

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL –
DOUTORADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL

EDUARDA TORRES AMARAL

**ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS E VALORIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE
Chlorella EM EFLUENTES: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL PARA A
BIORREMEDIAÇÃO E A BIOMASSA RENOVÁVEL**

Santa Cruz do Sul

2024

Eduarda Torres Amaral

**ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS E VALORIZAÇÃO DA PRODUÇÃO
DE *Chlorella* EM EFLUENTES: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL PARA A
BIORREMEDIAÇÃO E A BIOMASSA RENOVÁVEL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Doutorado, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para o título de Doutor em Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Rosana de Cássia de Souza Schneider

Co-orientadora: Profa. Dra. Tiele Medianeira Rizzetti

Santa Cruz do Sul

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao CNPq pela bolsa de estudos concedida, à UNISC e ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental pela oportunidade da realização do doutorado e pela aprendizagem durante esses quatro anos de curso.

Gostaria de agradecer a minha orientadora, professora Dra. Rosana de Cassia de Souza, pela dedicação, disponibilidade, confiança, competência e especial atenção nas revisões e sugestões, fatores essenciais para a conclusão do trabalho.

Agradeço à minha coorientadora professora Dra. Tiele Medianeira Rizzetti por toda a ajuda, dedicação e incentivo, no qual foi muito importante para alcançar os objetivos deste trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Aos professores Dr. Fábio Neves, Dra. Kelma Pires, Dr. Thiago Rodrigues Bjerk e Dr. Marco Ferrão (UFRGS) pelos conhecimentos compartilhados que foram essenciais para a construção deste trabalho.

Agradeço a minha mãe Stael Torres Amaral, e ao meu pai Ademar Félix Amaral, por todo apoio e incentivo incondicional para chegar onde cheguei.

A meu esposo Tiago Machado de Souza, por todo apoio, incentivo e companheirismo ao longo desses anos de doutorado.

Aos demais familiares e amigos que sempre me apoiaram e incentivaram nesta jornada.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq – protocolo 310228/2019-0 e 400862/2019-0.

RESUMO

Embora o cultivo de biomassa de microalgas ofereça benefícios promissores, é necessário realizar avaliações abrangentes do ciclo de vida e análises de custo-benefício para garantir que seja sustentável e econômica em comparação com as fontes convencionais de biomassa. Neste estudo foi realizada uma análise abrangente dos aspectos ambientais relacionados à produção de biomassa de microalgas, considerando diferentes cenários e suplementos. Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura voltada a remoção de contaminantes orgânicos pela microalga do gênero *Chlorella*. Verificou-se que utilizando principalmente o modo mixotrófico a remoção se dá por bioadsorção, bioacumulação e bioabsorção ou biodegradação. Ainda que tenha havido sucesso em estudos para remoção de agrotóxicos e fármacos, esses e outros contaminantes emergentes ainda representam um desafio. Em um segundo momento, a partir de dados de cultivo de *Chlorella* em efluente sanitário com diferentes cenários, avaliou-se a análise do ciclo de vida destes cultivos, em que o glicerol como suplemento em efluente sanitário gerou menores impactos na produção de biomassa quando comparado aos outros cultivos; contudo, depende da finalidade em que a biomassa será utilizada. Por fim, realizou-se uma abordagem de avaliação dos impactos ambientais rápidas baseada na matriz de Leopold, que mostrou que a utilização de efluentes em geral no cultivo de microalgas pode representar um risco maior do que quando comparado ao cultivo em meios convencionais. Tendo em vista problemas que poderão surgir como, por exemplo, derramamentos no solo, riscos à saúde do trabalhador ao manusear efluentes podendo ter contaminantes, a contribuição de especialistas são fundamentais para garantir que o cultivo de microalgas seja conduzido de maneira responsável e sustentável. Com isso, a ACV e matriz de avaliação ambiental rápida podem oferecer *insights* valiosos para a tomada de decisões sustentáveis na produção de microalgas.

Palavras-chave: microalgas, biorremediação, ACV, impactos ambientais, matriz de Leopold, RIAM

ABSTRACT

ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL IMPACTS AND VALUATION OF *Chlorella* PRODUCTION IN EFFLUENTS: A SUSTAINABLE APPROACH TO BIOREMEDIATION AND RENEWABLE BIOMASS

Although microalgae biomass cultivation offers promising benefits, comprehensive life cycle assessments and cost-benefit analyzes are necessary to ensure it is sustainable and cost-effective compared to conventional biomass sources. In this study, a comprehensive analysis of the environmental aspects related to the production of microalgae biomass was carried out, considering different scenarios and supplements. Initially, a literature review was carried out focused on the removal of organic contaminants by microalgae of the genus *Chlorella*. It was found that using mainly the mixotrophic mode, removal occurs by bioadsorption, bioaccumulation and bioabsorption or biodegradation. Although there have been successes in studies to remove pesticides and pharmaceuticals, these and other emerging contaminants still represent a challenge. In a second step, based on data from *Chlorella* cultivation in sanitary effluent with different scenarios, the analysis of the life cycle of these crops was evaluated, in which glycerol as a supplement in sanitary effluent generated smaller impacts on biomass production when compared to other crops; however, it depends on the purpose for which the biomass will be used. Finally, a rapid environmental impact assessment approach was carried out based on the Leopold matrix, which showed that the use of effluents in general in the cultivation of microalgae may represent a greater risk than when compared to cultivation in conventional media. In view of problems that may arise, such as spills in the soil, risks to worker health when handling effluents that may contain contaminants, the contribution of experts is essential to ensure that microalgae cultivation is conducted in a responsible and sustainable manner. Therefore, the LCA and rapid environmental assessment matrix can offer valuable insights for making sustainable decisions in microalgae production.

Keywords: microalgae, bioremediation, LCA, environmental impacts, Leopold matrix, RIAM.

LISTA DE FIGURAS

- Figure 1. Mapa bibliométrico da produção científica sobre microalgas e avaliação de impactos ambientais para os últimos 5 anos, considerando a presença das palavras ("microalgae cultivation" OR "microalgae production") AND ("environmental impacts evaluation" OR "environmental impacts assessment") nas bases *Science direct*, *Scopus* e *Web of Science* disponibilizadas no Sistema de Periódicos da Capes. 21
- Figura 2. Expressões mais citadas com a pesquisa nos termos “lca” AND ("microalgae production" OR "microalgae cultivation") no período de 2002 a 2022. 23
- Figura 3. Número de documentos publicados por ano, com a busca realizadas nos termos “lca” AND ("microalgae production" OR "microalgae cultivation") obtido com base na pesquisa realizada nas de dados, *Science Direct (Elsevier)*, *Scopus* e *Web of Science*. . 24
- Figura 6. Análise bibliométrica realizada utilizando o software VOSviewer em pesquisas realizadas com os termos *Chlorella* e mixotrófico nas bases de dados Scopus e WOS nos últimos 5 anos. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 4. Análise bibliométrica realizada utilizando o software VOSviewer em pesquisas realizadas com os termos *Chlorella* e contaminantes emergentes nas bases de dados Scopus e WOS nos últimos 5 anos. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6. Análise bibliométrica realizada utilizando o software VOSviewer em pesquisas realizadas com os termos *Chlorella* e tipo de biorremediação (bioacumulação, biodegradação, bioadsorção) nas bases de dados *Scopus* e *WOS* nos últimos 5 anos. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 7. Complexidade da utilização de *Chlorella* para a remoção de compostos orgânicos no tratamento de águas residuais. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 7. Fotobiorreator utilizado no cultivo de microalgas do gênero predominante *Chlorella*..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 8. As categorias de impacto obtidas na produção de biomassa com diferentes meios (efluentes, efluentes suplementados com glicerol e solução NPK) utilizam o Simapro 8.5 com o método Impact 2002+ e a base de dados Ecoinvent. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 9. Categorias de danos ambientais foram obtidas na produção de biomassa com diferentes meios (águas residuárias, efluentes suplementados com glicerol e solução NPK) utilizando o método Simapro 8.5 com Impact 2002+ e o banco de dados Ecoinvent. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 11. Impactos negativos e positivos dos diferentes tipos de meios de cultivo em produção de microalgas. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 12. Impactos positivos e negativos de tecnologias que podem ser utilizadas na (a) separação e no (b) processo de secagem de biomassa microalgal. **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Principais métodos, avaliações de impactos, microalgas e tipos de cultivos encontrados na literatura..... 21
- Tabela 2. Documentos com "Microalgas" ou "*Chlorella*" associados a outros termos de pesquisa nos últimos cinco anos (até 2023).**Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 3. Relação de documentos com o gênero *Chlorella* e seu respectivo modo metabólico de cultivo.....**Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 4. Produção de microalgas com condições experimentais e taxa de remoção de contaminantes.**Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 5. Equipamento utilizado no cultivo de microalgas em fotobiorreatores tubulares.**Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 6. Entradas e saídas dos três cenários avaliados. ...**Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 7. Análise de incerteza por simulação de Monte Carlo (1000 interações e 95% de confiança) dos resultados de impacto das categorias destacadas na LCIA com o método Impact 2002+.**Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 8. Critérios de avaliação, classificação e pontuação na matriz de interação para avaliação dos impactos da produção de biomassa de microalgas.**Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 9. Cenários de produção de microalgas selecionados com base nos potenciais impactos para o meio físico, biótico e antrópico.**Erro! Indicador não definido.**

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS.....	13
	2.1 Objetivo Geral	13
	2.2 Objetivos específicos.....	13
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
	3.1 Microalgas	14
	3.2 Microalgas e Sustentabilidade.....	15
	3.3 Avaliação do Ciclo de Vida.....	16
	3.3.1 Avaliação do Ciclo de Vida e Microalgas	17
	3.4 Ferramentas de Avaliação de Impacto Ambiental – Uma abordagem Bibliométrica	20
4	METODOLOGIA.....	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
	5.1 ARTIGO 1 – Remoção de contaminantes orgânicos em águas ou águas residuais por microalgas do gênero <i>Chlorella</i> : Uma revisão.....	Erro! Indicador não definido.
	5.1.1 INTRODUÇÃO.....	Erro! Indicador não definido.
	5.1.2 METODOLOGIA.....	Erro! Indicador não definido.
	<i>Chlorella</i>	Erro! Indicador não definido.
	5.1.3 FICORREMEDIAÇÃO DE CONTAMINANTES ORGÂNICOS EM ÁGUA	Erro! Indicador não definido.
	5.1.4 PERSPECTIVAS FUTURAS PARA O EMPREGO DE <i>Chlorella</i> NA BIORREMEDIAÇÃO	Erro! Indicador não definido.
	5.1.5 CONCLUSÃO.....	Erro! Indicador não definido.
	5.1.6 REFERÊNCIAS	Erro! Indicador não definido.
	5.2 ARTIGO 2 - Análise de ciclo de vida de tratamento por microalgas de esgoto sanitário suplementado com glicerol	Erro! Indicador não definido.
	5.2.1 INTRODUÇÃO.....	Erro! Indicador não definido.
	5.2.2 DELIMITAÇÃO DO SISTEMA.....	Erro! Indicador não definido.
	5.2.3 ANÁLISE DE IMPACTO NO CICLO DE VIDA.....	Erro! Indicador não definido.
	5.2.4 PERSPECTIVAS FUTURAS	Erro! Indicador não definido.
	5.2.5 CONCLUSÕES	Erro! Indicador não definido.
	5.2.6 REFERÊNCIAS	Erro! Indicador não definido.

5.3 ARTIGO 3 – Avaliação de Impactos em Diversos Sistemas de Produção de Microalgas em Meios Alternativos através da Matriz de Interação **Erro! Indicador não definido.**

5.3.1	INTRODUÇÃO.....	Erro! Indicador não definido.
5.3.2	METODOLOGIA.....	Erro! Indicador não definido.
5.3.	3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	Erro! Indicador não definido.
5.3.4	CONCLUSÃO.....	Erro! Indicador não definido.
5.3.5	REFERÊNCIAS	Erro! Indicador não definido.
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
7	REFERÊNCIAS	32
8	ANEXOS.....	Erro! Indicador não definido.

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento contínuo da população e o desenvolvimento das indústrias, as águas residuais contêm poluentes tóxicos, principalmente matéria orgânica, fertilizantes, efluentes de indústrias como, por exemplo, farmacêuticas, têxteis, frigoríficos, entre outras que acabam representando ameaça à saúde humana e espécies aquáticas. Desse modo, esses poluentes quando presentes em águas potáveis, subterrâneas e agrícolas podem se acumular na cadeia alimentar e causar diversas doenças no ser humano. Logo, métodos eficientes para a remoção desses poluentes de águas residuais vêm sendo cada vez mais estudados (Wang *et al.*, 2023).

