



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PESCA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PESCA**

**EGÍDIA ANDRADE MORAES**

**CULTIVO DA MICROALGA *Chlorella vulgaris* EM EFLUENTE INDUSTRIAL,  
COMO MEIO ALTERNATIVO, PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA VISANDO  
OBTENÇÃO DE ENERGIA VERDE**

**FORTALEZA**

**2023**

EGIDIA ANDRADE MORAES

CULTIVO DA MICROALGA *Chlorella vulgaris* EM EFLUENTE INDUSTRIAL, COMO  
MEIO ALTERNATIVO, PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA VISANDO OBTENÇÃO DE  
ENERGIA VERDE

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao Curso de Graduação em Engenharia de  
Pesca do Centro de Ciências Agrárias da  
Universidade Federal do Ceará, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Pesca.

Orientador: Profa. Dra. Kelma Maria dos  
Santos Pires Cavalcante.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M819c Moraes, Egídia Andrade.  
Cultivo da microalga *Chlorella vulgaris* em efluente industrial, como meio alternativo, para produção de biomassa visando obtenção de energia verde / Egídia Andrade Moraes. – 2023.  
35 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Engenharia de Pesca, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Profa. Dra. Kelma Maria dos Santos Pires Cavalcante.

1. Biomassa. 2. Energia verde. 3. Efluente industrial. I. Título.

CDD 639.2

---

EGIDIA ANDRADE MORAES

CULTIVO DA MICROALGA *Chlorella vulgaris* EM EFLUENTE INDUSTRIAL, COMO MEIO ALTERNATIVO, PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA VISANDO OBTENÇÃO DE ENERGIA VERDE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Pesca do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Pesca.

Aprovada em 06/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Kelma Maria dos Santos Pires Cavalcante (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Suzete Roberta da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me. Kelly Lima de Oliveira  
Rede Nordeste de Biotecnologia (RENORBIO/UECE)

A Deus e ao meu protetor São Miguel.  
A minha mãe.  
A minha avó Egídia.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, ao Arcanjo Miguel e aos espíritos de luz que me guiaram nessa caminhada.

À Profa. Dra. Kelma Maria dos Santos Pires Cavalcante, pela amizade, pelo carinho, pelo exemplo de profissional e pela excelente orientação.

Aos membros participantes da Banca examinadora, Prf<sup>a</sup>. Dra. Suzete Roberta da Silva e Kelly Lima de Oliveira, pelo tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Pesca da Universidade Federal do Ceará, em especial ao saudoso professor Manuel de Andrade Furtado Neto (*in memoriam*), que me fez amar esse curso e ao professor Oscar Pacheco pelo grande exemplo de profissional e por ser uma inspiração como professor.

À professora Mona Lisa da Universidade Estadual do Ceará, pelo apoio financeiro e pela oportunidade de trabalhar com excelentes profissionais.

Ao PET Engenharia de Pesca, pelo crescimento pessoal, profissional e pelos amigos incríveis que eu fiz.

À minha mãe, Esielma Andrade, pelo amor, garra, fé e por ser minha maior apoiadora. Ao meu irmão de quatro patas Francisco de Assis pelo companheirismo.

À minha prima Kamilla Sá, por acreditar em mim e por me acompanhar na minha matrícula.

Aos meus melhores amigos Ana Caroline Reis (Carolzinha) e Rodrigo Gomes (Rô), pela parceria e pelas risadas nos dias difíceis.

Aos meus amigos de trabalho Kelly Lima, José Lucas de Oliveira e Dévany Quintela, por acreditarem no meu potencial e pelo apoio incansável.

Aos meus amigos de vida Wesley Carvalho e Daniel Vasconcelos (020), por sempre me fazerem acreditar que eu seria uma grande profissional.

À grande amiga da minha família Samara Santos e a minha tia Elitânia, por terem acreditado no meu potencial e investido emocionalmente e financeiramente em mim.

À minha querida avó paterna (*in memoriam*), por acreditar que eu teria um futuro brilhante e por sempre ter idealizado o momento mágico da minha formatura.

Aos grandes amigos que fiz ao longo dessa trajetória, Letícia Andrade (Lêê), Dyjhorg Lucas (Dj), Rissette Fernandes (Ri), Iann Gabriel (Iann da Rissette), Amanda Cavalcanti (Amandinha), Herlon Santiago (Herlin), Rildisson Doris (Rildi) e Willame Quaresma (a Will).

“A felicidade pode ser encontrada mesmo nas horas mais difíceis, se você lembrar de acender a luz.” (Alvo Dumbledore).

## RESUMO

A produção de biomassa microalgal tem sido bastante estudada, devido suas aplicações biotecnológicas, principalmente pela sua capacidade de acumular bioprodutos como lipídios, carboidratos, proteínas, pigmentos e outros. A microalga verde *Chlorella vulgaris* pode ser usada principalmente na biorremediação de efluentes e na síntese de compostos de alto valor agregado como, biocombustíveis. Além disso, buscam-se meios de cultura como alternativa aos meios sintéticos que garantam um crescimento similar ou até maior, a fim de minimizar os custos de cultivo. Desse modo, o objetivo deste trabalho é analisar quantitativamente a produção de biomassa final da microalga *Chlorella vulgaris* em meio alternativo, efluente industrial, visando a produção de energia verde. O experimento foi realizado em reatores de polietileno de 20L com volume útil de 10L, com aeração constante e fotoperíodo de 12/12 horas luz, diferindo o meio de cultura utilizado. A configuração experimental consistiu em dois tratamentos (MC e EI) em triplicata, onde MC é o cultivo da microalga em meio padrão controle, f/2 GUILLARD, e EI é o cultivo em meio alternativo, efluente industrial. O crescimento da microalga foi monitorado durante 10 dias por meio de densidade óptica por espectrofotômetro (HACH) e contagem celular em câmara de Neubauer. O tratamento do efluente foi monitorado por meio de sonda multiparâmetros (HANNA). A biomassa foi obtida através de floculação química com NaOH seguido de centrifugação de cada um dos tratamentos (MC e EI). Assim, foram aferidos os pesos e os dados tratados a partir da média das replicatas de cada tratamento, já os outros parâmetros foram à análise de variância (ANOVA) simples ( $p < 0,05$ ). No cultivo padrão (MC) foi possível observar um rendimento de 0,520 g, já no efluente (EI) o rendimento foi de 0,890 g. Ademais, constatou-se a biorremoção em 100% do nitrato, 76,3% da amônia e 7% do fósforo total. Foi possível concluir que, o cultivo da microalga em efluente industrial não afeta negativamente a produção de biomassa da *Chlorella vulgaris*, o que pode ser uma possibilidade para reduzir os custos de produção de energia verde a partir da biomassa de algas, além de apresentar capacidade de redução de compostos nitrogenados no efluente.

**Palavras-chave:** Biomassa; energia verde; efluente industrial.

## ABSTRACT

The production of microalgal biomass has been extensively studied due to its biotechnological applications, mainly due to its ability to accumulate bioproducts such as lipids, carbohydrates, proteins, pigments and others. The biomass of the green microalgae *Chlorella vulgaris* can be used mainly in the bioremediation of effluents and in the synthesis of compounds with high added value, such as biofuels. Furthermore, culture media are sought after as an alternative to synthetic media that guarantee similar or even greater growth in order to minimize cultivation costs. Therefore, the objective of this work is to quantitatively analyze the final biomass production of the microalgae *Chlorella vulgaris* in an alternative medium, industrial effluent, aiming at the production of green energy. The experiment was carried out in 20L polyethylene reactors with a useful volume of 10L, with constant aeration and a 12/12 hour light photoperiod, differing in the cultivation medium used. The experimental setup consisted of two treatments (MC and EI) in triplicate, where MC is the cultivation of microalgae in standard control medium, f/2 GUILLARD, and EI is the cultivation in an alternative medium, industrial effluent. The growth of microalgae was monitored for 10 days using an optical density spectrophotometer (HACH) and cell counting in a Neubauer chamber. Effluent treatment was monitored using a multiparameter probe (HANNA). Biomass was obtained through chemical flocculation with NaOH followed by centrifugation of each of the treatments (MC and EI). Thus, the weights and treated data were measured based on the average of the repetitions of each treatment, while the other parameters were subjected to simple analysis of variance (ANOVA) ( $p < 0.05$ ). In the standard culture (MC) it was possible to observe a yield of 0.520g, while in the alternative medium (EI) the yield was 0.890 g. Furthermore, bioremoval was found in 100% nitrate, 76.3% ammonia and 7% total phosphorus. It was possible to conclude that the cultivation of microalgae in industrial effluents does not negatively affect the production of *Chlorella vulgaris* biomass, which may be a possibility of reducing the costs of producing green energy from algae biomass, in addition to having the capacity to reduce nitrogen compounds in the effluent.

