

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DOS
ALIMENTOS

Paola Lasta

**PRODUTOS COMERCIAIS À BASE DE MICROALGAS APLICADOS
ÀS FRONTEIRAS PLANETÁRIAS**

Santa Maria, RS

2022

Paola Lasta

**PRODUTOS COMERCIAIS À BASE DE MICROALGAS APLICADOS ÀS
FRONTEIRAS PLANETÁRIAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Alimentos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência e Tecnologia dos Alimentos**.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Jacob-Lopes

Santa Maria, RS

2022

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Lasta, Paola
Produtos comerciais à base de microalgas aplicados às fronteiras planetárias / Paola Lasta.- 2022.
61 p.; 30 cm

Orientador: Eduardo Jacob-Lopes
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Alimentos, RS, 2022

1. Biomassa microalgal 2. Pigmentos 3. Ácidos graxos
4. Indicadores de sustentabilidade 5. Limites planetários I. Jacob-Lopes, Eduardo II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

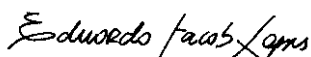
Declaro, PAOLA LASTA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Paola Lasta

**PRODUTOS COMERCIAIS À BASE DE MICROALGAS APLICADOS ÀS
FRONTEIRAS PLANETÁRIAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Alimentos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência e Tecnologia dos Alimentos**.

Aprovado em 28 de março de 2022:



Eduardo Jacob-Lopes, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Raquel Guidetti Vendruscolo, Dra. (UFVJM)



Valcenir Júnior Mendes Furlan, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

Um trabalho de mestrado é uma longa jornada, que inclui uma trajetória permeada por inúmeros desafios, tristezas, incertezas e alegrias. Também reúne contributos de várias pessoas, indispensáveis para encontrar o melhor rumo em cada momento da caminhada. Portanto, trilhar este caminho só foi possível com o apoio, energia e força de várias pessoas, a quem dedico especialmente este projeto de vida.

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitária, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Ao meu orientador, Eduardo Jacob Lopes, pela orientação, ensinamentos e pela confiança em meu trabalho. Sou extremamente grata por todo conhecimento comigo compartilhado e por todas as oportunidades à mim concedidas.

Aos meus pais, Angela e Gilmar, pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida. Por acreditarem em mim, e não medirem esforços para a concretização dos meus sonhos.

À minha irmã Ana Cláudia, por ser minha melhor amiga, por sua preocupação, carinho e incentivo.

Ao meu namorado Neiluis, por ser a minha força e o meu guia em todos os momentos.

As minhas amigas Patricia Arrojo da Silva e Patricia Acosta Caetano pelo laço de amizade que foi criado desde a iniciação científica.

Aos colegas de laboratório, principalmente ao Grupo de Intensificação de Bioprocessos pelas incansáveis rodadas de aconselhamentos, pelos momentos de apoio e pelos dias de descontração.

Aos Professores membros da banca pela disponibilidade e contribuições.

À CAPES, pela bolsa de mestrado concedida.

À Universidade Federal de Santa Maria, pela formação proporcionada.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

*“Saber finalizar uma fase da vida requer
tanta sabedoria quanto para iniciar”*

Pe. Fábio de Melo

RESUMO

PRODUTOS COMERCIAIS À BASE DE MICROALGAS APLICADOS ÀS FRONTEIRAS PLANETÁRIAS

AUTORA: Paola Lasta

ORIENTADOR: Eduardo Jacob Lopes

Neste estudo, os impactos da produção e do consumo dos produtos comerciais à base de microalgas foram avaliados por meio de indicadores baseados na avaliação do ciclo de vida e comparados com os limites planetários. A produção de biomassa seca total, β -caroteno, astaxantina e ficocianina, bem como ácidos docosaheptaenoico (DHA) e eicosapentaenoico (EPA) também foram analisados. Além disso, a avaliação do ciclo de vida foi identificada como uma ferramenta adequada para vincular as atividades humanas aos limites planetários. Esses produtos foram estimados por nove esferas planetárias reconhecidas para descrever o teto ambiental das fronteiras planetárias. Nesse sentido, pontos críticos ambientais do processo foram identificados e discutidos. Os resultados em nível per capita mostram que, no contexto da fronteira planetária, há impactos negativos na produção de astaxantina da microalga *Haematococcus pluvialis* nas categorias de acidificação ($1,70 \times 10^2$ mol H^+ eq) e potencial de aquecimento global ($1,05 \times 10^3$ kg CO_2 eq), encontrando-se dentro da zona amarela. E na produção de EPA da microalga *Nannochloropsis oculata*, nas categorias de ecotoxicidade ($4,12 \times 10^4$ CTUe), potencial de aquecimento global ($5,87 \times 10^3$ kg CO_2 eq), potencial de acidificação ($9,68 \times 10^2$ mole H^+ eq) e o potencial de criação de oxidante fotoquímico ($1,40 \times 10^2$ kg O_3 eq), encontrando-se na faixa vermelha. Diante disso, os parâmetros que mais influenciam as cargas estão diretamente relacionados às necessidades de energia e nutrientes. Portanto, este trabalho visa evitar grandes mudanças ambientais que possam causar danos irreversíveis ao ecossistema global.

