidade de íons através de sua membrana celular (UDOM et al., 2013). Para tal, a dosagem do coagulante, o pH de coagulação e o tempo de sedimentação devem apresentar ambiente adequado conforme as características das espécies de microalgas inoculadas.

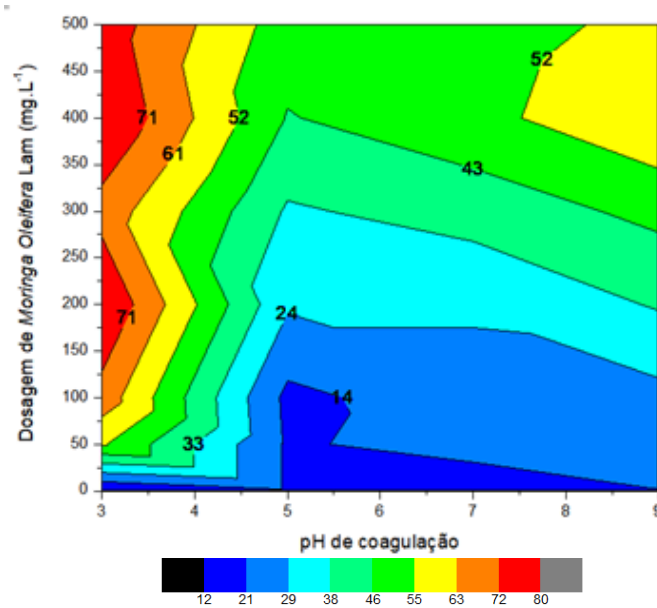
Neste caso, o tempo de sedimentação de 15 minutos, as baixas dosagens das sementes de MOL (50, 100 e 150 mg.L⁻¹) avaliadas e os valores de pH entre 5 e 7,5, não proporcionaram adequado ambiente para a separação das microalgas. Os valores médios de eficiência de remoção da turbidez, nos ensaios com tempo de sedimentação de 15 minutos, demonstraram que apenas 50% das células algais poderiam ser removidas se aplicados concentrações de 400 a 500 mg.L⁻¹.

De forma geral, o tempo de 15 minutos não foi suficiente para o encontro de célula-célula, e assim garantir a formação de densos flocos. Para tal, a dosagem do coagulante, o valor de pH usado para coagulação e o tempo de sedimentação devem ser cuidadosamente escolhidos, devido aos diferentes ambientes gerados e conforme as necessidades das microalgas inoculadas. E neste sentido outros ambientes foram testados e avaliados na presente pesquisa.

5.3.2. Diagrama de coagulação da turbidez em 30 minutos de sedimentação

Na Figura 13 estão apresentadas as curvas de eficiência de remoção da turbidez em 30 minutos de sedimentação. Pode-se observar que para pH de coagulação entre 5 e 9, as baixas dosagens do coagulante apresentaram cerca de 20 % de remoção da turbidez, no qual não houve diferença significativa se comparada com a mesma região avaliada no tempo de sedimentação igual a 15 minutos ($p=0,05$).

Figura 13: Diagrama de coagulação em 30 minutos de sedimentação.



A interação do coagulante com as células algais em 30 minutos de sedimentação para as dosagens de 50, 100, 200 e 300 mg.L⁻¹ não foram eficientes para a separação das microalgas devido as baixas remoções da turbidez. As melhores eficiências podem ser observadas quando foi aplicado 500 mg.L⁻¹ do coagulante natural, em pH de coagulação igual a 3 e 9, com redução de 72 e 55% da turbidez, respectivamente. Segundo Zhu et al. (2016), a superfície das partículas em geral apresenta cargas que podem variar em cargas negativas ou positivas, denominadas por anfóteras. Essas superfícies apresentam uma variabilidade na carga devido ao pH do meio em que se encontram, transferindo ou recebendo do meio íons [H⁺] ou [OH⁻], sendo variado conforme o equilíbrio químico necessário. Acredita-se que tal comportamento pode ter ocorrido após a aplicação das sementes de MOL em pH ácido e alcalino, com elevada concentração de tais íons, em 30 minutos de sedimentação, sendo um bom tempo para a interação das cargas, observada pela boa eficiência de remoção da turbidez obtida do valor de pH igual 3 e 9.

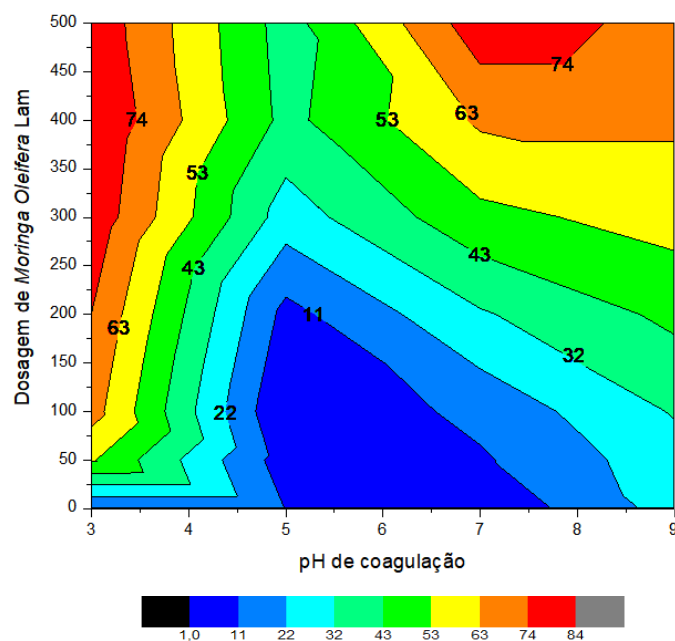
As melhores dosagens aplicadas em ambiente ácido, avaliando a turbidez foram aplicando entre 150 a 500 mg.L⁻¹ das sementes de MOL, sendo possível remover cerca de 80% da turbidez. Em ambiente neutro e básico a remoção foi de 50%, aplicando dosagens das sementes de MOL acima de 350 mg.L⁻¹. Valores de pH ácido podem transferir a amostra maior concentração de cátions de hidrogênio [H⁺] e a aplicação direta do ácido pode ajudar na

desestabilização das microalgas, e diminuir a aplicação da dosagem do coagulante natural. Porém, caso contrário pode ocorrer se a amostra apresentar um excesso de cátions de $[H^+]$, e provocar a reversão das cargas da superfície das microalgas e inviabilizar o processo (ZHU et al., 2016). No entanto, o tempo de sedimentação de 30 minutos não foi suficiente para alcançar boa eficiência para ambos os ambientes estudados, e para este caso foi avaliado as combinações de dosagens pelos valores de pH em 40 minutos de sedimentação.

5.3.3. Diagrama de coagulação da turbidez em 40 minutos de sedimentação

No diagrama de coagulação para o tempo de sedimentação de 40 minutos (Figura 14) demonstra regiões com curvas bem definidas, devido a melhor interação das células algais com o coagulante aplicado, após maior tempo destinado a etapa de sedimentação. A faixa de dosagem de coagulante entre 200 a 500 $mg.L^{-1}$ apresentaram boas condições para a remoção de microalgas, e conforme as análises estatísticas todos os valores apresentados nessa faixa não apresentaram diferenças significativas ($p=0,05$). Dentre os valores testados nessa faixa de tratamento, a melhor dosagem do coagulante natural aplicada foi de 500 $mg.L^{-1}$, o que confirma as primeiras condições já apresentadas no diagrama em 30 minutos de sedimentação.

Figura 14: Diagrama de coagulação em 40 minutos de sedimentação.



Após aplicação do coagulante a base de MOL, houve uma remoção de 81% de turbidez, em valor de pH igual a 9 em 40 minutos de sedimentação. Becker (1994), afirma que algas já se autofloculam em pH com valores acima de 8, isso pode ocorrer tanto pelo consumo de CO₂ pela fotossíntese, quanto pela adição direta de bases, é o caso da aplicação de hidróxido de sódio (NaOH), levando a supersaturação de íons na amostra, possibilitando que as paredes das células algais sirvam de suporte sólido e garantindo uma melhor interação com o coagulante aplicado.

Por tais motivos, ao menos um jarro foi deixado com o efluente bruto sem o contato com o coagulante, a fim de poder observar a diferença causada pela aplicação do coagulante natural, para todos os valores de pH estudados. Quanto aos valores obtidos em pH igual 9, em termos de remoção de turbidez no jarro chamado como “branco” foi de 27%, o que demonstra de fato que em ambientes alcalinos há um incremento na floculação antes mesmo da aplicação do floculante.

Teixeira et al. (2012), em seu estudo, utilizaram sementes de MOL como coagulante natural, de vagens secas adquiridas do estado de Sergipe. As sementes foram descascadas e moídas em pilão, passadas em peneiras de 420 µm de abertura, e armazenadas por 45 dias. Para o tratamento foi aplicado 1000 mg.L⁻¹ das sementes de MOL, em intervalo de 20 a 240 minutos, e avaliados os valores de pH entre 4 a 9. A melhor eficiência das sementes de MOL para a separação das microalgas (*Chlorella vulgaris*) foi obtido em pH igual a 9,2, atingindo eficiência de 89% de remoção da turbidez, em 120 minutos de sedimentação.

Nessa pesquisa foi possível obter eficiência similar após aplicação de 450 e 500 mg.L⁻¹ do coagulante a base de MOL, o qual apresentou remoção de 81% da turbidez, em pH igual a 9 e 40 minutos de sedimentação. Nota-se que a quantidade de coagulante natural aplicado e o tempo de sedimentação de contato foram menores daqueles citados por Teixeira et al. (2012), e que o ambiente simulado no presente trabalho foi adequado para separação das microalgas.

No ambiente ácido (pH 3) foi possível remover 85% da turbidez, aplicando 500 mg.L⁻¹ das sementes como coagulante natural, em 40 minutos de sedimentação, tal eficiência foi o melhor resultado se comparado as demais regiões avaliadas nos diagramas. Cassini et al. (2017), compararam vários coagulantes, dentre eles avaliaram as sementes de MOL como coagulante natural para a separação de microalgas como a *Scenedesmus sp.*, *Chlorella sp* e a *Synechocystis sp.*, que foram cultivadas em efluente anaeróbico. As sementes

de MOL foram obtidas em mercado local, e foram secas em estufa, descascadas, moídas (moedor comercial), peneiradas (peneiras de 500 μm) e passadas em malha de 250 μm , a fim de obter um pó fino e homogêneo. E por fim, 5 g do pó das sementes foram diluídos em água. Os autores alcançaram remoção de 80% da turbidez, após ajuste do pH para a faixa ácida (4 a 5), aplicando dosagens de 100 a 150 mg.L^{-1} . Os mesmos autores ainda afirmam que valores de pH menores que 4 apresentam eficiência de apenas 50%. O ambiente ácido (pH 3) avaliado nessa etapa da pesquisa apresentou uma remoção de 85% da turbidez, aplicando 500 mg.L^{-1} , sendo essa dosagem superior daquela apresentada por Cassini et al. (2017). Foi possível notar que dosagens abaixo de 100 mg.L^{-1} e tempo de sedimentação menor que 30 minutos, apresentaram apenas 30% da separação da biomassa de microalgas, para estes casos os resultados são considerados insatisfatórios.

A principal diferença entre o presente estudo e o apresentado por Cassini et al. (2017), está relacionado na forma de preparo do coagulante, pois tais autores optaram em aplicar um coagulante preparado em solução aquosa, no qual garantiu maior interação em ambiente ácido, do que a aplicação direta do pó integral das sementes de MOL, além de apresentar menor consumo de sementes. No entanto, as sementes em solução aquosa acrescentam mais etapas ao preparo do coagulante, e dependendo das características do efluente a ser tratado pode não ser viável, tal como para efluentes com pH alcalino.

Em ambiente neutro (pH 7) foi possível verificar nas regiões do diagrama que as dosagens de 50 a 200 mg.L^{-1} , foi obtido entre 22 a 32% de eficiência na remoção da turbidez, nas dosagens de 250 a 350 mg.L^{-1} as eficiências obtidas foram de 32 a 53%, já as maiores concentrações aplicadas do coagulante natural de 350 a 500 mg.L^{-1} foi possível obter de 63 a 74% de remoção da turbidez, todos as eficiências foram avaliadas em 40 minutos de sedimentação. Portanto, as melhores eficiências obtidas para valor de pH neutro foram observadas nos resultados acima de 350 mg.L^{-1} . Outro aspecto relevante obtido no ambiente neutro foi observado na pequena variação do pH, não comprometendo as características finais da biomassa. Nota-se que ambientes com pH ácido ou alcalino podem comprometer as características finais da biomassa de microalgas, já que a *Chlorella Sorokiniana* tem preferência por ambiente neutro para valores de pH entre 6 e 7, no qual garante uma adequada recuperação das células algais (MORITA et al., 2000).

De maneira geral, todos os ambientes analisados (ácido, neutro e alcalino) apresentaram as melhores eficiências concentrados na faixa de 400 a 500 mg.L^{-1} , analisadas

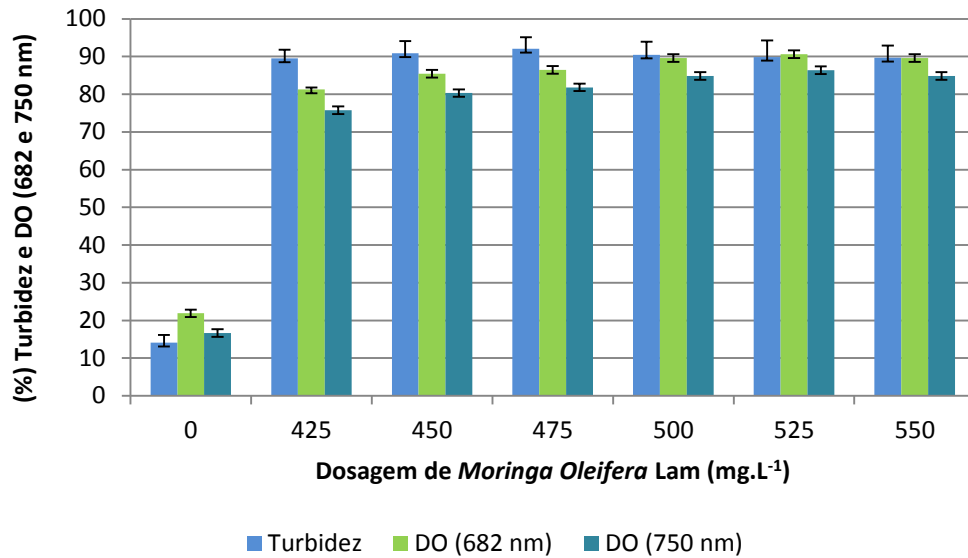
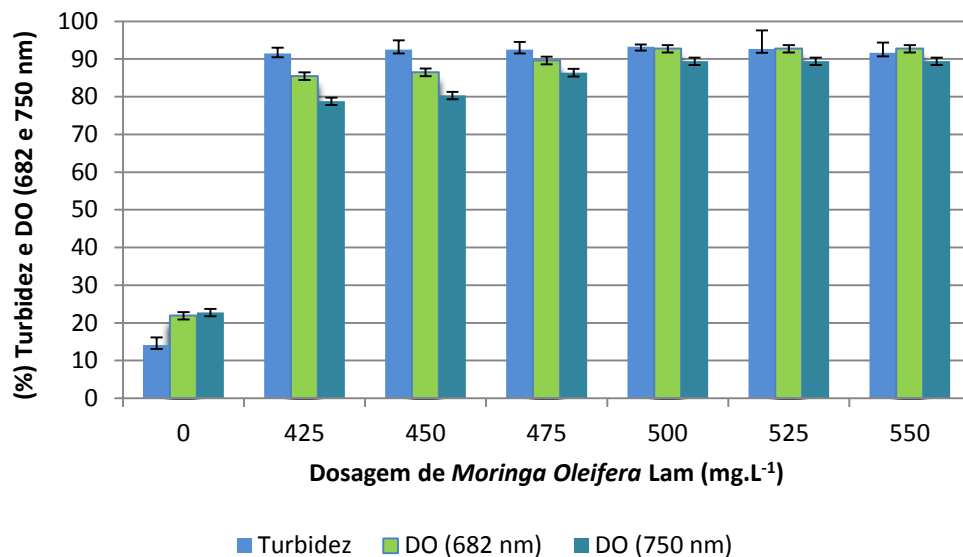
em 40 minutos de sedimentação. No entanto, vale destacar que o valor de pH a ser aplicado na etapa de separação das microalgas devem ser conforme a melhor eficiência na separação das microalgas e no produto final em que se deseja obter, pois a recuperação dos metabólitos e a preparação dos produtos estão diretamente relacionados ao valor de pH da biomassa (GRIMA et al., 2003; ANDRADE et al., 2014).

Dos três ambientes testados, ácido, neutro e alcalino, os melhores resultados observados foram 85% de redução da turbidez em ambiente ácido, 74% em ambiente neutro, 80% em ambiente alcalino, ambos foram aplicados 500 mg.L^{-1} em 40 minutos de sedimentação. Apesar do ambiente ácido (pH 3) apresentar a maior eficiência de remoção da turbidez, as próximas etapas foram destinadas a avaliação de dosagens de coagulante e diferentes tempos de sedimentação e pH neutro (7,5). O objetivo foi avaliar a biomassa de microalgas separadas como fertilizante orgânico, para tal a aplicação de produtos químicos, ácidos ou bases para a correção do pH, podem inviabilizar o uso da biomassa algal no setor agrícola com aplicação direta em alimentos, sendo um dos motivos em continuar a avaliando os testes de separação para efluente com valor de pH neutro.

5.4. ETAPA 2: Otimização da dosagem do coagulante, pH e Tempo de sedimentação

5.4.1. Turbidez e densidade óptica

Ressalta-se que na Etapa 2 todos os ensaios foram realizados em pH neutro, isto devido a uma economia de insumos e qualidade do produto final, (biomassa algal). Foram avaliados a remoção da turbidez e as reduções das densidades ópticas ($DO_{682\text{nm}}$ e $DO_{750\text{nm}}$), obtidos logo após as etapas de coagulação/floculação e sedimentação. Nessa etapa do estudo foram avaliados os tempos de sedimentação em 35 e 45 minutos, a escolha por tais períodos de tempo foi a partir do melhor tempo de sedimentação obtido na Etapa 1 (40 minutos). Nas Figuras 15 e 16 estão apresentadas as eficiências de remoção da turbidez e reduções das densidades ópticas em 35 e 45 minutos de sedimentação, respectivamente.

Figura 15: Eficiência de remoção da turbidez e redução da densidade óptica em 35 minutos**Figura 16:** Eficiência de remoção da turbidez e redução da densidade óptica em 45 minutos.

As concentrações de MOL analisadas apresentaram eficiências médias de remoção da turbidez entre 86 a 93%, em 35 e 45 minutos de sedimentação. Os ensaios em branco (0 mg.L⁻¹) apresentaram remoção dos parâmetros entre 14 a 24%. Conforme as Figuras 15 e 16 os resultados dos testes em branco foram similares para ambos os tempos de sedimentação (35 e 45 minutos). O efluente branco apresentou diferença significativa apenas comparada com as demais dosagens do coagulante ($p=0,05$), demonstrando a boa eficiência das sementes de MOL utilizadas como coagulante natural.

A aplicação do coagulante natural nas dosagens de 425 e 450 mg.L⁻¹, apresentaram as menores eficiências se comparadas as demais concentrações da faixa de dosagem do

coagulante MOL avaliada, sendo alcançadas em média 80% de remoção da turbidez, e 35 minutos de sedimentação. As melhores dosagens avaliadas em 35 minutos sedimentação, foram observadas em 475, 500, 525 e 550 mg.L⁻¹, apresentando 88%, 89%, 90% e 90% de remoção da turbidez. As eficiências apresentadas pela aplicação das diferentes dosagens não apresentaram diferença significativa ($p=0,05$).

No estudo realizado por Teixeira et al. (2012), aplicaram 1000 mg.L⁻¹ das sementes de MOL para separação da *Chlorella vulgaris*, em pH igual a 9,2; sendo alcançado uma remoção de 89%, em 120 minutos de sedimentação. Já o estudo apresentado por Udom et al., (2013) a eficiência de separação de microalgas do gênero *Chlorella sp.* foi de 85%, sendo aplicado 4.670 mg.L⁻¹ das sementes de *Moringa Oleifera* Lam, em efluente com valor de pH superior a 6 e 60 minutos de sedimentação. Nota-se que o estudo apresentado por Teixeira et al., (2012) e Udom et al., (2013) comparado a essa presente pesquisa, a eficiência entre 85 a 89% de remoção da turbidez pode ser alcançada aplicando entre 450 a 500 mg.L⁻¹ das sementes de MOL, entre 35 e 45 minutos na etapa de sedimentação. Para tal, foi possível verificar que a melhor atuação das sementes como coagulante natural destinada a separação das microalgas foi obtido em pH neutro se comparado ao pH alcalino estudado por Teixeira et al., (2012) e Udom et al., (2013), pois o efluente em pH neutro contribuiu com uma economia significativa na aplicação do coagulante natural. Além disso, foi possível observar que o aumento de 10 minutos na etapa de sedimentação pode contribuir com uma economia de 50 mg.L⁻¹ na aplicação das sementes.

Um aspecto importante está relacionado ao excesso de coagulante aplicado ao tratamento, no qual pode provocar a reversão das cargas elétricas das superfícies das microalgas, na maioria dos casos podem inverter as cargas negativas para positivas, e permitir que as células algais permaneçam em suspensão sem gerar flocos densos para a sedimentação (VANDAMME et al., 2011). Para tal, a concentração do coagulante se aplicado ao tratamento deve ser cuidadosamente avaliada.

Na presente pesquisa, as melhores eficiências de remoção das microalgas foram observadas nas concentrações entre 475 a 550 mg.L⁻¹ em 45 minutos de sedimentação, os resultados de remoção da turbidez foram de 91 a 93% da turbidez, de 89% a 93% da densidade óptica (682 nm), e de 82% a 87% da densidade óptica (750 nm), respectivamente.

Mezzari et al., (2014) estudaram o tanino comercial modificado para separação da *Chlorella vulgaris*, cultivada em efluente de suinocultura, no qual foi aplicado dosagem de

11 mg.L⁻¹, em pH igual a 7, apresentando remoção de 97% da turbidez. Já os autores Divakaran et al., (2002) estudaram a quitosana como coagulante natural para remoção de três espécies de microalgas (*Spirulina*, *Oscillatoria* e *Chlorella*), em pH igual 7, sendo aplicado 5 mg.L⁻¹ do coagulante e sendo possível obter uma remoção de 90% de todas espécies estudadas. O tanino e a quitosana se comparado com as sementes de MOL apresentaram certa vantagem apenas pela menor quantidade de coagulante aplicado ao tratamento. Porém, tanto o tanino quanto a quitosana apresentam alta dependência do pH, e isso requer ao final do tratamento a aplicação de ácido ou base a correção do efluente, e tal ação poderá inviabilizar o uso da biomassa de microalgas recuperada devido a modificação de sua característica final, e portanto no produto a qual se deseja chegar.