**Keywords:** Biomass; green energy; industrial effluent.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Exemplares da microalga <i>Chlorella vulgaris</i> .....	18
Figura 2	– Crescimento da <i>Chlorella vulgaris</i> no tratamento controle (Mc) .....	25
Figura 3	– Crescimento da <i>Chlorella vulgaris</i> no tratamento efluente industrial (EI) ...	26
Figura 4	– Floculação química (NaOH 0,5 M) do cultivo de <i>Chlorella vulgaris</i> .....	27
Figura 5	– Fluxograma explicativo dos materiais e métodos utilizados no experimento	27
Figura 6	– Acompanhamento diário da absorbância (680 nm) da microalga <i>C. vulgaris</i> cultivada em diferentes meios .....	28
Figura 7	– Acompanhamento diário da densidade celular da microalga <i>C. vulgaris</i> cultivada em diferentes meios .....	29
Figura 8	– Aspecto da biomassa úmida da microalga <i>Chlorella vulgaris</i> cultivada em diferentes meios .....	32
Figura 9	– Peso médio (g peso seco) de biomassa da microalga <i>C. vulgaris</i> cultivada em diferentes meios .....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Características dos tipos de tratamentos de efluentes industriais .....	21
Tabela 2	– Composição do meio de cultura Guillard f/2 modificado .....	24
Tabela 3	– Composição da solução mãe (g L <sup>-1</sup> ) de metais traço do meio de cultura Guillard f/2 modificado .....	25
Tabela 5	– Características físicas e químicas do efluente industrial (EI) .....	30

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	16
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	16
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	16
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
<b>3.1</b>	<b>Microalgas</b> .....	17
<b>3.1.1</b>	<i>Divisão chlorophyta</i> .....	17
<b>3.1.2</b>	<i>Microalga Chlorella vulgaris</i> .....	18
<b>3.1.3</b>	<i>Meios de cultivo</i> .....	19
<b>3.2</b>	<b>Efluentes industriais</b> .....	20
<b>3.2.1</b>	<i>cultivo de microalgas</i> .....	21
<b>3.3</b>	<b>Biomassa de microalgas</b> .....	22
<b>3.3.1</b>	<i>Microalgas como alternativa de energia renovável</i> .....	22
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	24
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	28
<b>5.1</b>	<b>Crescimento</b> .....	28
<b>5.2</b>	<b>Caracterização do meio alternativo</b> .....	30
<b>5.3</b>	<b>Biomassa</b> .....	31
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	33
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	33
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	35

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento dos índices de poluição ambiental provenientes de emissões veiculares tem causado uma séria preocupação em relação ao aquecimento global, ademais a grande demanda para produção de energia acaba aumentando a ameaça de um possível esgotamento dos combustíveis fósseis (DUARTE *et al.*, 2022).

Em suma, a combustão de combustíveis fósseis pode causar graves danos ao ecossistema e à saúde humana. Problemas respiratórios causados pela emissão de contaminantes atmosféricos, como monóxido de carbono, além de dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, que contribuem para chuva ácida, provém dessa fonte energética (FGV ENERGIA, 2020). Outrossim, tem se tornado comum a divulgação de notícias a respeito de vazamentos em petroleiros ou navios carregados de óleo cru para ser refinado. O resultado disso é que o petróleo contém algumas substâncias tóxicas que, quando misturadas com água, causam sérias sequelas à vida aquática (TECCOM, 2021).

A pesquisa por recursos limpos que permitam assegurar as necessidades energéticas da sociedade no futuro constitui um dos maiores desafios da atualidade. (DUARTE *et al.*, 2022). Neste cenário, surgem os biocombustíveis como uma opção oportuna para geração de energia renovável, contribuindo também na redução significativa da emissão de gases que induzem o agravamento do efeito estufa o que no panorama atual, representam alternativa energética cada vez mais explorada (DUARTE *et al.*, 2022).

Todavia, a geração desta energia limpa atual está baseada apenas nos cultivos vegetais, como canola, milho, soja, açúcar e colza. Embora não se tenha dados científicos relevantes, acredita-se que o cultivo dessas culturas para biocombustíveis pode conduzir ao aumento nos preços dos alimentos e ao agravamento do desmatamento. (GREENWELL *et al.*, 2010; MME, 2020; FGV ENERGIA, 2020).

Devido ao aumento das atenções voltadas para o desenvolvimento renovável, tecnologias sustentáveis e preocupação ambiental, as microalgas vem se destacando como solução para esses ideais. Colocando em evidência as vantagens das microalgas, pode-se perceber que a produção de biocombustíveis, em certos aspectos, apresentam atrativos no que se refere à reutilização de resíduos provenientes de outros processos de produção. Além disso, conforme a pesquisa realizada pelo Instituto Nacional de Tecnologia, as microalgas possuem características que garantem a produção de um combustível eficiente e verde, sem riscos preocupantes para a sua utilização. (SALAMA *et al.*, 2017; AJALA, ALEXANDER, 2019).

A biomassa das microalgas possui um excelente potencial biotecnológico, devido às inúmeras aplicações nas indústrias farmacêutica, alimentícia e cosmética, como também para obtenção de biocombustíveis. Ademais, as microalgas não só produzem biomassa, que pode ter diferentes fins biotecnológicos, como também oferecem uma solução eficaz para tratamento de efluentes, devido a sua capacidade de absorver nutrientes e outros compostos contaminantes do meio, como metais pesados, e ainda assim possuir uma produção de baixo custo. Estudos com esta temática têm sido cada vez mais periódicos. (OLIVEIRA *et al.*, 2018; DIAS, HIPÓLITO, SANTOS, 2019; CASTRO *et al.*, 2020; RODRIGUES, 2022).

O cultivo de microalgas em efluentes é considerado uma ferramenta eficaz, para assimilação de nutrientes e outros compostos contaminantes do meio por ser natural e de baixo custo, como metais pesados e fármacos, podendo assim ser utilizado como alternativa viável para o tratamento terciário, por exemplo para remoção metais pesados e fármacos (YUEFEI *et al.*, 2019).

O potencial de absorção se dá mediante processo de fotossíntese realizado pelas microalgas, que necessitam de compostos presentes nas águas residuais para o seu crescimento (CASTRO *et al.*, 2020). Dessa forma, o cultivo de microalgas em efluentes tem se destacado muito no meio científico visto que apresenta elevada eficiência na remoção de nutrientes e produção de biomassa para geração de biocombustíveis de terceira geração (LAM *et al.*, 2018).

A microalga *Chlorella vulgaris* é uma das espécies que têm ganhado atenção para cultivo em águas residuárias. Sendo classificada como *Chlorophyta* (alga verde), unicelulares de água continental, contendo celulose como principal componente da parede celular e o amido como principal fonte de reserva intracelular (DALIRY *et al.*, 2017).

Esta espécie possui importantes vantagens, como crescimento acelerado, adaptação flexível aos meios de cultura e manejo facilitado, além de possuir resistência a fatores externos. Outrossim, a biomassa de *Chlorella vulgaris* já possui várias aplicações nas indústrias alimentícia e farmacêutica, e vem recebendo muito destaque na produção de biocombustíveis, por sua biomassa incorporar até 40% de lipídios, sob condições de estresse (RODRIGUES, 2022; ASSIS NETO *et al.*, 2022).

## 2 OBJETIVO

### 2.1 Objetivo geral

Cultivar a microalga *Chlorella vulgaris* em efluente industrial, como meio alternativo, para produção de biomassa, visando potenciais biocombustíveis.

### 2.2 Objetivos específicos

- Comparar o desenvolvimento da *Chlorella vulgaris* em meio padrão (Guillard f/2) e no efluente, mediante curvas de crescimento e peso seco da biomassa.
- Caracterizar o meio alternativo quanto a parâmetros físico-químicos de qualidade da água, antes e após o cultivo, para analisar a capacidade de biorremediação da microalga *Chlorella vulgaris*.
- Avaliar produtividade de biomassa seca da microalga *Chlorella vulgaris* em efluente.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Microalgas

Fitoplâncton ou microalga constituem a base da cadeia trófica aquática, sendo capazes de realizar fotossíntese, adaptar-se a condições extremas e ainda obter rápido crescimento. Ademais, habitam principalmente ambientes aquáticos (marinho e continental), mas também podem ser encontrados em superfícies terrestres úmidas. O fitoplâncton possui diversos grupos que podem se apresentar como células isoladas ou colônias. Assim, devido seu alto rendimento, eles são considerados uma fonte natural confiável de inúmeros metabólitos que podem ser usados em uma diversidade de aplicações como nos setores de alimentos, rações, produtos farmacêuticos e energia (LOURENÇO, 2006; MELO, 2021; AMARAL *et al.*, 2023).