Palavras-Chave: Biomassa microalgal. Pigmentos. Ácidos graxos. Indicadores de sustentabilidade. Avaliação do ciclo de vida. Limites planetários.

ABSTRACT

COMMERCIAL MICROALGAE-BASED PRODUCTS APPLIED TO PLANETARY BOUNDARIES

AUTHOR: Paola Lasta

ADVISOR: Eduardo Jacob Lopes

In this study, the impacts of production and consumption of the commercial microalgae-based products were assessed by means of life cycle assessment-based indicators and compared with the planetary boundaries. The production of whole dried biomass, β -carotene, astaxanthin, and phycocyanin, as well as docosahexaenoic (DHA) and eicosapentaenoic (EPA) acids were also analyzed. In addition, life cycle assessment was identified as an adequate tool to link human activities to planetary boundaries. These products were estimated by nine planetary spheres recognized to describe the environmental ceiling of planetary boundaries. In this sense, environmental critical points in the process were identified and discussed. The results at the per capita level show that, in the context of the planetary frontier, there are negative impacts on the production of astaxanthin from the microalgae *Haematococcus pluvialis* in the categories of acidification (1.70×10^2 mol H^+ eq) and global warming potential (1.05×10^3 kg CO_2 eq), meeting up within the yellow zone. And in the production of EPA from the microalgae *Nannochloropsis oculata*, in the categories of ecotoxicity (4.12×10^4 CTUe), global warming potential (5.87×10^3 kg CO_2 eq), acidification potential (9.68×10^2 mole H^+ eq), and the potential for creating photochemical oxidant (1.40×10^2 kg O_3 eq), meeting up in the red range. Therefore, the parameters that most influence loads are directly related to energy and nutrient requirements. Therefore, this work aims to avoid major environmental changes that could cause irreversible damage to the global ecosystem.