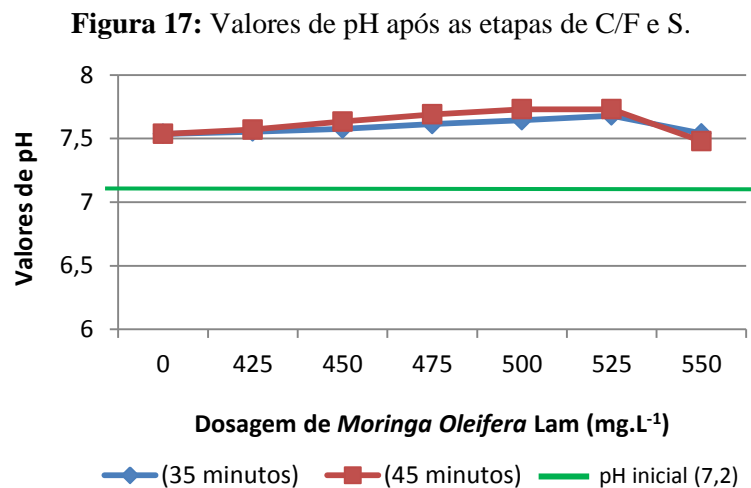
Choy et al., (2016) realizaram a comparação entre o amido catiônico, sulfato de alumínio e cloreto de férrico para separar a microalga *Ankistrodesmus* do seu meio de crescimento. Para tal, aplicaram 120 mg.L⁻¹ de amido de arroz autoclavado, em efluente com valor de pH igual a 4, no qual foi possível recuperar 80% da biomassa de microalgas após 30 minutos de sedimentação. Nesta pesquisa, foi obtido eficiência de 80% remoção da turbidez, para valores de pH ácido, aplicando entre 100-150 mg.L⁻¹ das sementes de MOL (Etapa 2), as eficiências de separação das microalgas obtidas foram de 63-74%, sendo possível notar que as eficiências de remoção da turbidez aplicando as sementes de MOL como coagulante natural e o amido catiônico foram bem próximas. Em ambiente alcalino (pH=10) aplicou-se 80 mg.L⁻¹ do amido, no qual foi possível obter eficiência de remoção de 92,5%. No presente estudo, as sementes de MOL foram aplicadas entre 50 -100 mg.L⁻¹ em ambiente alcalino, no qual apresentou uma remoção de 43%, e foi possível observar que o ambiente alcalino as sementes de MOL apresentavam menores eficiências se comparadas ao amido catiônico apresentado por Choy et al., (2016). A eficiência do amido em pH neutro é pouco discutida na literatura.

Nota-se que o amido catiônico apresenta ser uma alternativa atraente devido sua abundância e baixo custo no mercado, porém seu uso como coagulante pode competir sua exploração com usos prioritários, tais como seu consumo como alimento, além de ser uma alternativa trabalhosa aplicada em larga escala (VANDAMME et al., 2013). Já as sementes de MOL apresentam certo benefício por ser uma espécie mundialmente distribuída, que apresenta boa adaptação no seu cultivo em diferentes regiões, além de proporcionar diferentes usos como fertilizante, suplemento alimentar e coagulante natural (MORENO et al., 2016).

Valores aplicados de coagulante acima de 550 mg.L^{-1} podem ser inviáveis em pH neutro, já que as eficiências obtidas permaneceram constantes até a última concentração da faixa de coagulante avaliada. Da faixa de dosagem do coagulante natural estudada, a dosagem de 475 mg.L^{-1} apresentou certas vantagens em termos econômicos, de eficiência e sustentabilidade, sendo possível obter remoção de 91% da turbidez e 89% e 86% da densidade óptica (682 e 750 nm), e 45 minutos de sedimentação.

5.4.2. Potencial Hidrogeniônico (pH)

Na Figura 17 estão apresentados os valores de pH obtidos após as etapas de coagulação/floculação e sedimentação.



O pH tem grande importância na etapa de separação das microalgas, pois o pH pode ser um fator limitante na densidade da carga de superfície das microalgas e alterar a eficiência da coagulação (FRANCISCO, 2016; CASSINI et al. 2017). O valor do pH inicial da ANS do estudo era de $7,2 \pm 0,1$, após agitação foi possível obter o pH do efluente “branco” o valor de 7,5, para os dois tempos de sedimentação estudados.

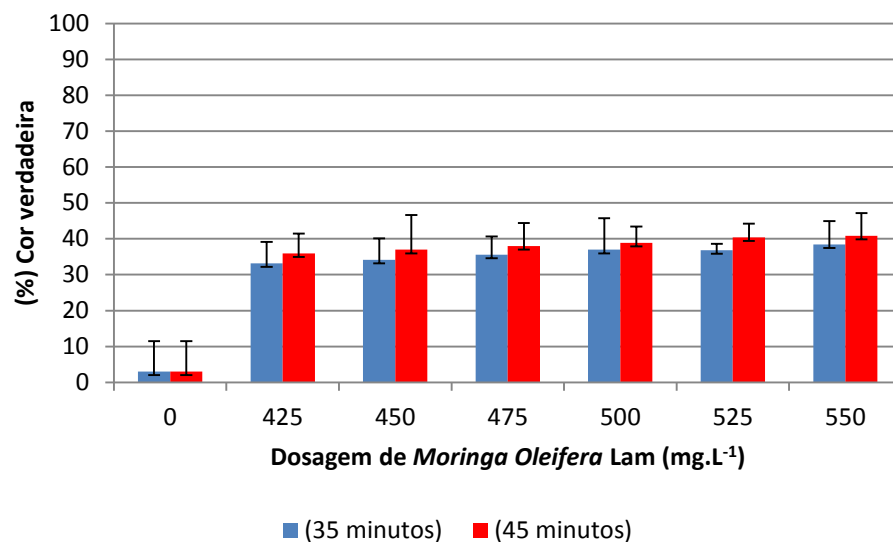
Conforme a faixa de dosagem do coagulante avaliada nessa etapa do estudo (425 a 550 mg.L^{-1}) foi possível observar que o maior valor de pH alcançado foi de 7,7; após a aplicação de 525 mg.L^{-1} das sementes de MOL. Portanto, nota-se que as sementes de MOL não alteram o pH do efluente de forma significativa ($p=0,05$), e descarta-se a necessidade de

se aplicar reagentes para a correção do pH, apresentando outro aspecto positivo na aplicação das sementes de MOL como coagulante natural.

5.4.3. Cor verdadeira

Na Figura 18 estão apresentados os resultados da eficiência de remoção da cor verdadeira para as diferentes concentrações do coagulante natural de sementes de MOL aplicadas.

Figura 18: Eficiência de remoção da cor verdadeira em 35 e 45 minutos de sedimentação.



O valor inicial da cor verdadeira foi 298 ± 1 uC, indicativo da elevada concentração de material coloidal dissolvido presente na ANS. Após os testes de jarros, o efluente “branco” apresentou remoção de 5%, caso submetido apenas às rotações de mistura rápida e lenta, apresentando baixa remoção da cor verdadeira. O baixo valor obtido pelo efluente “branco” evidencia a necessidade da aplicação do coagulante para obter remoções significativas. Após aplicação do coagulante natural as melhores eficiências de remoção da cor verdadeira foram obtidas a partir da concentração de 475 mg.L^{-1} , apresentando remoção de 38%, 39%, 40% e 41% da cor verdadeira, em 45 minutos de sedimentação, tais valores não apresentaram diferença significativa ($p=0,05$). Portanto, foi possível verificar que as sementes MOL podem remover cerca de 40% de cor verdadeira presente na ANS.

Wyatt et al. (2012), avaliaram coagulantes químicos tais como o sulfato de alumínio e o cloreto férrico para a separação de microalgas do gênero *Chlorella* sp. A concentração de

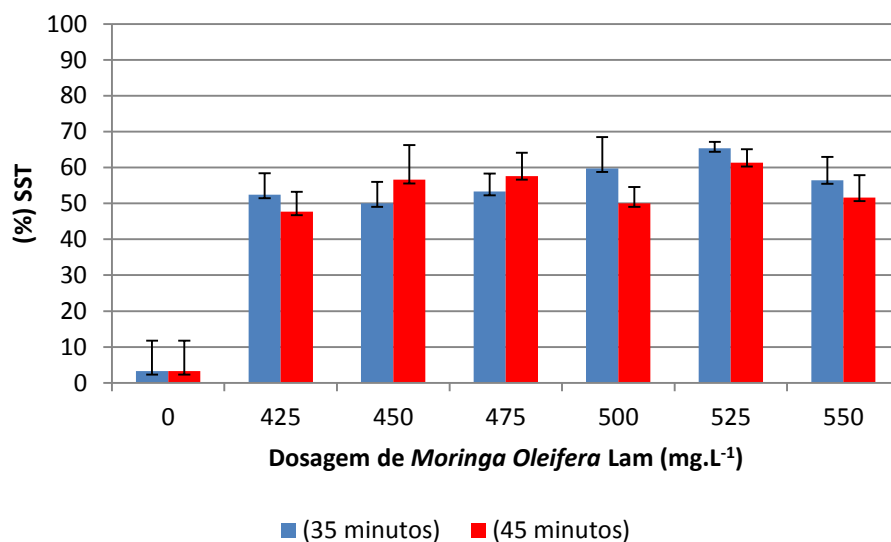
sais metálicos aplicado foi maior que 1000 mg.L^{-1} , e assim alcançando remoção acima de 90% da cor verdadeira. Entretanto, os autores afirmam que a aplicação de coagulante a base de alumínio ocasionou a lise celular das microalgas, além do excesso de coagulante químico ter provocado alteração no parâmetro cor, devido o excesso de coagulante aplicado ao meio.

Nessa pesquisa apesar das eficiências de remoção da cor verdadeira serem baixas se comparados aos resultados apresentado por Wyatt et al. (2012), a aplicação do coagulante natural é bem menor, além de não contribuir com a ruptura das células algais, sendo observados pela razão entre as densidades ópticas (682/540 nm), os quais apresentam células saudáveis, mantendo suas características até o processo de extração dos metabólitos. As sementes de MOL aplicadas como coagulante natural não alteraram a cor do efluente final, mesmo com aplicação de concentração de 550 mg.L^{-1} , sendo a maior dosagem do coagulante natural avaliada na faixa de estudo, o que apresenta uma vantagem se comparados aos coagulantes químicos aplicados na separação das microalgas.

5.4.4. Sólidos em Suspensão Totais (SST)

Os resultados de remoção dos sólidos em suspensão totais (SST) obtidos após as etapas de coagulação/floculação estão apresentados na Figura 19.

Figura 19: Eficiência de remoção dos SST em 35 e 45 minutos de sedimentação.



Os melhores resultados da remoção dos sólidos em suspensão totais foram obtidos na concentração de 525 mg.L⁻¹, sendo apresentado uma redução acima de 67%, em 35 minutos de sedimentação. Neste trabalho a concentração de 475 mg.L⁻¹, foi a melhor concentração para a remoção da turbidez, que contribuiu com 60% na remoção dos SST, em 45 minutos de sedimentação. Todas as dosagens avaliadas não apresentaram diferença significativa ($p=0,05$).

O sucesso da remoção de SST depende muito da densidade das microalgas, pois células algais de baixa densidade não se assentam bem e continuam em suspensão na amostra (EDZWALD et al.,1995). Segundo Joshua e Vasu (2013), a sedimentação simples por gravidade pode remover até 60% do material em suspensão e 75% das bactérias, caso o sistema apresente bom controle operacional, principalmente em requisitos como temperatura, valor de pH e dosagem do coagulante. O presente trabalho utilizou a *Chlorella sorokiniana*, microalgas que possuem formato esférico com diâmetro de 3-5 µm e gravidade específica superior ao da água, características comuns das algas verdes propícias para a etapa de sedimentação (PIETERSE e CLOOT, 1997; UDOM et al., 2013).

Agarwal et al. (2001), estudaram a remoção da turbidez aplicando sementes de quiabo como coagulante natural, no estudo atingiram eficiência de 86% para remoção de SST presente na água residuária doméstica, sendo aplicado 0,12 mg.L⁻¹ das sementes de quiabo para efluente de pH neutro. Neste trabalho, as sementes de MOL, pH neutro da água negra digerida anaerobiamente, apresentaram eficiência de 90% da remoção de turbidez e 60% da redução de SST, em concentração de 525 mg.L⁻¹. Para pH ácido (pH=3), aplicando 500 mg.L⁻¹ das sementes de MOL, foi possível obter 85% de remoção da turbidez. As eficiências obtidas em pH ácido, após a aplicação das sementes de MOL apresentaram remoção similar ao da goma de quiabo, situação contrária ocorreu em pH neutro (pH=7), pois as sementes de MOL apresentaram eficiência superior e boa remoção dos SST aplicando as sementes de MOL como coagulante natural. A goma de quiabo (*Hibiscus esculentus*) apresenta situação similar aos demais coagulantes naturais, sua aplicação como coagulante requer de baixas dosagens, porém, assim como o amido catiônico, o uso do quiabo como coagulante natural pode ser limitado por ser um alimento introduzido na cultura alimentar brasileira.

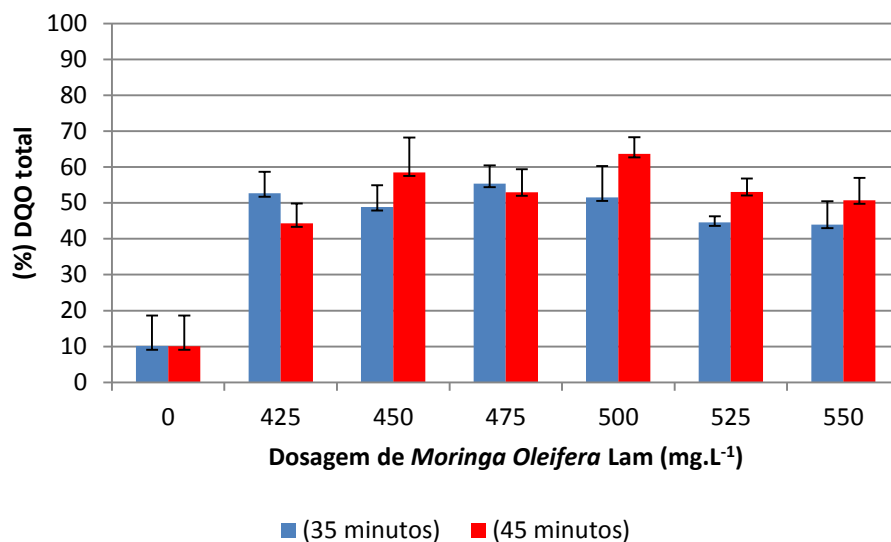
A menor eficiência de remoção dos SST foi observada aplicando 550 mg.L⁻¹, sendo inviável a aplicação das sementes de *Moringa Oleifera* Lam em concentrações acima de tal

dosagem. De maneira em geral, as dosagens aplicadas entre 425 a 550 mg.L⁻¹ podem remover aproximadamente 60% dos SST, para ambos os tempos de sedimentação avaliados (35 e 45 minutos).

5.4.5. Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Na Figura 20 estão apresentadas as eficiências de remoção da DQO_{total} em 35 e 45 minutos de sedimentação.

Figura 20: Eficiência de remoção da DQO_{total} em 35 e 45 minutos de sedimentação.



A concentração de matéria orgânica (DQO_{total}) presente na ANS antes da aplicação das sementes de MOL era de 823 ± 93 mg.L⁻¹. Na Figura 20 pode-se observar que a remoção média da DQO_{total} foi entre 46 a 60%, aplicando de 425 a 550 mg.L⁻¹ das sementes de MOL, em 35 e 45 minutos sedimentação (vs = 0,21 e 0,17 cm.min⁻¹), tais valores não apresentaram diferença significativa ($p=0,05$). De todas as dosagens avaliadas a melhor eficiência obtida foi aplicado 500 mg.L⁻¹ em 45 minutos de sedimentação, sendo possível remover cerca de 65% da matéria orgânica presente na água residuária.

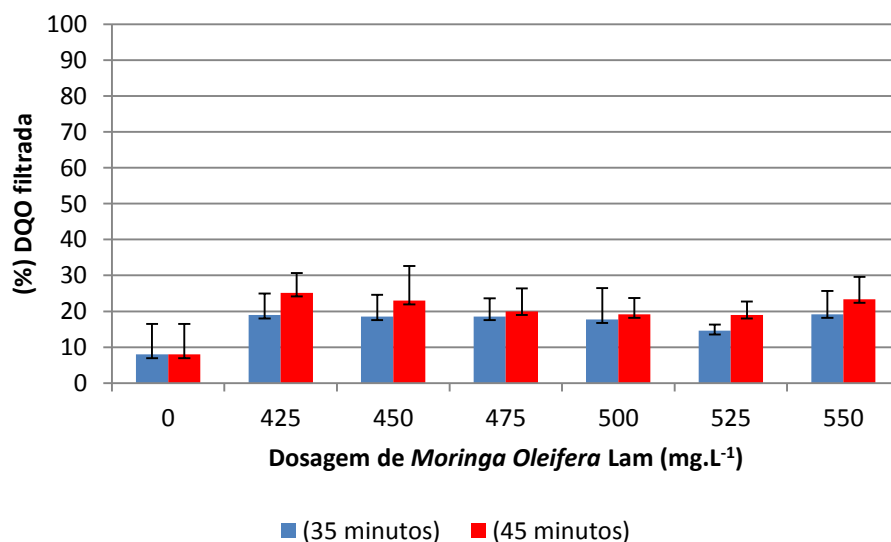
Cassini et al. (2017) relatam em seu estudo que foi aplicado 150 mg.L⁻¹ das sementes de MOL como coagulante natural, para a separação de microalgas do gênero *Scenedesmus* sp., *Chlorella* sp.e *Synechocystis* sp, associado ao efluente anaeróbio, em pH igual a 5, apresentando eficiência de 44% na remoção da DQO. Em comparação com o estudo realizado por Cassini et al. (2017), apesar da diferença entre a quantidade de coagulante aplicado na

separação das microalgas devido a influência direta do pH, ambos os estudos apresentaram satisfatória remoção da matéria orgânica (DQO), sendo um aspecto interessante já que a aplicação de coagulantes naturais pode influenciar no aumento da matéria orgânica natural (VALVERDE, 2014).

Francisco (2016) relata que o sucesso da floculação está relacionado a todo material orgânico em suspensão e dissolvido, de carga negativa, presente no efluente anaeróbio, tais como as microalgas além dos demais microrganismos associados à água residuária, os quais podem apresentar uma boa diminuição da DQO. Autores como Bernhardt e Clasen, (1991) e Francisco, (2016) apresentam que a matéria orgânica extracelular de culturas de microalgas pode atuar como polieletrólitos aniônicos e não iônicos tais biopolímeros secretados pelas microalgas em resposta a aplicação de coagulantes os quais também podem se comportar como auxiliar na coagulação. No entanto, coagulantes catiônicos, tais como a MOL, são recomendados vistos a possibilidade de neutralizar as células algais de cargas negativas.

Neste estudo, a maior parte do material orgânico encontra-se em suspensão, devido a elevada concentração da DQO_{total} presente no efluente. Foi avaliado também a matéria orgânica dissolvida pela $DQO_{filtrada}$. Na Figura 21 estão apresentadas as eficiências de remoção da $DQO_{filtrada}$ obtidas nos tempos de sedimentação de 35 e 45 minutos.

Figura 21: Eficiência de remoção da $DQO_{filtrada}$ em 35 e 45 minutos de sedimentação.



A remoção média da $DQO_{filtrada}$ foi de 20%. Nota-se que as melhores eficiências de remoção da $DQO_{filtrada}$ foram em 45 minutos de sedimentação. Entretanto, os tempos de

sedimentação avaliados na remoção da $DQO_{filtrada}$ não apresentaram diferença significativa ($p=0,05$).

Bhuptawat et al. (2007) aplicaram as sementes de MOL como coagulante natural, sendo aplicado dosagens entre 50 a 100 $mg.L^{-1}$, combinadas ou não com 10 $mg.L^{-1}$ de sulfato de alumínio, em efluente anaeróbio mantido em pH neutro (7,22). As sementes de MOL aplicadas como coagulante natural proporcionou uma eficiência de 50% de remoção da $DQO_{filtrada}$, com o auxílio do sulfato de alumínio a remoção da $DQO_{filtrada}$ aumentou entre 58 a 64%.

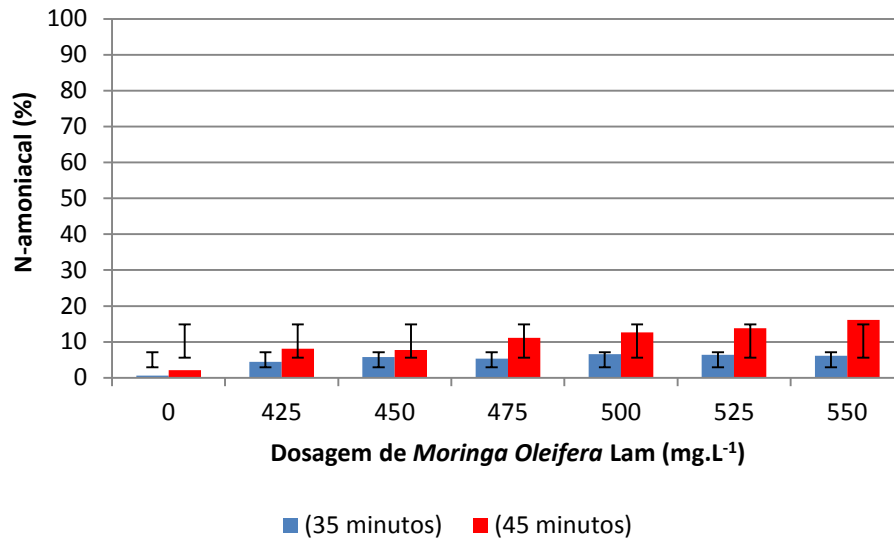
A eficiência de remoção da $DQO_{filtrada}$ encontradas nos estudos por Bhuptawat et al., (2007), assim como as encontradas na presente pesquisa, apresentam uma boa remoção da matéria orgânica presente em efluente anaeróbio, se aplicado as sementes de MOL como coagulante natural. A carga orgânica acrescida ao efluente pela aplicação das sementes de MOL não apresenta aumento significativo. Para tal, a diferença entre o que foi removido e acrescido no efluente de matéria orgânica apresentam aspectos positivos, já que a concentração da matéria orgânica removida é maior do que aquela acrescida pelas sementes.

A DQO em suspensão pode ser obtida pela diferença entre a DQO_{total} e a $DQO_{filtrada}$. Para tal, foi possível observar que a concentração de 500 $mg.L^{-1}$ remove 65% da DQO_{total} , isto é 22% da $DQO_{filtrada}$ e 46% da $DQO_{em suspensão}$. Para a concentração de 475 $mg.L^{-1}$ a remoção foi de 91% da turbidez, a remoção da DQO_{total} foi 55%, sendo 20% destinada a remoção da $DQO_{filtrada}$ e 35% de remoção da $DQO_{em suspensão}$, ambas concentrações apresentam boa remoção da matéria orgânica presente nas microalgas e na água residuária do estudo.

5.4.6. Nitrogênio Total (NT)

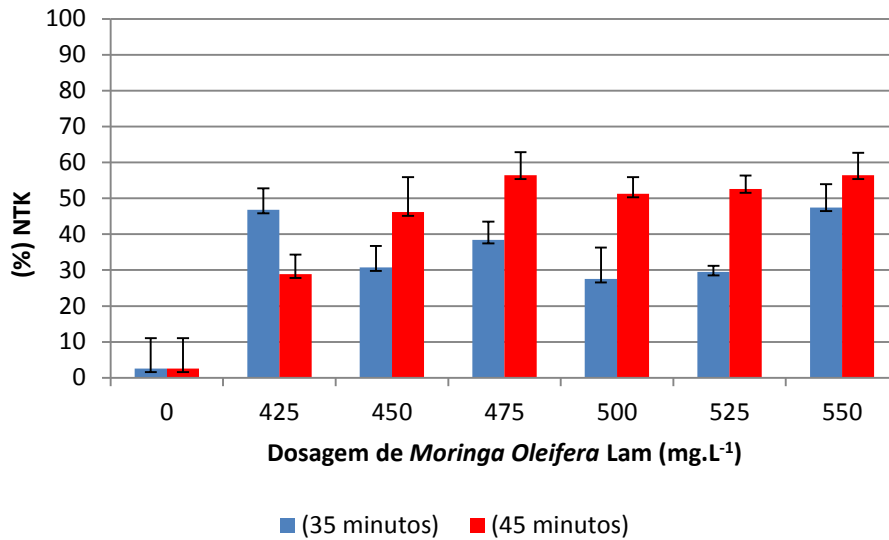
As microalgas são capazes de assimilar nitrogênio em todas as suas formas, tais como: uréia, amônia, nitrito e nitrato. Nas Figuras 22, 23 e 24 estão apresentadas as eficiências de remoção de nitrogênio na forma reduzida (N-amoniacal e NTK) e oxidativa (nitrito e nitrato).

Figura 22: Eficiência de remoção do N - amoniacal em 35 e 45 minutos de sedimentação.