Atualmente, as microalgas têm sido bastante estudadas visando a produção de biocombustíveis, e demonstram como qualidades para esta aplicação:

- Crescimento acelerado e, portanto, manejo facilitado quando comparado a fontes alimentares (soja, milho, cana-de-açúcar) utilizadas para produção de biocombustíveis atualmente.
- Elevada produtividade em uma demanda menor de área.
- Não competem com a produção de alimentos, já que podem ser cultivadas em terras consideradas inviáveis para a agricultura.
- Alta capacidade de biorremocão de contaminantes presentes nos corpos d'água.
- Não emitem gases de efeito estufa, sendo uma alternativa sustentável.
- Apresentam uma boa adaptação a ambientes com condições extremas, como desertos.

##### 3.1.1 Divisão *chlorophyta*

O filo Chlorophyta é constituído por algas verdes, contendo formas unicelulares até talos multicelulares, e engloba cerca de 17.000 espécies, sendo, aproximadamente, 10% marinhas e 90% dulcícolas (LOURENÇO, 2006).

Além disso, as algas verdes apresentam essa coloração porque possuem as clorofilas *a* e *b* se destacam sobre os demais pigmentos acessórios, podendo haver alterações de tonalidade devido à presença de carotenóides. Outrossim, a substância reserva das

clorofíceas é o amido, que fica armazenado no interior dos pirenoides (DALIRY *et al.*, 2017).

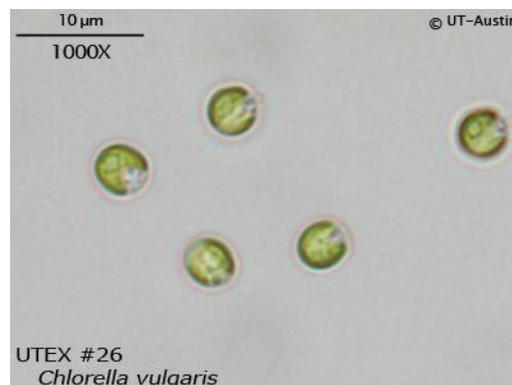
As clorofíceas apresentam morfologias celulares que podem ser flageladas, cocóides, filamentosas ou raramente foliáceas, e podem se reproduzir de forma assexual ou sexual, por isogamia, anisogamia ou oogamia (MELO, 2021).

Os membros da ordem Chlorococcales em sua maioria são de água continental, porém também ocorrem no ambiente marinho, no solo úmido, como endófitos de plantas vasculares, em simbiose com animais inferiores e até formando líquens (SILVA, 2014). Além disso, os gêneros com formas unicelulares está *Chlorella*, uma das variedades mais estudadas. Em uma pesquisa na Science Direct o grupo já possui 37.000 trabalhos publicados, sendo 3.371 só em 2023.

### 3.1. 2 Microalga *Chlorella vulgaris*

As microalgas do gênero *Chlorella* (Figura 1), foram reconhecidas pela primeira vez pelo pesquisador holandês Martinus Willem Beijerinck em 1890 classificada como a primeira microalga com um núcleo definido em um corpo hídrico nos arredores da cidade de Delft, na Holanda. O autor descreve em seu trabalho que as águas do lago estavam tomadas por microalgas que possuíam uma coloração verde intensa ao qual ele comparou com o verde da grama que crescia nas margens da lâmina d'água. O nome *Chlorella* vem da palavra grega chloros (Χλωρός) que significa verde, e o sufixo latino ella que se refere ao seu tamanho microscópico (CAVALCANTI, 2020).

Figura 1. Exemplos da microalga *Chlorella vulgaris*



Fonte: <https://utex.org/products/utex-0026?variant=30991239970906>

Outrossim, foi constatado que a *C. vulgaris* não possui mobilidade, sendo encontrada principalmente em ambientes dulcícolas, mas também em águas salobras no

mundo todo, praticamente. Ademais, essa espécie possui um único cloroplasto e pode acumular pigmentos como clorofilas *a* e *b*,  $\beta$ -caroteno e xantofilas. Apesar de o amido configurar seu carboidrato de reserva intracelular, possuem a capacidade de acumular lipídios quando se encontram em condições estressantes (SAFI *et al.*, 2014; BHUVANA *et al.*, 2019). Os processos metabólicos para obtenção de energia necessária ao crescimento e manutenção celular são realizados pelas mitocôndrias, formadas por membranas duplas, fosfolipídios e proteínas (CORONADO-REYES *et al.*, 2020).

Para mais, sua reprodução é assexuada e rápida, assim, se cultivada em condições adequadas, se multiplica por meio de auto esporulação, modo mais comum de reprodução assexuada entre as algas, onde uma célula mãe de *C. vulgaris* origina quatro células filhas (SAFI *et al.*, 2014; CAVALCANTI, 2016).

Assim, o interesse pelo consumo de *C. vulgaris*, ocorreu após a descoberta das propriedades antitumorais, antibacteriana e antioxidante, como a presença de  $\alpha$ - e  $\beta$ -caroteno, ácido ascórbico, luteína e  $\alpha$ -tocoferol, presentes em sua biomassa. Adicionalmente, essa espécie também possui uma composição rica em vitaminas do complexo B, essencialmente B12 (BHUVANA *et al.*, 2019), além de apresentar 42 a 58% de proteínas em sua biomassa seca. A *C. vulgaris* pode alcançar um teor de até 40% de lipídios em base seca, constituído principalmente de fosfolipídios, glicolipídios, hidrocarbonetos, ceras e ácidos graxos, sintetizados pelo cloroplasto (CORONADO-REYES *et al.*, 2020).

### **3.1.3 Meios de cultivo**

Os meios de cultivo sintético, para produção de microalgas são constituídos por macronutrientes (carbono, oxigênio, hidrogênio, fósforo, cálcio, nitrogênio, silicato, enxofre e potássio) e micronutrientes (ferro, cobre, molibdênio, zinco, manganês). Os macronutrientes constituem as estruturas das biomoléculas, de membranas e do meio intracelular, e portanto, são considerados essenciais. Os micronutrientes promovem as atividades metabólicas das enzimas, que participam das organelas celulares (LOURENÇO, 2006).

O aporte de nutrientes no cultivo de microalgas pode ser: contínuo, em batelada e semi-contínuo. No contínuo, os nutrientes são ofertados durante todo o período de produção, assim o metabolismo é mantido quase estável. No cultivo em batelada, esses nutrientes são fornecidos apenas na fase inicial, assim o nitrogênio celular vai diminuindo e ocorre o aumento da composição das frações de ácido graxo. No semi-contínuo os nutrientes são adicionados ao longo da produção, com objetivo de reduzir o uso de água e nutrientes, e

portanto, o custo. O último modo de cultivo abordado pode diminuir a limitação de nutrientes para o cultivo e a penetração de luz durante as fases de crescimento. Porém é mais suscetível à contaminação, principalmente com zooplâncton. Todavia, para cada forma de cultivo há respostas distintas dependendo das características fisiológicas da cepa escolhida e da finalidade requerida (LOURENÇO, 2006; YUAN *et al.*, 2019; CASTRO *et al.*, 2020).

A caracterização de meios de cultivo formados por resíduos diversos se mostra uma solução eficaz para diminuir os custos de produção de microalgas. Já que, o investimento monetário em insumos sintéticos tem sido o grande impasse do cultivo desses microrganismos, a utilização de resíduos na formulação de meios de cultura é mínimo, promovendo rentabilidade a produção desses microrganismos (VARANDAS, 2022)

Dessa forma, surge a necessidade de se utilizar meios alternativos como águas residuárias, fertilizantes, esgotos domésticos e resíduos de efluentes que possuem potencial para serem reutilizados na produção de microalgas, no qual alguns desses compostos residuais são ricos em matéria orgânica podendo ser usados como fonte de nutrientes como o nitrogênio, fósforo, potássio, dentre outros (VARANDAS, 2022).