Tecnologias convencionais de tratamentos de águas residuais abrangem principalmente métodos físicos como, por exemplo, adsorção, eletrólise, floculação, processos químicos, coagulação, e processos biológicos como a digestão anaeróbia e o tratamento de lodo ativado. No entanto, esses métodos possuem algumas desvantagens como, altos custos de tratamento, poluição secundária, altos custos de operação e de matéria-prima. Desta forma, faz-se necessário o desenvolvimento de tecnologias limpas, seguras, com eficiência de remoção de poluentes, eficazes e econômicas (Altowayti *et al.*, 2022; Ankush *et al.*, 2019).

Nesse sentido, as microalgas podem ser adaptadas em diferentes sistemas para fins de limpeza ambiental, como a mitigação biológica de CO₂ para reduzir as emissões associadas à combustão em unidades industriais e a biorremediação de águas residuárias e solo poluído (Khor *et al.*, 2022; Nguyen *et al.*, 2021). Assim, as microalgas podem ser uma alternativa viável para o tratamento de águas residuárias, uma vez que são altamente eficientes na remoção de nutrientes e compostos poluentes de águas, conhecido como ficorremediação, sobretudo em esgotos primários, além de uma variedade de águas residuais, principalmente águas municipais e domésticas (Hariz *et al.*, 2019; Pechsiri *et al.*, 2023).

Diversas tecnologias de biorreatores, focadas no cultivo de microalgas, podem ser implantadas, de acordo com a especificidade do seu uso e tipo de tratamento a ser incorporado. Essa ampla gama de tecnologias resulta em variações nos requisitos de material utilizado e energia, por exemplo, para a produção de biomassa. Em contrapartida isso afeta a eficiência de absorção de carbono ou nutrientes de cada tecnologia, como está associada a outros impactos ambientais (Pechsiri *et al.*, 2023).

A biomassa proveniente do cultivo de microalgas é considerada versátil pelo fato de poder ser utilizada para a produção de biocombustíveis, como biohidrogênio e biodiesel (Ebhodaghe *et al.*, 2022), podendo ser fonte de biomoléculas de valor agregado (Li *et al.*, 2023) entre outros.

O cultivo da biomassa de microalgas possui o potencial de produzir diferentes composições; além de evitar a poluição, trata resíduo e recupera recursos. Entretanto, os desempenhos ambiental, energético e econômico dessas produções devem ser vantajosos, quando comparados às fontes convencionais de biomassa. Os impactos ambientais e a demanda energética da produção de biomassa de microalgas são dependentes de sua produtividade, a qual está associada ao sistema de cultivo, à escala de produção, às espécies cultivadas e às condições climáticas (Schade; Meier, 2019).

Neste trabalho, foram analisados os impactos ambientais utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), associados à produção da microalga *Chlorella* sp.. Convém destacar que este estudo foi realizado a partir do estudo experimental realizado a partir da pesquisa de mestrado, utilizando experimentos com efluente sanitário proveniente da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da Universidade de Santa Cruz do Sul, com cultivo suplementado com glicerol e NPK, a fim de produzir biomassa com potencial biotecnológico. Esta ACV considera um sistema em que a microalga está em condição de remediação e de produção de biomassa renovável.

Desta forma, neste estudo foram avaliados, além do desempenho ambiental da produção de biomassa microalgal por ACV, a partir do *software SimaPro*, a avaliação das interações ambientais durante a produção da microalga. Para tanto, foi utilizada uma matriz de avaliação ambiental rápida (RIAM, do inglês *rapid impact assessment matrix*) para identificar implicações prejudiciais ao meio ambiente (Chakraborty *et al.*, 2022). Adaptou-se uma matriz, a partir da Matriz de Leopold (página 25) com todos os tipos de cultivo, meio de cultivo, tipo de separação de biomassa, de secagens, limpeza, acondicionamento, recirculação e descarte, em que esses foram avaliados quanto a sua atividade impactante, sendo no solo, água, atmosfera, recursos, flora, fauna, econômicos, social e qualidade do produto final. Ressalta-se que não é encontrada nas bases de pesquisa esse tipo de avaliação ambiental utilizando a matriz de Leopold para a produção de microalgas, em que é possível identificar os principais impactos de cada atividade do processo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar e quantificar os impactos ambientais decorrentes da produção em escala piloto de *Chlorella* para a remediação de águas residuárias, comparando-os de forma sistemática com os métodos convencionais de cultivo e buscando identificar oportunidades de otimização para mitigar impactos negativos, para aprimorar a eficiência da biorremediação e promover a produção sustentável de biomassa renovável.

2.2 Objetivos específicos

- Elaborar uma revisão bibliográfica para reconhecer as implicações tecnológicas e ambientais da aplicação das microalgas, do gênero *Chlorella*, na fitorremediação de poluentes orgânicos em águas residuárias.
- Avaliar os impactos ambientais aplicando à metodologia de análise do ciclo de vida da produção de microalgas em diferentes cenários, com meio padrão contendo nitrogênio/fósforo/potássio (NPK), suplementado com glicerol e produzidas somente em água residuária
- Avaliar as tecnologias e atividades associadas a produção de microalgas, com ênfase na *Chlorella* em relação quanto aos possíveis impactos ambientais para o meio físico, biótico, e antrópico empregando uma matriz de interação, empregando análise por especialistas em produção de microalgas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Microalgas

As microalgas possuem uma grande capacidade para gerar energia a partir de recursos renováveis sem afetar as terras agrícolas, na qual são utilizadas para grandes plantações alimentares (Bhattacharya; Goswami, 2020).

São organismos autotróficos unicelulares que geralmente são encontrados em água doce e água do mar. As microalgas utilizam normalmente o dióxido de carbono do ar para seu crescimento e produção de energia (Bhattacharya; Goswami, 2020). Além disso, as microalgas podem utilizar diferentes métodos nutricionais sendo cultivadas em método autotrófico e/ou heterotrófico (Dragone, 2022).

O cultivo autotrófico utiliza composto inorgânico como fonte de carbono, como por exemplo CO₂ ou bicarbonatos. São conhecidos como fotoautotróficos, pois sua energia química é obtida pela absorção de luz por meio da fotossíntese. Já no cultivo heterotrófico, a fonte de carbono são os compostos orgânicos, e são conhecidos como fotoheterotróficos, utilizando a luz como fonte de energia (Dragone, 2022). Como nem todas as espécies de microalgas de interesse biotecnológico são capazes de crescer heterotroficamente há a possibilidade de realizar o cultivo mixotrófico, onde as fontes de carbono são assimiladas junto com o CO₂ (Castillo *et al.*, 2021). O cultivo mixotrófico de microalgas é caracterizado por uma relação entre as atividades metabólicas fotoautotróficas e heterotróficas (Dragone, 2022).

Existem algumas microalgas que utilizam uma fonte de carbono orgânico, como por exemplo, o glicerol residual para produzir biomassa (Dario *et al.*, 2021; Rana; Prajapati, 2021; Rattanapoltee *et al.*, 2021). O cultivo de microalgas em modo mixotrófico utilizando diferentes fontes de carbono, como o glicerol, pode aumentar a concentração geral de biomassa e o acúmulo de lipídios (Rana; Prajapati, 2021).

O cultivo das microalgas é realizado em sistemas abertos e fechados. Levando em conta que o sistema de cultivo fechado inclui o fotobiorreator que é um recipiente de cultivo fechado com CO₂ e fonte de luz. Além disso, o fotobiorreator requer menos espaço, possui um baixíssimo risco de contaminação e tem uma alta produtividade, uma vez que é fácil controlar os parâmetros de cultivo, como, pH, temperatura e nutrientes. Por outro lado, nesse sistema é extremamente difícil de escalar a sua produção, pois exige grande custo para construir além de acabar consumindo mais energia (Rehman *et al.*, 2022). Ainda que os sistemas fechados sejam

mais eficazes em razão de melhor controle do processo, maiores produtividades de biomassa e riscos reduzidos de contaminação, os sistemas abertos, como lagoas *raceway*, ainda é a escolha mais adequada, principalmente para cultivos em larga escala. O cultivo de microalgas ao ar livre depende de diversos fatores, entre eles a temperatura, umidade, emissão solar, estirpe de microalgas, disponibilidade de nutrientes, clima local, velocidade do vento e níveis de CO₂ (Yadav *et al.*, 2020; Yadav; Sen, 2017).

As microalgas possuem grande teor de proteínas, lipídios e açúcares complexos que podem ser usados como matéria-prima na produção de uma ampla variedade de bioprodutos. Elas são desenvolvidas em lagos abertos ou tanques de sistemas fechados utilizando água e CO₂ podendo ser cultivadas a um baixo custo, entretanto, um meio de cultura exige uma suplementação para que haja o desenvolvimento das microalgas (Bhattacharya; Goswami, 2020).

3.2 Microalgas e Sustentabilidade

As microalgas vêm sendo amplamente estudadas como grande potencial como matéria prima na produção de biocombustíveis e compostos bioativos de alto valor agregado (Cheng *et al.*, 2019; Do *et al.*, 2022). Como por exemplo, vem sendo exploradas para aplicações industriais, como, biodiesel, mitigação de CO₂, suplementos dietéticos, produtos nutracêuticos, cosméticos, rações animais, produtos farmacêuticos e também para o tratamento de águas residuais (Fawcett *et al.*, 2022; Molazadeh *et al.*, 2019). Além disso, as microalgas possuem a habilidade de crescer em águas residuais e produzir biomassa de baixo custo para combustíveis, enquanto podem remover ou consumir nutrientes orgânicos e inorgânicos das águas residuais, sendo uma alternativa sustentável (Singh *et al.*, 2020).

As microalgas oferecem muitas vantagens econômicas e ambientais, incluindo a eficiência fotossintética, alta taxa de crescimento além de rápido cultivo, possui vantajosa produção de biodiesel, colaboração para o sequestro de CO₂ e o tratamento de águas residuais (Li *et al.*, 2022c; Muhammad *et al.*, 2021).

As águas residuais provenientes de várias operações entre elas, agrícolas, domésticas e águas industriais que contêm poluentes artificiais, além de produtos químicos inorgânicos e orgânicos que são liberados na atmosfera, representam riscos para a saúde humana e levam a destruição ambiental (Ahmed *et al.*, 2022; Mofijur *et al.*, 2021). Substâncias orgânicas estão presentes em águas residuais como por exemplo, gorduras, carboidratos, proteínas,

aminoácidos e ácidos voláteis, bem como grande quantidade de substâncias inorgânicas como, cloro, sódio, magnésio, enxofre, sais de amônio, arsênio, cálcio e fosfato (Goswami *et al.*, 2021).

A perspectiva baseada em microalgas se estabeleceu como um dos métodos de baixo custo e ecologicamente corretos para tratar águas residuais por meio da remoção de efluentes (Ahmed *et al.*, 2022). Os componentes orgânicos e inorgânicos nas águas residuais, como N, P e substâncias carbonáceas, são utilizados para o crescimento de microalgas e, assim, diminuem as concentrações desses compostos na água. A principal vantagem de integrar microalgas no tratamento de águas residuais é a geração de oxigênio (O₂). Várias bactérias heterotróficas biodegradam hidrocarbonetos e geram O₂ através da fotossíntese (Mohsenpour *et al.*, 2021).

As águas residuais tratadas por algas não requerem uma transição entre múltiplas condições operacionais para remoção de N e P inorgânicos, reduzindo assim a complexidade e o consumo de energia do processo de tratamento. Este método também podendo ser utilizado para remover metais pesados e contaminantes emergentes como fármacos e produtos de cuidados pessoais (Ahmed *et al.*, 2022; Gouveia *et al.*, 2016; Hena *et al.*, 2021).

3.3 Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta importante para avaliar diversos impactos ambientais ao longo da vida de valor do produto, desde a aquisição da matéria-prima, passando por produção, uso e disposição final. Essa ferramenta permite realizar a identificação de fontes de impacto, evita a transferência de carga para outros processos da cadeia de suprimentos e possibilita a comparação de tecnologias ou produtos com base na mesma unidade funcional (Guiton *et al.*, 2022). Conforme a International Organisation for Standardisation (2006) através da Norma 14040, a ACV é a seleção e a avaliação das entradas, das saídas e dos potenciais impactos ambientais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida. Mais especificamente na Norma 14044, um estudo de ACV deve ser composto por quatro fases, sendo elas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação.