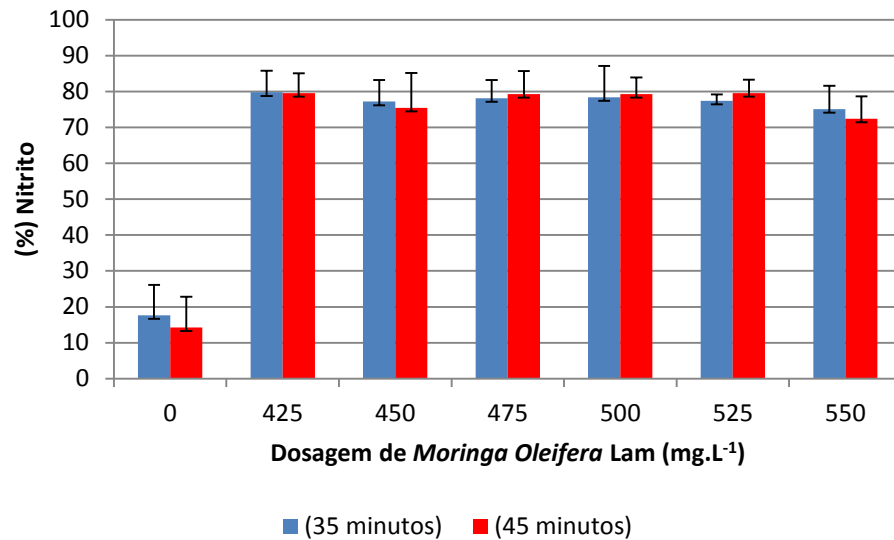
Segundo Delgadillo-Mirquez et al. (2016), a amônia é a fonte de nitrogênio mais eficiente em quesitos de energia biológica, pois as microalgas utilizam menor energia para sua absorção. Tais como a *Chlorella vulgaris* e a *Scenedesmus Obliquus* apresentam preferências na absorção da amônia comparadas às demais formas de nitrogênio.

A remoção do nitrogênio amoniacal para o efluente “branco” foi de apenas 2%. Após a aplicação das sementes de MOL como coagulante natural, as concentrações de 425, 450, 475, 500, 525 e 550 mg.L⁻¹ apresentaram remoção de 4%, 6%, 5%, 7%, 6% e 6%, em 35 minutos de sedimentação respectivamente, e 8%, 8%, 11%, 13%, 14% e 16%, em 45 minutos de sedimentação, respectivamente. Nota-se baixa eficiência de remoção do N-amoniacal, pois além do N-amoniacal está presente nas microalgas após sua assimilação, parte deste pode ser facilmente volatilizado, principalmente para efluentes em torno da neutralidade, submetidos a elevados tempos de sedimentação. Tais concentrações avaliadas não apresentaram diferença significativa ($p=0,05$). Na Figura 23 estão apresentados os valores de remoção de NTK obtida após 35 e 45 minutos de sedimentação.

Figura 23: Eficiência de remoção do NTK em 35 e 45 minutos de sedimentação.

O valor inicial de NTK era cerca de 30 mg.L⁻¹, após a assimilação de nutrientes pelas microalgas e a separação destas da ANS do estudo pelas etapas de (C/F e S), a remoção de NTK foi de 4% no efluente “branco” em ambos os tempos de sedimentação avaliados. O efluente bruto, em que foi aplicado as sementes de MOL como coagulante natural, a dosagem de 475 mg.L⁻¹ se destacou entre as demais avaliadas, no qual proporcionou 58% na remoção de NTK. A dosagem de 550 mg.L⁻¹ contribuiu com remoção de 56% de NTK em 45 minutos de sedimentação. Tais condições evidenciaram a boa atuação das sementes de MOL como coagulante natural na remoção das microalgas, e, portanto na boa remoção de todas as formas encontradas de nitrogênio na ANS do estudo.

Em geral, as sementes de MOL podem remover cerca de 50% de NTK em 45 minutos de sedimentação, se aplicado dosagens das sementes de MOL a partir de 475 mg.L⁻¹. Tais concentrações avaliadas não apresentaram diferença significativa ($p=0,05$). Foram avaliadas as demais formas de nitrogênio presente na água residuária do estudo, na Figura 24 estão apresentados a remoção de nitrito em 35 e 45 minutos de sedimentação.

Figura 24: Eficiência de remoção de nitrito em 35 e 45 minutos de sedimentação.

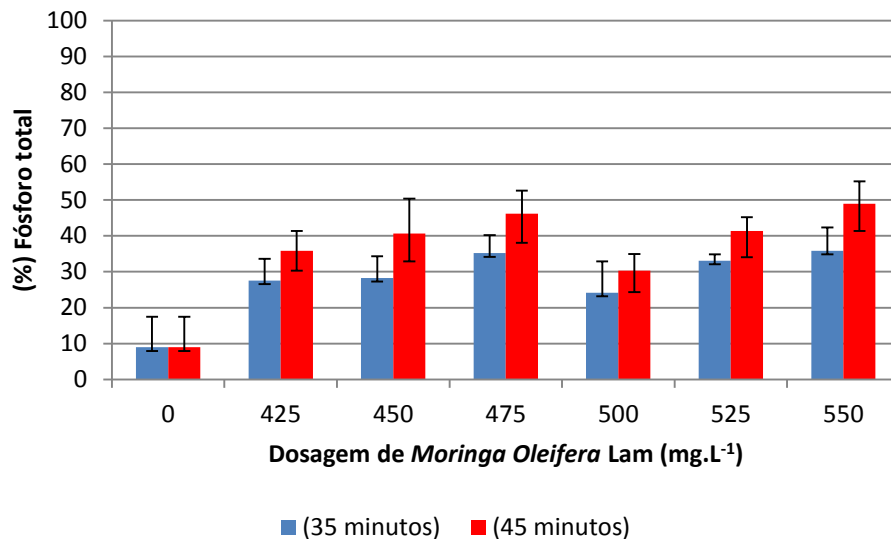
Em comparação as demais formas de nitrogênio, o nitrito apresentou remoção similar para ambas às dosagens e tempos de sedimentação avaliados ($p=0,05$), o valor inicial de nitrito era de 14 mg. L⁻¹. A remoção de nitrito no efluente “branco” foi de aproximadamente 20% para ambos os tempos de sedimentação (35 e 45 minutos). A remoção média de nitrito aplicando as sementes de MOL no efluente bruto foi de 79%. Neste caso a dosagem de 425 mg.L⁻¹ apresenta ser a melhor remoção de nitrito presente no efluente e 35 minutos de sedimentação. A concentração de 475 mg.L⁻¹ também se destaca devido a boa eficiência de remoção obtida para a maioria dos parâmetros analisados. A concentração 475 mg.L⁻¹ foi capaz de remover 91% da turbidez, e 78% de nitrito em 45 minutos de sedimentação. Os pares avaliados de dosagem e tempo de sedimentação não apresentaram diferença estatística ($p=0,05$).

5.4.7. Fósforo Total (FT)

Assim como o nitrogênio total, o fósforo é um macronutriente responsável pelo crescimento das microalgas, sendo a parcela dissolvida (ortofosfatos) a preferencial para o suprimento da biomassa algal (FAKIR et al., 2011, FRANCISCO, 2016). A relação de N:P para a assimilação das microalgas, tem grande relevância, uma vez que a baixa concentração de fósforo no efluente pode comprometer a assimilação de NT, e portanto diminuir a eficiência na remoção de nutrientes para a etapa de separação das microalgas. Nessa etapa do

trabalho foi avaliada a remoção de fósforo total presente no efluente do estudo, as eficiências obtidas estão apresentadas na Figura 25.

Figura 25: Eficiência de remoção de fósforo total em 35 e 45 minutos de sedimentação.



A concentração de fósforo total presente no efluente do estudo era de $55 \pm 14 \text{ mg.L}^{-1}$, após os ensaios de (C/F e S) o efluente “branco” apresentou remoção de 20%, em 35 e 45 minutos de sedimentação. Conforme os resultados apresentados na Figura 25 notam-se que as melhores eficiências de remoção de fósforo total foram obtidas em 45 minutos de sedimentação, aplicando dosagens de 475 mg.L^{-1} e 550 mg.L^{-1} , e contribuindo com remoção de 42% e 55% de FT, respectivamente. Assim como os demais parâmetros avaliados, os resultados da remoção do FT não apresentaram diferença significativa ($p=0,05$).

Cassini et al. (2017), estudaram a remoção de NT e FT após cultivo de microalgas dos seguintes gêneros *Scenedesmus* sp., *Chlorella* sp. e *Synechocystis* sp, associado ao efluente anaeróbio, aplicando 80 mg.L^{-1} de amido catiônico, em pH alcalino (10). Os autores encontraram eficiência de 95% e 91% na remoção de NT e FT. O equilíbrio de nutrientes no meio e a boa assimilação pelas microalgas podem influenciar na quantidade de nutrientes recuperados na etapa de separação das microalgas.

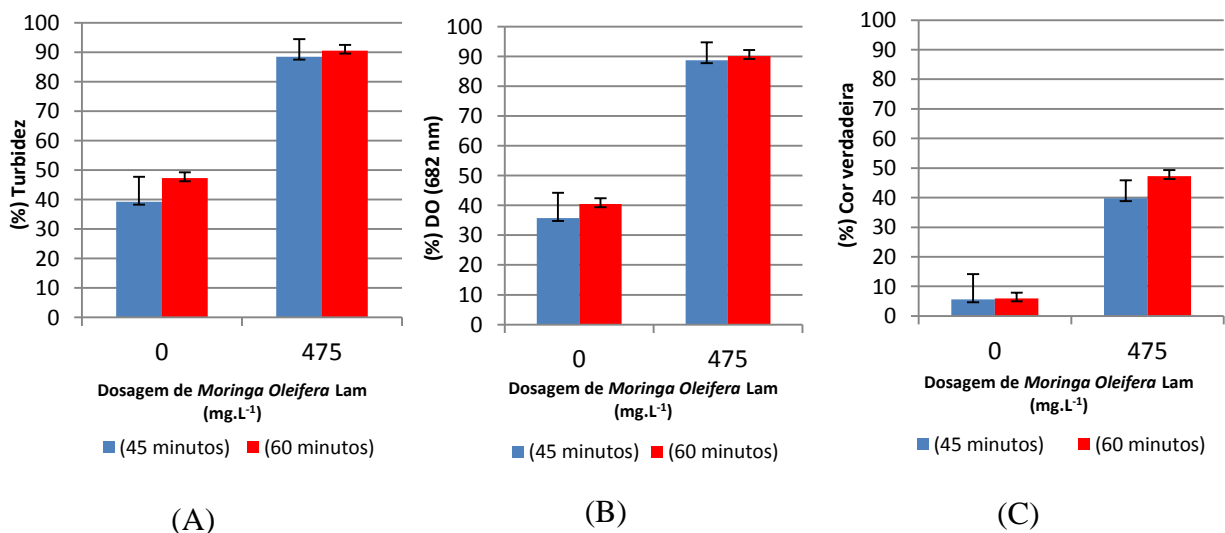
De maneira geral, a dosagem de 475 mg.L^{-1} das sementes de MOL se destacou em relação as demais, pois além de promover a boa remoção da turbidez, SST, cor verdadeira, apresentou boa remoção dos nutrientes presente no efluente. No qual promoveu remoção de 11% de N-amoniaco, 40% de NTK, 78% de nitrito e 42% de FT, em 45 minutos de sedimentação, sendo todas as análises realizadas em pH neutro.

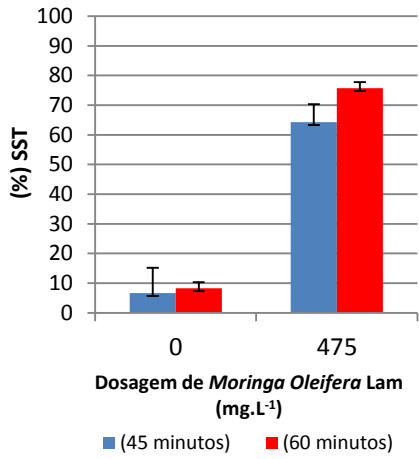
5.5. ETAPA 3: Condições ótimas das etapas de C/F e S

Na Etapa 3 foi avaliada a partir da dosagem ótima o melhor tempo de sedimentação. Vale ressaltar que o valor de pH foi mantido fixo em neutro, por apresentar uma biomassa algal com boas características a serem avaliadas como fertilizante orgânico. Na Etapa 2, a partir da faixa de dosagem do coagulante natural (425, 450, 475, 500, 525 e 550 mg.L⁻¹) e os tempos de sedimentação (35 e 45 minutos / vs = 0,21 e 0,17 cm.min⁻¹) avaliados, a dosagem de 475 mg.L⁻¹ e o tempo de 45 minutos de sedimentação se destacaram por apresentarem em média 90% de redução da turbidez e das densidades ópticas, além da boa eficiência de remoção dos parâmetros de controle, tal concentração apresentou economia no uso das sementes como coagulante natural.

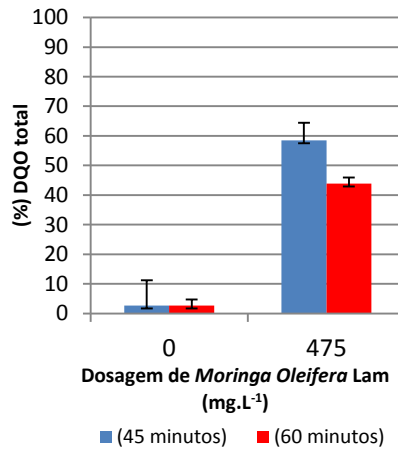
Nessa etapa, a dosagem ótima de 475 mg.L⁻¹ foi avaliada em diferentes tempos de sedimentação (45 e 60 minutos), a fim de verificar a influência desta variável na etapa de sedimentação. Na Figura 26 (A), (B), (C), (D), (E), (F), (G), (H), (I), (J) e (L) estão apresentadas as eficiências obtidas aplicando 475 mg.L⁻¹, e tempos de 45 e 60 de sedimentação para a remoção da turbidez, DO_{682nm}, cor verdadeira, SST, DQO_{total}, DQO_{filtrada}, N-amoniaco, Nitrito, Nitrato, NT e FT.

Figura 26: Eficiência dos parâmetros de qualidade aplicando 475 mg.L⁻¹ do pó integral de MOL em 45 e 60 minutos de sedimentação

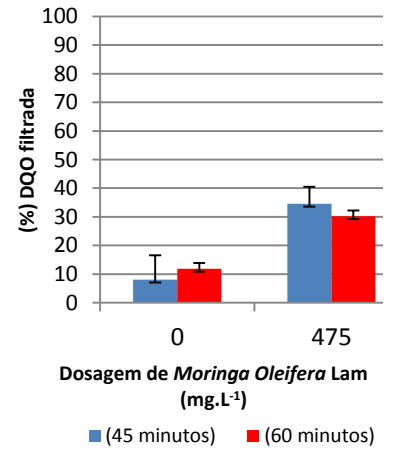




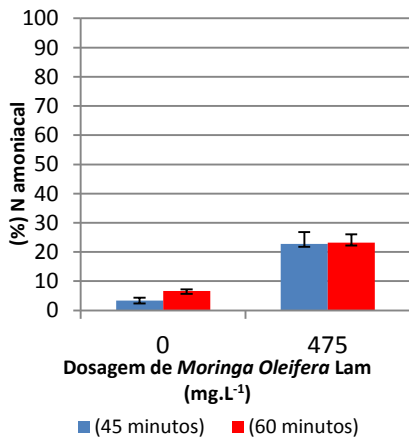
(D)



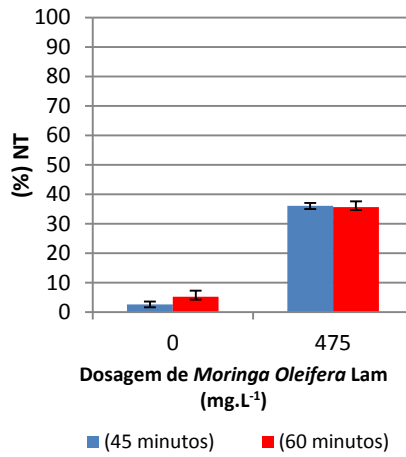
(E)



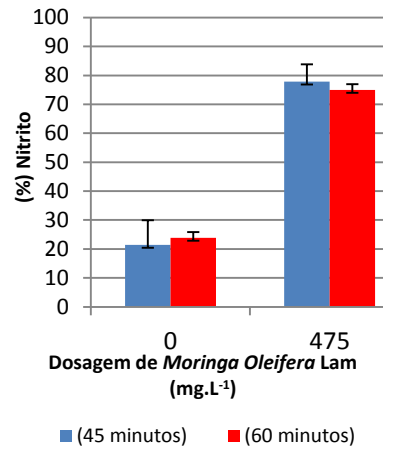
(F)



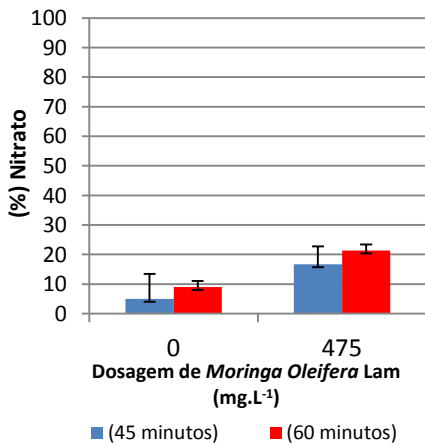
(G)



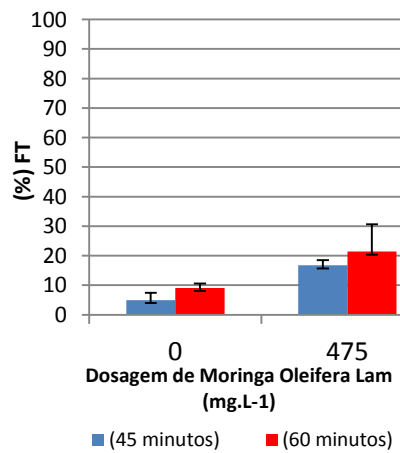
(H)



(I)



(J)



(L)

Teixeira et al. (2017), avaliaram a aplicação das sementes de MOL em pó integral (1000 mg.L^{-1}) e solução aquosa (50.000 mg.L^{-1}) para a floculação da *Chlorella vulgaris* cultivadas em efluente anaeróbio, nesse estudo fizeram uma breve comparação entre a quantidade de sementes necessárias para a aplicação do coagulante em pó integral e em solução aquosa (sementes diluídas em água destilada, salina e água do mar). Verificaram que se fosse utilizado a solução aquosa seriam necessárias apenas 25 mg de sementes de MOL, evidenciando uma economia de 75% em massa das sementes se comparados com a sua aplicação na forma de pó integral, apresentando ser economicamente viável.

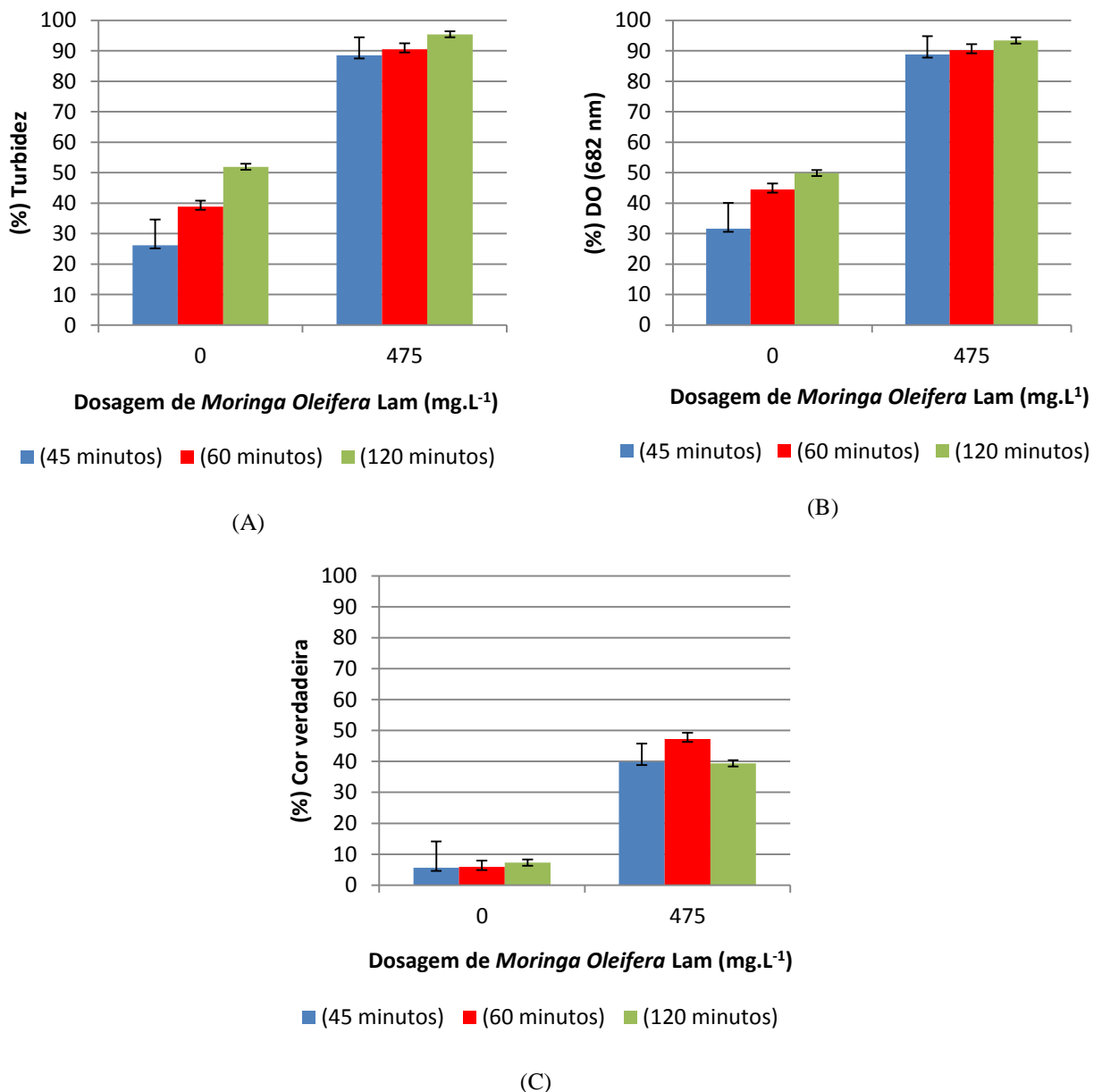
Nesse sentido, a dosagem ótima de 475 mg.L^{-1} avaliada no presente estudo, foram comparados com as dosagens apresentadas por Teixeira et al. (2013) e Texeira et al. (2017). A quantidade de sementes necessárias para o preparo em pó integral foi bem menor daquela citada por Teixeira et al. (2013), que aplicou 1000 mg.L^{-1} das sementes de MOL, e caso contrário ocorreu se comparados com o coagulante preparado em solução aquosa apresentado por Teixeira et al. (2017), no qual utilizou apenas 25 mg.L^{-1} das sementes. Apesar do preparo das sementes em solução aquosa apresentar menor quantidade em massa de sementes, requer de mais etapas para o seu preparo como coagulante, tal como a etapa de agitação magnética e filtração. A utilização e aplicação das sementes em pó integral apresentam vantagens quanto à simplicidade, menor custo e perdas das sementes nas demais etapas do preparo, pois utilizam apenas as etapas de trituração e peneiramento, além de manter a composição natural das sementes sem acréscimo de sais obtidos a partir da solução salina e da água do mar.

A aplicação de 475 mg.L^{-1} do coagulante a base de MOL e 45 minutos de sedimentação apresentaram as seguintes eficiências: 88% de remoção da turbidez, 89% de redução da densidade óptica (682 nm), 40% de remoção da cor verdadeira, 64% de remoção de SST, 58% de remoção da DQO total, 35% de remoção da DQO filtrada, 23% de remoção do N amoniacal, 78% de remoção do nitrito, 17% de remoção do nitrato, 36% de remoção do NT e 36% de remoção do FT. As eficiências obtidas em 60 minutos de sedimentação foram de: 90% de remoção da turbidez, 90% da densidade óptica (682 nm), 47% da cor verdadeira, 76% da remoção de SST, 44% da remoção da DQO total, 30% da remoção da DQO filtrada, 23% da remoção do N amoniacal, 75% da remoção de nitrito, 21% da remoção de nitrato, 36% da remoção de NT e 40% da remoção de FT.