### 3.2 Efluentes industriais

A classificação das águas residuárias se verifica das seguintes formas (SANTOS, 2018):

- Descartes de origem doméstica (proveniente das cozinhas, lavanderias e higiene);
- Efluentes gerados por atividades hospitalares, de análise laboratorial e criminal, que são específicas aos hospitais. Estes descartes possivelmente contêm produtos químicos e radioativos, líquidos biológicos e até excreções contagiosas;
- Efluentes industriais (água utilizada na produção e na manutenção dos produtos, que contêm geralmente um grande volume de óleos, de detergentes e alguns metais);

Os efluentes liberados sem o tratamento correto causam desequilíbrio ecológico de águas superficiais devido a floração de microalgas e consequente redução dos níveis de oxigênio, resultando na morte de diversos seres vivos que compõem o ecossistema aquático. Esse fenômeno é identificado como eutrofização (MELO, 2014).

Dessa forma, o planejamento adequado dos efluentes industriais possui valor significativo, sendo necessário avaliar de forma eficaz a caracterização do efluente por muitos

motivos, como verificar se este cumpri os parâmetros designados pela legislação ambiental, dimensionar unidades de pós tratamento, prever a dimensão de impactos ambientais, entre outros. Porém, o tratamento que gera um efluente de alta qualidade ocasiona um alto custo às empresas, o que as força a pesquisar processos alternativos, os quais irão satisfazer os padrões da legislação e ao mesmo tempo exigir um menor investimento e custo operacional (SANTOS, 2018; RECK, 2019).

Os principais tipos de tratamentos realizados em efluentes industriais são conhecidos como tratamento preliminar, primário, secundário e terciário, onde cada um apresenta uma função específica desde a retirada de sólidos grosseiros até microrganismo (Tabela 1) (SANTOS, 2018).

Tabela 1 – Características dos tipos de tratamentos de efluentes industriais.

Preliminar	Primário	Secundário	Terciário
Gradeamento/ desarenação	Coagulação/floculação/ sedimentação/flotação	Processos biológicos	Processos biológicos/ físico-químicos avançados
Remoção de sólidos grosseiros, areia, óleos e gorduras	Remoção de sólidos suspensos	Remoção de sólidos dissolvidos	Remoção de poluentes em concentrações residuais

Elaborado pela autora, adaptado de BELTRAME, LHAMBY, BELTRAME, 2016.

Destarte, os efluentes industriais, em sua maioria, são alvo de preocupação devido a eficácia do tipo de tratamento recebido e ao seu despejo em corpos receptores. Já que, apresentam características diretamente relacionadas à matéria-prima que foi processada, assim como com o procedimento industrial empregado resultando em múltiplas composições físicas, químicas e biológicas, dessa forma, é recomendado que esse resíduo seja caracterizado, quantificado e tratado de forma adequada e eficaz antes do descarte no meio ambiente (AZZOLINI e FABRO, 2013; SANTOS, 2018).

### **3.2.1 Cultivo de microalgas em efluente**

Os meios de cultivo utilizados para a produção de microalgas podem ser classificados em três categorias gerais: (a) meio sintético completo; (b) água natural enriquecida com minerais e (c) efluentes (TANGO, 2015).

Os efluentes aquícolas, industriais e agrícolas podem possuir altas concentrações

de nutrientes mesmo após o tratamento (LÚCIO, 2013), que se lançados em corpos d'água sem o tratamento adequado podem corroborar, dentre outros impactos ambientais, à eutrofização (MELO, 2014), prejudicando a qualidade dos corpos hídricos.

Segundo Tango (2015), o cultivo de microalgas em efluentes diminui a demanda por água e por nutrientes e ganha destaque à medida que se comprova a capacidade de transformar um entrave ambiental em fonte de produtos valorizados. Outrossim, a biorremediação a partir de microalgas não gera contaminantes e, dentre outras aplicações, a assimilação de nitrogênio e de fósforo pela microalga, enriquecem sua biomassa que pode ser utilizada como biofertilizante, nutriente para formulação de ração e produção de biocombustíveis (PITTMAN, DEAN e OSUNDEKO, 2011; TANGO, 2015)

### **3.3 Biomassa de microalgas**

A biomassa microalgal e os compostos extraídos dessa biomassa estão ganhando destaque no mercado mundial por possuírem variadas substâncias com efeitos antioxidantes, ômega 3 e proteínas imunologicamente eficazes, por exemplo (ANDRADE, 2014).

O manejo utilizado para colheita da biomassa depende das características da microalga, como tamanho e densidade. Assim, esse processo é dividido em duas fases: a primeira, consiste em concentrar a biomassa suspensa, no qual se aplica tecnologias como floculação, flotação e sedimentação; e a segunda fase tem o propósito de separar a pasta úmida formada no primeiro momento utilizando técnicas como centrifugação, filtração e ultrassons (SOUSA, 2014; LÚCIO 2013)

Dessa maneira, pesquisadores de todo o mundo têm se empenhado a estudar o uso da biomassa microalgal na produção de energia renovável, biodiesel e biogás, por exemplo. A fim de, reduzir o valor gasto no cultivo da microalga em escala comercial pode-se aliar à produção de energia verde ao tratamento de águas residuais; ao uso de efluentes agrícolas e industriais, como a vinhaça proveniente da produção de etanol por meio da cana-de-açúcar (RODRIGUES, 2022; ASSIS NETO *et al.*, 2022); o reuso do meio de cultura e principalmente aplicando o conceito de biorrefinarias, ou seja, indústrias que produzem não só biocombustíveis, mas também subprodutos de alto valor agregado, tornando mais rentável e atrativo tais produtos (SCHUTZ, 2022).

#### ***3.3.1 Microalgas como alternativa de energia renovável***

Há mais de uma década a geração de biocombustíveis por meio de oleaginosas contribui apenas para uma fração da demanda global de combustível para meios de locomoção (GRESSLER, 2011). De forma que, tal produção não pode ser elevada ao utilizar terra fértil sem que o fornecimento de alimentos seja impactado. Todavia, as microalgas podem ser cultivadas em meio marinho e em efluentes sem afetar negativamente a agricultura. Assim, os biocombustíveis provenientes de algas almejam um grande potencial para suprir a necessidade de energética do mundo (MELO, 2014).

Ademais, devido o destaque que as microalgas vem mostrando nesse setor energético, vários autores têm enumerado diversas vantagens do uso de biocombustíveis derivados de algas, como exemplo, esses microrganismos não sofrem influência sazonal, por conseguinte, o rendimento de óleo a partir de culturas de microalgas é maior do que o rendimento das melhores culturas de oleaginosas; requerem uma menor quantidade de água do que culturas terrestres, diminuindo a demanda solicitada de água potável; apresentam crescimento rápido e algumas espécies são caracterizadas com óleo na faixa de 20 a 50% de peso seco da biomassa e ainda, auxiliam na redução de poluentes do ar, já que sua biomassa pode promover a biofixação de  $\text{CO}_2$ , 1 kg de biomassa algal seca utiliza aproximadamente 1,83 kg de  $\text{CO}_2$  (MELO, 2014; ANDRADE, 2019; MINELLO e VARANDAS, 2022).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido por um período de 10 dias, no Laboratório de Planctologia, do Centro de Biotecnologia Aplicada à Aquicultura (CEBIAQUA), do Departamento de Engenharia de Pesca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

O efluente industrial utilizado no experimento foi obtido junto à uma empresa de eletrodomésticos, localizada no Distrito Industrial, Maracanaú - CE. O material foi coletado no período diurno (8h), após passar por tratamento primário na estação de tratamento da própria indústria, e transportado em galões plásticos de 200 L. Ao chegar no laboratório, foi filtrado com uma malha de 120  $\mu\text{m}$ . Um total de 54 L foram transferidos para os reatores, que posteriormente foram inoculados com a microalga.

Uma alíquota de 500 mL do efluente foi retirada para caracterização físico-química que foi realizada através de fotolorímetro (ALFAKIT), para quantificação de fósforo total, amônia, nitrito, nitrato; e sonda multiparâmetros (HANNA *Instruments*) para determinação de pH, condutividade e sólidos totais.