A primeira fase intitulada como definição de objetivo e escopo; refere-se à aplicação pretendida, as razões para realizar o estudo, o público-alvo e a quem serão divulgados os

resultados. O escopo inclui o sistema a ser estudado, suas funções e limites, a unidade funcional, as categorias de impacto e metodologias que serão utilizadas, os dados necessários e sua qualidade, premissas, limitações e o formato final da revisão. ACV é um método constante que, ao coletar dados e detalhes necessários, diferentes facetas do escopo podem ser alteradas para atender o objetivo do estudo (Curran, 2017).

A análise do inventário, segunda fase, consiste na avaliação de estoque em que são incluídos todos os dados de entrada e saída do sistema para cada unidade de processo, desde entradas, como, materiais, energia e processos secundários, até saídas, como, produtos, coprodutos, resíduos e emissões para compartimentos ambientais. Este estágio é mais exigente de recursos, pois tem que para atender aos requisitos da fase de meta e escopo, coletando dados sobre fluxos de e para todos os processos em um determinado sistema e tratamento adicional de dados para chegar a emissões abrangentes e inventário de consumo de recursos, e também para modelar o sistema.

A terceira fase da ACV, avaliação de impacto, tem por objetivo esclarecer a significância ambiental do inventário. Com isso, os resultados da categoria fornecem informações sobre as questões ambientais associadas às entradas e saídas do sistema. E por fim, a última fase destina-se a interpretação em que os resultados das etapas anteriores são discutidos para que decisões e recomendações possam ser tomadas (International Organisation for Standardisation, 2006; Pesqueira *et al.*, 2020).

As ACV geram informações sobre diferentes tipos de impactos, como por exemplo, alterações climáticas, eutrofização, toxicidade, destruição da camada de ozônio, esgotamento de recursos, etc., resultantes de uma função do sistema, e dessa maneira, sobre como as decisões podem afetar os impactos e a transferência de encargos ambientais sobre categorias de impacto. As ACV também são frequentemente empregadas para identificar pontos críticos de impacto nas cadeias de abastecimento, isto é, processos que levam a impactos particularmente elevados, e, deste modo, para informar a otimização ambiental dos sistemas de produtos (Pechsiri *et al.*, 2023).

3.3.1 Avaliação do Ciclo de Vida e Microalgas

A aplicação da metodologia ACV, tem se tornado cada vez mais apresentada com alguns estudos avaliando a produção de microalgas como resultado alimentar e energético. A Esta

ferramenta permite quantificar com precisão as emissões para o meio ambiente, destacar pontos críticos no processo de produção e comparar processos de produção (Herrera *et al.*, 2021).

A avaliação geralmente é executada em softwares específicos de ACV, como *SimaPro*. A contribuição dos diferentes estágios do ciclo de vida e entradas e saídas para o processo podem ser avaliadas (Thomassen *et al.*, 2018).

As primeiras avaliações do ciclo de vida publicadas em sistemas de microalgas tiveram foco, sobretudo na produção de biocombustíveis, em geral sendo o biodiesel, como produto final (Tua *et al.*, 2021). A produção de biomassa de microalgas em grande escala envolve diversos tipos de processos unitários, como por exemplo, cultivo, desidratação e colheita, secagem e processamento, no qual cada um tem insumos associados em termos de eletricidade e materiais do ecossistema e também possui a questão ambiental a ser avaliada. O estudo de ACV auxilia a identificar as categorias em um sistema e impulsiona a explorar inovações tecnológicas com redução de energia e pegada ambiental (Yadav *et al.*, 2020). Por meio da avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida, as múltiplas vias de produção de biomassa de microalgas, que consistem em uma combinação de opções de cultivo e colheita, podem ter o potencial de reduzir as demandas críticas de produção de biomassa (Wu *et al.*, 2019).

A fim de estimar o avanço sustentável de um produto em uma nova cadeia produtiva, é essencial contar com uma abordagem padronizada, procedendo a avaliações completamente validadas. Um dos métodos utilizados é a avaliação do ciclo de vida (Herrera *et al.*, 2021).

Em recente estudo realizado por Zhao *et al.* (2022), os impactos ambientais foram avaliados utilizando a ACV, a fim de comparar as condições originais da cultura e condições ótimas.

A unidade funcional foi definida como 1000 L de águas residuais de suinocultura. Os limites do sistema constaram as entradas de substâncias químicas e consumo de energia, as saídas de emissões de substâncias e conversão de biomassa. A análise do inventário incluiu os requisitos de carbono e nitrogênio para o meio de cultura, a substância química usada para ajustar a alcalinidade do meio de cultura e o consumo de eletricidade para extração de lipídios. Foi utilizado neste estudo o método ReCiPe para a avaliação do impacto ambiental total, incluindo o cultivo de microalgas, tratamento de águas residuais e extração de lipídios. Autores destacam que os resultados apresentam que o impacto ambiental negativo foi reduzido em torno de 48% e os benefícios ambientais da geração de energia aumentaram cerca de 49% após a

otimização. Ainda destacam que a avaliação da contribuição de cada processo para a pontuação de impacto ambiental apresentou que as contribuições do cultivo de microalgas e tratamento de águas residuais foram superiores a 75% da pontuação final. Já as mudanças nos impactos ambientais negativos no cultivo de microalgas e tratamento de águas residuais foram associadas às substâncias químicas utilizadas para ajustar o pH e C/N das águas residuais da suinocultura.

Os impactos da extração de lipídios foram relacionados ao consumo de energia elétrica para o procedimento de evaporação. Com base no estudo do impacto ambiental total, apresentou redução de 48% para as condições otimizadas, e o fator atuante para o impacto ambiental foi o consumo de eletricidade associado à extração de lipídios. Também foi salientado que, outra situação provável é que as condições ótimas que levam à taxa máxima de degradação e produção de lipídios trazem maior impacto ambiental. Como desfecho, os autores evidenciam que por meio da melhoria da cultura de microalga utilizada, a aplicação de abordagens de ciclo de vida apontou resultados de avaliação quantificados e identificou os principais fatores contribuintes para o impacto ambiental.

Um estudo realizado por Raghuvanshi *et al.* (2018), foi adotada a metodologia de avaliação do ciclo de vida para comparar o processo de produção de biodiesel de algas cultivadas em águas residuais e doce. A energia e modelos de fluxo de materiais foram criados e avaliados para potenciais de impactos nocivos ao meio ambiente. Autores relatam em seu estudo, que a utilização de águas residuais para produção de biodiesel é uma solução sustentável viável em vez de usar água doce.

Pechsiri *et al.* (2023) em seu recente estudo, utilizou a ACV para comparar o desempenho ambiental de reatores convencionais e reator fechado proposto com iluminação interna, onde na ACV foram expressos os impactos por kg de bioestimulante para a colheita de *Scenedesmus almeriensis*. Cenários de simbiose urbano-industrial também são retratados no estudo utilizando águas residuais e gases de combustão de incineradores. Os resultados mostram que sob insumos sintéticos de nutrientes e carbono nas operações piloto, a demanda cumulativa de energia para os novos fotobiorreatores é semelhante à dos biorreatores convencionais de horizonte empilhados verticalmente, mas é substancialmente mais exigente do que os reatores abertos convencionais. Autores destacam que, ao aproveitar fontes de energia renováveis o processo de fotossíntese para consumir fluxos de resíduos em cenários de simbiose urbano-industrial, o novo fotobiorreator foi capaz de alcançar melhorias de até 80% em diversas categorias de impacto, por exemplo, eutrofização e alterações climáticas. Os

créditos de mitigação de impacto por kg de biomassa DWT em todos os cenários energéticos em simbiose chegam a $\approx 1,8$ kg CO₂ eq e $\approx 0,09$ kg PO₄ eq. Isto destaca que os fotobiorreatores fechados e iluminados internamente podem ser competitivos com os reatores convencionais e possuem potencial para aproveitar a fotossíntese para reduzir os encargos ambientais num cenário de simbiose urbano-industrial.

3.4 Ferramentas de Avaliação de Impacto Ambiental – Uma abordagem Bibliométrica

Na Figura 1, pode-se observar um mapa bibliométrico gerado no software Vosviewer 1.6.19. Está é uma análise bibliométrica realizada a partir da pesquisa nas bases *Scopus*, *Web of Science* e *Science direct*, com os documentos associados a avaliação de impactos ambientais e produção de microalgas ("microalgae cultivation" OR "microalgae production") AND ("environmental impacts evaluation" OR "environmental impacts assessment"). Foram encontrados 138 documentos obtidos na pesquisa com a limitação para artigos de pesquisa publicados nos últimos 5 anos. Nesta Figura 1 destacam-se os *clusters* “microalgae”, “LCA”, “environmental impacts”, “biomass”, “algae”, “microorganisms”, “biogás”, “anaerobic digestion”, “biofuel”, “energy”, “biodiesel”, “energy fuels”, “engineering”, “photobioreactor”, “sustanably”, “wastewater”, “biorefinary”, “cultivation” e “enviromental impact assessmen”.

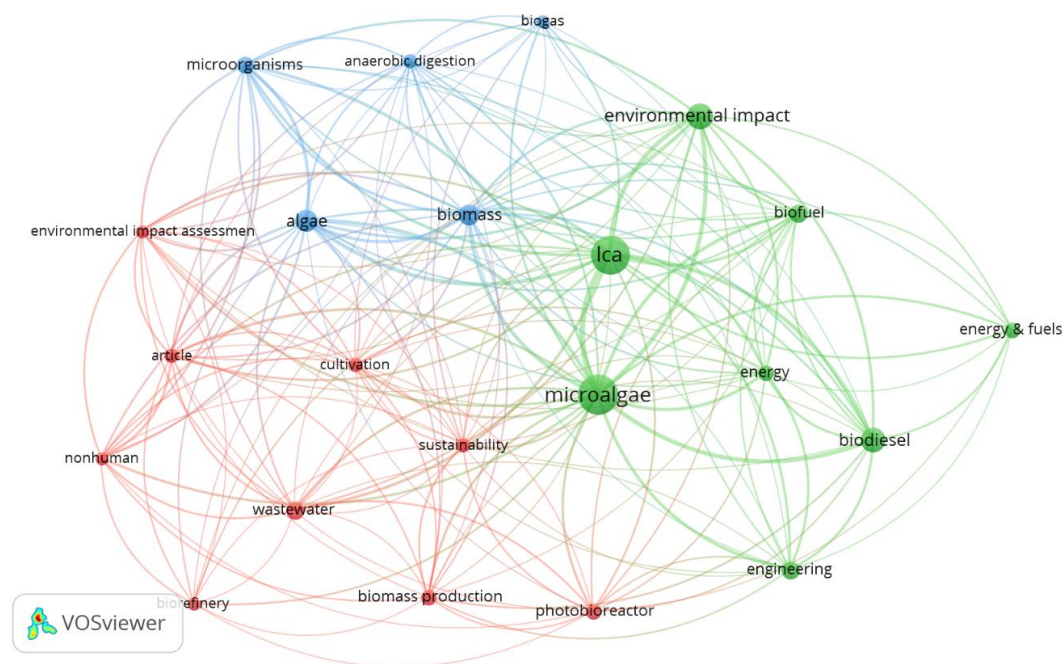


Figure 1. Mapa bibliométrico da produção científica sobre microalgas e avaliação de impactos ambientais para os últimos 5 anos, considerando a presença das palavras ("microalgae cultivation" OR "microalgae production") AND ("environmental impacts evaluation" OR "environmental impacts assessment") nas bases *Science direct*, *Scopus* e *Web of Science* disponibilizadas no Sistema de Periódicos da Capes.

Esta imagem de impactos ambientais demonstra a importância do ACV, visto que a avaliação do ciclo de vida está inteiramente ligada a pesquisas realizadas com microalgas. Na pesquisa com os termos voltados ao cultivo e aos impactos ambientais, observa-se que os 138 documentos de pesquisa encontrados estão interligados, onde o termo “LCA” e “microalgae” estão em evidência mostrando-se maiores que os outros pontos das palavras-chave pesquisadas.

Com isso, fica evidente a importância da ACV como uma ferramenta para reconhecer os impactos ambientais da produção de microalgas. Os principais métodos de avaliação de impactos encontrados nesta pesquisa podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1. Principais métodos, avaliações de impactos, microalgas e tipos de cultivos encontrados na literatura.