Nota-se que o tempo de sedimentação de 60 minutos apresenta remoção de 90% da turbidez e 90% de redução da $\text{DO}_{682 \text{ nm}}$, porém não houve diferença significativa se comparado

com 45 minutos de sedimentação ($p=0,05$). A fim de verificar eficiências acima de 90%, optou-se em avaliar a etapa de sedimentação em 120 minutos. Na Figura 27 (A), (B) e (C) estão apresentadas as eficiências de remoção da turbidez, $DO_{682\text{ nm}}$ e cor verdadeira em 120 minutos de sedimentação.

Figura 27: Eficiência de remoção da turbidez, $DO_{682\text{ nm}}$ e cor verdadeira em 45, 60 e 120 minutos de sedimentação.



A sedimentação dos flocos gerados no efluente branco durante 120 minutos apresentou remoção média de 50% da turbidez e da DO_{682} . Para o efluente em que foi aplicado a

concentração de 475 mg.L^{-1} das sementes de MOL foi possível obter remoção de 95% de turbidez. Nota-se que a partir de 120 minutos cerca de 50% dos flocos gerados podem ser removidos por sedimentação natural sem a aplicação do coagulante, diminuindo de forma significativa a eficiência do coagulante aplicado no tratamento. Essa relação também pode ser observada no parâmetro cor verdadeira, no qual foi obtido remoção de 6% para o efluente branco, e 40%, 47% e 39% de remoção da cor aplicando a dosagem de 475 mg.L^{-1} de MOL.

Entretanto, apesar da boa eficiência de remoção dos parâmetros turbidez, densidade óptica e cor verdadeira ambos avaliados em 120 minutos, esse tempo apresenta ser elevado para a etapa de sedimentação, devido à eficiência de remoção dos sólidos em suspensão presente na amostra permanecerem constantes ($p=0,05$). Segundo Di Bernardo e Dantas, (2005) os sedimentadores convencionais de escoamento horizontal ou vertical são dimensionados para serem robustos. Para tal, manter a etapa de sedimentação em 45 minutos apresentou certa vantagem se comparados aos demais tempos de sedimentação (15, 30, 35, 40, 60 e 120 min) avaliados ao longo de todas as etapas desse trabalho, pois além de apresentar boa eficiência ao sistema de separação das microalgas, poderá reportar economia na instalação e operação de tanques de sedimentação.

Além da vantagem a respeito da infraestrutura, o adequado tempo de sedimentação pode contribuir também com uma biomassa algal com menor teor de umidade para secagem. A ANS que após ser digerida anaerobiamente em reator UASB, seguido pela remoção de nutrientes em fotobiorreator, e por fim a separação das células algais pelas etapas de (C/F e S) aplicando o coagulante natural MOL, apresentar um efluente com boas características para reuso (Etapa 4), que devem atender os requisitos existentes para os diferentes tipos de usos.

Na Tabela 5 estão apresentadas as características do efluente final do estudo após o processo de separação das microalgas em 45 e 60 minutos de sedimentação e as legislações referentes aos diversos tipos de reuso.

Tabela 5: Comparação entre a legislação vigente sobre água de reuso e o efluente final.

Parâmetros	Afluente	Efluente		⁽¹⁾ OMS/SP	⁽²⁾ USEPA	⁽³⁾ OMS/SP	⁽⁴⁾ NBR
		(45 min)	(60 min)	(2017)	(2012)	(2006)	13.969 (1997)
pH	7,6 ± 1	7,7 ± 1	7,7 ± 1	6-9	6-9	-	-
Temperatura (°C)	24 ± 2	24 ± 2	25 ± 2	-	-	-	-
Turbidez (UNT)	130 ± 3	15 ± 1	12 ± 2	≤ 2	-	-	-
Cor verdadeira (uC)	220 ± 11	125 ± 2	116 ± 2	-	-	-	-
DO 682 nm	2,7 ± 1	0,22 ± 1	0,19 ± 1	-	-	-	-
DQO bruta (mg L ⁻¹)	750 ± 52	303 ± 27	410 ± 74	-	-	-	-
DQO filtrada (mg L ⁻¹)	175 ± 1	109 ± 21	112 ± 11	-	-	-	-
NT (mg L ⁻¹)	26 ± 9	16 ± 1	16 ± 1	-	-	-	-
N-amoniaco (mg L ⁻¹)	19 ± 1	15 ± 4	14 ± 3	20	-	-	-
Nitrito (mg L ⁻¹)	14 ± 1	3 ± 2	3 ± 1	-	-	-	-
Nitrato (mg L ⁻¹)	74 ± 1	61 ± 2	53 ± 8	-	-	-	-
FT (mg L ⁻¹)	36 ± 6	23 ± 2	21 ± 9	-	-	-	-
SST (mg.L ⁻¹)	300 ± 39	100 ± 25	67 ± 14	0,5	≤ 30	-	-
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	-	-	-	++	-	-	-
Coliformes Fecais (NMP/100 mL)	-	-	-	-	≤ 200	10000	5000

- (1) Resolução conjunta SES/SMA/SSRH nº 01 de 28 junho de 2017 – Apresenta o reuso direto não potável de água, para fins urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário dá providências correlatadas- Foi avaliado o uso com restrição moderada.
- (2) USEPA,(2012) – Reuso na agricultura para culturas não alimentícias, sendo obtido por tratamento secundário seguido por desinfecção. As análises de pH e DBO devem ser realizadas semanalmente, as análises de SST e coliformes fecais devem ser realizadas diariamente.
- (3) Diretrizes da OMS, (2006) – Apresenta o monitoramento de metas mínimas exigidas para o uso seguro de águas residuárias (negra e cinza) na agricultura, destaca-se o uso irrestrito para cultura foliar. p.33. Ressalta que 100 mL de águas residuárias equivale de 1 a 4 g de sólidos totais; 1 L = 10-40 g de sólidos totais. A *E.coli* e helmintos também deve ser avaliado por unidade peso.
- (4) NBR 13.969, (1997) – Classe 4: reuso nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual. O oxigênio dissolvido deve ficar acima de 2 mg.L⁻¹. Aplicação deve ser interrompida pelo menos 10 dias antes da colheita.

Para os valores da Portaria OMS/SP (2017) foi possível observar maior exigência do que as apresentadas pela Resolução do CONAMA 357/05, destinada ao lançamento da água residuária tratada. A portaria visa uso urbano, aplicando o reuso direto não potável com restrição moderada. Apesar da boa remoção da turbidez (12 UNT) e dos SST (67 mg.L⁻¹), ambos valores avaliados em 60 minutos de sedimentação, não foram suficientes para atender os requisitos apresentados nessa legislação para esse tipo de reuso. Já os parâmetros pH e N_{-amoniaco} permaneceram dentro do estabelecido pela legislação.

As diretrizes de água de reuso apresentada pela *United States Environmental Protection Agency* – (EPA), (2012) apontam o reuso destinado ao setor agrícola para culturas não alimentícias. Conforme os valores observados na Tabela 5 observa que o parâmetro SST

apresenta valor acima do permitido, sendo necessária aplicação de um maior tempo destinada à etapa de sedimentação, tal como em 120 minutos, cuja finalidade seria o melhor assentamento dos sólidos presente na amostra. Deve ser previsto também o estudo da quantidade de patógenos, que visa garantir o exigido pela EPA em relação ao reuso na irrigação, pois o padrão de qualidade exigido assemelha ao padrão de potabilidade da água para consumo humano.

A OMS de 2006 apresenta orientações para o uso seguro de água residuária (negra e cinza) na agricultura e aquacultura. Apontam que o uso das águas residuárias na agricultura apresentam diversas vantagens, pois além de ser uma fonte de água para todo o ano, apresentam quantidade de nutrientes satisfatória para aplicação no solo a fim de aumentar a produtividade das culturas e diminuir a aplicação de fertilizantes químicos.

No manual apresentado pela OMS de 2006 relata que a Jordânia é o país pioneiro na aplicação de águas residuárias na agricultura de forma planejada. Relataram que nesse país cerca de 93% das águas residuárias tratadas são utilizadas para rega, e deste volume 24% são aplicadas para regar uma área de aproximadamente 3500 ha. O uso direto das águas residuárias é controlado por meio de contratos realizados entre os agricultores e o Ministério da Água e Rega do país. A principal recomendação observada pela OMS de 2006 é o monitoramento microbiológico (*E.coli* e ovos de helmintas). Na Tabela 5 destaca-se a aplicação da água residuária (negra e cinza) na agricultura como uso irrestrito para cultura foliar, sendo a concentração mínima exigida de 10^4 NMP/100 mL de *E.coli*, o que evidencia que além do monitoramento adequado desse parâmetro na busca de diminuir riscos para a saúde do homem, o reuso de águas residuárias na agricultura requer de uma boa gestão seguida por um bom planejamento que deve ser realizado para cada região e país, pois existem muitas variantes que poderá influenciar nesse tipo de reuso tanto em escala regional quanto global.

Foi comparada também a legislação brasileira a NBR 13.699 (1997), com finalidade de observar o reuso por meio de escoamento superficial ou irrigação pontual, referente a pequenos cultivos, tais como, o reuso nos pomares, forragens, pastagens para gados e outros. Neste caso, os coliformes fecais apresentam maior valor permissível se comparados aos valores apresentados na EPA (2012), porém, mesmo pela maior flexibilidade deste parâmetro nesta norma, a etapa de desinfecção ainda torna-se imprescindível. E nesse caso as sementes de MOL podem contribuir de forma satisfatória, pois estudos apontam que as sementes contribuem com a remoção de patógenos, e diminui custos nas etapas de desinfecção (HUSNAN et al., 2016). Marchello (2013) relata que patógenos também podem ser removidos por vários fatores tais

como: o aumento da temperatura no meio, a variação do pH decorrente do metabolismo algal, antibióticos naturais, metabólitos produzidos pelas próprias microalgas, possibilitando melhor aderência á superfície celular das células e na remoção desses microrganismos.

Husnan et al. (2016) avaliaram a atividade antibacteriana e antifúngica da árvore de MOL, foram preparados extratos das vagens, sementes, folhas, caule, flores e testadas em bactérias patogênicas cultivadas *in vitro*. Concluíram diferentes respostas na inibição de bactérias para cada parte específica da árvore, mas sendo as sementes a parte da árvore que se destacou com a melhor atividade antibactericida, inclusive para bactérias *Gram negativas* como a *E.coli*.

Bichi, Agunwamba e Muyibi (2012) que avaliaram a aplicação das sementes de MOL como coagulante natural para a remoção da *E.coli*, utilizaram ensaios de coagulação/floculação, em escala de bancada, seguido por análises de regressão factorial e resposta tridimensional, com finalidade de avaliar as condições ótimas no tratamento. Portanto, foi avaliada a eficiência de remoção da *E.coli* como variável dependente, as velocidades, tempos de misturas e dosagens do coagulante de MOL foram consideradas como variáveis independentes. Concluíram que, todas as variáveis avaliadas nas etapas de coagulação/floculação influenciaram na remoção da *E.coli*, apresentando remoção entre 45% a 100%, sendo tais resultados satisfatórios.

Slompo, (2018) realizou análises de coliformes totais e *E.coli* presente na ANS do estudo, no qual observou uma variabilidade na remoção de coliformes totais, e significativa remoção de *E.coli* entre 0,82 a 4,5 log, logo após batelada em fotobiorreator. Na etapa de separação das microalgas a remoção de coliformes totais e *E.coli* ainda pode contar com a atividade bactericida das sementes MOL aplicada como coagulante natural. Entretanto, estudos mais elaborados devem ser realizados a fim de verificar o tipo de mecanismo atuante no meio. Na pesquisa em questão, a boa remoção dos sólidos em suspensão de 64% em 45 minutos e 76% em 60 minutos de sedimentação, também apresentam vantagens, em especial aquelas direcionadas a etapa de desinfecção, pois os sólidos em suspensão podem servir como suporte para microrganismos patogênicos, inibindo a ação e sendo possível inativa-los. Portanto, após a etapa de separação recomenda-se uma etapa de desinfecção, a fim de proporcionar maior qualidade para o efluente final e a possibilidade de reuso (MARCHELLO, 2013).

Enfim, apesar da boa remoção de nutrientes pelas microalgas e a sedimentação das microalgas pela aplicação do coagulante natural a base de MOL, o efluente final ainda apresenta concentração de nutrientes suficientes para o reuso planejado no setor agrícola.

Porém, sendo levadas em consideração as características microbiológicas e bioquímicas, conforme o tipo de cultura, o solo, o sistema de irrigação, o produto e a forma em que se consumirá o produto final.

5.6. ETAPA 4: Características da biomassa algal

As microalgas, além da capacidade de produzir diversas biomoléculas, possuem em sua biomassa altos níveis de macronutrientes e micronutrientes com potencial de crescimento e desenvolvimento vegetal (GARCIA-GONZALEZ, 2015; ABDEL-RAOUF, 2012). Com a intenção de empregar a biomassa algal recuperada como fertilizante orgânico, analisou-se sua composição química quanto aos teores de macro e micronutrientes apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Composição química da biomassa algal quanto aos teores de nutrientes.

Constituintes	E1	E2
pH	-	10
Umidade (%)	7,0	8,0
CO _{seca} (g kg ⁻¹)	32	31
C/N	7,7	8,0
MO	-	51
Macronutrientes primários (g kg⁻¹)		
N	41,6	37,0
P ₂ O ₅	46,8	42,9
K ₂ O	86,4	81,3
Macronutrientes secundários (g kg⁻¹)		
Ca	13,5	14,7
Mg	14,5	15,1
S	5,4	3,5
Micronutrientes (mg kg⁻¹)		
Na	39.018	44.772
B	-	177
Cu	-	72
Fe	-	289
Mn	-	265
Zn	-	96

* E1: Ensaio 1 / E2: Ensaio 2 / CO: Carbono Orgânico / C/N: Carbono/Nitrogênio / MO: Matéria Orgânica

Os fertilizantes correspondem à concentração expressa de macro e micronutrientes que variam conforme suas características físico-químicas e aplicações finais (MARTÍNEZ-ALCÁNTARA et al., 2016). Na legislação brasileira (Lei n° 12.890/2013 - Decreto n°8.384/2014) apresentam as diferentes definições existentes para fertilizantes, destacam o lodo de esgoto, vermicomposto e composto de lixo como fertilizante orgânico composto, os quais

podem ser aplicados em diferentes vias, tais como foliar, solo, fertirrigação, hidroponia e semente. O lodo de águas residuárias é classificado na categoria D. Essa categoria refere-se a qualquer tipo de fertilizante orgânico que utiliza como matéria-prima despejos sanitário. Fertilizantes obtidos a partir da biomassa algal ainda não estão dentro da lista de fertilizantes orgânicos apresentadas na legislação e, portanto, foram consideradas as recomendações apresentadas para lodo de águas residuárias de classe D.

Na legislação (Lei nº 12.890/2013 - Decreto nº 8.384/2014), o item destinado para os fertilizantes orgânicos mistos e composto apresenta umidade máxima de 70% (valores expressos em base seca). A umidade da biomassa algal do presente estudo não ultrapassa o exigido pela legislação. Para os fertilizantes orgânicos, o valor mínimo de pH é 6, e o valor de pH obtido após a análise da biomassa algal do estudo foi 10, acima do valor exigido, indicando boas características da biomassa algal recuperada após as etapas de (C/F e S).

Os fertilizantes orgânicos, conforme sua natureza física apresentam diferentes especificações. Na Instrução Normativa SDA/MAPA 25/2009 determina 21% da somatória do teor de NPK para fertilizantes minerais e apenas 10% para fertilizantes organominerais. Os teores de macronutrientes primários (NPK) obtidos nos ensaios (E1) e (E2), apresentaram boas características, pois a somatória 17,5% e 16,2%, respectivamente, ficaram acima do teor mínimo exigido pelo Decreto 4.954 (BRASIL, 2005). O teor de carbono orgânico (E1 - 32% e E2 - 31%) também obedece aos critérios estabelecidos pelo mesmo decreto, assim como a relação C/N observada nos ensaios (E1) e (E2) de 7,7 e 8,0, os quais não devem exceder a 20 (razão mássica) para ambas as classes avaliadas (A, B, C e D). Os teores de macronutrientes secundários (Ca e Mg) também foram convincentes, exceto o enxofre (S) que não atendeu a garantia mínima de 1%, como recomendado pela legislação.

Khan et al. (2019), estudaram a aplicação da biomassa seca como fertilizante orgânico para três espécies de microalgas, *Chlorella minutissima*, *Scenedesmus* e *Nostoc muscorum*, obtidas após tratamento primário das águas residuárias. A *C. minutissima* foi a microalga que apresentou melhor assimilação de nitrogênio e fósforo de águas residuárias e, portanto, sua aplicação como fertilizante orgânico se destacou entre as demais. A biomassa de *C. minutissima*, apresentou teor de NPK melhor que muitos outros tipos de fertilizantes naturais, porém, o teor de macronutrientes foi relativamente baixo se comparados com os fertilizantes químicos. Tal fato não influenciou na sua aplicação como fertilizante orgânico. Os autores afirmaram que cerca de 5% do nitrogênio presente na microalga estão disponíveis como

nitrogênio mineral, e sua aplicação no solo podem diminuir de forma considerável a lixiviação e o escoamento superficial desses nutrientes, diminuindo o processo de eutrofização, problema ambiental muito recorrente nos dias atuais.

A biomassa de microalgas aplicada como fertilizante orgânico, além de melhorar a quantidade de macro e micronutrientes no solo, apresenta um bom crescimento para as plantas e contribui com uma agricultura orgânica sustentável (GEMIN, 2016). Nas Tabelas 7 e 8 estão apresentadas as faixas de suficiência de macro e micronutrientes no tecido foliar para algumas culturas apresentadas na literatura.

Tabela 7: Faixas de macro e micronutrientes no tecido foliar de grãos e cultura comercial.

Nutrientes		Amendoim	Arroz irrigado	Cana de açúcar (planta)	Girassol
Macronutrientes (g.Kg ⁻¹)	N	30-45	26-42	19-21	30-50
	P	2-5	2,5-4,8	2-2,4	3-5
	K	17-30	1,5-40	11-13	30-45
	Ca	10-20	2,5-4	8-10	8-22
	Mg	3-8	1,5-3	2-3	3-8
	S	2-3,5	2-3	2-3	1,5-2
Micronutrientes (mg.Kg ⁻¹)	Fe	50-300	70-300	40-250	80-120
	Zn	20-60	20-100	10-50	30-80
	Cu	5-20	5-20	6-15	25-100
	Mn	20-350	30-600	25-250	10-20
	B	25-60	20-100	10-30	35-100

Fonte: Grãos (Amendoim, Arroz irrigado e Girassol) / Cultura comercial (cana de açúcar): Trani et al., (2014).

Legenda: Concentração de nutrientes

ABAIXO

ACIMA

ÓTIMA

Trani et al. (2014), relatam que fertilizantes naturais liberam os nutrientes de forma gradativa, isso ocorre devido a composição e relação C/N. A análise química foliar apresenta o estado nutricional da cultura, no qual auxilia na interpretação da aplicação de fertilizantes e estima o grau de fertilidade que o solo deverá receber. É possível observar que os nutrientes: fósforo, potássio, magnésio, enxofre e bório ficaram acima da faixa requerida de macro e micronutrientes para grãos e cana de açúcar. O excesso de nitrogênio pode provocar crescimento acelerado ao vegetal, além de diminuir sua resistência para doenças. O excesso de magnésio pode interferir na absorção de cálcio e potássio (NUNES, 2016). O enxofre está associado ao nitrogênio, sendo essencial para o metabolismo energético das plantas, e que deve estar em equilíbrio. O bório em excesso provoca a diminuição da resistência de todos os tecidos vegetais que atua no desenvolvimento das folhas e brotos.

Portanto, a aplicação da biomassa algal deve ser bem avaliada para grãos e cana de açúcar, pois a maioria das concentrações de nutrientes obtidas excederam aos valores requeridos para tais culturas. Vale ressaltar que o tipo de solo e a forma de plantio, clima e aplicação da biomassa no meio (se diretamente ou incorporado em outros fertilizantes) devem ser levados em consideração. Nesse sentido, foram comparados os teores de nutrientes obtidos pela *C.sorokiana* e as faixas de nutrientes exigidas para legumes e hortaliças que foram apresentadas na literatura. Na Tabela 8 estão apresentadas as faixas de macro e micronutrientes exigidas para o tecido foliar de legumes e hortaliças.

Tabela 8: Faixas de macro e micronutrientes no tecido foliar de legumes e hortaliças.

Nutrientes		Berinjela	Tomate	Alface	Espinafre
Macronutrientes (g.Kg ⁻¹)	N	40-60	40-60	30-50	40-60
	P	3-12	2,5-7,5	3-7	4-8
	K	35-60	3-5	50-80	30-50
	Ca	10-25	15-30	15-25	14-40
	Mg	3-10	4-6	4-6	4-8
	S	-	4-12	2-4	3-10
Micronutrientes (mg.Kg ⁻¹)	Fe	50-300	400-600	-	100-300
	Zn	20-250	60-70	30-100	30-100
	Cu	7-60	10-20	7-20	5-15
	Mn	40-250	250-400	30-150	50-250
	B	25-75	50-70	30-70	30-100
Nutrientes		Almeirão	Agrião	Chicória	Rúcula
Macronutrientes (g.Kg ⁻¹)	N	30-50	30-60	40-60	40-50
	P	3-12	4-7	4-8	3-8
	K	35-60	40-60	30-50	30-70
	Ca	15-25	15-30	14-40	20-40
	Mg	4-6	3-8	4-8	4-7
	S	-	4-7	-	4-9
Micronutrientes (mg.Kg ⁻¹)	Fe	50-300	50-300	50-300	100-300
	Zn	25-250	25-100	30-100	45-80
	Cu	7-60	7-20	8-20	25-60
	Mn	40-250	50-300	30-250	50-160
	B	25-75	25-60	30-100	25-60

Fonte: Berinjela: Silva, (1999); Tomate: Silva & Giordano, (2000); Demais alimentos: Embrapa, (2004). Hortaliças (Nova Zelândia): Trani et al., (2014).

Legenda: Concentração de nutrientes

ABAIXO

ACIMA

ÓTIMA

Nota-se que se for aplicado à biomassa algal em grãos, cana de açúcar, legumes e hortaliças, toda necessidade de macro e micronutrientes dessas culturas serão supridas, se aplicados adequadamente. Deve ser levado em consideração o excesso de nutrientes aplicado

no sistema solo-planta, pois poderá influenciar em outros impactos no cultivo. De maneira geral, os legumes e hortaliças foram os alimentos que apresentaram demanda de nutriente próxima da obtida pela biomassa algal do estudo. A concentração de macronutrientes (fósforo, potássio e magnésio) ficaram acima do limite para todas as culturas avaliadas nas Tabelas 7 e 8. Os micronutrientes cobre e bório também ficaram acima do limite para o cultivo de cana de açúcar, girasol, berinjela, alface, espinafre, almeirão, chicória e rúcula (Tabelas 7 e 8). Dentre os alimentos estudados, o tomate, o espinafre, o agrião e a rúcula são as culturas que podem apresentar melhor adaptação dos nutrientes se aplicado a biomassa algal do presente estudo como fertilizante orgânico. Elhafiz et al. (2015), aplicaram o consórcio de microrganismos (*Stenotrophomonas maltophilia*) e a *C. vulgaris* no solo a fim de melhorar o crescimento da raiz e das folhas, e relataram em seu estudo que as células de *Chlorella vulgaris* aplicadas na água de irrigação apresentou ser um ótimo biofertilizante sustentável, em termos de peso seco e teor clorofila, para cultivo de arroz, alface, pepino e berinjela (BARONE et al., 2018).