A cepa de *C. vulgaris* foi cedida pelo banco de cepas do Laboratório de Planctologia e adaptada em meio de cultura Guillard f/2 (GUILLARD, 1975) modificado, que é um meio semidefinido amplamente utilizado em cultivos de microalgas tanto marinhas quanto dulcícolas. O meio foi esterilizado em autoclave, a 121°C, por 15 min e pressão de 1 ATM (LOURENÇO, 2006). A composição de nutrientes está representada nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Composição do meio de cultura Guillard f/2 modificado

Solução	Reagente	Solução mãe (g L <sup>-1</sup> )	Volume (mL L <sup>-1</sup> )
I	Nitrato de sódio	75,0	1,0
II	Fosfato de sódio	5,0	1,0
III	Silicato de sódio	30,0	1,0
IV	Vitaminas	*	0,1
V	Metais traço	**	1,0

Fonte: Elaborado pelo Autor, adaptado de LOURENÇO, 2006.

\*Para solução de vitaminas foi utilizado um par de ampolas do composto vitamínico Citoneurin 5000 (B1 e B6, 100 mg e B12 5000 g) em 50 mL de água destilada previamente autoclavada (SILVA, 2022).

Tabela 3. Composição da solução mãe (g L<sup>-1</sup>) de metais traço do meio de cultura Guillard f/2 modificado

Componentes	Solução estoque (g L <sup>-1</sup> )	Quantidade na solução de metais traço
Sulfato de cobre	9,8	1 mL L <sup>-1</sup>
Sulfato de zinco	22,0	1 mL L <sup>-1</sup>
Cloreto de manganês	180,0	1 mL L <sup>-1</sup>
Cloreto de cobalto	10,0	1 mL L <sup>-1</sup>
Molibdato de sódio	6,3	1 mL L <sup>-1</sup>
Na <sub>2</sub> EDTA	4,36	1 mL L <sup>-1</sup>
Cloreto férrico	31,5	1 mL L <sup>-1</sup>

Fonte: Elaborado pelo Autor, adaptado de LOURENÇO, 2006.

\*\*Cada solução de metais traço, preparada em água destilada, foi autoclavada separadamente em frasco âmbar, e em seguida foi utilizado 1 mL de cada, para preparar uma 1 L de solução estoque final de metais-traço (SILVA, 2022).

Para a propagação, a cultura foi repicada gradativamente e de forma asséptica, através da diluição 1:1 (cepa/meio) partindo de 5 mL, utilizando meio padrão Guillard f/2, na salinidade de 0 ppt, duplicando o volume a cada quatro dias até atingir 12 L, com iluminação e aeração constantes e temperatura média de  $27 \pm 2^\circ\text{C}$ , no qual foi esperado atingir a densidade algal de  $439,5 \pm 29,0 \times 10^5 \text{ cel.mL}^{-1}$ .

O desenho experimental consistiu em um tratamento controle (microalga em meio Guillard f/2, denominado de Mc) e um cultivo em efluente industrial (EI), ambos em triplicata, como mostrado nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

Figura 2 - Crescimento da *Chlorella vulgaris* no tratamento controle (Mc).



Fonte: autora

Figura 3 - Crescimento da *Chlorella vulgaris* no tratamento efluente industrial (EI).



Fonte: autora

Os reatores utilizados foram garrafas de polipropileno com capacidade de 20 L e volume útil de 10 L, no qual a proporção utilizada nos tratamentos foi de 2 L de inóculo para 8 L de meio. As culturas foram mantidas com temperatura de  $27\pm 2^{\circ}\text{C}$ , sob aeração constante com fluxo de ar de 3 L/min e fotoperíodo de 12/12 horas luz, com iluminância de 5000 Lux, provenientes de lâmpadas LED de 18 w.

A taxa de crescimento microalgal foi monitorada a partir da determinação da densidade celular da cultura a cada 24 horas, para este procedimento foi coletada uma alíquota de 1 mL de cada reator, na qual foi acrescentada 1 gota de Lugol para fixação da amostra para contagem do número de células em microscópio óptico (OLYMPUS BX-40) utilizando um hemocitômetro (câmara de Neubauer). Diariamente, também era mensurada a absorvância ( $\lambda=680\text{ nm}$ ) da cultura em espectrofotômetro HACH DR 2000.

O potencial de biorremediação da microalga foi determinado através da capacidade da microalga de remover N e P do efluente industrial. As análises foram feitas por fotolorimetria, através da quantificação de fósforo total, nitrato, nitrito e amônia após 10 dias de cultivo, para tanto o efluente foi recuperado através de centrifugação a 3.000 rpm. Também foram determinados os parâmetros: pH, condutividade e sólidos totais, utilizando sonda multiparâmetros.

A biomassa de *C. vulgaris* foi recuperada do meio de cultivo através de floculação química, por meio de adição de NaOH 0,5 M na proporção de 6:100 (NaOH/meio de cultura). Depois da separação em duas fases (Figura 4), com a biomassa decantada, foi realizado o

sifonamento do sobrenadante e posteriormente a lavagem da biomassa em água corrente. A biomassa úmida foi desidratada em estufa a 50°C por 24h.

Figura 4. Floculação química (NaOH 0,5 M) do cultivo de *Chlorella vulgaris*.

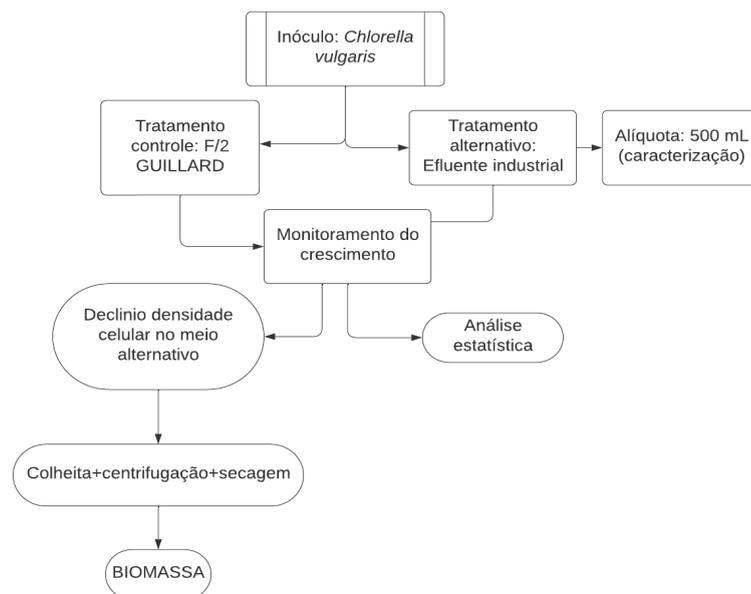


Fonte: autora

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) simples ( $p < 0,05$ ).

A Figura 5 representa o fluxograma das etapas do experimento.

Figura 5- Fluxograma explicativo dos materiais e métodos utilizados no experimento.



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de Silva (2006).

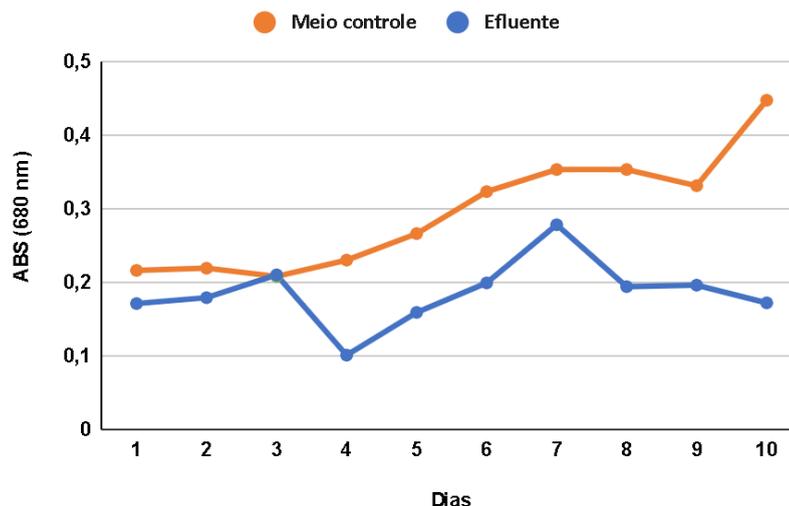
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Crescimento

Os resultados obtidos do monitoramento de crescimento da *C. vulgaris* nos cultivos f/2 (controle) e efluente industrial (alternativo) estão representados nas Figuras 6 e 7 que demonstram dados de absorvância e contagem de células por dia, respectivamente.