Ano	Método de avaliação de impactos	Microalga / tipo de cultivo	Referência
2023	ACV - LCIA, GaBi 10.6.1.35	<i>Nannochloropsis salina</i> (microalga marinha) / cultivo em lagoas abertas	(Moradiya; Marathe, 2023)
2022	ACV - ReCiPe 2016	<i>A. platensis</i> (Spirulina) / lagoa de algas de alta taxa / sistema (UASB)	(Arashiro <i>et al.</i> , 2022)
	ACV – não consta método	<i>Desmodesmus</i> sp. EJ 8–10 / cultivo em fotobiorreator fechado	(Li <i>et al.</i> , 2022a)
	ACV - CML-IA V3.05/EU25 - software SimaPro	<i>Chlorella pyrenoidosa</i> / cultivo cíclico de microalgas	(Sun <i>et al.</i> , 2022)
	ACV - ReCiPe	<i>Scenedesmus</i> sp. / cultivo em fotobiorreator fechado e cultivo em lagoas abertas	(Magalhães <i>et al.</i> , 2022)
	ACV - ReCipe	<i>Chlorella sorokiniana</i> sp. ZM-5 / cultivo em fotobiorreator fechado	(Zhao <i>et al.</i> , 2022)
2021	ACV - IMPACT2002 +	<i>Acutodesmus obliquus</i> (SAG 276–10) / Cultivo em fotobiorreator tubular	(Sandmann <i>et al.</i> , 2021)
	ACV – ReCipe	<i>Chlorella vulgaris</i> / cultivo em lagoas abertas, UASB	(Magalhães <i>et al.</i> , 2021)
2020	ACV - Midpoint+v1.10	<i>Tetraselmis suecica</i> / Sistema de cultivo em lagoas Raceway	(Morales <i>et al.</i> , 2020)
2019	ACV – não consta	<i>Chlorella vulgaris</i> / 3 sistemas de cultivo: raceway, coluna de bolhas e tubular.	(Dasan <i>et al.</i> , 2019)

Na Figura 2, pode ser visto um mapa bibliométrico gerado a partir de uma pesquisa realizada pelos autores nas seguintes bases de dados, *Science Direct (Elsevier)*, *Scopus* e *Web of Science*. Foi realizada uma combinação de palavras-chave consideradas mais relevantes para a pesquisa voltadas ao assunto de ACV e microalgas. A pesquisa foi baseada nos termos “lca” AND (“microalgae production” OR “microalgae cultivation”). O total de referências encontradas foi de 323, retirando artigos de revisão e as duplicidades.

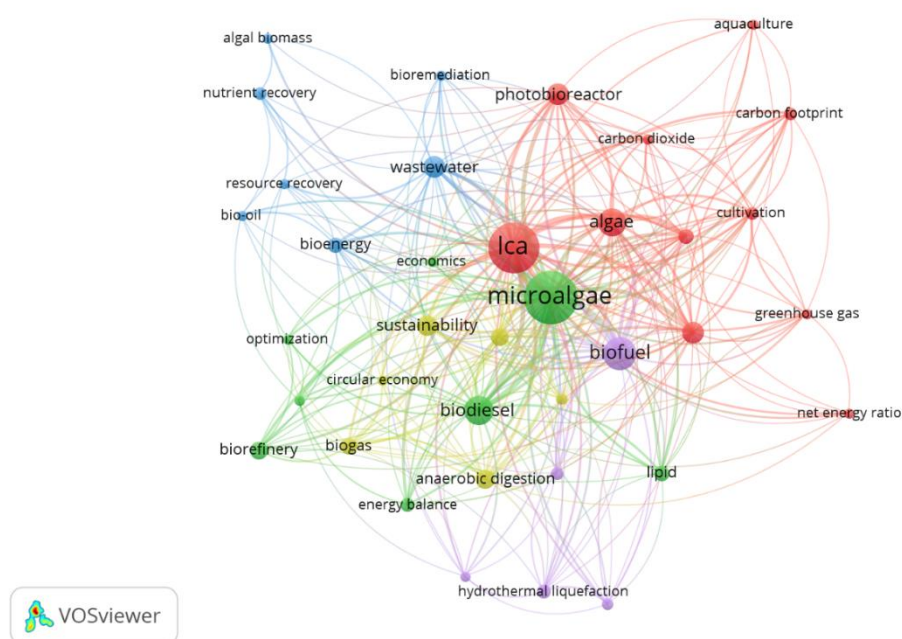


Figura 2. Expressões mais citadas com a pesquisa nos termos “lca” AND ("microalgae production" OR "microalgae cultivation") no período de 2002 a 2022.

Utilizando esses mesmos dados, observa-se na Figura 3 o número de artigos publicados por ano. Nesta figura pode-se observar que o primeiro artigo de pesquisa publicado relacionado ao assunto ACV (do inglês, LCA) e microalgas, foi em 2002. A partir de 2010 teve crescimento, decaiu, mas voltou a crescer e teve seu pico de pesquisas em 2021.

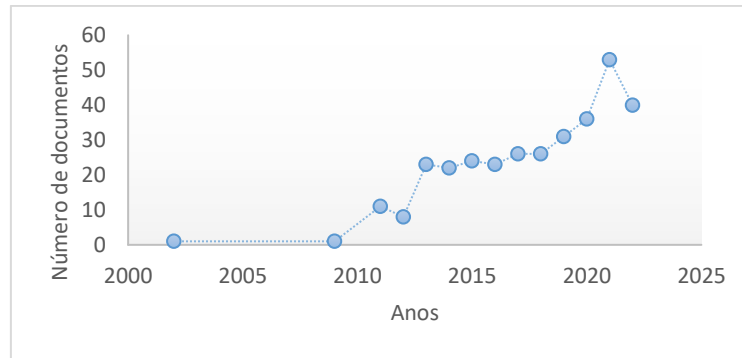


Figura 3. Número de documentos publicados por ano, com a busca realizadas nos termos “lca” AND ("microalgae production" OR "microalgae cultivation") obtido com base na pesquisa realizada nas de dados, *Science Direct (Elsevier)*, *Scopus* e *Web of Science*.

4 METODOLOGIA

Os resultados e discussões desta tese são apresentados na forma de artigos científicos. Na Figura 4, pode ser vista de forma resumida os artigos elaborados desta tese. A seguir será brevemente apresentada a metodologia desta tese. As informações completas da metodologia estão descritas nos artigos.

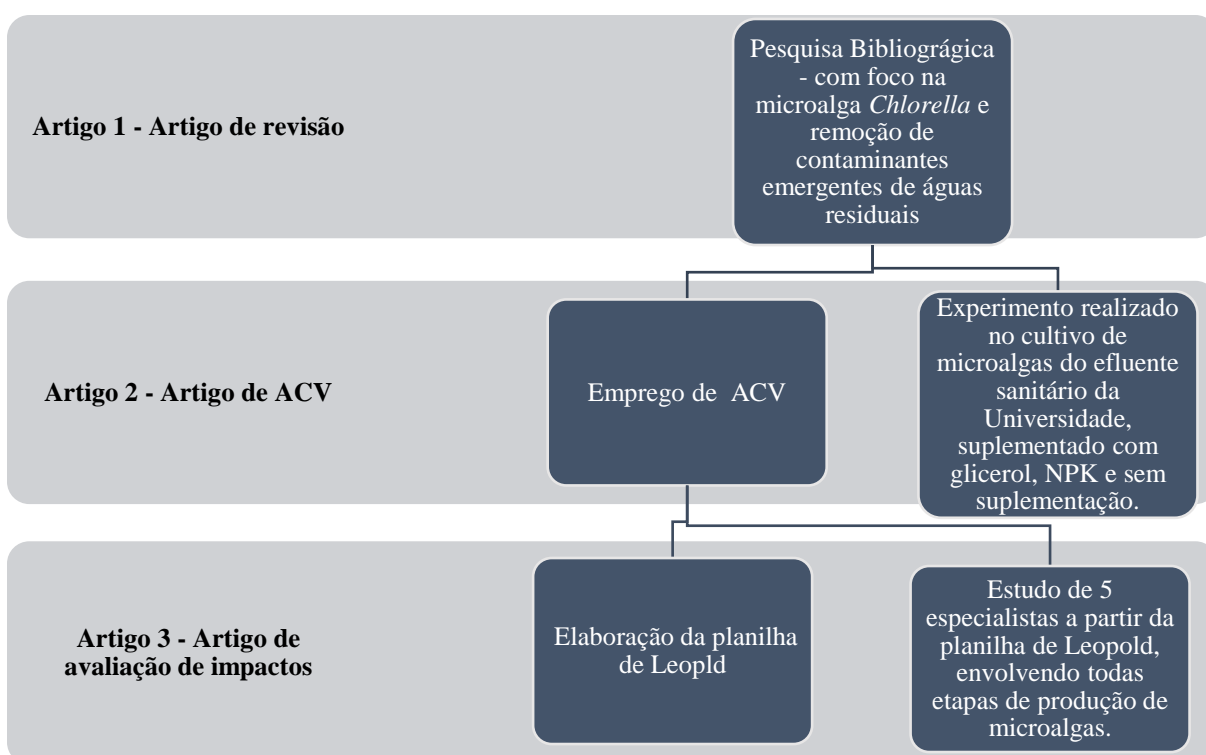


Figura 4. Resumo dos artigos elaborados na tese.

O primeiro artigo refere-se a uma revisão bibliográfica para um artigo de revisão sobre o cultivo de microalgas do gênero *Chlorella* juntamente com a remoção de contaminantes orgânicos de águas residuais.

Para o segundo artigo foi realizado uma ACV da produção de microalgas provenientes do efluente da estação de tratamento da Universidade de Santa Cruz do Sul- UNISC, cultivadas em fotobiorreatores tubulares de 3 L com suplementação de glicerol. O método de avaliação do ciclo de vida foi utilizado para avaliar os impactos ambientais de todas as etapas de produção de microalgas em fotobiorreator tubular. A parte experimental foi realizada no mestrado em

laboratório no período de julho de 2015 a julho de 2016, conforme dissertação escrita pela autora, podendo ser encontrada no site do Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental da UNISC. O fotobiorreator utilizado na produção das microalgas possuía as características, tamanho, consumo de energia e outros atributos necessários para a avaliação. O escopo da análise compreendeu as etapas de produção de microalgas e separação de biomassa. A ACV foi realizada com o software *SimaPro*. Os potenciais impactos ambientais decorrentes da ACV para produção de 1 kg de biomassa considerando cultivo, separação e secagem foram avaliados nos três cenários. Todas as entradas e saídas foram encontradas na base de dados *Ecoinvent 3.6*. O uso do glicerol como fonte de carbono no cultivo de microalgas, foi avaliado visando principalmente dar um destino final ao glicerol residual da indústria de biodiesel.

Um terceiro artigo foi elaborado para a avaliação de impactos utilizando a matriz de Leopold. A matriz de Leopold foi construída sendo adaptada com base em diferentes processos e cultivos de microalgas, desde o início até o produto final, apresentando as principais etapas da produção de microalgas por diferentes sistemas. Estas etapas foram subdivididas em ações que são comumente realizadas. As dimensões de impactos analisadas foram os meios de água, ar, solo, recursos utilizados, flora, fauna, meios econômicos, social e qualidade do produto final. Para o reconhecimento dos impactos positivos e negativos identificados na planilha com auxílio de especialistas em produção de microalgas, seguindo o critério de Valor, ordem, espaço, tempo, dinâmica e plasticidade, indicando se é de curto, longo ou médio prazo e se é um impacto positivo ou negativo, como mostra a Figura 5.