No estudo realizado por Barone et al. (2018), foram aplicadas células vivas de *C. vulgaris* e do *Stenotrophomonas maltophilia* no solo, a fim de avaliar sua eficiência no crescimento das plantas de tomate. Foram realizados os testes em vasos usando solo agrícola e plantas de tomate mantido em câmara de crescimento a 25 ± 2 °C, utilizando luz artificial por um período de 16 horas. Concluíram que todos os vasos que receberam a *C. vulgaris* e o *Stenotrophomonas maltophilia* apresentaram crescimento significativo das plantas de tomate em relação ao solo não tratado, melhorando assim a atividade biológica do solo. Barone et al. (2018), afirmam que a aplicação das microalgas no sistema solo-planta apresentam diversas vantagens, tais como maior influência bioquímica no solo, fácil manejo e método de tratamento de menor custo, apontando ser um cultivo sustentável para as plantas de tomate, se comparados com a aplicação de fertilizantes químicos.

Apesar dos adequados valores obtidos de NPK, outro aspecto observado foi elevado teor de sódio (Na) na biomassa algal, provavelmente pelas características obtidas após a mistura de dejetos suínos e esgoto doméstico, obtendo assim a ANS do estudo. Miyazawa e Barbosa (2015) afirmam que os dejetos suínos possuem composição química muito variável, relacionado à alimentação e o manejo de água distribuído nos criatórios suínos, assim como peso e idade dos animais, os quais podem influenciar em quantidades desproporcionais de nutrientes e, portanto, apresentar uma concentração instável de nutrientes na biomassa algal. A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2003) relata que dejetos suínos é

um composto multinutriente, os quais os elementos encontram-se em quantidades desproporcionais em relação às necessidades das plantas. Os dejetos apresentam os elementos NPK acima do requerido pelo sistema solo-planta e, portanto, os demais nutrientes podem apresentar em excesso também, como é o caso do sódio.

O sódio em excesso pode contribuir com o aumento da salinidade nos solos, restringindo a permeabilidade e o movimento do ar no solo e planta. (MOTA e VON SPERLING, 2009; CHATTERJEE et al., 2017). Para tal, plantas adaptadas a ambientes salinos (halófitas) podem sobreviver em ambientes onde a concentração de NaCl é superior a 200 mM (equivalente a condutividade elétrica no extrato de saturação do solo de aproximadamente 20 dS.m⁻¹) (FLOWERS e COLMER, 2008). Porém, plantas sensíveis ou hipersensíveis à salinidade, sendo quase a totalidade das plantas assim classificadas, apresentam algum tipo de comprometimento em alguma fase do ciclo de crescimento quando a concentração de NaCl supera a 40 mM, que equivale a condutividade elétrica no extrato de saturação do solo de aproximadamente 4,0 dS.m⁻¹ (RIBEIRO et al., 2010; MUNNS & TESTER, 2008). Neste sentido, é necessário avaliar a água residuária doméstica do estudo com outros resíduos, a fim de obter um efluente final com estabilidade na concentração de nutrientes. No sentido de empregar um adequado manejo na aplicação da biomassa algal e diminuir fatores que envolvam a salinização.

Deve ser levado em consideração o balanço de nutrientes e as boas práticas agrônômicas. Candido (2015) apresenta a vinhaça como resíduo utilizado para o cultivo da *Chlorella vulgaris*. O tratamento do efluente vinhaça pode causar mudanças químicas no meio e proporcionar melhoria nas condições de crescimento das microalgas (*C. vulgaris*). O cultivo de algas e heterótrofos em vinhaça apresenta boa assimilação de nutrientes, diminui a concentração de potássio na célula algal e minimiza problemas relacionados à fertirrigação. Porém, semelhante ao dejetos suíno, apresenta aumento significativo de cálcio e sódio na biomassa algal. Selesu (2015), relatam que microalgas cultivadas em dejetos suínos biodigerido, podem apresentar aumento significativo de alguns nutrientes, estando diretamente relacionado a morte das células algais e a secreção de metabólitos secundários pelas microalgas. Como alternativa de fonte nutricional para as microalgas, em escala de bancada, a fim de obter uma melhor avaliação da ANS do estudo, os autores Fogaça et al. (2016) recomendam utilizar vinhaça diluída em 30%, ou mesmo dejetos suínos com maior fator de diluição que não afete a quantidade de sódio e potássio na biomassa algal.

Com objetivo de obter melhor cultivo das células algais com boas características para fins agrícolas.

Wuang et al. (2016) utilizaram a microalga *Spirulina platensis* (*S. platensis*) para a remoção de macro e micronutrientes em água residuária de aquicultura. Nos resultados observaram que a biomassa de *S.platensis*, com 78,0 g kg⁻¹de nitrogênio (N), 8,0 g kg⁻¹de fósforo (P₂O₅) e 16,0 g kg⁻¹de potássio (K₂O), apresentando menor teor de NPK se comparados aos teores de 124,0 g kg⁻¹de nitrogênio (N), 66,0 g kg⁻¹de fósforo (P₂O₅) e 125,0 g kg⁻¹de potássio (K₂O) presente no fertilizante químico Triple Pro (15-15-15). Sendo assim, relatam que os macronutrientes primários (NPK) devem ser aplicados em elevadas taxas para os diversos tipos de culturas. Ao contrário dos baixos valores de NPK, o valor obtido de cálcio pela *S.platensis* foi 4,0 g kg⁻¹, valor superior ao encontrado no fertilizante químico de 1,0 g kg⁻¹. O cálcio é um importante nutriente, pois promove a elasticidade da parede celular e melhora o crescimento das raízes das plantas. O fertilizante á base de *Spirulina* apresentou ótimo desempenho, sendo quase similar ao fertilizante químico para o crescimento de plantas, em especial caso para a rúcula.

Foi realizado uma breve comparação entre os ensaios (E1) e (E2) do presente estudo e o fertilizante orgânico (*S.platensis*) e químico (TriplePro 15-15-15) apresentado por Wuang et al., (2006). Foi possível observar que a concentração de nitrogênio assimilado pela *S.platensis* foi superior ao valor da *C.sorokiniana* do estudo, apenas o fósforo e potássio foram superiores aos teores obtidos pela *S.platensis*. Um dos fatores que pode influenciar na remoção de nutrientes de águas residuárias são as características do efluente e a adaptação das diferentes espécies de microalgas, apresentando assim distintas concentrações de nutrientes na composição de fertilizantes naturais. Em comparação com o fertilizante químico Triple Pro, os valores de NPK obtidos pela *C.sorokiniana* foram menores, semelhante aos resultados *S.platensis* apresentado por Wuang et al., (2006). Os fertilizantes á base de algas apresentam sempre menor teor de macronutrientes primários (NPK), característica comum para os fertilizantes naturais, porém contribuem com boa eficiência para as diversas culturas. Apesar dos fertilizantes de microalgas apresentarem baixo teor de (NPK), a adequada aplicação de macronutrientes secundários no solo pode apresentar equilíbrio na demanda para os demais nutrientes e contribuir com a moderada aplicação de fertilizantes no sistema solo-planta.

5.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O preparo do coagulante na forma de pó integral apresentou ser uma opção vantajosa, devido à simplicidade nas etapas de preparo. O lote do estudo apresentava sementes com 1 cm de diâmetro e massa de 216 mg. As sementes armazenadas por 10 meses não apresentaram redução de sua propriedade coagulante, apresentando em média 27% de proteína bruta, concentração satisfatória para sua aplicação como coagulante natural.

ETAPA 1: Os ensaios preliminares e a interpretação dos diagramas de coagulação, indicaram que as dosagens de 400 a 500 mg.L⁻¹ das sementes de MOL foram as melhores dosagens dentro da faixa de estudo. O pH neutro, além de reportar boa eficiência na remoção das células algais, apresentou biomassa algal apropriada para avaliação como fertilizante orgânico. Para os três tempos de sedimentação (15, 30 e 40 minutos) avaliados nessa etapa do estudo, o tempo de 40 minutos apresentou melhor interação na etapa de sedimentação, confirmada pela boa eficiência de remoção da turbidez e da densidade óptica. Os parâmetros destinados à etapa de separação: dosagem de coagulante (400 – 500 mg.L⁻¹), pH = 7 e 40 minutos de sedimentação, foram considerados o ponto de partida para a avaliação da Etapa 2.

ETAPA 2: Após a avaliação da faixa de dosagem do estudo (425 a 550 mg.L⁻¹), foi possível observar que a aplicação do coagulante a cada 25 mg.L⁻¹ não apresentou diferença estatística ($p=0,05$) e das seis concentrações avaliadas, a dosagem de 475 mg.L⁻¹ destacou-se em termos de eficiência e economia. Para a aplicação dessa dosagem foram necessárias apenas 4 sementes de MOL com massa de 216 mg, a fim de obter 90% de remoção da turbidez. Nessa etapa, o pH foi mantido em neutro a fim de avaliar a biomassa como fertilizante orgânico e o melhor tempo de sedimentação analisado foi de 45 minutos. A fim de analisar melhor a influência do tempo de sedimentação, foram fixados os seguintes parâmetros analisados na Etapa 3: dosagem do coagulante natural 475 mg.L⁻¹, pH = 7 e 45 minutos de sedimentação.

ETAPA 3: A última variável analisada foi o tempo de sedimentação, e mantendo a dosagem de 475 mg.L⁻¹, e tempos de sedimentação (45, 60 e 120 minutos) avaliados, foi possível observar que o incremento de 10 minutos na etapa de sedimentação ocorria uma redução de 50 mg.L⁻¹ na aplicação do coagulante. O tempo de sedimentação de 45 minutos apresentou ser o melhor tempo para sedimentação dos flocos gerados. Portanto, para a avaliação da Etapa 4, foram fixados os seguintes parâmetros no sentido de obter a biomassa de

microalgas: dosagem ótima 475 mg.L^{-1} , $\text{pH} = 7$ e 45 minutos de sedimentação. Tais etapas de separação das microalgas contribuíram com remoção 91% da turbidez, 78% dos SST e 43% DQO.

ETAPA 4: Após o tratamento de 2 L de ANS por meio de testes de coagulação/floculação e sedimentação, foi possível obter cerca de 10g de biomassa de microalgas seca analisadas como fertilizante orgânico, o qual foi possível verificar que a concentração de macro e micronutrientes foram suficientes para sua aplicação como fertilizante orgânico. Apesar de a biomassa apresentar elevado teor de sódio, essa pode ser aplicada em várias culturas que não apresentam sensibilidade em solo com alta salinidade ou apenas utilizada como auxiliares de outros fertilizantes. Recomenda-se maior diluição dos dejetos suínos para obter um efluente com características estáveis para avaliação. Em geral, a concentração de (NPK) foi considerada satisfatória para sua aplicação como fertilizante orgânico.

5.8.Recomendações

- Investigar diferentes tipos de coagulantes naturais (Tanino, Quitosana, *Moringa Oleifera* Lam, Amidos e *Hibiscus esculentus*) e fazer um comparativo da quantidade de coagulante aplicado no tratamento, em termos de eficiência e economia, para uma mesma cultura de microalgas.
- Estudar os diversos tipos de preparo do coagulante de MOL (solução aquosa, salina, pó integral e pó desengordurado) e avaliar a melhor eficiência e economia.
- Realizar o estudo de perdas das sementes conforme o tipo de preparo do coagulante.
- Estudar a distribuição granulométrica das sementes de MOL preparadas como coagulante natural na forma de pó integral.
- Realizar ensaios dos parâmetros operacionais, em escala de bancada, a fim de investigar as velocidades e tempo de agitação aplicada às etapas de coagulação/floculação, sendo direcionada a eficiência e a diminuição de gastos com energia.
- Investigar a ação antibactericida e fungicida das sementes de MOL no tratamento de água e águas residuárias.
- Estudar a viabilidade econômica na aplicação das sementes de MOL como coagulante natural para separação de microalgas cultivadas em água negra digerida anaerobiamente.
- Investigar a separação das microalgas em ambiente ácido e básico aplicando a MOL, conforme a avaliação do produto final em que se deseja obter (bioplásticos, biocombustíveis).
- Realizar estudo comparativo entre a separação das microalgas aplicando a etapa de sedimentação e a flotação por ar dissolvido.
- Realizar análises microbiológicas da água negra digerida anaerobiamente e da biomassa de microalgas, e avaliar se cumprem os requisitos apresentados na legislação vigente.
- Investigar os metabólitos (carboidratos, proteínas e lipídeos) existentes na biomassa algal recuperada.
- Realizar testes da biomassa algal como fertilizante orgânico em diferentes culturas, a fim de observar a melhor interação entre a biomassa algal no sistema solo-planta.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABALIWANO, J. K.; GHEBREMICHAEL, K. A.; AMY, G. L. Application of the purified *Moringa oleifera* coagulant for surface water treatment. WaterMill Working Paper Series, n. 5, p. 1-19, 2008.

ABDELAZIZ, A.E., LEITE, G.B., HALLENBECK, P.C. Addressing the challenges for sustainable production of algal biofuels: II. Harvesting and conversion to biofuels. Environ. Technol., v. 34, p. 1807-1836., 2013. DOI: 10.1080/09593330.2013.831487. Disponível em : https://www.researchgate.net/publication/259385198_Addressing_the_challenges_for_sustainable_production_of_algal_biofuels_II_Harvesting_and_conversion_to_biofuels. Acesso em: 16 jan. 2019.

ABORCENTER – site de compras e vendas - sementes exóticas – *Moringa Oleifera*, 2011. Disponível em: <https://www.sementesarborcenter.com.br/sementes-de-moringa-oleifera.html>. Acesso em: 14 maio., 2019.

AGARWAL, M.; SRINIVASAN, R.; MISHRA, A. Study on Flocculation Efficiency of Okra Gum in Sewage Waste Water. Macromolecular Materials Engineering. v.286, p.560-563., 2001. DOI: 10.1002/1439-2054(20010901)286:9<560::AID-MAME560>3.0.CO;2-B . Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/230355124_Study_on_Flocculation_Efficiency_of_Okra_Gum_in_Sewage_Waste_Water. Acesso em: 21 jan de 2019.

AHMAD, A.L.; YASIN, N.H.M.; DEREK, C.J.C.; LIM, J.K. (2011). Optimization of microalgae coagulation process using chitosan. Chemical Engineering Journal. v.173, p.879-882, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.07.070>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894711009144>. Acesso em 21 jan 2019.

ALCÁNTARA, C., FERNÁNDEZ, C., ENCINA, G. P. A., MUNOZ, R. Mixotrophic metabolism of *Chlorella sorokiniana* and algal-bacterial consortia under extended dark-light and nutrient starvation. Applied microbiology and biotechnology, v. 99, p. 2393-2404, 2015. DOI: 10.1007/s00253-014-6125-5. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25341398>. Acesso em: 18 jan. 2019.

ALSHARAA, A.; BASHEER, C.; ADIO, S. O.; ALHOOSHANI, K.; LEE, H. Removal of haloethers, trihalomethanes and halo ketones from water using *Moringa oleifera* seeds. International Journal of Environmental Science and Technology, v. 13, n. 11, p. 2609- 2618, 2016. ISSN 1735-1472. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-016-1079-z>. Acesso em 23 jan. 2019.

AMAYA, D.R.; KERR, W.E.; GODOI, H.T.; OLIVEIRA, A.L.; SILVA, F.R. Moringa: hortaliça arbórea rica em beta-caroteno. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v.10, n.2, p.126, 1992.

ANDRADE, D. S., FILHO, A. C. Potencialidades e desafios do cultivo. IAPAR., v. 3, 2014.

ANYANWU, R. C., RODRIGUEZ, C., DURRANT, A., OLABI, A. G. Microalgae Cultivation Technologies. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering., 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09258-4>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818092584>. Acesso em 23 jan 2019.

APHA - *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, twentieth ed. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Association., 2005.

ARAUJO, C. S. T., ALVES, V. N., REZENDE, H. C., COELHO, M. M. C. Development of a flow system for the determination of low concentrations of silver using *Moringa Oleifera* seeds as biosorbent and flame atomic absorption spectrometry. *Microchemical Journal*., v. 96, p. 82-85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2010.02.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026265X1000041X>. Acesso em: 23 jan. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12216: Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento Público: procedimento. p. 18, Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13969: Tanques sépticos: unidades de tratamento complementar e disposição dos efluentes líquidos: projeto, construção e operação. p.60, Rio de Janeiro, 1997.

AOAC. *Association of Official Analytical Chemists. Official methods of analysis of the Association of the Analytical Chemists*;17th ed. Virginia, 2000.

BAHARUDDIN, N. D. E., AZIZ, N. S., SOHIF, H. N., KARIM, W. A. A., AL-OBAIDI, J. R., BASIRAN, N. M. Marine microalgae flocculation using plant: The case of *Nannochloropsis* and *Moringa Oleifera*. *Pak. J. Bot.*, v. 48, p. 831-840, 2016. Disponível em: [https://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/48\(2\)/52.pdf](https://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/48(2)/52.pdf). Acesso em 19 jan. 2019.

BAPTISTA, A. T. A; SILVA, M. O; GOMES, R.G; BERGAMASCO, R; VIEIRA, M. F; VIEIRA, A. M. S. Protein fractionation of seeds of *Moringa Oleifera* Lam and its application in superficial water treatment. *Separation and Purification Technology*, v. 180, p. 114-124, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2017.02.040>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586617305774>. Acesso em: 24 nov. 2018.

BARONE, V., PUGLISI, I., FRAGALÁ, F., STEVANATO, P., BAGLIERI, A. Effect of living cells of microalgae or their extracts on soil enzyme activities. *Archives of Agronomy and Soil Science*., p. 1476-3567, 2018. DOI: 10.1080/03650340.2018.1521513. Disponível em: [file:///C:/Users/debor/Downloads/Effect%20of%20living%20cells%20of%20microalgae%20or%20their%20extracts%20on%20soil%20enzyme%20activities%20\(5\).pdf](file:///C:/Users/debor/Downloads/Effect%20of%20living%20cells%20of%20microalgae%20or%20their%20extracts%20on%20soil%20enzyme%20activities%20(5).pdf). Acesso em: 30 de maio de 2019.

BARSANTI, L., GUALTIERI, P. Is exploitation of microalgae economically and energetically sustainable ?. *Algal Research.*, v. 31, p. 107 – 115, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.02.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926417309980>. Acesso em 19 jan. 2019.

BASULTO, D. L. V., SÁNCHEZ, P. D. A., OLVERA, J. R., BANDALA, E. R. Wastewater treatment using *Moringa oleífera* Lam seeds: A review. *Journal of Water Process Engineering.* v. 23, p. 151 – 164, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.03.017>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325502440_Wastewater_treatment_using_Moringa_oleifera_Lam_seeds_A_review. Acesso em 18 jan. 2019.

BECKER, E. W. *Microalgae: biotechnology and microbiology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

BERNHARDT, H., CLASEN, J. Flocculation of micro-organisms. *Journal Water SRT- Aqua*, v. 40, p. 76-87., 1991. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/279887379_Flocculation_of_Micro-Organisms. Acesso 24 jan. 2019.

BICHI, M. H., AGUNWAMBA, J., MUYBI, S. A. Optimization of operating conditions for the application of *Moringa Oleifera* (Zogale) seeds extract in water disinfection using response surface methodology. *African Journal of Biotechnology.*, v. 11, n. 92, p. 15875 – 15887, 2012. DOI: 10.5897/AJB12.1341.

BHUPTAWAT, H., FOLKARD, G. K., CHAUDHARI, S. Innovative physico-chemical treatment of wastewater incorporating *Moringa Oleifera* seed coagulant. *Journal of Hazardous Materials.*, v. 142, p. 477-482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.08.044>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406009861>. Acesso em 23 jan, 2019.

BINA, B.; MEHDINEJAD, M. H.; DALHAMMER, G.; RAJARAO, G.; NIKAEEN, M.; ATTAR, H. M. Effectiveness of *Moringa oleifera* coagulant protein as natural coagulant aid in removal of turbidity and bacteria from turbid waters. *World Academy of Science Engineering and Technology*, v. 43, pp. 618-620., 2010. Disponível em: <https://waset.org/publications/5079/effectiveness-of-moringa-oleifera-coagulant-protein-as-natural-coagulant-aid-in-removal-of-turbidity-and-bacteria-from-turbid-waters>. Acesso em : 21 jan 2019.

BORBA, L. R. Viabilidade do uso da *Moringa oleifera* Lam no tratamento simplificado de água para pequenas comunidades. 2001. 84 p. Orientador: Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, Joao Pessoa, 2001.

BRASIL. Decreto-lei nº 6.894, de 14 de janeiro de 2004. Dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, ou

biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura., Brasília, 29 de dezembro 2014.

BRASIL, CONAMA. Resolução 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, v. 357, 2005.

CANDIDO, C. Cultivo de *Chlorella vulgaris* em vinhaça convencional e biodigerida tratadas: uma abordagem ecofisiológica. Dissertação (mestrado) em Ecologia e Recursos Naturais. Universidade de São Carlos – UFSCAR., Orientador: Profa. Dra. Ana Teresa Lombardi., São Carlos, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/7088/DissCC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 17 jun. 2019.

CAMACHO, V.S; SOUSA, R; BERGAMASCO, M.R; TEIXEIRA. The use of *Moringa oleifera* as a natural coagulant in surface water treatment. *Chemical Engineering Journal*, v. 313. p. 226-237, abr. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.031>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894716317831>. Acesso em: 24 nov. 2018.

CAMP, T. R., STEIN, P. C. Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers.*, v. 30, n. 4, p. 219-237, 1943. Disponível em: [http://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjt55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1360856](http://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjt55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1360856). Acesso em: 21 ago., 2019.

CAPORGNO, M. P., TALEB, A., OLKIEWICZ, M., FONT, J., PRUVOST, J., LEGRAND, J., BENGUA, C. Microalgae cultivation in urban wastewater: Nutrient removal and biomass production for biodiesel and methane. *Algal Research*, v. 10, p. 232-239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.05.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926415001319>. Acesso em 28 em jan. 2019.

CASSINI, S. T; FRANCISCO, S. A; ANTUNES, P. W. P; OSS, R. N; KELLER, R. Harvesting Microalgae Biomass grow in Anaerobic Sewage Treatment Effluent by Coagulation-Flocculation Method: Effect of pH. *Environmental Sciences*. v.60, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-201716017>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-89132017000100700. Acesso em: 24 nov. 2018.

CHATSUNGNOEN, T.; CHISTI, Y. Harvesting by flocculation-sedimentation. *Algal Research*, v. 13, p. 271-283, 2016. DOI: 10.1016 / j.algal.2015.12.009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926415301223#>. Acesso em: 21 ago. 2019.

CHATTERJEE, A., SINGH, S., AGRAWAL, C., YADAV, S., RAI, R., RAI, L. C. Role of Algae as a biofertilizer. In book: *Algal Green Chemistry.*, 2017. DOI: 10.1016/B978-0-444-63784-0.00010-2. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316344136_Role_of_Algae_as_a_Biofertilizer. Acesso em: 14 maio. 2019.

CHEN, C.; YEH, K.; AISYAH, R.; LEE, D.; CHANG, J. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. *Bioresource Technology*. v. 102, p.71-81., 2011. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.06.159. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/45439242_Cultivation_photobioreactor_design_and_harvesting_of_microalgae_for_biodiesel_production_A_critical_review. Acesso em: 21 jan 2019.

CHERNICHARO, C.A.L. (coordenador). Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Belo Horizonte: Projeto PROSAB, 2007.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*., v. 25, n.3, p. 294-306., 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975007000262>. Acesso em 21 jan. 2019.

CHOY, S. Y., PRASAD, K. N., WU, T. Y., RAGHUNANDAN, M. R., RAMANAN, R. N. Performance of conventional starches as natural coagulants for turbidity removal. *Ecological Engineering*., v. 94, p. 352-364, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.05.082>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857416303172>. Acesso em 18 jan. 2019.

CHRISTENSON, L.; SIMS, R. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. *Biotechnology Advances*. v.29, p.686-702., 2011. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2011.05.015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21664266>. Acesso em 21 jan. 2019.

CONNELLY. R. How algal biofertilizers can accelerate sustainable agriculture. The University of Texas at Austin Sustainability. Texas. Disponível em: <https://sustainability.utexas.edu/pssc/symposium/2011/16>. Acesso em: 22 de nov. 2018.