Durante os dois primeiros dias de experimento a densidade em ambos os meios teve taxas de crescimento parecidas, ocorrendo um tangenciamento na curva no terceiro dia. Porém, a partir do quarto dia a *C. vulgaris* em meio controle demonstra uma maior adaptação e permaneceu crescendo ao longo do período de estudo, ao contrário do que acontece no efluente, no qual ocorrem decréscimos e picos sucessivos, demonstrando a oscilação no metabolismo da cepa buscando adaptação aos nutrientes disponíveis no efluente utilizado. Foi possível observar um pico de crescimento em *C. vulgaris*, no sexto dia de cultivo em meio alternativo, e que a partir de então o crescimento começou a declinar. Já quando cultivada em meio padrão, até o décimo dia, a cultura apresentava-se em crescimento exponencial (Figura 6).

Figura 6 – Acompanhamento diário da absorvância (680 nm) da microalga *C. vulgaris* cultivada em diferentes meios



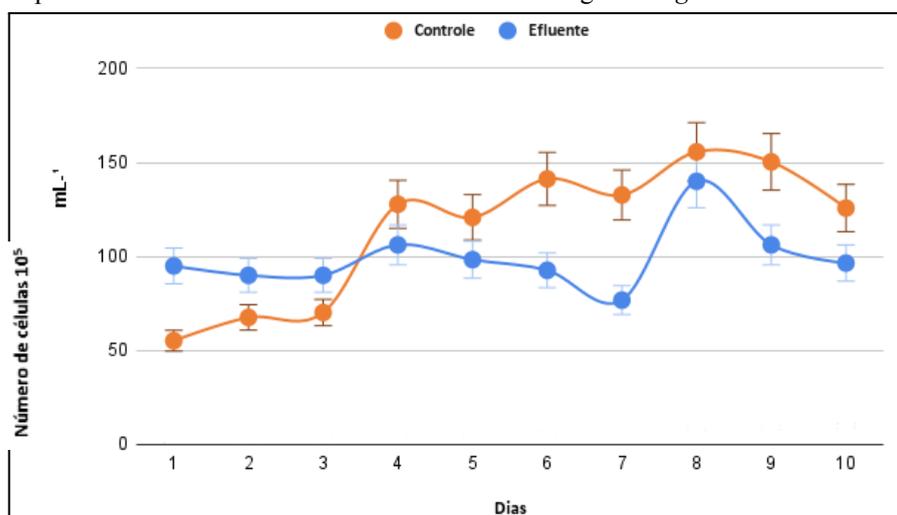
Fonte: elaborada pela autora.

Pode-se notar que a densidade celular demonstrou que o processo de adaptação da *C. vulgaris* no efluente é eficiente em termos de aumento da densidade, no decorrer dos dez dias de crescimento microalgal.

Segundo Schargel *et al.* (2022) a *Chlorella vulgaris*, tem a capacidade de assimilar e incorporar fósforo e nitrogênio, em suas células, para os utilizar nos processos de fotossíntese e respiração, sendo esses compostos os principais requerimentos nutricionais para o crescimento e desenvolvimento microalgal, quando são acrescentadas em uma solução rica nesses elementos. Entretanto, no caso do efluente utilizado no presente trabalho havia um desbalanceamento desses nutrientes por já ter passado por um tratamento primário.

No início do experimento a densidade celular do inóculo de *C. vulgaris* foi de  $439,5 \pm 29,0 \times 10^5 \text{ cel.mL}^{-1}$  para ambos os tratamentos. O cultivo em meio alternativo iniciou com maior densidade celular ( $106,2 \pm 9,8 \times 10^5 \text{ células.mL}^{-1}$ ) e apresentou fase de adaptação mais lenta quando comparado ao meio controle ( $55,5 \pm 7,3 \times 10^5 \text{ células.mL}^{-1}$ ). Em ambos os tratamentos o pico máximo de produção foi observado no oitavo dia sendo estes iguais a  $155,7 \pm 28,0 \times 10^5 \text{ células.mL}^{-1}$  e  $140,0 \pm 11,7 \times 10^5 \text{ células.mL}^{-1}$ , respectivamente para o tratamento controle e em efluente industrial. A partir do 9º dia, ambos os cultivos apresentaram queda no crescimento da cultura (Figura 7).

Figura 7 – Acompanhamento diário da densidade celular da microalga *C. vulgaris* cultivada em diferentes meios



Fonte: elaborada pela autora.

Sabe-se que nos meios de cultivo sintéticos, as quantidades de nutrientes estão balanceadas em dosagens necessárias para um bom desempenho no crescimento da microalga. No efluente industrial (EI), as quantidades de nutrientes não estão em uma dosagem específica para a *C. vulgaris*, um dos motivos de haver a diferença significativa no crescimento da microalga entre os meios analisados neste trabalho.

Assim, um dos fatores que pode ter influenciado em um baixo crescimento celular foi o inóculo da *C. vulgaris* ter sido elevado em relação a baixa quantidade de nutrientes

disponíveis no efluente, processo esse nomeado por Wang *et al.* (2012) de exaustão de nutrientes, dificultando assim sua melhor adaptação à cultura. Uma solução para o problema encontrado seria utilizar a metodologia de diluição do efluente, como feito pelos autores em Schargel *et al.* (2022).

Ademais, a busca por adaptação no efluente também foi um fator que contribuiu para que a *C. vulgaris* poupasse energia reprodutiva e investisse em energia metabólica de absorção de nutrientes para manter-se estabilizada.

## 5.2. Caracterização do meio alternativo (efluente)

A Tabela 4 apresenta os resultados da caracterização físico-química do efluente industrial (meio alternativo).

Com a aplicação da ficobiotecnologia empregando a microalga *C. vulgaris*, foi possível observar uma elevada remoção de compostos nitrogenados. O nitrato foi completamente consumido e a amônia foi reduzida em 76,3%, passando de 0,776 mg.L<sup>-1</sup>, no início do experimento, para 0,184 mg.L<sup>-1</sup> no final do experimento. Entretanto, a redução de fósforo total não foi tão eficiente como esperado, com percentual de redução de apenas 7%, onde a concentração inicial de 2.918 mg.L<sup>-1</sup> foi reduzida para 2.706 mg.L<sup>-1</sup> (Tabela 4).

As porcentagens de biorremoção do N encontradas no presente trabalho são corroboradas tanto por Silva (2006), que observou remoção de N-NH<sub>3</sub>, N-NO<sub>3</sub> pela *Chlorella* spp. em efluente doméstico atingiram respectivamente 69,82% e 61,45%; como por Tango (2015) quando coloca que a *C. vulgaris* absorve primeiramente as fontes de nitrogênio, que requer menos energia metabólica, e só depois inicia-se a absorção de fontes de fósforo

Tabela 4: Características físicas e químicas do efluente industrial (EI)\*.

Parâmetros	Caracterização Inicial	Caracterização final
pH	7,5	8,6
Condutividade (µS.cm <sup>-1</sup> )	1.540	1.453
Sólidos Totais (mg.L <sup>-1</sup> )	790	726
Fósforo Total - P (mg.L <sup>-1</sup> )	2.918	2.706
Amônia - N-NH <sub>3</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	0,776	0,184
Nitrito - N-NO <sub>2</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	0	0
Nitrato - N-NO <sub>3</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	2.842	0

Fonte: elaborada pela autora.

\*Resultados obtidos através de fotocolorímetro e multiparâmetros, realizados no primeiro dia de experimento, no Laboratório de Planctologia (UFC).

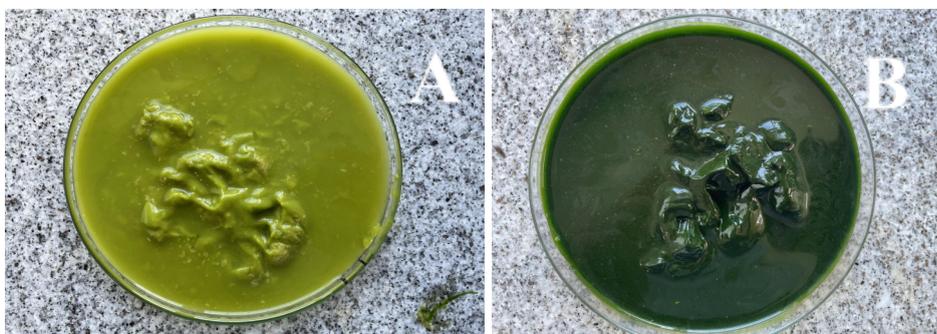
Foi observado um aumento no valor de pH, que passou de 7,5 no primeiro dia, para 8,6, no décimo dia. Esse aumento do pode ter provocado uma maior assimilação de nitrato e em segundo plano de amônia, ocorrendo uma inversão do que foi citado por Tango (2015) no qual a redução do pH permitiu maior assimilação de amônia do que nitrato.