Keywords: Microalgal biomass. Pigments. Fatty acids. Sustainability indicators. Life cycle assessment. Planetary limits.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Limites de sistemas para avaliação de produtos à base de microalgas.....	25
Figura 2 - A estrutura conceitual para a abordagem do limite planetário, mostrando o espaço operacional seguro, a zona de incerteza, a posição do limite (onde é provável que exista) e a área de alto risco.....	34
Figura 3 - Impactos ambientais da produção de biomassa seca total das microalgas <i>Chlorella vulgaris</i> e <i>Arthrospira platensis</i> , aplicados às fronteiras planetárias em nível global.....	37
Figura 4 - Impactos ambientais da produção de biomassa seca total das microalgas <i>Chlorella vulgaris</i> e <i>Arthrospira platensis</i> , aplicados às fronteiras planetárias em nível per capita.....	39
Figura 5 - Impactos ambientais da produção de ficocianina de <i>Arthrospira platensis</i> , β -caroteno de <i>Dunaliella salina</i> e astaxantina de <i>Haematococcus pluvialis</i> , aplicados às fronteiras planetárias em nível global.....	42
Figura 6 - Impactos ambientais da produção de pigmentos, como ficocianina de <i>Arthrospira platensis</i> , β -caroteno de <i>Dunaliella salina</i> e astaxantina de <i>Haematococcus pluvialis</i> , aplicados às fronteiras planetárias em nível per capita.....	44
Figura 7 - Impactos ambientais da produção de ácidos graxos das espécies <i>Cryptocodinium cohnii</i> (DHA), <i>Nitzschia laevis</i> (EPA) e <i>Nannochloropsis oculata</i> (EPA), aplicada às fronteiras planetárias em nível global.....	47
Figura 8 - Impactos ambientais da produção de ácidos graxos das espécies <i>Cryptocodinium cohnii</i> (DHA), <i>Nitzschia laevis</i> (EPA) e <i>Nannochloropsis oculata</i> (EPA), aplicado às fronteiras planetárias em nível per capita.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Inventário de entradas/saídas do processo de produção de 1 ton/ano de biomassa seca integral, β -caroteno, ficocianina, astaxantina, DHA e EPA.....	21
Tabela 2 - Requisitos de materiais e energia para a operação em fotobiorreator do tipo <i>raceway pond</i> , fotobiorreator tubular e fermentador.....	26
Tabela 3 - Fatores de caracterização dos impactos ambientais de materiais e energia nos processos.....	29
Tabela 4 - Visão geral dos limites planetários propostos, limites da zona de incerteza, limite natural e espaço operacional seguro.....	31
Tabela 5 - Limites planetários globais e per capita das zonas verde, amarela e vermelha.....	35
Tabela 6 - Pontuações de integração entre fronteiras planetárias e avaliação do impacto do ciclo de vida (LP-ACV).....	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	MICROALGAS.....	14
2.2	METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO.....	15
2.3	FOTOBIORREACTORES: CONFIGURAÇÕES E PARÂMETROS DE PROCESSO.....	16
2.4	COMPONENTES E APLICAÇÕES COMERCIAIS DE MICROALGAS	17
2.5	LIMITES PLANETÁRIOS	18
3	MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	20
3.2	LIMITES PLANETÁRIOS	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	A RELEVÂNCIA DAS MÉTRICAS DE SUSTENTABILIDADE DEVIDO À PRODUÇÃO E CONSUMO DE PRODUTOS À BASE DE MICROALGAS .	36
4.1.1	Biomassa seca total.....	36
4.1.2	Pigmentos	41
4.1.3	Ácidos graxos poliinsaturados.....	46
4.1.4	Discussão geral	50
5	CONCLUSÃO GERAL	53
	REFÊRENCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade dos padrões de produção e consumo é um tema amplamente discutido na literatura científica e no debate político. É sabido que o crescimento social e econômico exerce pressão crescente sobre o meio ambiente, levando a mudanças relevantes e muitas vezes irreversíveis. Portanto, é necessário avaliar cuidadosamente até que ponto os padrões de consumo são ambientalmente sustentáveis (SALA et al., 2020).

As microalgas são uma fonte promissora como matéria-prima sustentável para a produção de alimentos, rações, combustíveis, produtos químicos e produtos de alto valor. Vale acrescentar que, as microalgas não requerem terra arável e podem ser colhidas quase o ano todo, tornando-se atrativas para a exploração comercial. No entanto, existem alguns obstáculos que limitam sua expansão e estabelecimento (RUIZ et al., 2016).

A biomassa microalgal contém quantidades relevantes de moléculas bioativas (carotenoides, ácidos graxos, polissacarídeos e proteínas), que podem ser usadas em várias aplicações como corantes, produtos farmacêuticos, alimentos e rações (OTA, 2021). A microalga *Haematococcus pluvialis* têm sido amplamente explorada devido à capacidade de produzir carotenoides como a astaxantina (MOLINO et al., 2018). A exploração de ácidos graxos, como ácido docosaheptaenoico (DHA) e ácido eicosapentaenoico (EPA), encontrados em espécies como *Cryptocodinium cohnii*, *Nitzschia laevis* e *Nannochloropsis oculata*, recebeu a atenção dos fabricantes como suplemento alimentar (BANERJEE et al., 2018). *Chlorella vulgaris* constitui uma fonte importante de proteínas, sendo promissora para a indústria de alimentos (HILDEBRAND et al., 2020). *Dunaliella salina* já é promissora para a produção comercial de β -caroteno, pois é capaz de acumular esse carotenoide em altas concentrações (LAMERS et al., 2008); e *Arthrospira platensis* é utilizado como suplemento alimentar para humanos e animais e é uma fonte rica em ficocianinas (MAZOKOPAKIS et al., 2014).

No entanto, devido aos processos de microalgas exigirem muita energia, a necessidade de sistemas de produção de energia limpos, sustentáveis, economicamente eficazes e eficientes tornou-se uma meta desafiadora (DEPRÁ et al., 2020). A tecnologia limpa é um conceito geral sob o qual se buscam formas sustentáveis de atender às necessidades humanas. Os benefícios dessa tecnologia podem incluir a redução do uso de recursos e danos ambientais em comparação com as demais tecnologias alternativas, mantendo-se economicamente competitiva (DE SOUZA et al., 2019).