DAE – Departamento de Água e Energia. Estação de Tratamento de Esgoto – Tibiriçá, 2009. Disponível em: <http://www.daebauru.sp.gov.br/2014/esgoto/esgoto.php?secao=tratamento&pagina=18#>. Acesso em: 14 de maio. 2019.

DE BASHAN, L. E., TREJO, A., HUSS, V. A. R., HERNANDEZ, J. P., BASHAN, Y. *Chlorella sorokiniana* UTEX 2805, a heat and intense, sunlight-tolerant microalga with potential for removing ammonium from wastewater. *Bioresource Technology*., v. 99, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.065>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852407008127>. Acesso em 21 jan. 2019.

DELGADILLO-MIRQUEZ, L; LOPES, F; TAIDI, B; PAREAU, D. Nitrogen and phosphate removal from wastewater with a mixed microalgae and bacteria culture. *Biotechnology Reports*., v.11., 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.04.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215017X16300182>. Acesso em: 24 nov. 2018.

DE GRAAFF, M. S. Resource recovery from black water. Wageningen Unirvesity. Wageningen. p 192., 2010.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. Métodos e técnicas de tratamento de água. 2ª ed. 2v. Rima: São Carlos, 2005.

DICKIN, S., DAGERSKOG, L., JIMÉNEZ, A., ANDERSSON, K., SAVADOGO, K. Understanding sustained use of ecological sanitation in rural Burkina Faso. *Science of the Total Environmental.*, v. 613-614, p. 140-148, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.251>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717322659>. Acesso em 21 jan 2019.

DIVAKARAN, R., SIVASANKARA, P. V. N. Flocculation of Kaolinite suspensions in water by chitosan. *Water Research.*, v. 35, p. 3904-3908. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00131-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00131-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135401001312>. Acesso em: 23 jan. 2019.

DUAN, A., J.; GREGORY, J. Coagulation by hydrolysing metal salts. *Advances in Colloid and Interface Science.* v.100, p.475-502., 2003.

EDZWALD, J. K., BUNKER, D. Q., Pretreatment considerations for dissolved air flotation: Water type, coagulants and flocculation. *Water Science and Technology.*, v. 31., p. 3-4, 1995. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.1995.0517>. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/31/3-4/63/4172/Pretreatment-considerations-for-dissolved-air?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 23 jan., 2019.

ELHAFIZ, A., GAUR, A. E. S. S., OSMAN, N. H. M., LAKSHMI, T. *Chlorella vulgaris* and *Chlorella pyrenoidosa* live cells appear to be promising sustainable biofertilizer to grow rice, lettuce, cucumber and eggplant in the UAE soils. *Science and Technology.*, v.7, p. 14-21., 2015. DOI: [10.19071/rrst.2015.v7.2919](https://doi.org/10.19071/rrst.2015.v7.2919). Disponível em: https://pdfs.semanticscholar.org/15f5/0be74cbb983d415a1df687a28421bc66d37b.pdf?_ga=2.133280782.1419651074.1559188028-2131513368.1559188028. Acesso em: 30 maio de 2019.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Produção Suínos. EMBRAPA SUÍNOS E AVES. ISSN 1678-8850. Versão Eletrônica., jul., 2003. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/SP/suinos/manejodejetos.html>. Acesso em: 16 de jun. 2019.

FAKIR, K., YAAKOB, Z., ALI, E., ABDULLAH, S. R. S., TAKRIFF, M. S. Na Overview of microalgae as a wastewater treatment. *Jordan International Energy Conference.* 2011. Disponível em: http://www.academia.edu/5748134/An_Overview_of_Microalgae_as_a_Wastewater_Treatme nt. Acesso em fev. 2019.

FAROOQ, U.; MALVIYA, R.; SHARMA, P.K. Extraction and Characterization of Okra Mucilage as Pharmaceutical Excipient. *Academic Journal of Plant Sciences*. v.6, p.168-172., 2013. DOI: 10.5829/idosi.ajps.2013.6.4.82292. Disponível em: [https://www.idosi.org/ajps/6\(4\)13/3.pdf](https://www.idosi.org/ajps/6(4)13/3.pdf). Acesso em: 21 jan 2019.

FERNANDES, T. V. Toward an Ecologically Optimized N:P Recovery from Wastewater by Microalgae. *Frontiers in microbiology.*, v. 8, p. 1742, 2017. DOI: 10.3389/fmicb.2017.01742. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5601980/>. Acesso em: 24 nov. 2018.

FERNANDES, T. V., SHRESTHA, R., SUI, Y., PAPINI, G. Closing domestic nutrient cycles using microalgae. *Environmental Science & Technology*. ed. 49., v. 20., 2015. DOI: 10.1021/acs.est.5b02858. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26389714>. Acesso em 16 jan. 2019.

FLOWERS, T. J., COLMER, T. D. Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*, v. 179, p. 945 – 963., 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02531.x>. Disponível em: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?referenceID=1711733](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?referenceID=1711733). Acesso em: 14 maio. 2019.

FOIDL, N.; MAKKAR, H. P.S.; BECKER, K. The Potential of Moringa Oleifera For Agricultural And Industrial Uses. In: L.J. Fuglie (Ed.), *The Miracle Tree: The Multiple Attributes of Moringa* (Pp. 45-76). Dakar, Senegal: Church World Service, 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/310440123_The_potential_of_Moringa_oleifera_for_agricultural_and_industrial_uses_Moringa_oleifera_Webpage. Acesso em 19 jan. 2019.

FOGAÇA, F. M., MORAES, L. C. K., OLIVEIRA, G. A., NAKAGAKI, J. M. N. Cultivo de microalga em meio alternativo enriquecido com vinhaça para indicativo de potencialidade na produção de biocombustíveis. Conference: XIV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental. Centro Oeste., 2016. DOI: 10.5151/engpro-eneeamb2016-er-007-5073. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/309439571_CULTIVO_DE_MICROALGA_EM_MEIO_ALTERNATIVO_ENRIQUECIDO_COM_VINHACA_PARA_INDICATIVO_DE_POTENCIALIDADE_NA_PRODUCAO_DE_BIOCOMBUSTIVEIS. Acesso em: 17 jun. 2019.

FRANCISCO, S. A. Recuperação de microalgas cultivadas em efluente de tratamento anaeróbio de esgoto por processo de coagulação-floculação. Orientador: Prof. Dr. Sérgio Túlio Alves Cassini. 2016. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santos, Vitória., 2016.

FREITAS, C. I.; CAMACHO, F. P.; MORETI, L. O. R.; FURLAN, C. H.; BERGAMASCO, R. Viabilidade do extrato aquoso de *Moringa Oleifera* no tratamento de água com florações de cianobactérias. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, 2013.

FUAD, N., OMAR, R., KAMARUDIN, S., HARUN, R., A. IDRIS., W.A.K.G., WAN AZLINA. Effective use of tannin based natural biopolymer, AFlok-BP1 to harvest marine microalgae *Nannochloropsis*. *Journal of Environmental Chemical Engineering.*, v. 6, p. 4318-4328, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.041>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343718303506>. Acesso em: 24 nov. 2018.

GARCIA-GONZALEZ, SOMMERFELD, M. Biofertilizer and biostimulant properties of the microalga *Acutodesmus dimorphus*. *Journal of Applied Phycology.*, v. 28, n. 2., 2015. DOI: 10.1007/s10811-015-0625-2. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277965347_Biofertilizer_and_biostimulant_properties_of_the_microalga_Acutodesmus_dimorphus. Acesso em: 14 maio. 2019.

GALLAO, I. M.; DAMASCENO, L. F.; BRITO, E. S. Avaliação química e estrutural da semente de Moringa. *Revista Ciência Agronômica*, v. 37, n. 1, p. 106-109., 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/279694951_Avaliacao_quimica_e_estrutural_da_semente_de_moringa. Acesso em: 24 nov. 2018.

GASSENSCHMIDT, U.; JANY, K. D.; TAUSCHER, B.; NIEBERGALL, H. Isolation and characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam. *Biochimica et Biophysica Acta*, v. 1243, n. 3, p. 477-481, 1995. doi:10.1016/0304-4165(94)00176-X. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7727523>. Acesso em: 18 jan. 2019.

GEMIN, L. G. Aplicações flocculantes de suspensões da microalga *Scenedesmus subspicatus* como biofertilizante no cultivo orgânico do tomateiro. Dissertação (mestrado) em Agronomia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Orientador: Prof. Dr. Átila Francisco Mógor.

GHEBREMICHAEL, K. A.; GUNARATNA, K. R.; HENRIKSSON, H.; BRUMER, H.; DALHAMMAR, G. A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed. *Water Research*, v. 39, n. 11, p. 2338-2344, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.04.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135405001612>. Acesso em: 18 jan. 2019.

GRIMA, G.E.; BELARBI, E.-H, FERNÁNDEZ, A. A.; MEDINA, R.; YUSUF, C. Recovery of microalgae biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology Advances*, v. 20, p. 491 – 515, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(02\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(02)00050-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975002000502>. Acesso em: 24 nov. 2018.

GUTIÉRREZ, R.; PASSOS, F.; FERRER, I.; UGGETTI, E.; GARCÍA, J. Harvesting microalgae from wastewater treatment systems with natural flocculants: Effect on biomass settling and biogas production. *Algal Research*. v.9, p.204-211., 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.03.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926415000739>. Acesso em 21 jan. 2019.

HAMID, S. H. A., LANANAN, F., KHATOON, H., ENDUT, A. A study coagulating protein of *Moringa Oleifera* in microalgae bio-flocculation. *International Biodeterioration & Biodegradation.*, v. 113, p. 310-317., 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.03.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830516300968>. Acesso em: 24 nov. 2018.

HAYIM, R., IMAI, T., THONG, S. O., SULISTYOWATI, L. Biohydrogen production from sago starch wastewater using an enriched thermophilic mixed culture from hot spring. *International Journal of Hydrogen Energy.*, v. 36, p. 14162-14171., 2011. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.04.211. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/236230294_Biohydrogen_production_from_sago_starch_wastewater_using_an_enriched_thermophilic_mixed_culture_from_hot_spring. Acesso em 28 jan. 2019.

HDR. *Moringa Oleifera* a multi-purpose tree. The organic organisation. Disponível em: <http://www.hdra.org.uk>. Acesso em: 23 jan 2019.

HUSNAN, L. A. A., ALKAHTANI, M. D. F. Impacto f *Moringa* aqueous extract on pathogenic and fungi in vitro. *Annals of Agricultural Sciences.*, v. 61, n. 2, 2016. DOI: 10.1016/j.aosas.2016.06.003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/311941148_Impact_of_Moringa_aqueous_extract_on_pathogenic_bacteria_and_fungi_in_vitro. Acesso em: 14 maio. 2019.

ITB - INSTITUTO TRATA BRASIL. Benefícios econômicos e sociais da expansão do saneamento no Brasil. Ed: Exante Consultoria Econômica., 2018. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/blog/2018/08/29/saneamento-e-desenvolvimento-humano-no-mundo-o-acesso-a-agua-e-esgoto/>. Acesso em: 11 jan. 2019.

ITB – INSTITUTO TRATA BRASIL. ODS- Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Ed. IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada., 2018. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/uploads/phpmP0tlH-5c3749fa94450.pdf>. Acesso em 16 jan. 2019.

KADIR, W. N. A., LAM, M. L., UEMURA, Y., LIM, J. W., LEE, K. T. Harvesting and pre-treatment of microalgae cultivated in wastewater for biodiesel production: A review. *Energy Conversion and Management.*, v. 171, p. 1416-1429., 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.074>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418306836>. Acesso em 23 jan., 2019.

KATAYON, S., NOOR, M. J. M. M., ASMA, M., GHANI, L. A. A., THAMER, A. M., AZNI, I. SULEYMAN, A. M. Effects of storage conditions of *Moringa oleifera* seeds on its performance in coagulation. *Bioresource Technology*, v.97, p.1455–1460, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.07.031>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852405003603>. Acesso em: 24 nov. 2018.

KHAN, A. A. GAUR, R. Z., KUMAR, A., MEHROTRA, I., KAZMI, A. A., GORONSZY, M. C. Integrated UASB and Continuous Flow Sequencing Batch Reactor (CFID) System for Sewage Treatment. Proceedings IWA Conference on Microbes in Wastewater and Waste Treatment, Bioremediation and Energy Production, p. 97, January 24-27, 2011, Goa, Índia.

KEFFER, J. E., KLEINHEINZ, G. T. Use of *Chlorella vulgaris* for CO₂ mitigation in a photobioreactor. Journal Ind Microbiol Biotechnol., v. 29, p. 275-80., 2002. DOI: 10.1038/sj.jim.7000313. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12407463>. Acesso em 29 jan. 2019.

KIM, S., PARK, J. , CHO, Y. B., HWANG, S. J. Growth rate, organic carbon and nutrient removal rates of *Chlorella sorokiniana* in autotrophic, heterotrophic and mixotrophic conditions., Bioresource Technology, v. 144, p. 8-13, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.068>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413009875>. Acesso em 21 jan., 2019.

KLIPHUIS, A. M. J., WINTER, L., VEJRAZKA, C., MARTENS, D. E., JANSSEN, M., WIJFFELS, R. Photosynthetic efficiency of *Chlorella sorokiniana* in a turbulently mixed short light-path photobioreactor. Biotechnology Progress., v. 26, p. 687-696, 2010. DOI: [doi: 10.1002/btpr.379](https://doi.org/10.1002/btpr.379). Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20175153>. Acesso em: 24 nov. 2018.

KONRADT-MORAES.; LEILA CRISTINA. Estudo da coagulação-ultrafiltração para produção de água potável. Orientador: Rosângela Bergamasco. 2004. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná., 2004.

KUJAWA-ROELEVELD, k.; ZEEMAN, G. Anaerobic Treatment in Decentralised and Source-Separation-Based Sanitation Concepts.Reviews in Environmental Science and Biotechnology., v. 5, p. 115-139, 2006. DOI 10.1007/s11157-005-5789-9. Disponível em: <https://sci-hub.tw/10.1007/s11157-005-5789-9>. Acesso em: 16 jan. 2019.

JAHN, S. A., MUSNA, H. A., BURGSTALLER, H. The tree that purifies water: cultivating multipurpose Moringaceae in Sudan. Unasyhara, v. 38, p. 23-28, 1986. Disponível em: <https://dlc.dlib.indiana.edu/dlc/handle/10535/8421>. Acesso em 19 jan., 2019.

JANKOWSKA, E., SAHU, A. K., POPIEL, P. O. Biogas from microalgae: Review on microalgae's cultivation, harvesting and pre treatment for anaerobic digestion. . Renewable and Sustainable Energy Reviews., v. 75, p. 692-709, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.045>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116308486>. Acesso em 21 jan. 2019.

JOSHUA, R., VASU, V. Characteristics of stored rain water and its treatment technology using Moringa Seeds. International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research, v. 2, n. 01, 2013. ISSN 2250-3137. Disponível em: http://new.ijlbpr.com/jlbpradmin/upload/ijlbpr_50e55cb6dd292.pdf. Acesso em 23 jan. 2019.

JUNIOR, O. J. L. Tratamento descentralizado de águas residuárias domésticas: uma estratégia de inclusão social. In: LIRA, WS., and CÂNDIDO, GA., orgs. Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa [online]. Campina Grande: EDUEPB, 2013, pp. 213-232. ISBN 9788578792824. Available from SciELO Books .

LANZA, M. H. Utilização de lodo de esgoto compostado e irrigação com água residuária na substituição de adubos químicos e água potável em laranjeira valência. Orientador: Dr. Hélio Grassi Filho. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual ‘Júlio de Mesquita Filho’, Botucatu – SP, 2018.

LEDO, Patricia Guilhermina da Silva. Flotação por ar dissolvido na clarificação de águas com baixa turbidez utilizando sulfato de alumínio e sementes de *Moringa oleifera* como coagulantes. 2008, 123 p. Orientador: Prof. Dr. João Bosco de Araújo Paulo. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

LEGNER, C. Reator UASB para tratamento biológico de esgoto. Revista TAE.,2015. Disponível em: <http://www.revistatae.com.br/9034-noticias>. Acesso em 16 fev. 2019.

LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. Campinas. Ed. Àtomo, 2005.

LORENZI, H., MATOS, F.J. Plantas medicinais no Brasil – nativas e exóticas cultivadas. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, p. 346-347, 2002.

LOURENÇO, S. O. Cultivo de microalgas marinhas: princípios e aplicações. São Carlos: Rima, 2006.

MAADANE, A., MERGHOUB, N., AINANE, T., EL ARROUSSI, H., BENHIMA, R., AMZAZI, S., BAKRI, Y., WAHBY, I. Antioxidant activity of some Moroccan marine microalgae: Pufa profiles, carotenoids and phenolic content. Journal of Biotechnology., v. 215, p. 13-19., 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2015.06.400>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168165615300262>. Acesso em: 28 jan. 2019.

MAHAPATRA, D. M., CHANAKYA, H. N., RAMACHANDRA, T. V. Bioremediation and lipid synthesis through mixotrophic algal consortia in municipal wastewater. Bioresource Technology., v. 168, p. 142-150, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.130>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852414004350>. Acesso em 21 jan. 2019.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional de plantas: Princípios e aplicações. Potafos. Piracicaba, SP, Brasil. Avaliação do estado nutricional de plantas: Princípios e aplicações. 2 ed. Potafos, Piracicaba, SP, Brasil., p.116 - 217, 1997.

MARCHELLO, A. E. Cultivo de microalgas e redução de coliformes em efluente de tratamento anaeróbio. Orientadora: Dra. Ana Teresa Lombardi. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2013.

MARTÍNEZ-ALCÁNTARA, B.; MARTÍNEZ-CUENCA, M. R.; BERMEJO, A.; LEGAZ, F.; QUIÑONES, A. Liquid organic fertilizers for sustainable agriculture: Nutrient uptake of organic versus mineral fertilizers in citrus trees. *Plos One.*, v. 11, n. 10, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0161619. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5072554/>. Acesso em: 16 de jun. 2019.

MATA, T.M., MARTINS, A.A., CAETANO, N.S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (1), 217e 232., 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001646>. Acesso em: 16 jan. 2019.

MATASSA, S., BATSTONE, D., HULSEN, T., SCHNOOR, J., VERSTRAETE, W. Can Direct Conversion of Used Nitrogen to New Feed and Protein Help Feed the World. *Environmental Science & Technology.*, v. 49, pp. 5247-5254., 2015. DOI: 10.1021/es505432w. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es505432w>. Acesso em 24 jan. 2019.

MATHIOT, C., PONGE, P., GALLARD, B., SASSI, J. F., DELRUE, F., MOIGNE, N. L. Microalgae starch-based bioplastics: Screening of ten strains and plasticization of unfractionated microalgae by extrusion. *Carbohydrate Polymers.*, v. 208, p. 142-152, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.12.057>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861718315030>. Acesso em fev. 2019.

MCCABE, W. L.; SMITH, J.; HARRIOT, P. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. , Ed. McGraw-Hill., Aravaca, 1998.

METCALF; EDDY. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse. McGraw-Hill International Editions, 3rd ed., New York., 1991.

METCALF & EDDY, I. N. C. Wastewater engineering: treatment and reuse. 4ª ed. New York, McGraw – Hill Inc. p. 1819., 2013.

MEZZARI, M. P., SILVA, M. L. B., NICOLOSO, R. S., IBELLI, A. M. G., BORTOLI, M., VIANCELLI, A., SOARES, H. M. Assessment of N₂O from a photobioreactor treating ammonia-rich swine wastewater digestate. *Bioresource Technology.*, v. 149., p. 327- 332, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.065>. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24128394>. Acesso em jan. 2019.

MIHELICIC, J. R., FRY, L. M., SHAW, R. Global potential of phosphorus recover and feces. *Chemosphere.*, v. 84, p. 832 -839, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.046>. Disponível em : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653511001925>. Acesso em: 19 de jan. 2019.

MILLER, J. C.; MILLER, J. N. Statistic for Analytical Chemistry, third ed. Ellis Horwood PTR Prentice Hall. 233 p. 1993.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água. Resolução CNRH, número 54, de 28 de novembro de 2005. Diário Oficial da União, Brasília, mar. 2005.

MIYAZAWA, M., BARBOSA, G. M. C. Dejeito líquido de suíno como fertilizante orgânico. Boletim Técnico Nº 84, Instituto Agrônômico do Paraná – IAPAR, Londrina - PR, 32p., 2015. Disponível em: http://www.iapar.br/arquivos/File/banner%20pequeno/dejeito_suinoa.pdf. Acesso em: 20 jun, 2019.

MOHD UDAIYAPPAN, A. F., HASAN, H. A., TAKRIFF, M. S., ABDULLAH, S. R. S. A review of the potentials, challenges and current status of microalgae biomass applications in industrial wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering.*, v. 20, p. 8-21., 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.09.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714417303549>. Acesso em 28 jan. 2019.

MORENO, B. M. M.; HEREDIA, B. J.; GALLARDO, M. Microalgae removal with *Moringa Oleifera*. *Toxicon*, v. 110, p. 68-73, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2015.12.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004101011530146X>. Acesso em: 24 nov. 2018.

MORUZZI, R. B. Reuso de água no contexto da gestão de recursos hídricos: impacto, tecnologias e desafios. *OLAM – Ciência & Tecnologia.*, v.8, n.3, p.271., 2008. ISSN: 1982-7784. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/planejamento/download/rodrigo/reuso.pdf>. Acesso em: 13 maio. 2019.

MORITA, M., WATANABE, Y., SAIKI, H. High photosynthetic productivity of green microalga *Chlorella sorokiniana*. *Applied Biochemistry Biotechnology.*, v. 87., p. 203-218, 2000. DOI: [10.1385/ABAB:87:3:203](https://doi.org/10.1385/ABAB:87:3:203). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/12340506_High_Photosynthetic_Productivity_of_Green_Microalga_Chlorella_sorokiniana. Acesso em 19 jan. 2019.

MORETI, L. O. R. Estudo do processo de remoção de microalgas para obtenção de água potável. Orientador: Rosângela Bergamasco. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná., 2014.

MORTON, J. F. The horseradish tree, *Moringa pterygosperma* (Moringaceae) – a boon to arid lands. *Economy Botany*, v. 45, p. 318-333, 1991. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02887070>. Acesso em 19 jan. 2019.

MOTA, S. B., VON SPERLING, M. Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção., *Pesquisas em Saneamento Básico. PROSAB/ABES*, 1 ed., Rio de Janeiro, 2009.

MULLER- FEUGA, A. The role of microalgae in aquaculture: situation and trends. *Journal of Applied Phycology.*, v. 12, p. 527-534., 2000. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008106304417>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008106304417>. Acesso em 28 jan. 2019.

MULBRY, W., KONDRAD, S., PIZARRO, C., WESTHEAD, E. K. Treatment of dairy manure effluente using freshwater algae: Algal productivity and recovery of manure nutrientes using pilot-scale algal turf scrubbers. *Bioresource Technology.*, v. 99, n. 17, p. 8137-8142., 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.073>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852408003106>. Acesso em: 14 maio. 2019.

MUNNS, R., TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Reviews of Plant Biology.*, v. 59, p. 651-681, 2008. DOI: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911.. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18444910>. Acesso em: 14 maio. 2019.

NAIK, S. N., GOUD, V. V., ROUT, P. K., DALAI, A. K. Production of first second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, v. 14, p. 578-597., 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002342>. Acesso em 28 jan. 2019.

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S.; TALBOT, B. G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. *Water Research*, v. 29,n. 2, p. 703-710, 1995. doi:10.1016/0043-1354(94)00161-Y. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00161-Y](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00161-Y). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004313549400161Y>. Acesso em: 18 jan. 2019.

NISHI, L., GUILHERME, A. L. F., VIEIRA, A. M. S., ARAÚJO, A. A., AMBROSIO-UGRLI, M. C. B., BERGAMASCO, R. Cyanobacteria removal by coagulation/flocculation with seeds of the natural coagulant *Moringa oleifera* Lam. *Chemical Engineering Transactions*, v. 24, pp. 1129-1134.,2011. DOI: DOI: 10.3303/CET1124189. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/278142494_Cyanobacteria_Removal_by_CoagulationFlocculation_with_Seeds_of_the_Natural_Coagulant_Moringa_oleifera_Lam. Acesso em: 24 nov. 2018.