No presente trabalho foi feito fotoperíodo de 12/12 horas luz, visando provocar um estresse na cepa que faria com que ocorresse uma maior absorção de nutrientes para que pudesse se manter em um equilíbrio metabólico, como realizado por Randhavane, Madaan (2021) quando avaliaram o potencial biorremediador da *C. vulgaris* em diferentes fotoperíodos. Porém, o estresse causado a *C. vulgaris*, no presente trabalho, provavelmente foi o que impactou negativamente na absorção de P- total, visto que esse nutriente é facilmente assimilado por esta microalga, sendo este composto um das fontes energéticas implementadas em seu meio sintético padrão (LOURENÇO, 2006).

### 5.3. Biomassa

Biomassas úmidas da *Chlorella vulgaris*, obtidas nos tratamentos EI e MC apresentaram cor com tonalidades diferentes (Figura 8). Essa diferença pode ter sido evidenciada devido ao estresse da quantidade desbalanceada de nutrientes no meio alternativo, podendo ter gerado nas células uma má formação. O mesmo foi evidenciado no estudo feito por Silva (2022), no qual o autor apontou as diferentes tonalidades de cor na biomassa úmida da diatomácea *Chaetoceros gracilis* em diferentes salinidades.

Figura 8. Aspecto da biomassa úmida da microalga *Chlorella vulgaris* cultivada em diferentes meios



Fonte: autora

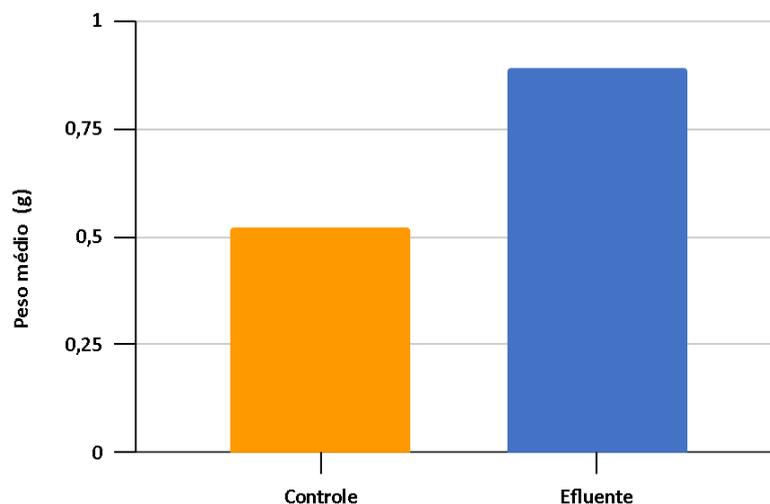
(A) Efluente industrial, (B) meio padrão GUILLARD f/2

Os valores de biomassa da microalga *C. vulgaris* em ambos os meios foram

analisados por meio do peso seco, havendo diferença significativa estatisticamente ( $p > 0,05$ ) entre os dois tratamentos, o maior rendimento foi observado em EI com valor igual a 0,890 g. No meio controle esse valor foi de 0,520 g (Figura 9).

Lira (2011) e Ferreira e Azevedo (2023) também observaram rendimento de biomassa maior quando a microalga foi cultivada no efluente, com deficiência de nutrientes, do quando cultivada em meio padrão. Diferentemente do observado em Kumar e Surojit (2020) e Zanetoni (2023), que cultivaram *Chlorella* sp. em diferentes tipos de esgoto, e obtiveram resultados máximos de produção de biomassa nos efluentes brutos com maiores concentrações de nutrientes.

Figura 9. Peso médio (g peso seco) de biomassa da microalga *C. vulgaris* cultivada em diferentes meios



Fonte: elaborada pela autora

A obtenção da biomassa foi realizada por floculação, porém, apesar do cultivo realizado em meio controle apresentou melhor crescimento de biomassa, é possível que o floculante utilizado (NaOH) tenha sido mais efetivo na separação da biomassa no efluente, que ao final do experimento apresentou pH igual a 8,6. De acordo com Lourenço (2006), o processo de floculação causa um desbalanceamento do pH, fazendo com que a microalga decante. Como o pH observado no efluente (8,6) era diferente ao do meio controle (que chega no máximo a 8,0), possivelmente por este motivo o processo de floculação tenha sido mais efetivo.

## 6 CONCLUSÃO

Foi possível concluir que apesar da adaptação da microalga no meio alternativo não ter sido tão proveitosa quanto no meio padrão, o cultivo da microalga em efluente industrial não afeta negativamente a produção de biomassa da *Chlorella vulgaris*, o que pode ser uma possibilidade para reduzir os custos de produção de energia verde a partir da biomassa de algas, além de apresentar capacidade de redução de compostos nitrogenados no efluente, sendo uma alternativa para a biorremediação desses compostos que seriam possivelmente lançados nos corpos receptores.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em pesquisas futuras, é recomendado que a microalga seja inoculada em diferentes proporções, visando a compreensão de qual é a melhor densidade algal para que a cepa se adapte melhor ao meio para que o crescimento celular seja maximizado.

É de bom tom, caracterizar o efluente utilizado, a fim de compreender todas as características físicas e químicas presentes em sua formulação.

Também é necessário um aprofundamento sobre a aplicabilidade da biomassa algal obtida na produção de biocombustíveis, a fim de avaliar a capacidade e rentabilidade dessa energia em motores, visando sua real aderência no setor comercial.

## REFERÊNCIAS

- AJALA, S. O.; ALEXANDER, M. L. Assessment of *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, and *Oocystis minuta* for removal of sulfate, nitrate, and phosphate in wastewater. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v. 11, p. 311-326, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00333-0>
- ANDRADE, D.S. Características dos principais grupos de microalgas de águas continentais. In: \_\_\_\_\_. **Microalgas de Águas Continentais: Potencialidades e Desafios do Cultivo**. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 2014. p. 21-72.
- ASSIS NETO, D.Q.; LOPES, T.S.A.; SANTOS, W.B.; FERREIRA, W.B.; LIMA, V.L.A. Potencial biorremediador da microalga *Chlorella vulgaris* BEIJERINCK em meio composto por águas residuárias. **Águas Subterrâneas**, Campina Grande, v. 35, n. 3, p. 1-11, fev. 2022.
- AZZOLINI, J.C.; FABRO, L.F. Monitoramento da eficiência do sistema de tratamento de efluentes de um laticínio da região Meio Oeste de Santa Catarina. **Unoesc & Ciência - ACET**, Joaçaba, v.4, n.1, p.43-60, 2013.
- BELTRAME, T. F.; LHAMBY, A. R.; BELTRAME, A. Efluentes, resíduos sólidos e educação ambiental. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20. p.351-362, 2016.
- BHUVANA, P.; SANGEETHA, P.; ANURADHA, V. ALI, M. Spectral characterization of bioactive compounds from microalgae: *N. Oculata* and *C.Vulgaris*. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v.5, 2019. [10.1016/j.bcab.2019.101094](https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101094)
- CASTRO, A. A.; KONRAD, O.; MARDER, M.; FILHO, M. G. Cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais: revisão de literatura. **Revista Geama**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 60–71, 2020. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/3346>. Acesso em: 10 out. 2023.
- CAVALCANTI, D.L. **Potencial biotecnológico de *chlorella vulgaris*: aplicação em biocelulas a combustível fotossintética, produção de energia e sequestro de CO<sub>2</sub>**. 2016. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.
- CORONADO-REYES, J.A.; SALAZAR-TORRES, J. A.; JUÁREZ-CAMPOS, B.; GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, J.C. *Chlorella vulgaris*, a microalgae important to be used in Biotechnology: a review. **Food Science and Technology**. [S.L.], v. 42. n. 37320.p. 1-11, 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/fst.37320>.
- DALIRY, S.; HALLAJISANI, A.; MOHAMMADI, J.; NOURI, H.; GOLZARY, A. Investigation of optimal condition for *Chlorella vulgaris* microalgae growth. **Jornal Global de Ciência e Gestão Ambiental**. Tehran, v. 3, n. 2, p. 1-14. mar. 2017. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2017.03.02.010>
- DIAS, G.; HIPÓLITO, M.; SANTOS, F.; LOUREGA, R.; MATTIA, J.; EICHLER, P.; ALVES, J. Biorremediação de efluentes por meio da aplicação de microalgas – uma revisão.