Meios analisados		Atividade impactante																	preenchimento automático																
		Solo				Água				Atmosfera			Recursos		Flora		Fauna	Econômicos		social	qualidade do produto final			Negativa	Positiva										
		propriedades físicas	propriedades químicas	uso	contaminação	pH	temperatura	nutrientes	uso	organolépticas (cor, odor)	substâncias orgânicas	metais	ruído	partículas	Material particulado	contaminantes	Minerais	energia	água	apicultura	fauna	ferozes	emprego e renda	custos	saúde	quantidade de vida	segurança para indústria	amenidade urbana	amenidade humana	soluções agrícolas	quantidade de água final				
Tipo de meio	convencional/medium	0	5	0	6	4	4	0	7	0	4	0	4	0	0	0	0	11	3	3	5	8	0	10	3	10	0	10	10	10	10	4	73	74	
	RFK/medium	0	5	0	6	4	4	0	7	0	4	0	4	0	0	0	0	11	3	3	5	8	0	10	3	10	0	10	10	10	10	4	88	84	
	saatary/offbeat	0	4	0	6	7	4	0	4	0	4	4	6	5	0	0	0	3	3	3	8	4	7	4	10	3	5	0	10	10	0	0	10	71	82
	industrial/offbeat	0	5	0	6	8	4	0	4	0	5	4	7	6	0	0	0	3	3	3	8	4	8	9	10	3	10	0	10	10	0	0	10	98	92
	saatary/offbeat + org. carbon	0	6	0	6	9	4	0	7	0	4	5	6	6	0	0	0	3	3	3	8	5	9	5	10	3	10	0	10	10	0	0	10	82	72
saatary/offbeat + saorg. Carbon	0	5	0	6	8	4	0	4	0	4	4	5	5	0	0	0	3	3	3	8	4	8	4	10	3	5	0	10	10	0	0	10	73	94	

TABELAS DE VALORAÇÃO DOS IMPACTOS (PREENCHIMENTO PELO ESPECIALISTA)

Observação importante: Preenchimento obrigatório de Ca (caráter) e I, Co, D e R devem ser preenchidos para a análise identificada como de caráter positivo ou negativo.

convencional/medium	Caráter (Ca)																	I	Co	D	R	N	P	LEGENDA									
	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	-1	0	-1	0	0	0	0	-1	-1	-1								-1	0	1	-1	0	1	1	1	1
Importância (I)	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	3	2	3	3	1	2	3	2	3	1	3	2	3	1	3	3	3	3	3	1	23	* 21
Cobertura (Co)	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	3	3	2	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	3	3	3	1	23	* 22
Duração (D)	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	1	2	2	3	1	2	2	2	2	2	1	21	* 16	
Reversibilidade (R)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	16	* 15	
Total	0	-5	0	-6	-4	-4	0	-7	0	-4	0	-4	0	0	0	0	-11	-9	-9	5	-8	0	10	3	-10	0	10	10	10	10	10	-4	

Total corresponde a Impacto total (IT) = Ca*(I+Co+D+R)

RFK/medium	Caráter (Ca)																	I	Co	D	R	N	P	LEGENDA								
	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	-1	0	0	0	0	-1	-1	-1								-1	0	1	-1	0	1	1	1
Importância (I)	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	3	2	3	3	1	2	3	2	3	1	3	2	3	1	3	3	3	3	1	23	* 24
Cobertura (Co)	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	3	3	2	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	3	3	1	23	* 25
Duração (D)	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	1	2	2	3	1	2	2	2	2	1	22	* 18	
Reversibilidade (R)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	16	* 17
Total	0	-5	0	-6	-4	-4	0	-7	0	-4	0	-4	0	0	0	0	-9	-8	-9	5	-8	0	10	3	-5	10	10	10	10	10	10	-4

Total corresponde a Impacto total (IT) = Ca*(I+Co+D+R)

Figura 5. Matriz utilizada para a obtenção dos impactos com os especialistas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados desta tese estão nos artigos, onde o **artigo 1** é de revisão, no qual foi abordado a importância das microalgas para a remoção de contaminantes emergentes de águas residuárias. O artigo foi redigido com base no serviço ambiental para a remoção de poluentes emergentes pela microalga do gênero *Chlorella*. Considerou-se que a microalga cresce por modo mixotrófico, explorando a bioadsorção, biodegradação e bioacumulação, no qual se mostrou ainda ser um desafio quando se refere à remediação de efluentes com contaminantes, em especial fármacos e agrotóxicos.

O **artigo 2**, é a aplicação da ACV na produção de biomassa, considerando o benefício ambiental que esta biomassa pode trazer ao ser produzida em efluente e com suplementação de uma fonte de carbono. Para tanto, o estudo experimental avaliado foi a produção de biomassa de microalgas em efluente sanitário com suplementação do glicerol. Ambientalmente, remover carbono, nitrogênio e fósforo é uma redução dos impactos ambientais de um efluente e adicionar mais um insumo (glicerol), levou a mais biomassa produzida e conseqüente menores valores nas categorias de impacto analisadas por ACV. Contudo, a avaliação de cada ação e seus riscos, não contabilizam neste artigo. Por isso, o **artigo 3** foi elaborado contendo esta abordagem.

No **artigo 3**, foi realizada uma avaliação das variáveis que poderiam envolver a produção de microalgas e, com base nisso, foi construída uma matriz de interação, a qual foi preenchida por 5 especialistas. A análise englobando meio de cultivo, modo metabólico, suplementação, centrifugação, secagem, limpeza, acondicionamento, recirculação e descarte quando analisados quanto a aspectos de impactos ambientais ao solo, água, atmosfera, recursos, flora, fauna, econômicos, social e qualidade de produto final. Os dados foram avaliados por uma ferramenta multivariada e foi observado no dendrograma que o conjunto dos dados dividiu em duas ramificações, estando uma delas ligada a fatores econômicos, sociais e qualidade do produto final, e a outra ramificação associada as atividades impactantes podendo gerar impacto direto a água, solo, atmosfera, fauna e flora.

Os conhecimentos apresentados nos 3 artigos compõem os potenciais ambientais das microalgas, considerando remoção de contaminantes orgânicos, remoção de nutrientes e avaliação ambiental por ACV do sistema, considerando o tratamento de efluente e uma

avaliação geral da produção de microalgas buscando identificar gargalos do sistema que possam reconhecer pontos a serem melhorados para reduzir os impactos ambientais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da pesquisa realizada com/sobre as publicações selecionadas foi possível compreender que as microalgas do gênero *Chlorella* são eficazes na remoção de poluentes orgânicos em águas residuais especialmente quando empregado o modo mixotrófico por bioadsorção, bioacumulação e bioabsorção ou biodegradação. No entanto, a remoção de compostos orgânicos como agrotóxicos, fármacos, entre outros ainda apresentam certos desafios, tendo em vista que pesquisadores buscam meios sustentáveis para a remoção desses contaminantes.

Na análise do ciclo de vida no cultivo de *Chlorella* sp. em três cenários: solução NPK, efluente sanitário e efluente sanitário com suplementação de glicerol foi possível identificar que o cultivo com efluente sanitário utilizando como suplemento glicerol gerou menores impactos na produção de biomassa quando comparado aos outros cultivos, entretanto depende da finalidade em que a biomassa será utilizada.

Em um terceiro momento, a fim de avaliar os impactos ambientais do processo de cultivo das microalgas, em especial a *Chlorella*, com diferentes tipos de cenários, empregando o método da matriz de avaliação de impactos ambiental rápida baseada na matriz de Leopold, foi possível identificar que a utilização de efluentes em geral no cultivo de microalgas apesar de apresentar pontos positivos também pode representar um risco maior quando comparado ao cultivo em meios convencionais. Alguns problemas poderão ser enfrentados como derramamentos em solo podendo ocasionar contaminação, assim como risco à saúde do trabalhador que irá manusear com estes efluentes, e efluentes podendo conter contaminantes emergentes, agentes biológicos nocivos. Para isso é a tomada de decisão a partir de especialistas visa reduzir os impactos ambientais, sendo de extrema importância para delinear um caminho mais sustentável na produção de microalgas.

7 REFERÊNCIAS

ADENIYI, O. M. *et al.* Algae biofuel: Current status and future applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 316-335, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.067>

ADHIKARI, S.; MANDAL, R. N. Effects of Climate Change on the Use of Wastewater for Aquaculture Practices. *In*: SINGH, R. P.; KOLOK, A. S., *et al* (Ed.). **Water Conservation, Recycling and Reuse: Issues and Challenges**. Singapore: Springer Singapore, 2019. p. 107-119.

AHMADZADEH, S.; DOLATABADI, M. In situ generation of hydroxyl radical for efficient degradation of 2,4-dichlorophenol from aqueous solutions. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 6, p. 340, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6697-0>

AHMED, S. F. *et al.* Progress and challenges of contaminate removal from wastewater using microalgae biomass. **Chemosphere**, v. 286, p. 131656, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131656>

AL-KHALAIFAH, H.; UDDIN, S. Assessment of Sargassum sp., Spirulina sp., and Gracilaria sp. as Poultry Feed Supplements: Feasibility and Environmental Implications. **Sustainability**, v.14, n. 14, DOI: 10.3390/su14148968.

ALI, M. E. M. *et al.* Removal of pharmaceutical pollutants from synthetic wastewater using chemically modified biomass of green alga *Scenedesmus obliquus*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 151, p. 144-152, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.012>

ALI, S. *et al.* Resource recovery from industrial effluents through the cultivation of microalgae: A review. **Bioresource Technology**, v. 337, p. 125461, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125461>

ALIYU, A. *et al.* Microalgae for biofuels via thermochemical conversion processes: A review of cultivation, harvesting and drying processes, and the associated opportunities for integrated production. **Bioresource Technology Reports**, v. 14, p. 100676, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100676>

ALTOWAYTI, W. *et al.* The Role of Conventional Methods and Artificial Intelligence in the Wastewater Treatment: A Comprehensive Review. **Processes**, v. 10, p. 1832, 2022. [10.3390/pr10091832](https://doi.org/10.3390/pr10091832)

ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, A. *et al.* The potential of wastewater grown microalgae for agricultural purposes: Contaminants of emerging concern, heavy metals and pathogens assessment. **Environmental Pollution**, v. 324, p. 121399, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121399>

AMARAL, E. *et al.* Sanitary Wastewater Supplemented with Glycerol to Obtain Lipid-Rich Microalgal Biomass. **Journal of Environmental Health and Sustainable Development**, v. 7, 2022. 10.18502/jehsd.v7i4.11431

ANGULO, E. *et al.* Bioremediation of Cephalixin with non-living *Chlorella* sp., biomass after lipid extraction. **Bioresource Technology**, v. 257, p. 17-22, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.079>

ANKUSH *et al.* Membrane Technologies for the Treatment of Pharmaceutical Industry Wastewater. In: BUI, X.-T.; CHIEMCHAI SRI, C., *et al* (Ed.). **Water and Wastewater Treatment Technologies**. Singapore: Springer Singapore, 2019. p. 103-116.

ARASHIRO, L. T. *et al.* Life cycle assessment of microalgae systems for wastewater treatment and bioproducts recovery: Natural pigments, biofertilizer and biogas. **Science of The Total Environment**, v. 847, p. 157615, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157615>

ARISEKAR, U. *et al.* Bioaccumulation of organochlorine pesticide residues (OCPs) at different growth stages of pacific white leg shrimp (*Penaeus vannamei*): First report on ecotoxicological and human health risk assessment. **Chemosphere**, v. 308, p. 136459, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136459>

AVILA, R. *et al.* Biodegradation of hydrophobic pesticides by microalgae: Transformation products and impact on algae biochemical methane potential. **Science of The Total Environment**, v. 754, p. 142114, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142114>

BARROSO JÚNIOR, J. C. A. *et al.* Evaluation of UASB effluent post-treatment in pilot-scale by microalgae HRP and macrophytes pond for nutrient recovery. **Journal of Cleaner Production**, v. 357, p. 131951, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131951>

BHATTACHARYA, M.; GOSWAMI, S. Microalgae – A green multi-product biorefinery for future industrial prospects. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. p. 101580, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101580>

BUITRÓN, G. *et al.* 9 - Biohydrogen production from microalgae. In: GONZALEZ-FERNANDEZ, C. e MUÑOZ, R. (Ed.). **Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts**: Woodhead Publishing, 2017. p. 209-234.

CAETANO, N. *et al.* Influence of cultivation conditions on the bioenergy potential and bio-compounds of *Chlorella vulgaris*. **Energy Reports**, v. 6, p. 378-384, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.08.076>

CAI, Y. *et al.* Heterotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* using broken rice hydrolysate as carbon source for biomass and pigment production. **Bioresource Technology**, v. 323, p. 124607, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124607>

CANELLI, G. *et al.* Chlorella vulgaris in a heterotrophic bioprocess: Study of the lipid bioaccessibility and oxidative stability. **Algal Research**, v. 45, p. 101754, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101754>

CASTILLO, T. *et al.* Mixotrophic cultivation of microalgae: An alternative to produce high-value metabolites. **Biochemical Engineering Journal**, v. 176, p. 108183, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108183>

CECCHIN, M. *et al.* Molecular basis of autotrophic vs mixotrophic growth in Chlorella sorokiniana. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 2018. 10.1038/s41598-018-24979-8

CELENTE, G. *et al.* LCA FOR ENERGY SYSTEMS AND FOOD PRODUCTS Life cycle assessment of microalgal cultivation medium: biomass, glycerol, and beta-carotene production by Dunaliella salina and Dunaliella tertiolecta. v. 2023.