NUNES, J. L. S. Fertilizantes. *Agrolink*. 12 set, 2016. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/nutrientes_361443.html. Acesso em: 20 jun, 2019.

OKUDA, T.; BAES, A. U.; NISHIJIMA, W.; OKADA, M. Coagulation mechanism of salt solution-extracted active component in *Moringa oleifera* seeds. *Water Research*, v. 35, n. 3,p. 830-834, 2001a. doi:10.1016/S0043-1354(00)00296-7. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00296-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00296-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135400002967>. Acesso em : 18 jan. 2019.

ONG FLORA TIÊTE – Associação de Recuperação Florestal. Tabela de preços sementes de *Moringa Oleifera* Lam, agosto, 2019. Disponível em: http://www.floratiete.org.br/relacao/sementes_2012.pdf. Acesso em: 14 de maio. 2019.

ONU – Organização das Nações Unidas. A ONU e o meio ambiente, 1987. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente/>>. Acesso em: 13 set. 2018.

ONU/BR - Nações Unidas No Brasil. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável., 2018. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em: 11 jan. 2019.

OMS – Organização Mundial de Saúde (OMS/WHO) - 2006. Planejamento da Segurança do Saneamento: Manual para o uso e eliminação segura de águas residuais, águas cinzentas e dejetos. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/171753/9789248549243-por.pdf?sequence=5>. Acesso em 12 de jun. 2019.

OPHER, T., FRIEDLER, E. Reducing inventory data requirements for scenario representation in comparative life cycle assessment (LCA), demonstrated on the urban wastewater system. *Urban Water Journal.*, v. 13, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1036084>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1573062X.2015.1036084?journalCode=nurw20>. Acesso em 23 jan 2019.

PAPAZI, A., KOTZABASIS, K. Bioenergetic strategy of microalgae for the biodegradation of phenolic compounds – Exogenously supplied energy and carbon sources adjust the level of biodegradation. *Journal of Biotechnology.*, v. 129, p. 706-716. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2007.02.021>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168165607001551>. Acesso em 24 jan, 2019.

PARK., J. B.K., CRAGGS, R. J., SHILTON, A. N. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology.*, v. 102, p. 35-42., 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.158>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410011636>. Acesso em 24 jan., 2019.

PEREIRA, F. S. G. Viabilidade sustentável de biomassas de *Moringa Oleifera* para produção de biodiesel e briquetes., 142 p. Orientador: Valdinete Lins da Silva e Nelson Medeiros de Lima Filho. Tese (Doutorado em Química) – Departamento de Química Fundamental da Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

PIETERSE, A. J. H., CLOOT, A. Algal cells and coagulation, flocculation and sedimentation processes. *Water Science & Technology.*, v. 36, p. 111-118., 1997. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.1997.0099>. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/36/4/111/6684/Algal-cells-and-coagulation-flocculation-and?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em 23 jan. 2019.

PNAD – Plano Nacional por Amostra de Domicílios. Síntese de indicadores., 2015. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2015/>. Acesso em 11 jan.2019.

PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2010. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pnsb/tabelas>. Acesso em 11 jan. 2019.

POORTVLIET, M. P., SANDERS, L., WEIJMA, J., VRIES, J. R. Acceptance of new sanitation: The role of end-users pro-environmental personal norms and risk and benefit perceptions. *Water Research*, v. 131, p. 90-99, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.032>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135417310278>. Acesso em 16 jan. 2019.

PRINCE, M. L. The Moringa Tree. *Echo Technical Note.*, 12 p., 2002. Disponível em: <http://www.pkdiet.com/pdf/food/drumstick/Moringa1.PDF>. Acesso em 24 jan., 2019.

PULZ, O. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Appl. Microbiol Biotechnol.*, v. 3., p. 287-93., 2001. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11759675>. Acesso em 23 jan. 2019.

PULZ, O., GROSS, W. Valuable products from biotechnology of microalgae. *Appl Microbiol Biotechnol*, v. 65, p. 635-48, 2004. DOI: 10.1007/s00253-004-1647-x. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15300417>. Acesso 28 jan. 2019.

RAVEN, J. A. Primary Production Processes. *Encyclopedia of Ocean Sciences (Second Edition). Ref. Module in Earth Systems and Environmental Sciences.*, p. 585-589, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00202-2>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123744739002022>. Acesso em 21 jan. 2019.

RANGEL, M. S. A. *Moringa Oleifera*: Uma planta de uso múltiplo. Embrapa – CPATC. Circular Técnica n. 9., 42 p. Aracaju, 1999. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/371079/moringa-oleifera-uma-planta-de-uso-multiplo>. Acesso em 23 jan 2019.

RAWAT, I., KUMAR, R., MUTANDA, T., BUX, F. Dual role microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, v. 88, p. 3411-3424, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910004885>. Acesso em: 24 nov. 2018.

REIS, A., LOPES, C. A., MORETTI, C. L., RIBEIRO, C. S. C., CARVALHO, C. M. M., FRANÇA, F. H., BÔAS, G. L. V., HENZ, G. P., SILVA, H. R., BIANCHETTI, L. B., VILELA, N. J., MAKISHIMA, N., FREITAS, R. A., SOUZA, R. B., CARVALHO, S. I. C., BRUNE, S., MAROUELLI, W. A., NASCIMENTO, W. M., PEREIRA, W. MELO, W. F. Como plantar berinjela. EMBRAPA HORTALIÇAS., *Sistemas de Produção*, 3a ed., ISSN 1678-880X. Versão Eletrônica., Brasília – DF. Disponível em: <https://www.embrapa.br/hortalicas/berinjela/diagnose-foliar>. Acesso em: 30 de maio de 2019.

RENAULT, F., SANCEY, B., BADOT, P. –M., CRINI, G. Chitosan for coagulation/flocculation process – Na eco-friendly approach. *European Polymer Journal.*, v. 45, p. 1337-1348, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.12.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014305708007222>. Acesso em 21 jan. 2019.

RIBEIRO, M. R. Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados. Fortaleza, INCTSal., p. 11-19, 2010. Disponível em: <http://www.ppgea.ufc.br/wp-content/uploads/2018/04/manejo-da-salinidade-na-agricultura.pdf>. Acesso em: 14 maio. 2019.

RIBEIRO, R. L. L., MARIANO, A. B., VARGAS, J. V. C. Estimate of production of biodiesel from microalgae in compact tubular photobioreactor. 22nd International Congress of Mechanical Engineering, p.3-7, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/311595263_ESTIMATE_OF_PRODUCTION_OF_BIODIESEL_FROM_MICROALGAE_IN_COMPACT_TUBULAR_PHOTOBIOREACTOR. Acesso em: 05 set. 2019.

RIZWAN, M., MUJTABA, G., MEMON, S. A., LEE, K., RASHID, N. Exploring the potencial of microalgae for new biotechnology applications and beyond: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews., v. 92, pp. 394-404., 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.034>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118302557>. Acesso em: 21 jan 2019.

RÔLA, A. K. K., CASTRO, G. M., SANTANA, H. F., J. J. L. L. de SOUZA., SILVA, D. J. Avaliação da eficiência de coagulantes comerciais para aplicação em sistemas de tratamento de água. Journal of Chemical Engineering and Chemistry., v. 2, n.3., p. 014-033. DOI: 10.18540/2446941602032016014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/309756478>. Acesso em : 14 maio. 2019.

ROSELET, F.; VANDAMME, D.; ROSELET, M.; MUYLAERT, K.; ABREU, P.C. Screening of comercial natural and synthetic cationic polymers for flocculation of freshwater and marine microalgae and effects of molecular weight and charge density. Algae Research. v.10, p.183-188., 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.05.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926415001289>. Acesso em: 21 jan. 2019.

RUIZ, A. M., GARCIA, N. M., ROMERO, I., SECO, A., FERRER, J. Microalgae cultivation in wastewater: Nutrient removal from anaerobic membrane bioreactor effluente. Bioresource Technology., v. 126, p. 247-253., 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.022>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412013594>. Acesso em 23 jan 2019.

SAGOLT, M., FOLCH, M. Wastewater treatment and water reuse. Environmental Science & Health., v. 2, p. 64-74., 2018. DOI: 10.1016/j.coesh.2018.03.005. Disponível em: <http://sci-hub.tw/https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468584417300314>. Acesso em: 14 maio. 2019.

SÃO PAULO. Resolução conjunta SES/SMA/SSRH N° 01 de 28 de junho de 2017., que dispõe sobre o reuso direto não potável de água, para fins urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário e dá providências correlatas. Estado de São Paulo., 2017.

SCHWEDE, S., KOWALCZYK, A., GERBER, M., SPAN, R. Anaerobic co-digestion of the marine microalga *Nannochloropsis salina* with energy crops. Bioresource Technology, v.

148, p. 428-435, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.157>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413014156>. Acesso em 21 jan. 2019.

SECO, A.; HERMANN, L.; KABBE, C. Green and circular economy. SOS fosforo: Quale futuro sostenibile. Disponível em: <https://www.ecomondo.com/eventi/programma/seminari-e-convegni/e8587300/european-nutrient-event-towards-circular-economy-of-phosphorus.html>. Acesso em: 17 out. 2018.

SELESU, N. F. H. Desenvolvimento do processo de produção de microalgas em fotobiorreator industrial usando efluente suíno biodigerido. Dissertação (em Ciências dos Materiais) – PIPE. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015. Orientador: Prof. Dr. José Virato Coelho Vargas. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/38149/R%20-%20D%20-%20NELSON%20FERNANDO%20HERCULANO%20SELESU.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 17 jun. 2019.

SILVA, A. P. F. S. Eletroflotação não-convencional aplicada à separação e ruptura celular de microalgas: um avanço na viabilidade da geração de biodiesel., 2013. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Disponível em: http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFC-7_55150877027412a63b21383ed7e75161. Acesso em: 21 de ago., 2019.

SILVA, J. B. C., GIORDANO, L. B., FURUMOTO, O., BOITEUX, L. S., FRANÇA, F. H., BÔAS, G. L. V., BRANCO, M. C., MEDEIROS, M. A., MAROUELLI, W., SILVA, W. L. C., LOPES, C. A., ÁVILA, A. C., NASCIMENTO, W. M., PEREIRA, W. Cultivo de tomate para industrialização. EMBRAPA HORTLIÇAS., Sistemas de Produção, 2a. ed., dez., 2018. Disponível em: https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Tomate/TomateIndustrial_2ed/adubacao.htm. Acesso em: 30 maio de 2019.

SINGH, G.; PATIDAR, S. K. Microalgae harvesting techniques: A review. Journal of Environmental Management. v. 217. p. 499-508, 2018. DOI: [doi: 10.1016/j.jenvman.2018.04.010](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.010). Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29631239>. Acesso em: 17 out. 2018.

SHRESTHA, K. M., HILDEBRAND, M. Development of flow cytometric procedures for the efficient isolation of improved lipid accumulation mutants in a *Chlorella* sp. microalga. Journal of Applied Phycology., v. 25, pp 1643-1651, 2013. DOI: [10.1007/s10811-013-0021-8](https://doi.org/10.1007/s10811-013-0021-8). Disponível em : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3825614/>. Acesso em 21 jan 2019.

SLOMPO, N. D. M. Monitoramento e avaliação de sistema de tratamento para águas negras composto por Reator UASB, Fotobiorreator, Flotação e processos de desinfecção. Orientador: Luiz Antônio Daniel. 2018. 317 f. Tese (Doutorado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, São Paulo, 2018.

SOUSA, A. F. S. Diretrizes para implantação de sistemas de reuso em condomínios residenciais baseados no método APPCC – análise de perigos e pontos críticos de controle: estudo de caso Residencial Valville I. Orientador: Dr. José Carlos Mierzwa. Dissertação (mestrado em saneamento ambiental) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2008.

SOUSA, J. T., HAANDEL, A. C. V., CAVALCANTI, P. F. F., FIGUEREDO, A. M. F. Tratamento de esgoto para uso na agricultura do semi-árido nordestino. *Engenharia Sanitária e Ambiental.*, v. 10, n. 3, p. 260-265., 2005.

SOUZA, M. H. B., CALIJURI, M. L., ASSEMANY, P. P., JACKELINE, S. C., OLIVEIRA, A. C. M. Soil application of microalgae for nitrogen recovery: A life-cycle approach. *Journal of Cleaner Production.*, v. 211, p – 342-349., 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.097>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618335017>. Acesso em jan 21. 2019.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto. <<http://www.snis.gov.br/component/content/article?id=175>>. Acesso em: 13 set. 2018.

SUBTIL, E. L., SANCHEZ, A. A., CAVALHERO, A. Sistemas descentralizados de tratamento de esgoto e reuso de água. *Ciência e Tecnologia Ambiental.* p. 201-220., 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Eduardo_Subtil/publication/309429650_Sistemas_descentralizados_de_tratamento_de_esgoto_e_reuso_de_agua/links/5970ed1d4585153016391d10/Sistemas-descentralizados-de-tratamento-de-esgoto-e-reuso-de-agua.pdf. Acesso em: 16 jan. 2019.

TANAC. Tratamento de água. Catálogo, 2013. Disponível em: <http://www.tanac.com.br/pt-br/produtos/aguas>. Acesso em: 16 jan. 2019.

TEIXEIRA, C. M. L. L.; KIRSTEN, F. V; TEIXEIRA, P. C. N; Evaluation of *Moringa Oleifera* seed flour a flocculating agent for potential biodiesel producer microalgae. v. 24, p. 557-563, jun. 2012. DOI: 10.1007/s10811-011-9773-1. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257576978_Evaluation_of_Moringa_oleifera_seed_flour_as_a_flocculating_agent_for_potential_biodiesel_producer_microalgae. Acesso em: 17 out. 2018.

TEIXEIRA, C. M. L. L., TEIXEIRA, P. C. N. Evaluation of the flocculation efficiency of *Chlorella vulgaris* mediated by *Moringa Oleifera* seed under diferente forms: flour, seed cake and extracts of flour and cake. *Brazilian Journal of Chemical Engineering.*, v. 34, n.01., p. 65-74, 2017. DOI: [dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20170341s20150470](https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170341s20150470). Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-66322017000100065. Acesso em: 14 maio. 2019.

TOMASELLI, L., LAMENTI, G., BOSCO, M., TIANO, P. Biodiversity of photosynthetic micro-organisms dwelling on stone monuments. *International Biodeterioration &*

Biodegradation, v. 46, p. 251-258., 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(00\)00078-0](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00078-0). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830500000780>. Acesso em 21 jan. 2019.

TRANI, P. E., PURQUÉRIO, L. F. V., FIGUEIREDO, G. J. B., TIVELLI, S. W., BLAT, S. F. Calagem e adubação da alface, almeirão, agrião d'água, chicória, coentro, espinafre e rúcula. Instituto Agrônômico., Campinas, SP, 2014. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/ruralpecuariapecuaria/calagem-e-adubao-da-alface-almeiro-agriogua-chicria-coentro-espinafre-e-rcula>. Acesso em: 30 de maio de 2019.

UDOM, I.; ZARIBAF, B. H.; HALFHIDE, T. Harvesting microalgae grown on wastewater. Bioresource Technology, v. 139, p. 101-106, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413006068>. Acesso em: 17 out. 2018.

UDUMAN, N.; QI, Y.; DANQUAH, M.K.; FORDE, G.M.; HOADLEY, A. Dewatering of microalgal cultures: A major bottleneck to algae-based fuels. Journal of Renewable and Sustainable Energy. v. 2, p.1-15., 2009. DOI: 10.1063/1.3294480. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/245308669_Dewatering_of_microalgal_cultures_A_major_bottleneck_to_algae-based_fuels. Acesso em 21 jan. 2019.

UGWU CU, AOYAGI H, UCHIYAMA H. Influence of irradiance, dissolved oxygen concentration, and temperature on the growth of *Chlorella sorokiniana*. Photosynthetica; v. 45, p.309–311, 2007. DOI: 10.1007/s11099-007-0052-y. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Influence-of-irradiance%2C-dissolved-oxygen-and-on-of-Ugwu-Aoyagi/917b263fb73a8259962e30be5e46d4d6536f2a16>. Acesso em 23 jan. 2019.

USEPA. United States – Environmental Protection Agency. Guidelines for water reuse. EPA / 600 / R-12/618., 2012.

VALVERDE, K. C. Avaliação do processo de tratamento de água utilizando a associação do coagulante natural *Moringa Oleifera* Lam e coagulantes químicos. Orientadora: Rosângela Bergamasco. 2014. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá. Maringá- PR, 2014.

VANDAMME, D., FOUBERT, I., MEESCHAERT, B., MUYLAERT, K. Flocculation of microalgae using cationic starch. Journal Appl. Phycol., v. 22., p 525-530., 2011. DOI 10.1007/S10811-009-9488-8. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-009-9488-8>. Acesso em 19 jan. 2019.

VANDAMME, D., FOUBERT, I., MUYLAERT, K. Flocculation as a low-cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production. Trends in Biotechnology., v. 31, n. 4., p. 233-239, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.12.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167779912002247>. Acesso em 19 jan. 2019.

VANDAMME, D., PONTES, S. C. V., GOIRIS, K., FOUBERT, I. Evaluation of electrocoagulation-flocculation for harvesting marine and freshwater microalgae. *Biotechnology and Bioengineering*. v. 108, 2011. DOI: 10.1002/bit.23199. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21557200>. Acesso em: 17 out. 2018.

VANEECKHAUTE, C., STYLES, D., PRADE, T., ADAMS, P., GUNNAR, T., RODHE, L., GUNNARSSON, I., HERTEFELDT, T. D. Closing nutrient loops through decentralized anaerobic digestion of organic residues in agricultural regions: A multi-dimensional sustainability assessment. *Resources Conservation and Recycling*. v. 136, p. 110-117, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.03.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344918301289>. Acesso em: 21 jan. 2019.

VOORTHUIZEN, V. E., ZWIJNENBURG, A., MEER, W. G. J. V., TEMMINK, H. Biological black water treatment combined with membrane separation. *Water research*, v. 42, p. 4334-4340, 2008. DOI: 10.1016/j.watres.2008.06.012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/23240223_Biological_black_water_treatment_combined_with_membrane_separation. Acesso em 19 jan. 2019.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução á qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. 3 ed., v. 1., Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

WAN, C.; ALAM, A.; ZHAO, X.; ZHANG, X.; GUO, S.; HO, S.; CHANG, J.; BAI, F. Current progress and future prospect of microalgal biomass harvest using various flocculation technologies. *Bioresource Technology*. v.184, p.251- 25, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.081>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852414016939>. Acesso em 21 jan. 2019.

WANG, X., ZHAO, Y., JIANG, X., WANG, Y., LI, H., LI WANG., LIANG, W. The growth and physiological activity of *Microcystis aeruginosa* after flocculation using modified tannin. *International Biodeterioration & Biodegradation*., v. 133, p. 180-186, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.07.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830518304475>. Acesso em: 17 out. 2018.

WENDLAND, C., DEGENER, S., BEHRENDT, J., TOSHEV, P., OTTERPOHL, R. Anaerobic digestion of blackwater from vacuum toilets and kitchen refuse in a continuous stirred tank reactor (CSTR). *Water Sci. Technol* v. 55, p. 187-194, 2007. Disponível: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17506437>.

WHUANG, S. C., KHIN, M. C., CHUA, P. Q. D., LUO, Y. D. Use of *Spirulina* biomass produced from treatment of aquaculture wastewater as agricultural fertilizers. *Algal Research*., v. 15, p. 59-64., 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.02.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926416300480>. Acesso em 13 maio. 2019.

WHO – World Health Organization. Reuse of effluents: methods of wastewater treatment and health safeguards. Reporto f a WHO - Meeting of Experts. Geneva, World Health Organization., n. 517, 1973.

WITHERS, P. J.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R.; BENITES, V. D. M.; GATIBONI, L. C.; SOUZA, D. M. G.; NUNES, R. N.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. *Scientific reports*, v. 8, p. 2537, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20887-z>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-20887-z>. Acesso em: 17 out. 2018.

WUANG, S. C., KHIN, M. C., CHUA, P. Q. D; LUO, Y. D. Use of *Spirulina* biomass produced from treatment of aquaculture wastewater as agricultural fertilizers. *Algal Research.*, v. 15, p. 59-64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.02.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926416300480>. Acesso em 14 maio. 2019.

WWF-BRASIL. Desenvolvimento Sustentável., 2018. Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/desenvolvimento_sustentavel/. Acesso em 11 jan. 2019.

WYATT, N. B., GLOE, L. M., BRADY, P. V., HEWSON, J. C., GRILLET, A. M., HANKINS, M. G., POHL, P. I. Critical conditions for ferric chloride-induced flocculation of freshwater algae. *Biotechnology and Bioengineering.*, v. 109, n. 02, 2012. DOI: 10.1002/bit.23319. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21882173>. Acesso em 21 jan. 2019.

YANG YIN, C. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry.* V. 45. p. 1437-1444., 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.05.030>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359511310002114>. Acesso em: 17 out. 2018.

XU, Y., PURTON, S., BAGANZ, F. Chitosan flocculation to aid the harvesting of the microalga *Chlorella sorokiniana*. *Bioresource Tchnology*, v. 129, p. 296-301., 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.068>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412017609>. Acesso em: 17 out. 2018.

ZAMALLOA, C., VULSTEKE, E., ALBRECHT, J., VERSTRAETE, W. The Techno-economic potential of renewable energy through the anaerobic digestion of microalgae., v. 102, p. 1149-1158, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410015294>. Acesso em 21 jan, 2019.

ZHOU, K., BARJENBRUCH, M., KABBE, C., INIAL, G., REMY, C. Phosphorus recovery from municipal and fertilizer wastewater: China's potential and perspective. *Journal of Environmental Sciences.*, v. 764, p.10, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.04.010>.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100107421630119X>. Acesso em: 17 out. 2018.

ZHU, X., ZHU, Z., LEI, X., YAN, C. Defects in structure as the sources of the surface charges of kaolinite. *Applied Clay Science.*, v. 124-125., p. 127 -136., 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.033>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131716300345>. Acesso em 18 jan. 2018.

APÊNDICE A: ETAPA 1: REGRESSÃO LINEAR

O atual planejamento experimental foi desenvolvido com finalidade de aperfeiçoar os ensaios realizados no laboratório, assim como reduzir tempo e reagente gasto nessa etapa do estudo, por meio de modelos matemáticos. Segundo Von Sperling, (2005) a análise com variáveis quantitativas e qualitativas atribuem ao conceito da teoria da probabilidade. Para tal, é necessário realizar análise correspondente a cada problema, é o caso da análise de regressão, ferramenta utilizada com finalidade de estimar o valor médio de uma variável resposta y (variável dependente), conforme avaliação das variáveis explicativas (independente) $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, sendo necessário portanto estudar o conjunto de duas variáveis aleatórias.

Neste estudo foi considerada a regressão linear com a intenção de estimar o valor médio de uma variável resposta (y) e da superfície de resposta de 2ª ordem (diagramas de coagulação) apresentado na Etapa 1. O método dos mínimos quadrados foi empregado exclusivamente para o ajuste da curva (VON SPERLING, 2005). Nessa pesquisa após ensaios primilinares de diversos modelos matemáticos aplicados as análises de coagulação/floculação e sedimentação, em escala de bancada, o modelo de regressão linear sem termos cruzados analisados por faixa de pH apresentou ser o melhor modelo matemático, devido ao menor erro e a confiabilidade das análises estatísticas realizadas.