Em virtude disso, a ferramenta de avaliação do ciclo de vida de uso (ACV) permite quantificar com precisão as emissões para o meio ambiente (quantidades físicas), destacar pontos críticos no processo de produção e comparar os processos de produção (HERRERA et al., 2021). Além disso, este procedimento inclui o cálculo de todas as entradas (energia e recursos) e saídas (emissões) para cada etapa de produção do ciclo de vida. Portanto, a avaliação do ciclo de vida surge como uma ferramenta adequada para conectar as atividades humanas às fronteiras planetárias (SALA et al., 2020).

Paralelamente, os limites planetários (LP) fornecem uma estrutura para o gerenciamento de recursos ambientais em nível global e uma série de processos são identificados, os quais são essenciais para manter o sistema terrestre em seu atual estado semelhante ao holoceno e fortemente impactado pelas atividades humanas (RYBERG et al., 2016). Digno de nota, a fronteira planetária determina um espaço operacional seguro para a humanidade executar, inspirando o interesse em integrar os limites planetários em ferramentas de avaliação ambiental orientadas para produtos e tecnologia, como avaliação do ciclo de vida (RYBERG et al., 2020).

Nesse sentido, a abordagem LP-ACV pode permitir a avaliação da sustentabilidade ambiental das atividades antrópicas, comparando seus impactos ambientais modelados à quantidade de espaço operacional seguro que pode ser atribuído a elas, com base em um princípio de compartilhamento escolhido. Além disso, os limites planetários podem apoiar as decisões da empresa relacionadas a evitar atividades insustentáveis nas cadeias de suprimentos (BJØRN et al., 2019). Os resultados encontrados podem servir como subsídios para reduzir os impactos ambientais dos produtos à base de microalgas, visando evitar grandes mudanças ambientais que podem causar danos irreversíveis ao ecossistema global.

O presente trabalho tem como principal objetivo explorar a aplicação dos principais produtos à base de microalgas comercializados através das fronteiras planetárias e estabelecer um espaço operacional seguro para o desenvolvimento da indústria de microalgas, diante do notório conhecimento de que o planeta terra está sob sérias ameaças decorrentes do crescimento da população humana e do desenvolvimento industrial e tecnológico.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

- Explorar a aplicação dos principais produtos à base de microalgas comercializados através das fronteiras planetárias e estabelecer um espaço operacional seguro para o desenvolvimento da indústria de microalgas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar a influência dos impactos ambientais dos produtos baseados em microalgas no meio ambiente;

- Avaliar a sustentabilidade da biomassa seca total, pigmentos e ácidos graxos poli-insaturados em nível global e per capita;

- Identificar os fatores que estão levando à ultrapassagem das fronteiras planetárias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MICROALGAS

As microalgas são organismos unicelulares microscópicos capazes de converter energia solar em energia química por meio da fotossíntese e assim produzir diversos compostos com alto valor agregado como pigmentos, lipídios, ácidos graxos poli-insaturados, carboidratos, proteínas e vitaminas. Esses microrganismos apresentam propriedades bioquímicas únicas não encontradas em plantas superiores (HOSIKIAN et al., 2010). As microalgas são classificadas em procarióticas e eucarióticas. Existem atualmente mais de 72.500 espécies catalogadas, mas poucas foram estudadas e analisadas (SILVA et al., 2020). Adicionalmente, as microalgas podem ser cultivadas em sistemas abertos e fechados. Particularmente, as tecnologias de fotobiorreatores fechados apresentam maior potencial em termos de produtividade, controle das condições de cultivo e aplicabilidade no cultivo de várias linhagens (PRUVOST et al., 2016).

Vale ressaltar que, as características de crescimento e composição das microalgas dependem fortemente das condições de cultivo e do modo de cultivo. No entanto, existem quatro modos de cultivo para microalgas: cultivo fotoautotrófico, heterotrófico, mixotrófico e foto-heterotrófico (CHEN et al., 2011). No cultivo fotoautotrófico as células necessitam de

compostos inorgânicos e luz para seu crescimento. Em contrapartida, o cultivo heterotrófico requer apenas compostos orgânicos (FRANCISCO et al., 2014). No cultivo mixotrófico, fazem uso da luz, compostos orgânicos e inorgânicos como fonte de energia e compostos orgânicos e inorgânicos como fonte de carbono, e já para o cultivo fotoheterotrófico, utiliza luz enquanto empregam compostos orgânicos como fonte de carbono. A principal diferença entre mixotrófico e fotoheterotrófico é que este último não pode absorver e metabolizar o CO_2 (CHEW et al., 2018).