CELENTE, G. D. S. *et al.* Organic Carbon Is Ineffective in Enhancing the Growth of Dunaliella. **Fermentation**, v. 8, n. 6, p. 261, 2022. <https://www.mdpi.com/2311-5637/8/6/261>

CHAKRABORTY, S. *et al.* Rapid impact assessment matrix for municipal material disposal for Agartala City- a case study. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 3293-3299, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.391>

CHANG, J. S. *et al.* 11 - Photobioreactors. In: LARROCHE, C.; SANROMÁN, M. Á., *et al.* (Ed.). **Current Developments in Biotechnology and Bioengineering**; Elsevier, 2017. p. 313-352.

CHAUDHARY, S.; RAWAL, N. Rapid impact assessment matrix, sustainable analysis and environmental performance index-based approach for selection of wastewater treatment units. **International Journal of Environmental Technology and Management**, v. 23, n. 1, p. 33-49, 2020. 10.1504/ijetm.2020.110157

CHEAH, W. Y. *et al.* Enhancing biomass and lipid productions of microalgae in palm oil mill effluent using carbon and nutrient supplementation. **Energy Conversion and Management**, v. 164, p. 188-197, 2018. 10.1016/j.enconman.2018.02.094

CHEN, C. Y. *et al.* A highly efficient two-stage cultivation strategy for lutein production using heterotrophic culture of Chlorella sorokiniana MB-1-M12. **Bioresource Technology**, v. 253, p. 141-147, 2018a. 10.1016/j.biortech.2018.01.027

CHEN, J. *et al.* A comparative study between fungal pellet- and spore-assisted microalgae harvesting methods for algae bioflocculation. **Bioresource Technology**, v. 259, p. 181-190, 2018b. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.040>

CHENG, C.-L. *et al.* Effect of pH on biomass production and carbohydrate accumulation of Chlorella vulgaris JSC-6 under autotrophic, mixotrophic, and photoheterotrophic cultivation. **Bioresource Technology**, v. 351, p. 127021, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127021>

CHENG, D. L. *et al.* Microalgae biomass from swine wastewater and its conversion to bioenergy. **Bioresource Technology**, v. 275, p. 109-122, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.019>

CHEW, K. W. *et al.* Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 91, p. 332-344, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.05.039>

CURRAN, M. A. Overview of goal and scope definition in life cycle assessment. *In: Goal and scope definition in life cycle assessment*: Springer, 2017. p. 1-62.

DANESHVAR, E. *et al.* Versatile applications of freshwater and marine water microalgae in dairy wastewater treatment, lipid extraction and tetracycline biosorption. **Bioresource Technology**, v. 268, p. 523-530, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.032>

DARIO, P. P. *et al.* Lumped intracellular dynamics: Mathematical modeling of the microalgae *Tetradismus obliquus* cultivation under mixotrophic conditions with glycerol. **Algal Research**, v. 57, p. 102344, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102344>

DASAN, Y. K. *et al.* Life cycle evaluation of microalgae biofuels production: Effect of cultivation system on energy, carbon emission and cost balance analysis. **Science of The Total Environment**, v. 688, p. 112-128, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.181>

DE SOUZA CELENTE, G. *et al.* Algae turf scrubber and vertical constructed wetlands combined system for decentralized secondary wastewater treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 10, p. 9931-9937, 2019. [10.1007/s11356-019-04425-6](https://doi.org/10.1007/s11356-019-04425-6)

DE SOUZA, D. S. *et al.* Enhanced *Arthrospira platensis* Biomass Production Combined with Anaerobic Cattle Wastewater Bioremediation. **BioEnergy Research**, v. 15, n. 1, p. 412-425, 2022. [10.1007/s12155-021-10258-4](https://doi.org/10.1007/s12155-021-10258-4)

DE SOUZA, L. *et al.* Biopolishing sanitary landfill leachate via cultivation of lipid-rich *Scenedesmus* microalgae. **Journal of Cleaner Production**, v. 303, p. 127094, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127094>

DENG, X. *et al.* Biomass production and biochemical profiles of a freshwater microalga *Chlorella kessleri* in mixotrophic culture: Effects of light intensity and photoperiodicity. **Bioresource Technology**, v. 273, p. 358-367, 2019. [10.1016/j.biortech.2018.11.032](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.032)

DEPRÁ, M. C. *et al.* Environmental impacts on commercial microalgae-based products: Sustainability metrics and indicators. **Algal Research**, v. 51, p. 102056, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102056>

DO, C. V. T. *et al.* Microalgae and bioremediation of domestic wastewater. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 34, p. 100595, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100595>

DRAGONE, G. Challenges and opportunities to increase economic feasibility and sustainability of mixotrophic cultivation of green microalgae of the genus *Chlorella*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 160, p. 112284, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112284>

EBHODAGHE, S. O. *et al.* Biofuels from microalgae biomass: A review of conversion processes and procedures. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 15, n. 2, p. 103591, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103591>

EVANS, L. *et al.* Effect of organic carbon enrichment on the treatment efficiency of primary settled wastewater by *Chlorella vulgaris*. **Algal Research**, v. 24, p. 368-377, 2017. 10.1016/j.algal.2017.04.011

FAWCETT, C. A. *et al.* Microalgae as an alternative to oil crops for edible oils and animal feed. **Algal Research**, v. 64, p. 102663, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102663>

FRET, J. *et al.* Implementation of flocculation and sand filtration in medium recirculation in a closed microalgae production system. **Algal Research**, v. 13, p. 116-125, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.11.016>

GANESH SARATALE, R. *et al.* Microalgae cultivation strategies using cost-effective nutrient sources: Recent updates and progress towards biofuel production. **Bioresource Technology**, v. 361, p. 127691, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127691>

GAO, F. *et al.* Effect of organic carbon to nitrogen ratio in wastewater on growth, nutrient uptake and lipid accumulation of a mixotrophic microalgae *Chlorella* sp. **Bioresource Technology**, v. 282, p. 118-124, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.011>

GE, S. *et al.* Centrate wastewater treatment with *Chlorella vulgaris*: Simultaneous enhancement of nutrient removal, biomass and lipid production. **Chemical Engineering Journal**, v. 342, p. 310-320, 2018. 10.1016/j.cej.2018.02.058

GIRARD, J.-M. *et al.* Mixotrophic cultivation of green microalgae *Scenedesmus obliquus* on cheese whey permeate for biodiesel production. **Algal Research**, v. 5, p. 241-248, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.03.002>

GOJKOVIC, Z. *et al.* Northern green algae have the capacity to remove active pharmaceutical ingredients. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 170, p. 644-656, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.032>

GONCALVES, G.; ABRAHAO, R. Evaluation of environmental impacts of a building-integrated photovoltaic system by the RIAM method. **International Journal of Global Warming**, v. 29, n. 3, p. 173-193, 2023. 10.1504/ijgw.2023.129478

GOSWAMI, R. K. *et al.* Microalgae-based biorefineries for sustainable resource recovery from wastewater. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, p. 101747, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101747>

GOUVEIA, L. *et al.* Microalgae biomass production using wastewater: Treatment and costs: Scale-up considerations. **Algal Research**, v. 16, p. 167-176, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.03.010>

GUIFON, M. *et al.* Comparative Life Cycle Assessment of a microalgae-based oil metal working fluid with its petroleum-based and vegetable-based counterparts. **Journal of Cleaner Production**, v. 338, p. 130506, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130506>

GUPTA, P. L. *et al.* Enhanced biomass production through optimization of carbon source and utilization of wastewater as a nutrient source. **Journal of Environmental Management**, v. 184, p. 585-595, 2016a. 10.1016/j.jenvman.2016.10.018

GUPTA, S. K. *et al.* Dual role of *Chlorella sorokiniana* and *Scenedesmus obliquus* for comprehensive wastewater treatment and biomass production for bio-fuels. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 255-264, 2016b. 10.1016/j.jclepro.2015.12.040

HAMMED, A. *et al.* Growth regime and environmental remediation of microalgae. **ALGAE**, v. 31, p. 189-204, 2017. 10.4490/algal.2016.31.8.28

HARIZ, H. B. *et al.* Potential of the microalgae-based integrated wastewater treatment and CO₂ fixation system to treat Palm Oil Mill Effluent (POME) by indigenous microalgae; *Scenedesmus* sp. and *Chlorella* sp. **Journal of Water Process Engineering**, v. 32, p. 100907, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100907>

HASHEMIAN, M. *et al.* Chapter 20 - Production of Microalgae-Derived High-Protein Biomass to Enhance Food for Animal Feedstock and Human Consumption. In: HOSSEINI, M. (Ed.). **Advanced Bioprocessing for Alternative Fuels, Biobased Chemicals, and Bioproducts**: Woodhead Publishing, 2019. p. 393-405.

HENA, S. *et al.* Removal of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) from wastewater using microalgae: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 403, p. 124041, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124041>

HENA, S. *et al.* Dairy farm wastewater treatment and lipid accumulation by *Arthrospira platensis*. **Water Research**, v. 128, p. 267-277, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.10.057>

HERNÁNDEZ, D. *et al.* Microalgae cultivation in high rate algal ponds using slaughterhouse wastewater for biofuel applications. **Chemical Engineering Journal**, v. 285, p. 449-458, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.072>

HERRERA, A. *et al.* Sustainable production of microalgae in raceways: Nutrients and water management as key factors influencing environmental impacts. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125005, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125005>

HU, J. *et al.* Heterotrophic cultivation of microalgae for pigment production: A review. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 1, p. 54-67, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.09.009>

HU, N. *et al.* Removal of atrazine in catalytic degradation solutions by microalgae *Chlorella* sp. and evaluation of toxicity of degradation products via algal growth and photosynthetic activity. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 207, p. 111546, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111546>

HULTBERG, M. *et al.* Effect of microalgal treatments on pesticides in water. **Environmental Technology**, v. 37, n. 7, p. 893-898, 2016. 10.1080/09593330.2015.1089944

IJÄS, A. *et al.* Developing the RIAM method (rapid impact assessment matrix) in the context of impact significance assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 30, n. 2, p. 82-89, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2009.05.009>

INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION, I. Environmental management – life cycle impact assessment – requirements and guidelines. 2006.

JALILIAN, N. *et al.* Macro and Micro Algae in Pollution Control and Biofuel Production – A Review. **ChemBioEng Reviews**, v. 7, 2020. 10.1002/cben.201900014

JAN, A. T. *et al.* Prospects for Exploiting Bacteria for Bioremediation of Metal Pollution. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 44, n. 5, p. 519-560, 2014. <https://doi.org/10.1080/10643389.2012.728811>

KALRA, R. *et al.* Microalgae bioremediation: A perspective towards wastewater treatment along with industrial carotenoids production. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, p. 101794, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101794>

KAZEMI, N. *et al.* Environmental life cycle assessment and energy-economic analysis in different cultivation of microalgae-based optimization method. **Results in Engineering**, v. 19, p. 101240, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101240>

KHOR, W. H. *et al.* Microalgae cultivation in offshore floating photobioreactor: State-of-the-art, opportunities and challenges. **Aquacultural Engineering**, v. 98, p. 102269, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102269>

KIKI, C. *et al.* Dissipation of antibiotics by microalgae: Kinetics, identification of transformation products and pathways. **Journal of Hazardous Materials**, v. 387, p. 121985, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121985>

KIST, L. T. *et al.* Cleaner production in the management of water use at a poultry slaughterhouse of Vale do Taquari, Brazil: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 13, p. 1200-1205, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.04.006>

KUMAR, P. K. *et al.* Biomass production from microalgae *Chlorella* grown in sewage, kitchen wastewater using industrial CO₂ emissions: Comparative study. **Carbon Resources Conversion**, v. 2, n. 2, p. 126-133, 2019. [10.1016/j.crcon.2019.06.002](https://doi.org/10.1016/j.crcon.2019.06.002)

KUMAR, P. K. *et al.* Phycoremediation of sewage wastewater and industrial flue gases for biomass generation from microalgae. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 25, p. 133-146, 2018. [10.1016/j.sajce.2018.04.006](https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.04.006)

KURADE, M. B. *et al.* Insights into microalgae mediated biodegradation of diazinon by *Chlorella vulgaris*: Microalgal tolerance to xenobiotic pollutants and metabolism. **Algal Research**, v. 20, p. 126-134, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.10.003>

KURNIAWAN, S. B. *et al.* Potential of microalgae cultivation using nutrient-rich wastewater and harvesting performance by biocoagulants/bioflocculants: Mechanism, multi-conversion of biomass into valuable products, and future challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 365, p. 132806, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132806>

LARAIB, N. *et al.* Mixotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* in sugarcane molasses preceding nitrogen starvation: Biomass productivity, lipid content, and fatty acid analyses. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 40, n. 4, p. e13625, 2021. <https://doi.org/10.1002/ep.13625>

LARSEN, C. *et al.* Mechanisms of pharmaceutical and personal care product removal in algae-based wastewater treatment systems. **Science of The Total Environment**, v. 695, p. 133772, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133772>

LENG, L. *et al.* Use of microalgae based technology for the removal of antibiotics from wastewater: A review. **Chemosphere**, v. 238, p. 124680, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124680>

LEOPOLD, L. B. **A procedure for evaluating environmental impact**. US Department of the Interior, 1971.