O planejamento factorial consistiu em um total de 245 observações. O objetivo principal desse tipo de análise foi observar a relação existente entre a variável resposta (y) representada pela eficiência na remoção da turbidez, em função do pH, dosagem do coagulante (C_0) e tempo de sedimentação (t_s), sendo as variáveis explicativas. O modelo linear é dado pela seguinte equação:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1 x_2 + \beta_5 x_1 x_3 + \beta_6 x_2 x_3 + \beta_7 x_1^2 + \beta_8 x_2^2 + \beta_9 x_3^2 + \beta_{10} x_1^2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 x_3 + \beta_{12} x_2^2 x_3 + \beta_{13} x_1 x_2^2 + \beta_{14} x_1 x_3^2 + \beta_{15} x_2 x_3^2 + \beta_{16} x_1^2 x_2^2 + \beta_{17} x_1^2 x_3^2 + \beta_{18} x_2^2 x_3^2 + \epsilon \quad (1)$$

- X_1 : potencial hidrogeniônico (pH)
- X_2 : dosagem do coagulante de MOL (C_0) medido em (mg.L^{-1});
- X_3 : tempo de sedimentação (t) medido em (min)
- Y : eficiência de remoção da turbidez
- erro = valor observado – valor estimado (componente aleatório / resíduo)

Na Tabela 9 está apresentada o modelo de regressão por faixa de pH estudada na Etapa 1 da pesquisa.

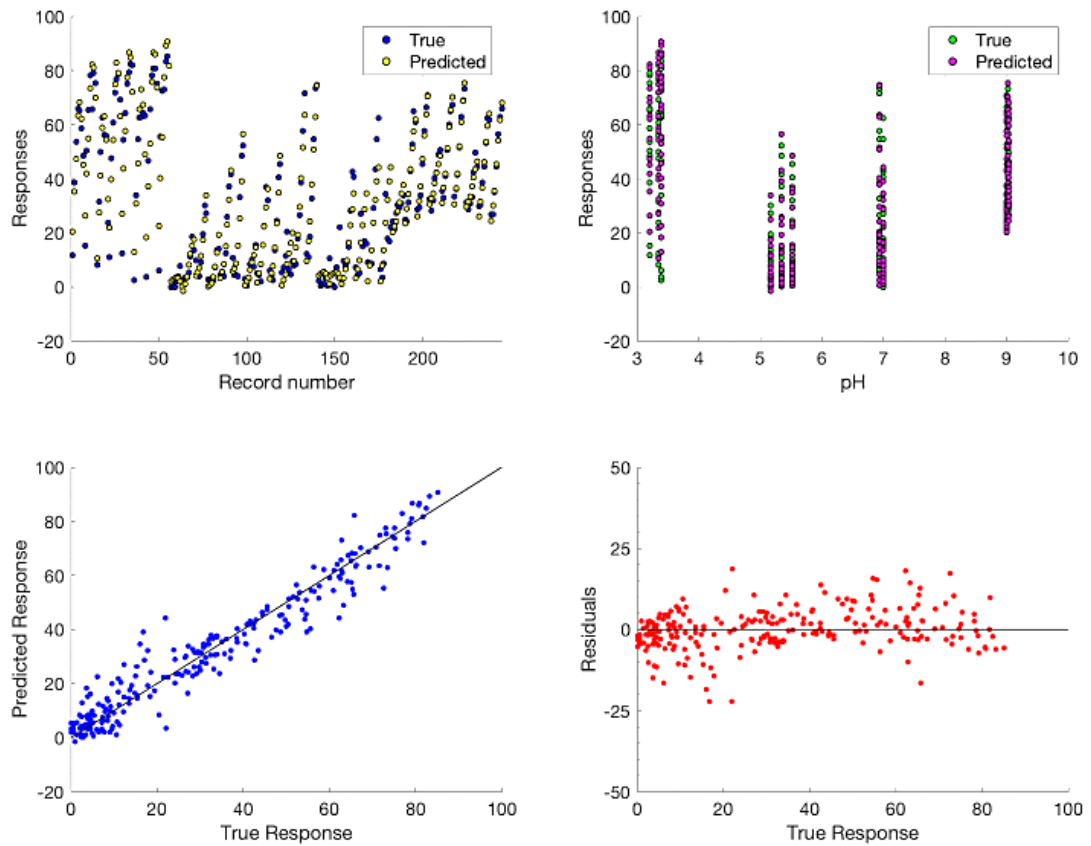
Tabela 9: Modelo de regressão por faixa de pH estudado.

pH	$3,20 \leq \text{pH} \leq 3,39$	$5,17 \leq \text{pH} \leq 5,52$	$6,93 \leq \text{pH} \leq 7,00$	$9,00 \leq \text{pH} \leq 9,03$
RMSE	8.27406	3.8172	8.5802	2.6761
R²	0.87807	0.9206	0.8063	0.9659
R²_{adj}	0.8710	0.9166	0.7964	0.9643
μ_{Bias}	0.9660	1.5496	1.4018	1.0016
CV_{Bias}	27.011923%	161.6030%	123.5355%	7.6689%
B	6964.5138 -4235.5187 0.369151 1.8178 642.3600 -0.000575 -0.0191111	-4304.6144 1587.9035 0.0317 0.9346 -146.9334 0.000048 -0.006965	0.0000 164.6854 0.077723 1.987657 -24.3082 -0.00032 -0.019554	-2294524.7959 508939.3096 0.091936 1.771454 -28221.4286 -0.000050 -0.022319

RMSE: raiz do erro médio quadrático (Root mean square error) – medida de erro mais comumente usada para aferir a qualidade do ajuste de um modelo. / R²: coeficiente de correlação / R²_{adj}: coeficiente ajustado / μ_{Bias} : coeficiente Bias / CV_{Bias}: coeficiente de variação Bias.

De maneira geral, o modelo de regressão linear sem termos cruzados apresentou a melhor correlação entre as variáveis estudadas. Na Figura 28 estão apresentados o modelo de regressão obtido após a análise dos dados da Etapa 1.

Figura 28: Modelo de Regressão 1



Na Figura 28 foi possível observar que as variáveis apresentam uma relação linear positiva, sendo que a melhor correlação entre os dados independentes foram observados na faixa de pH 9, onde o coeficiente de correlação foi de 96%. E tal relação também foi observado pelo coeficiente de variação Bias (CV_{Bias}), que apresentaram a diferença entre o valor padrão e a média observada, sendo uma medida de precisão. Os valores de pH avaliados separadamente apresentou uma análise mais precisa, do que a avaliação de todos os valores simultaneamente. Pode-se observar que os valores de turbidez obtidos na faixa de pH 7 e 9 apresentaram maior precisão dos resultados.

Nota-se que após análise estatística quanto maior for a concentração do coagulante e tempo de sedimentação, maior será a eficiência de remoção da turbidez. No modelo proposto ainda pode-se observar a interferência significativa pela diferença do pH do meio, apontando melhor linearidade nas análises realizadas em pH neutro (7) e básico (9), e melhor eficiência de remoção da turbidez para valores em pH ácido (3).

Neste caso, a equação pode apresentar valores próximos do valor real. Nota-se que conforme os resultados apresentados na Etapa 1 por meio da análise dos diagramas de coagulação, a melhor eficiência obtida na separação das microalgas encontram-se em pH (3) ácido, seguido pelo básico pH(9) e neutro pH (7). Como a maior parte das análises foram realizadas em pH neutro, para obtenção da biomassa de microalgas a ser avaliada como fertilizante orgânico, entende-se que os valores estimados também ficaram próximos aos valores verdadeiros. De forma geral, o uso desse modelo matemático apresenta ser adequado para sua aplicação no planejamento de novos experimentos, assim como na diminuição do número de ensaios a serem realizados em laboratório.

APÊNDICE B –ETAPA 1: TESTE *t* de Student

Nas Tabelas 10 e 11 estão apresentadas análises estatísticas realizadas entre as médias do efluente bruto, efluente branco e o efluente em que recebeu as diferentes dosagens do coagulante, e 35 e 45 minutos de sedimentação.

Tabela 10: Análise de comparação de médias (*t-Student*), para as médias das eficiências obtidas em 35 minutos.

Resultados (1)	BR_BC	BR_D425	BR_D450	BR_D475	BR_D500	BR_D525	BR_D550
Temperatura amostra (°C)	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL
pH	DIFERENTE	DIFERENTE	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE
Turbidez (UNT)	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
Densidade óptica 540 nm	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
Densidade óptica 682 nm	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
Densidade óptica 750 nm	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
DQO bruta	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	IGUAL
DQO filtrada	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL
Resultados (2)	BC_D425	BC_D450	BC_D475	BC_D500	BC_D525	BC_D550	
Temperatura amostra (°C)	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	
pH	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	
Turbidez (UNT)	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	
Densidade óptica 540 nm	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	
Densidade óptica 682 nm	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	
Densidade óptica 750 nm	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	
DQO bruta	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	
DQO filtrada	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	

BR- Bruto; BC – Branco; D425- dosagem de 425 mg.L⁻¹, D450 – dosagem de 450 mg.L⁻¹, D475 – dosagem de 475 mg.L⁻¹, D500 – dosagem de 500 mg.L⁻¹, D525 – dosagem de 525 mg.L⁻¹, D550 – dosagem de 550 mg.L⁻¹. *Apresentação de 50% dos dados analisados, conforme a comparação entre as médias das dosagens das sementes de MOL, aplicadas em diferentes concentrações.

IGUAL

$g\bar{L} = t$ calculado

DIFERENTE

$g\bar{L} \leq t$ calculado

Tabela 11: Análise de comparação de médias (*t-Student*), para as médias das eficiências obtidas em 45 minutos.

Resultados (1)	BR_BC	BR_D425	BR_D450	BR_D475	BR_D500	BR_D525	BR_D550
Temperatura amostra (°C)	DIFERENTE	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL
pH	DIFERENTE	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	DIFERENTE
Turbidez (UNT)	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
Densidade óptica 540 nm	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
Densidade óptica 682 nm	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
Densidade óptica 750 nm	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
DQO bruta	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE
DQO filtrada	IGUAL	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	IGUAL	IGUAL
Resultados (2)	BC_D425	BC_D450	BC_D475	BC_D500	BC_D525	BC_D550	
Temperatura amostra (°C)	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	
pH	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	IGUAL	
Turbidez (UNT)	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	
Densidade óptica 540 nm	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	
Densidade óptica 682 nm	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	
Densidade óptica 750 nm	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	
DQO bruta	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	
DQO filtrada	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	DIFERENTE	

BR- Bruto; BC – Branco; D425- dosagem de 425 mg.L⁻¹, D450 – dosagem de 450 mg.L⁻¹, D475 – dosagem de 475 mg.L⁻¹, D500 – dosagem de 500 mg.L⁻¹, D525 – dosagem de 525 mg.L⁻¹, D550 – dosagem de 550 mg.L⁻¹. *Apresentação de 50% dos dados analisados, conforme a comparação entre as médias das dosagens das sementes de MOL, aplicadas em diferentes concentrações.

IGUAL

$gL = t$ calculado

DIFERENTE

$gL < t$ calculado

APÊNDICE C: ETAPA 1: EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE (TURBIDEZ E DENSIDADE ÓPTICA)

Nas Tabelas 12, 13, 14 e 15 estão apresentados os melhores resultados da Etapa 2 (Diagramas de coagulação).

Tabela 12: Resultados de avaliação do pH (3), dosagens de 400 e 500 mg.L⁻¹ e 40 minutos de sedimentação.

Parâmetros	Afluente (C/F e S)	Efluente (C/F e S)	Dosagem de MOL (mg.L ⁻¹)	pH	TS (min)	Eficiência (%)
Turbidez (UNT)	214 ± 1	22 ± 5	400	3	40	85
DO 540 nm	2,76 ± 2	0,62 ± 0,1	400			78
DO 682 nm	3,20 ± 1	0,68 ± 0,1	400			79
DO 750 nm	2,33 ± 1	0,53 ± 0,1	400			77
Turbidez (UNT)	214 ± 1	37 ± 2	500	3	40	83
DO 540 nm	2,76 ± 2	0,62 ± 0,1	500			78
DO 682 nm	3,20 ± 1	0,83 ± 0,1	500			74
DO 750 nm	2,33 ± 1	0,52 ± 0,1	500			78

Tabela 13: Resultados de avaliação do pH (5), dosagens de 400 e 500 mg.L⁻¹ e 40 minutos de sedimentação.

Parâmetros	Afluente (C/F/S)	Efluente (C/F/S)	Dosagem de MOL (mg.L ⁻¹)	pH	TS (min)	Eficiência (%)
Turbidez (UNT)	214 ± 1	188 ± 26	400	5	40	45
DO 540 nm	2,76 ± 2	2,36 ± 0,1	400			15
DO 682 nm	3,20 ± 1	2,53 ± 0,1	400			21
DO 750 nm	2,33 ± 1	1,91 ± 0,1	400			18
Turbidez (UNT)	214 ± 1	114 ± 33	500	5	40	46
DO 540 nm	2,76 ± 2	2,54 ± 0,1	500			8
DO 682 nm	3,20 ± 1	2,80 ± 0,1	500			13
DO 750 nm	2,33 ± 1	2,27 ± 0,1	500			2

Tabela 14: Resultados de avaliação do pH (7), dosagens de 400 e 500 mg.L⁻¹ e 40 minutos de sedimentação.

Parâmetros	Afluente (C/F e S)	Efluente (C/F e S)	Dosagem de MOL (mg.L ⁻¹)	pH	TS (min)	Eficiência (%)
Turbidez (UNT)	214 ± 1	110 ± 50	400	7	40	48
DO 540 nm	2,76 ± 2	1,93 ± 0,1	400			30
DO 682 nm	3,20 ± 1	2,30 ± 0,1	400			28
DO 750 nm	2,33 ± 1	1,59 ± 0,1	400			31
Turbidez (UNT)	214 ± 1	56 ± 23	500	7	40	74
DO 540 nm	2,76 ± 2	1,85 ± 0,1	500			33
DO 682 nm	3,20 ± 1	2,07 ± 0,1	500			35
DO 750 nm	2,33 ± 1	1,59 ± 0,1	500			31

Tabela 15: Resultados de avaliação do pH (9), dosagens de 400 e 500 mg.L⁻¹ e 40 minutos de sedimentação.

Parâmetros	Afluente (C/F/S)	Efluente (C/F/S)	Dosagem de MOL (mg.L ⁻¹)	pH	TS (min)	Eficiência (%)
Turbidez (UNT)	214 ± 1	69 ± 8	400	9	40	68
DO 540 nm	2,76 ± 2	1,57 ± 0,1	400			48
DO 682 nm	3,20 ± 1	1,41 ± 0,1	400			56
DO 750 nm	2,33 ± 1	1,28 ± 0,1	400			45
Turbidez (UNT)	214 ± 1	43 ± 8	500	9	40	80
DO 540 nm	2,76 ± 2	1,74 ± 0,1	500			37
DO 682 nm	3,20 ± 1	1,52 ± 0,1	500			52
DO 750 nm	2,33 ± 1	1,14 ± 0,1	500			51

APÊNDICE D – ETAPA 2: EFICIÊNCIA APLICANDO 425, 475 E 550 mg.L⁻¹

Nas Tabelas 16, 17 e 18 estão apresentados os melhores resultados da Etapa 2.

Tabela 16: Resultados de avaliação do pH (9), dosagens de 425 mg.L⁻¹ e 45 minutos de sedimentação.

Parâmetros (425 mg.L⁻¹ / 45 min)	Afluente (C/F e S)	Efluente (C/F e S)	Eficiência (%)
Turbidez (UNT)	168 ± 1	21 ± 11	88
Cor verdadeira (uC)	298 ± 1	192 ± 5	36
DO 540 nm	2,6 ± 1	0,48 ± 0,1	82
DO 682 nm	3,2 ± 1	0,52 ± 0,1	84
DO 750 nm	2,2 ± 1	0,42 ± 0,1	81
DQO bruta (mg.L ⁻¹)	823 ± 52	438 ± 52	47
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	166 ± 1	125 ± 7	25
NTK (mg.L ⁻¹)	26 ± 1	18 ± 5	31
N-amoniaco (mg.L ⁻¹)	15 ± 2	14 ± 1	8
Nitrito (mg.L ⁻¹)	14 ± 1	3 ± 2	79
FT (mg.L ⁻¹)	55 ± 14	32 ± 6	42
SST (mg.L ⁻¹)	367 ± 39	180 ± 80	51

Tabela 17: Resultados da avaliação do pH (7), dosagens de 475 mg.L⁻¹ e 45 minutos de sedimentação.

Parâmetros (475 mg.L⁻¹ / 45 min)	Afluente (C/F e S)	Efluente (C/F e S)	Eficiência (%)
Turbidez (UNT)	168 ± 1	16 ± 8	91
Cor verdadeira (uC)	298 ± 1	185 ± 6	38
DO 540 nm	2,6 ± 1	0,35 ± 0,1	87
DO 682 nm	3,2 ± 1	0,35 ± 0,1	89
DO 750 nm	2,2 ± 1	0,30 ± 0,1	86
DQO bruta (mg.L ⁻¹)	823 ± 52	374 ± 77	55
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	166 ± 1	134 ± 6	19
NTK (mg.L ⁻¹)	26 ± 1	11 ± 3	58
N-amoniaco (mg.L ⁻¹)	15 ± 2	13 ± 1	11
Nitrito (mg.L ⁻¹)	14 ± 1	3 ± 1	79
FT (mg.L ⁻¹)	55 ± 14	26 ± 8	53
SST (mg.L ⁻¹)	367 ± 39	147 ± 25	60

Tabela 18: Resultados da avaliação do pH (7), dosagens de 550 mg.L⁻¹ e 45 minutos de sedimentação.

Parâmetros (550 mg.L⁻¹ / 45 min)	Afluente (C/F e S)	Efluente (C/F e S)	Eficiência (%)
Turbidez (UNT)	168 ± 1	13 ± 4	92
Cor verdadeira (uC)	298 ± 1	176 ± 6	41
DO 540 nm	2,6 ± 1	0,22 ± 0,1	92
DO 682 nm	3,2 ± 1	0,24 ± 0,1	93
DO 750 nm	2,2 ± 1	0,21 ± 0,1	90
DQO bruta (mg.L ⁻¹)	823 ± 52	388 ± 59	53
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	166 ± 1	128 ± 14	23
NTK (mg.L ⁻¹)	26 ± 1	11 ± 4	56
N-amoniaco (mg.L ⁻¹)	15 ± 2	13 ± 1	13
Nitrito (mg.L ⁻¹)	14 ± 1	4 ± 2	71
FT (mg.L ⁻¹)	55 ± 14	25 ± 8	55
SST (mg.L ⁻¹)	367 ± 39	166 ± 16	55

APÊNDICE E – ETAPA 3: DOSAGEM ÓTIMA E TEMPO DE SEDIMENTAÇÃO

Na Tabela 19 estão apresentados as eficiências obtidas se aplicar a dosagem ótima de 475 mg.L⁻¹ e 45 minutos de sedimentação.

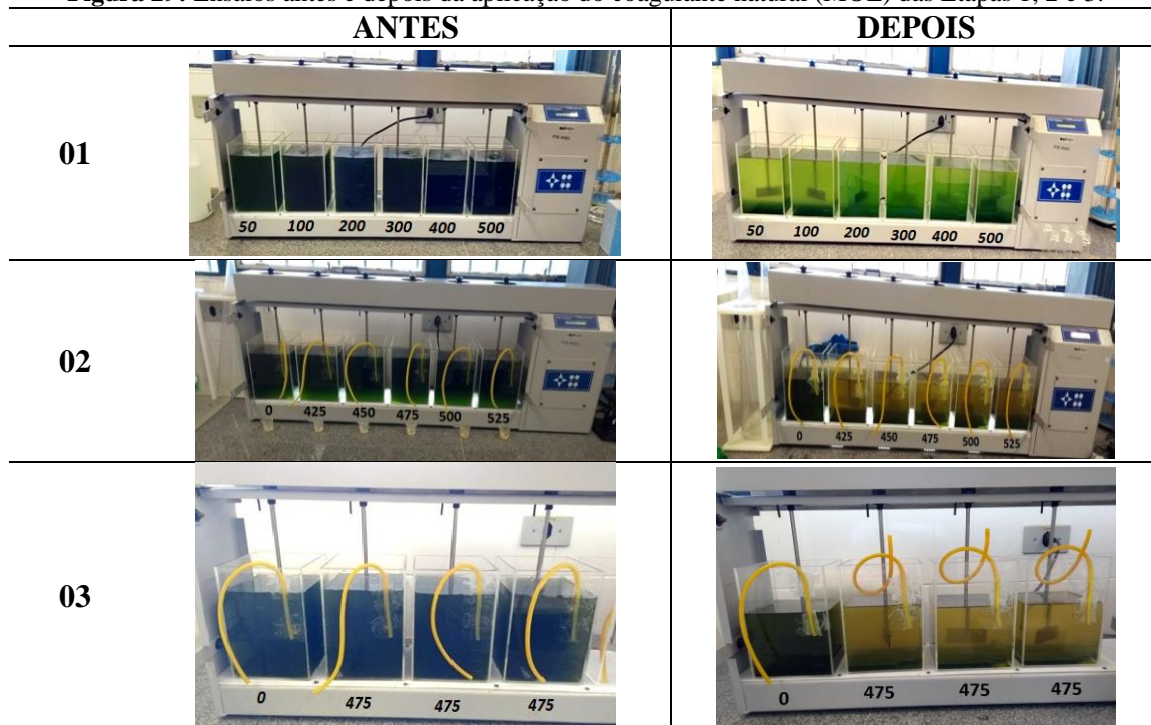
Tabela 19: Resultados da avaliação do pH (7), dosagens de 475 mg.L⁻¹ e 45 minutos de sedimentação.

Parâmetros (475 mg.L⁻¹ / 45 min)	Afluente (C/F e S)	Efluente (C/F e S)	Eficiência (%)
Turbidez (UNT)	130 ± 3	12 ± 11	91
Cor verdadeira (uC)	230 ± 2	136 ± 1	41
DO 540 nm	2,2 ± 1	0,19 ± 0,1	91
DO 682 nm	2,6 ± 1	0,17 ± 0,1	93
DO 750 nm	1,8 ± 1	0,15 ± 0,1	91
DQO bruta (mg.L ⁻¹)	750 ± 20	430 ± 48	43
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	175 ± 16	112 ± 11	36
NTK (mg.L ⁻¹)	25 ± 2	16 ± 1	37
N-amoniaco (mg.L ⁻¹)	20 ± 1	15 ± 2	25
FT (mg.L ⁻¹)	38 ± 6	29 ± 3	23
SST (mg.L ⁻¹)	300 ± 14	67 ± 14	78

APÊNDICE F - TESTE DE JARROS

Na Figura 29 estão apresentados os ensaios realizados antes e depois da aplicação das sementes de MOL como coagulante natural a cada etapa do experimento.

Figura 29: Ensaios antes e depois da aplicação do coagulante natural (MOL) das Etapas 1, 2 e 3.



Fonte: Própria autora.

APÊNDICE G – ETAPA 4: BIOMASSA DE MICROALGAS

A secagem foi diretamente influenciada pela eficiência de separação das microalgas nas etapas de coagulação/floculação e sedimentação. Nesse sentido, após ensaios aplicando 475 mg.L^{-1} de coagulante de MOL e 45 minutos de sedimentação, foi obtido remoção de 91% da turbidez, 78% de SST e 43% da $\text{DQO}_{\text{bruta}}$, boa remoção de matéria orgânica e nutrientes. No final do tratamento da ANS, os produtos obtidos (efluente e biomassa) foram avaliados e caracterizados. Na Figura 30 estão apresentadas as etapas de separação das microalgas e a secagem da biomassa algal.

Figura 30: Secagem da biomassa de microalgas



Após as etapas de coagulação/ floculação e sedimentação, foi possível obter aproximadamente 1600 mL de efluente tratado e 400 mL da biomassa algal úmida.

Em seguida foi realizada a secagem de 400 mL da biomassa algal úmida em estufa com temperatura de 60°C e 50% de recirculação de ar, por aproximadamente 48 h.

A secagem foi realizada até obter uma camada fina do composto orgânico no leito, e posteriormente macerado até obter um fino pó.

Na concentração de 475 mg.L^{-1} de coagulante MOL, $\text{pH} = 7$ e 45 minutos de sedimentação ($v_s = 0,17 \text{ cm.min}^{-1}$), foi possível obter cerca de 10 g da biomassa algal seca, avaliada como fertilizante orgânico composto.

Fonte: Própria autora.