**Química Nova**, [S.L.], v. 42, n. 8, p. 891-899, 2019. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170393>

DUARTE, V.; VALENTINI, M.H., SANTOS, G.B.; NADALETTI, W.; VIEIRA, B. Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biodiesel. **Meio Ambiente (Brasil)**. v.4, n.2, p.50-68, 2022.

AMARAL, E.T.; BENDER, L.B.C.; RIZZETTI, T.M.; SCHNEIDER, R.C.S. Removal of organic contaminants in water bodies or wastewater by microalgae of the genus *Chlorella*: A review. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**. v.8. p.1-11, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100476>.

El-Sayed Salama, Mayur B. Kurade, Reda A.I. Abou-Shanab, Marwa M. El-Dalatony, Il-Seung Yang, Booki Min, Byong-Hun Jeon, Recent progress in microalgal biomass production coupled with wastewater treatment for biofuel generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 79, p. 1189-1211, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.091>

FERREIRA, G.R.; AZEVEDO, J.C.R. Biorremediação como alternativa na remoção de nutrientes e produção de biomassa em efluente da suinocultura: cultivo de microalgas *Chlorella* sp. e *Desmodesmus subspicatus*. **Anais de Iniciação Científica**, v. 20, n. 20, 2023.

FGV ENERGIA . **Matriz Energética Brasileira (BP Statistical Review 2020)**. 2020. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/dados-matriz-energetica>. Acesso em: 17 out. 2023.

GREENWELL, H.C., LAURENS, L.M.L., SHIELDS, R.J., LOVITT, R.W., FLYNN, K.J. Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges. **Journal of the Royal Society Interface**. v.7.p.703-726, 2010.

GRESSLER, P.D. **Avaliação da eficiência de *Desmodesmus subspicatus* (R.chodat) e Hegewald & A.Schmidt (Chlorophyceae) cultivada em fotobiorreator tubular com efluente da ETE-UNISC, visando biorremediação e obtenção de energia**. 2011. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2011.

GUILLARD, R.R.L. Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates. In: SMITH, W.L.; CHANLEY, M.H. (Eds.). **Culture of marine invertebrate animals**. New York: Plenum, p. 29-60, 1975.

KUMAR, A.; SUROJIT, B. Revisiting nitrogen utilization in algae: A review on the process of regulation and assimilation. **Bioresource Technology Reports**. v.12, 2020 doi: 10.1016/j.biteb.2020.100584.

LAM; LEE, T.M; CHEN, C.Y; CHANG, J.S. Estratégias para controlar contaminantes biológicos durante o cultivo de microalgas em lagoas abertas. **Bioresource Technology**, v. 252, p. 180-187, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.088>

LIRA, R.A. **Estudo do rendimento de biomassa da microalga nativa *Chlorella* sp. visando a obtenção de biocombustíveis**. 2011. 133 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

LOURENÇO, S. O. **Cultivo de microalgas marinhas: princípios e aplicações**. São Carlos: Rima, 2006. 606 p.

LÚCIO, M.J. **Cultivo de microalgas *Chlorella vulgaris* com efluente doméstico como meio de cultura alternativo**. 2013. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MELO, P.A.M.C. Fitoplâncton marinho tropical. In: VIANA, D.L. **Ciências do Mar: dos oceanos do mundo ao Nordeste do Brasil**: Bioecologia, Pesca e Aquicultura. 2. ed. Recife: Via Design Publicações, 2021. Cap. 2. p. 42-65.

MELO, T.B. **Remoção de nitrato e fosfato presente em efluente sintético, por meio do cultivo de *Chlorella vulgaris*, com foco preliminar para produção de biodiesel**. 2014. 111 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014.

MINELLO, L.C. **Potencial biotecnológico das microalgas: referencial teórico das suas aplicações**. 2022. TCC (Graduação) - Engenharia Química, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2022.

Ministério de Minas e Energia (MME). **Resultados Biocombustíveis 2020**. 2020. Disponível em:

<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/resultados-dos-biocombustiveis-em-2020/resultados-biocombustiveis-2020/view>. Acesso em: 8 set. 2023.

OLIVEIRA, G.; CARISSIMI, E.; MONJE-RAMÍREZ, I.; VELASQUEZ-ORTA, S.B.; RODRIGUES, R.; LEDESMA, M. Comparison between coagulation flocculation and ozone-flotation for *Scenedesmus microalgal* biomolecule recovery and nutrient removal from wastewater in a high-rate algal pond. **Bioresource Technology**. v. 259, p. 334– 342, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.072>

PITTMAN, J. K.; DEAN, A. P.; OSUNDEKO, O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. **Bioresource Technology**. 102, pp 17-25, 2011.

RANDHAVANE B. S.; MADAAN, S. Cultivation and potential application of microalgae in treatment of Pesticide Manufacturing Effluent. **Materials Today: Proceedings**. v. 43.p.1944-1948, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.212>.

RECK, L. **Potencial biotecnológico de microalgas para biorremediação de efluentes industriais**. 2019. 87 f. Tese (Doutorado) - Curso de Biotecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2019.

RODRIGUES, L. **Aplicações da tecnologia de cultivo de microalgas verdes com vistas à biorremediação de efluentes e produção de bioativos**. 2022. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

SAFI, C.; ZEBIB, B.; MERAH, O.; PIERRE-YVES, P.; VACA-GARCIA. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.35.p.265–278, 2014.

SANTOS, D.A. **Microalgas aplicadas ao tratamento de efluentes oriundos de laticínios**. 2018. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SCHARGEL, M.; LUDWIG, I.; EL-SHEEKH, M., KORAROS, M.; ALI, S.S. The efficiency of microalgae-based remediation as a green process for industrial wastewater treatment. **Algal Research**. v.66, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102775>.

SCHUTZ, D. **Estudo da remoção de nitrogênio amoniacal em efluente através do manejo com microalgas**. 2022. TCC (Graduação) - Curso de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

SILVA, A.L.V. **Bioprospecção de microalgas dulcícolas com potenciais biotecnológicos: influência da temperatura no cultivo e composição química**. 2014. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharel em Ciências Biológicas, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

SILVA, D.C. **Cultivo da microalga *Chaetoceros gracilis* com variação de salinidade e seu efeito no crescimento, produção de pigmentos fotossintéticos e exopolissacarídeos**. 2022. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Pesca, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

SILVA, F. **Biorremoção de nitrogênio, fósforo e metais pesados (Fe, Mn, Cu, Zn) do efluente hidropônico, através do uso de *Chlorella vulgaris***. 2006. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agroecossistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SOUSA, C.V. **Microalgas: do Tratamento de efluentes para a biorrefinaria**. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia e Bioenergia, Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 2014.

TANGO, M.D. **Cultivo de microalgas em efluentes da indústria de beneficiamento de carnes em fotobiorreator do tipo coluna de bolhas**. 2015. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

TECCOM. **COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS: POR QUE ELES PREJUDICAM O MEIO AMBIENTE?** 2021. Disponível em: <https://teccom10.com.br/combustiveis-fosseis-por-que-eles-prejudicam-o-meio-ambiente/>. Acesso em: 25 out. 2023.

VARANDAS, R.C.R. **Cultivo de microalgas em meios alternativos: extração de compostos bioativos de interesse à indústria de alimentos**. 2022. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

WANG, H.; XIONG, H.; HUI, Z.; ZENG, X. Mixotrophic cultivation of *Chlorella pyrenoidosa* with diluted primary piggery wastewater to produce lipids. **Bioresource Technology**. v.104.p.215-220, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.020>.

YUAN, D.; YAO, M.; WANG, L.; LI, Y.; GONG, Y.; HU, Q. Effect of recycling the culture medium on biodiversity and population dynamics of bio-contaminants in *Spirulina platensis* mass culture systems. **Algal Research**. v. 44. 101718, 2019. DOI: [10.1016/j.algal.2019.101718](https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101718)

YUEFEI R.; RONGBEN, W.; JAMES, C.W. LAM; KAI, Z.; PAUL K.S.L. Seasonal occurrence and fate of chiral pharmaceuticals in different sewage treatment systems in Hong Kong: Mass balance, enantiomeric profiling, and risk assessment. **Water Research**.v 149. p.607-616, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.010>

ZANETONI, J.A.F. **Cultivo de macrofitas e microalgas em esgoto sanitário bruto com utilização de coagulantes no processo de separação por sedimentação**. 2023. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.