LI, G. *et al.* Cultivation of microalgae in adjusted wastewater to enhance biofuel production and reduce environmental impact: Pyrolysis performances and life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 355, p. 131768, 2022a. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131768>

LI, S. *et al.* A review on flocculation as an efficient method to harvest energy microalgae: Mechanisms, performances, influencing factors and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 131, p. 110005, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110005>

LI, S. *et al.* Biohydrogen production from microalgae for environmental sustainability. **Chemosphere**, v. 291, p. 132717, 2022b. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132717>

LI, S. *et al.* Microalgae as a solution of third world energy crisis for biofuels production from wastewater toward carbon neutrality: An updated review. **Chemosphere**, v. 291, p. 132863, 2022c. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132863>

LI, X. *et al.* Toxicological evaluation of industrial effluents using zebrafish: Efficacy of tertiary treatment of coking wastewater. **Environmental Technology & Innovation**, v. 30, p. 103067, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103067>

LÓPEZ-SERNA, R. *et al.* Removal of contaminants of emerging concern from urban wastewater in novel algal-bacterial photobioreactors. **Science of The Total Environment**, v. 662, p. 32-40, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.206>

LÓPEZ PASTOR, R. *et al.* Technical and economic viability of using solar thermal energy for microalgae drying. **Energy Reports**, v. 10, p. 989-1003, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.07.040>

LOWN, L. *et al.* Phase partitioning of mercury, arsenic, selenium, and cadmium in *Chlamydomonas reinhardtii* and *Arthrospira maxima* microcosms. **Environmental Pollution**, v. 329, p. 121679, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121679>

MAGALHÃES, I. B. *et al.* Agro-industrial wastewater-grown microalgae: A techno-environmental assessment of open and closed systems. **Science of The Total Environment**, v. 834, p. 155282, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155282>

MAGALHÃES, I. B. *et al.* Technologies for improving microalgae biomass production coupled to effluent treatment: A life cycle approach. **Algal Research**, v. 57, p. 102346, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102346>

MANZOOR, M. *et al.* Sugarcane bagasse as a novel low/no cost organic carbon source for growth of *Chlorella* sp. BR2. **Biofuels**, v. 12, n. 9, p. 1067-1073, 2021. <https://doi.org/10.1080/17597269.2019.1580970>

MARYJOSEPH, S.; KETHEESAN, B. Microalgae based wastewater treatment for the removal of emerging contaminants: A review of challenges and opportunities. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 2, p. 100046, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100046>

MATAMOROS, V.; RODRÍGUEZ, Y. Batch vs continuous-feeding operational mode for the removal of pesticides from agricultural run-off by microalgae systems: A laboratory scale study. **Journal of Hazardous Materials**, v. 309, p. 126-132, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.080>

MATEICHYK, V. *et al.* Developing a Tool for Environmental Impact Assessment of Planned Activities and Transport Infrastructure Facilities. **Transportation Research Procedia**, v. 55, p. 1194-1201, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.185>

MCMURRAY, A. *et al.* Guidance on applying the Monte Carlo approach to uncertainty analyses in forestry and greenhouse gas accounting. **Winrock International: Arlington, VA, USA**, v. 26, 2017.

- MIN, K. H. *et al.* Recent progress in flocculation, dewatering, and drying technologies for microalgae utilization: Scalable and low-cost harvesting process development. **Bioresource Technology**, v. 344, p. 126404, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126404>
- MOFIJUR, M. *et al.* Bioenergy recovery potential through the treatment of the meat processing industry waste in Australia. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 105657, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105657>
- MOHSENPOUR, S. F. *et al.* Integrating micro-algae into wastewater treatment: A review. **Science of The Total Environment**, v. 752, p. 142168, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142168>
- MOLAZADEH, M. *et al.* The Use of Microalgae for Coupling Wastewater Treatment With CO₂ Biofixation. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 7, p. 42, 2019. 10.3389/fbioe.2019.00042
- MORADIYA, K. K.; MARATHE, K. V. Life cycle assessment (LCA) of marine microalgae cultivation and harvesting process for the Indian context. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 56, p. 103063, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103063>
- MORAIS JUNIOR, W. G. *et al.* Microalgae for biotechnological applications: Cultivation, harvesting and biomass processing. **Aquaculture**, v. 528, p. 735562, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735562>
- MORALES, M. *et al.* Rotating algal biofilm versus planktonic cultivation: LCA perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, p. 120547, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120547>
- MSANNE, J. *et al.* An assessment of heterotrophy and mixotrophy in *Scenedesmus* and its utilization in wastewater treatment. **Algal Research**, v. 48, p. 101911, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101911>
- MU, D. *et al.* Simultaneous biohydrogen production from dark fermentation of duckweed and waste utilization for microalgal lipid production. **Bioresource Technology**, v. 302, 2020. 10.1016/j.biortech.2020.122879
- MUHAMMAD, G. *et al.* Modern developmental aspects in the field of economical harvesting and biodiesel production from microalgae biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110209, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110209>
- MUSTAFA, S. *et al.* Microalgae biosorption, bioaccumulation and biodegradation efficiency for the remediation of wastewater and carbon dioxide mitigation: Prospects, challenges and opportunities. **Journal of Water Process Engineering**, v. 41, p. 102009, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102009>

NANDA, M. *et al.* Integration of microalgal bioremediation and biofuel production: A ‘clean up’ strategy with potential for sustainable energy resources. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, v. 4, p. 100128, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100128>

NGUYEN, T.-T. *et al.* Nutrient recovery and microalgae biomass production from urine by membrane photobioreactor at low biomass retention times. **Science of The Total Environment**, v. 785, p. 147423, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147423>

NIE, J. *et al.* Bioremediation of water containing pesticides by microalgae: Mechanisms, methods, and prospects for future research. **Science of The Total Environment**, v. 707, p. 136080, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136080>

NORVILL, Z. N. *et al.* Emerging contaminant degradation and removal in algal wastewater treatment ponds: Identifying the research gaps. **Journal of Hazardous Materials**, v. 313, p. 291-309, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.03.085>

NZAYISENGA, J. C. *et al.* Mixotrophic and heterotrophic production of lipids and carbohydrates by a locally isolated microalga using wastewater as a growth medium. **Bioresource Technology**, v. 257, p. 260-265, 2018. [10.1016/j.biortech.2018.02.085](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.085)

OLIVEIRA, A. P. D. S. *et al.* Microalgae-based wastewater treatment for micropollutant removal in swine effluent: High-rate algal ponds performance under different zinc concentrations. **Algal Research**, v. 69, p. 102930, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102930>

PASTAKIA, C. M. The rapid impact assessment matrix (RIAM)—a new tool for environmental impact assessment. **Environmental Impact Assessment Using the Rapid Impact Assessment Matrix (RIAM)**, Olsen & Olsen, Fredensborg, Denmark, v. 1998.

PATEL, A. K. *et al.* Emerging prospects of mixotrophic microalgae: Way forward to sustainable bioprocess for environmental remediation and cost-effective biofuels. **Bioresource Technology**, v. 300, p. 122741, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122741>

PECHSIRI, J. S. *et al.* Comparative life cycle assessment of conventional and novel microalgae production systems and environmental impact mitigation in urban-industrial symbiosis. **Science of The Total Environment**, v. 854, p. 158445, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158445>

PENHAUL SMITH, J. K. *et al.* Tailoring of the biochemical profiles of microalgae by employing mixotrophic cultivation. **Bioresource Technology Reports**, v. 9, p. 100321, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100321>

PERALTA MUNIZ MOREIRA, R. *et al.* Computational fluid dynamics (CFD) modeling of removal of contaminants of emerging concern in solar photo-Fenton raceway pond reactors. **Chemical Engineering Journal**, v. p. 127392, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127392>

PESQUEIRA, J. F. J. R. *et al.* Environmental impact assessment of advanced urban wastewater treatment technologies for the removal of priority substances and contaminants of emerging concern: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 121078, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121078>

PLAZA, B. M. *et al.* Effect of microalgae hydrolysate foliar application (*Arthrospira platensis* and *Scenedesmus* sp.) on *Petunia x hybrida* growth. **Journal of Applied Phycology**, v. 30, n. 4, p. 2359-2365, 2018. [10.1007/s10811-018-1427-0](https://doi.org/10.1007/s10811-018-1427-0)

PREMARATNE, M. *et al.* Resource recovery from waste streams for production of microalgae biomass: A sustainable approach towards high-value biorefineries. **Bioresource Technology Reports**, v. 18, p. 101070, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101070>

QI, S. *et al.* Low energy harvesting of hydrophobic microalgae (*Tribonema* sp.) by electro-flotation without coagulation. **Science of The Total Environment**, v. 838, p. 155866, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155866>

QIAN, Z. *et al.* Capabilities and mechanisms of microalgae on nutrients and florfenicol removing from marine aquaculture wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 320, p. 115673, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115673>

RAGHUVANSHI, S. *et al.* Comparative Study Using Life Cycle Approach for the Biodiesel Production from Microalgae Grown in Wastewater and Fresh Water. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 568-572, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.030>

RANA, M. S.; PRAJAPATI, S. K. Stimulating effects of glycerol on the growth, phycoremediation and biofuel potential of *Chlorella pyrenoidosa* cultivated in wastewater. **Environmental Technology & Innovation**, v. 24, p. 102082, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102082>

RANI, L. *et al.* An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 124657, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124657>

RATTANAPOLTEE, P. *et al.* Biocircular platform for third generation biodiesel production: Batch/fed batch mixotrophic cultivations of microalgae using glycerol waste as a carbon source. **Biochemical Engineering Journal**, v. 175, p. 108128, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108128>

RAY, A. *et al.* A review on co-culturing of microalgae: A greener strategy towards sustainable biofuels production. **Science of The Total Environment**, v. 802, p. 149765, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149765>

REHMAN, M. *et al.* Impact of cultivation conditions on microalgae biomass productivity and lipid content. **Materials Today: Proceedings**, v. 56, p. 282-290, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.152>

REMPEL, A. *et al.* Current advances in microalgae-based bioremediation and other technologies for emerging contaminants treatment. **Science of The Total Environment**, v. 772, p. 144918, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144918>

RIZWAN, M. *et al.* Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, p. 394-404, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.034>

ROCCARO, P. Treatment processes for municipal wastewater reclamation: The challenges of emerging contaminants and direct potable reuse. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 2, p. 46-54, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.02.003>

RODRIGUES, M. V. C. *et al.* Urban watershed management prioritization using the rapid impact assessment matrix (RIAM-UWMAP), GIS and field survey. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 94, 2022. [10.1016/j.eiar.2022.106759](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106759)

RODRÍGUEZ-ROSALES, B. *et al.* Risk and vulnerability assessment in coastal environments applied to heritage buildings in Havana (Cuba) and Cadiz (Spain). **Science of The Total Environment**, v. 750, p. 141617, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141617>

RUIZ, J. *et al.* Heterotrophic vs autotrophic production of microalgae: Bringing some light into the everlasting cost controversy. **Algal Research**, v. 64, p. 102698, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102698>

RWEHUMBIZA, V. M. *et al.* Alum-induced flocculation of preconcentrated *Nannochloropsis salina*: Residual aluminium in the biomass, FAMES and its effects on microalgae growth upon media recycling. **Chemical Engineering Journal**, v. 200-202, p. 168-175, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.008>

SANDMANN, M. *et al.* Comparative life cycle assessment of a mesh ultra-thin layer photobioreactor and a tubular glass photobioreactor for the production of bioactive algae extracts. **Bioresource Technology**, v. 340, p. 125657, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125657>

SARANYA, D.; SHANTHAKUMAR, S. Insights into the influence of CO₂ supplement on phycoremediation and lipid accumulation potential of microalgae: An exploration for biodiesel production. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, p. 101596, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101596>

SATHEESH, S. *et al.* Biohydrogen production coupled with wastewater treatment using selected microalgae. **Chemosphere**, v. 334, p. 138932, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138932>

SATYA, A. D. M. *et al.* Progress on microalgae cultivation in wastewater for bioremediation and circular bioeconomy. **Environmental Research**, v. 218, p. 114948, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114948>

SCHADE, S.; MEIER, T. A comparative analysis of the environmental impacts of cultivating microalgae in different production systems and climatic zones: A systematic review and meta-analysis. **Algal Research**, v. 40, p. 101485, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101485>

SEKAR, M. *et al.* A review on the pyrolysis of algal biomass for biochar and bio-oil – Bottlenecks and scope. **Fuel**, v. 283, p. 119190, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119190>

SHARMA, A. K. *et al.* Impact of various media and organic carbon sources on biofuel production potential from *Chlorella* spp. **3 Biotech**, v. 6, n. 2, 2016. 10.1007/s13205-016-0434-6

SILVA, J. P. S. *et al.* Indirect solar drying of *Spirulina platensis* and the effect of operating conditions on product quality. **Algal Research**, v. 60, p. 102521, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102521>

SINGH, A. *et al.* Bioremediation and biomass production of microalgae cultivation in river water contaminated with pharmaceutical effluent. **Bioresource Technology**, v. 307, p. 123233, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123233>

SINGH, D. V. *et al.* Microalgae in aquatic environs: A sustainable approach for remediation of heavy metals and emerging contaminants. **Environmental Technology & Innovation**, v. 21, p. 101340, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101340>

SIROHI, R. *et al.* Design and applications of photobioreactors- a review. **Bioresource Technology**, v. 349, p. 126858, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126858>

SIVARANJANEE, R.; KUMAR, P. S. A review on remedial measures for effective separation of emerging contaminants from wastewater. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, p. 101741, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101741>

SMETANA, S. *et al.* Autotrophic and heterotrophic microalgae and cyanobacteria cultivation for food and feed: life cycle assessment. **Bioresource Technology**, v. 245, p. 162-170, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.113>

SONG, C. *et al.* Combination of brewery wastewater purification and CO₂ fixation with potential value-added ingredients production via different microalgae strains cultivation. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, p. 122332, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122332>

SONG, M.; PEI, H. The growth and lipid accumulation of *Scenedesmus quadricauda* during batch mixotrophic/heterotrophic cultivation using xylose as a carbon source. **Bioresource Technology**, v. 263, p. 525-531, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.020>

SORIANO-MOLINA, P. *et al.* Two strategies of solar photo-Fenton at neutral pH for the simultaneous disinfection and removal of contaminants of emerging concern.

Comparative assessment in raceway pond reactors. **Catalysis Today**, v. 361, p. 17-23, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.11.028>

STREIT, A. F. M. *et al.* Adsorption of ibuprofen, ketoprofen, and paracetamol onto activated carbon prepared from effluent treatment plant sludge of the beverage industry. **Chemosphere**, v. 262, p. 128322, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128322>

SUN, C.-H. *et al.* Life-cycle assessment of biofuel production from microalgae via various bioenergy conversion systems. **Energy**, v. 171, p. 1033-1045, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.074>

SUN, J. *et al.* A promising microalgal wastewater cyclic cultivation technology: Dynamic simulations, economic viability, and environmental suitability. **Water Research**, v. 217, p. 118411, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118411>

SUN, M. *et al.* Bioaccumulation and biodegradation of sulfamethazine in *Chlorella pyrenoidosa*. **Journal of Ocean University of China**, v. 16, n. 6, p. 1167-1174, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11802-017-3367-8>

SUTHAR, S.; SAJWAN, A. Rapid impact assessment matrix (RIAM) analysis as decision tool to select new site for municipal solid waste disposal: A case study of Dehradun city, India. **Sustainable Cities and Society**, v. 13, p. 12-19, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.03.007>

SUTHERLAND, D. L.; RALPH, P. J. Microalgal bioremediation of emerging contaminants - Opportunities and challenges. **Water Research**, v. 164, p. 114921, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114921>

TAMTÜRK, F. *et al.* Optimization of *Chlorella vulgaris* spray drying using various innovative wall materials. **Algal Research**, v. 72, p. 103115, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103115>

TANG, J. *et al.* Evaluation of factors influencing annual occurrence, bioaccumulation, and biomagnification of antibiotics in planktonic food webs of a large subtropical river in South China. **Water Research**, v. 170, p. 115302, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115302>

TERÁN HILARES, R. *et al.* Acid precipitation followed by microalgae (*Chlorella vulgaris*) cultivation as a new approach for poultry slaughterhouse wastewater treatment. **Bioresource Technology**, v. 335, p. 125284, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125284>

THOMASSEN, G. *et al.* The potential of microalgae biorefineries in Belgium and India: An environmental techno-economic assessment. **Bioresource Technology**, v. 267, p. 271-280, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.037>

TIONG, I. *et al.* *Chlorella vulgaris* : a perspective on its potential for combining high biomass with high value bioproducts. **Applied Phycology**, v. 1, p. 1-10, 2020. 10.1080/26388081.2020.1715256

TUA, C. *et al.* Integration of a side-stream microalgae process into a municipal wastewater treatment plant: A life cycle analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 279, p. 111605, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111605>

UPHAM, P.; SMITH, B. Using the Rapid Impact Assessment Matrix to synthesize biofuel and bioenergy impact assessment results: the example of medium scale bioenergy heat options. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 261-269, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.041>

VADIVELLOO, A. *et al.* Microalgae cultivation for the treatment of anaerobically digested municipal centrate (ADMC) and anaerobically digested abattoir effluent (ADAE). **Science of The Total Environment**, v. 775, p. 145853, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145853>

VADIVELLOO, A. *et al.* Sustainable Production of Bioproducts from Wastewater-Grown Microalgae. *In*, 2019. p. 165-200.

VADLAMANI, A. *et al.* Cultivation of Microalgae at Extreme Alkaline pH Conditions: A Novel Approach for Biofuel Production. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 5, n. 8, p. 7284-7294, 2017. 10.1021/acssuschemeng.7b01534

VALIZADEH, S.; HAKIMIAN, H. Evaluation of waste management options using rapid impact assessment matrix and Iranian Leopold matrix in Birjand, Iran. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 7, p. 3337-3354, 2019. 10.1007/s13762-018-1713-z

VANDANA, M. *et al.* Environmental impact assessment of laterite quarrying from Netravati-Gurpur river basin, South West Coast of India. **Environment Development and Sustainability**, v. 2022. 10.1007/s10668-022-02741-5

VAZ, S. A. *et al.* Recent reports on domestic wastewater treatment using microalgae cultivation: Towards a circular economy. **Environmental Technology & Innovation**, v. 30, p. 103107, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103107>

VIDOTTI, A. D. S. *et al.* Analysis of autotrophic, mixotrophic and heterotrophic phenotypes in the microalgae *Chlorella vulgaris* using time-resolved proteomics and transcriptomics approaches. **Algal Research**, v. 51, p. 102060, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102060>

VISHWAKARMA, R. *et al.* Exploring algal technologies for a circular bio-based economy in rural sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 354, p. 131653, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131653>

VISIGALLI, S. *et al.* Electrocoagulation–flotation (ECF) for microalgae harvesting – A review. **Separation and Purification Technology**, v. 271, p. 118684, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118684>

WANG, J. *et al.* Insights about fungus-microalgae symbiotic system in microalgae harvesting and wastewater treatment: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 182, p. 113408, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113408>

WANG, S. K. *et al.* Tofu whey wastewater is a promising basal medium for microalgae culture. **Bioresource Technology**, v. 253, p. 79-84, 2018. [10.1016/j.biortech.2018.01.012](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.012)

WANG, Y. *et al.* Cultivation of *Chlorella vulgaris* JSC-6 with swine wastewater for simultaneous nutrient/COD removal and carbohydrate production. **Bioresource Technology**, v. 198, p. 619-625, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.067>

WEIS, L. *et al.* Potential for bifenthrin removal using microalgae from a natural source. **Water Science and Technology**, v. 82, n. 6, p. 1131-1141, 2020. [10.2166/wst.2020.160](https://doi.org/10.2166/wst.2020.160)

WU, W. *et al.* Life cycle assessment of upgraded microalgae-to-biofuel chains. **Bioresource Technology**, v. 288, p. 121492, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121492>

WU, Y. *et al.* Mechanisms of removing pollutants from aqueous solutions by microorganisms and their aggregates: A review. **Bioresource Technology**, v. 107, p. 10-18, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.088>

XIE, P. *et al.* Revealing the role of adsorption in ciprofloxacin and sulfadiazine elimination routes in microalgae. **Water Research**, v. 172, p. 115475, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115475>

XIONG, J.-Q. *et al.* Combined effects of sulfamethazine and sulfamethoxazole on a freshwater microalga, *Scenedesmus obliquus*: toxicity, biodegradation, and metabolic fate. **Journal of Hazardous Materials**, v. 370, p. 138-146, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.049>

XIONG, J.-Q. *et al.* Biodegradation of levofloxacin by an acclimated freshwater microalga, *Chlorella vulgaris*. **Chemical Engineering Journal**, v. 313, p. 1251-1257, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.017>

XIONG, J.-Q. *et al.* Can Microalgae Remove Pharmaceutical Contaminants from Water? **Trends in Biotechnology**, v. 36, n. 1, p. 30-44, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.09.003>

XIONG, Q. *et al.* Microalgae-based technology for antibiotics removal: From mechanisms to application of innovational hybrid systems. **Environment International**, v. 155, p. 106594, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106594>

XIONG, Q. *et al.* Co-metabolism of sulfamethoxazole by a freshwater microalga *Chlorella pyrenoidosa*. **Water Research**, v. 175, p. 115656, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115656>

YADAV, G. *et al.* A biorefinery for valorization of industrial waste-water and flue gas by microalgae for waste mitigation, carbon-dioxide sequestration and algal biomass production. **Science of the Total Environment**, v. 688, p. 129-135, 2019. [10.1016/j.scitotenv.2019.06.024](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.024)

YADAV, G. *et al.* A comparative life cycle assessment of microalgae production by CO₂ sequestration from flue gas in outdoor raceway ponds under batch and semi-continuous regime. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120703, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120703>

YADAV, G.; SEN, R. Microalgal green refinery concept for biosequestration of carbon-dioxide vis-à-vis wastewater remediation and bioenergy production: Recent technological advances in climate research. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 17, p. 188-206, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2016.12.006>

YEN, H.-W. *et al.* Microalgae-based biorefinery – From biofuels to natural products. **Bioresource Technology**, v. 135, p. 166-174, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.099>

YU, Y. *et al.* Investigation of the removal mechanism of antibiotic ceftazidime by green algae and subsequent microbial impact assessment. **Scientific Reports**, v. 7, 2017. [10.1038/s41598-017-04128-3](https://doi.org/10.1038/s41598-017-04128-3)

ZAND, A. D.; HEIR, A. V. Integration of rapid impact assessment matrix method and sustainability modeling for management of municipal solid waste transfer stations in cold regions. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 8, n. 2, p. 2539-2550, 2022. [10.1007/s40808-021-01248-8](https://doi.org/10.1007/s40808-021-01248-8)

ZERAATKAR, A. K. *et al.* Potential use of algae for heavy metal bioremediation, a critical review. **Journal of Environmental Management**, v. 181, p. 817-831, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.059>

ZHANG, H. *et al.* Bioremediation of co-contaminated soil with heavy metals and pesticides: Influence factors, mechanisms and evaluation methods. **Chemical Engineering Journal**, v. 398, p. 125657, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125657>

ZHAO, X. *et al.* Single-cell sorting of microalgae and identification of optimal conditions by using response surface methodology coupled with life-cycle approaches. **Science of the Total Environment**, v. 832, p. 155061, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155061>

ZOU, Y. *et al.* Emerging technologies of algae-based wastewater remediation for bio-fertilizer production: a promising pathway to sustainable agriculture. **Journal of**

Chemical Technology & Biotechnology, v. 96, n. 3, p. 551-563, 2021.
<https://doi.org/10.1002/jctb.6602>