Com exceção do cultivo heterotrófico, nos demais cultivos, a fonte de luz e a intensidade da luz são fatores críticos que podem afetar o desempenho do crescimento fototrófico das microalgas (CHEN et al., 2011). Notavelmente, as microalgas fotoautotróficas necessitam apenas de luz solar, temperatura e dióxido de carbono (CO_2), para seu crescimento superior (KIRAN et al., 2014).

Algumas condições ambientais, como luz, temperatura, pH e nutrientes influenciam fortemente nas taxas de crescimento das microalgas. A luz é a força motriz da fotossíntese e um elemento indispensável para culturas fotoautotróficas. Cada espécie de microalga é definida por uma faixa de temperatura ideal relacionada à sua atividade fotossintética (RANGLOVÁ et al., 2019). O pH também apresenta uma faixa ideal e é estreita e específica da cepa (QIU et al., 2017; ZUCCARO et al., 2020). Além disso, as microalgas necessitam de nutrientes como carbono, nitrogênio e fósforo que são nutrientes essenciais para o metabolismo e crescimento (ARAVANTINO et al., 2013).

2.2 METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO

O processo fotossintético acontece em duas etapas fundamentais: reações luminosas que dão origem à energia química e poder redutor via ATP e NADPH; e reações escuras constituídas no ciclo de Calvin, fazendo com que os intermediários reajam com o CO_2 para produzir glicose e outros componentes. Durante as reações, o átomo de carbono de CO_2 é reduzido, ou seja, o processo requer uma fonte de elétrons (água) e uma fonte de energia (luz) (CARVALHO et al., 2011).

As microalgas durante a fotossíntese convertem água e CO_2 em açúcares por meio da energia luminosa. Entretanto, esses açúcares são utilizados para aprimorar o crescimento da biomassa. Este metabolismo é descrito como crescimento quimioheterotrófico aeróbio. Especificamente, dois processos destacam-se: formação de nova biomassa e manutenção

celular (anabolismo), ambos são suportados pela respiração aeróbia de açúcares na mitocôndria (catabolismo) (BLANKEN et al., 2016).

A fotossíntese ocorre nos cloroplastos em duas etapas, reações luminosas nas membranas tilacóides e as reações do ciclo de Calvin no estroma. As antenas coletoras de luz são fixadas nas membranas tilacóides do cloroplasto e conectadas com os complexos proteicos conhecidos como fotossistemas I e II. Os centros de reação do fotossistema I e II são responsáveis por transformar a energia da luz em potencial redox, que movimenta a cadeia de transporte de elétrons fotossintéticos (PET). As cadeias PET oxidam a água no lúmen e passam os elétrons ganhos através do complexo *Cyt_b₆f* (Citocromo b₆f) plastoquinona, fotossistema II, plastocianina e fotossistema I para reduzir a ferredoxina no estroma. Os resultados da reação à luz são oxigênio, ATP e NADPH pelo fotossistema II, ATP sintase e ferredoxina NADP redutase, respectivamente (ANWAR et al., 2019).

Os principais produtos deste ciclo são os carboidratos, mas ácidos graxos, aminoácidos e ácidos orgânicos também são produtos finais sintetizados a partir de compostos orgânicos provenientes da via fotossintética. Esses compostos podem ser formados sob diferentes condições de intensidade luminosa, concentração de CO₂ e nutrição (RICHMOND e HU, 2013).

2.3 FOTOBIORREADORES: CONFIGURAÇÕES E PARÂMETROS DE PROCESSO

Existem diversas configurações de fotobiorreatores, incluindo colunas de bolhas, fotobiorreatores de tanque agitado, tubulares, entre outros. Os fotobiorreatores mais utilizados comercialmente são os fotobiorreatores tubulares, de placa plana e coluna vertical. Os fotobiorreatores tubulares, de placa plana são apropriados para culturas ao ar livre, eles normalmente possuem uma fonte de iluminação sendo capaz de produzir biomassa e são relativamente baratos. Os fotobiorreatores de placa plana são geralmente feitos de materiais transparentes para a máxima captação da energia solar e são fáceis de limpar. Por outro lado, os fotobiorreatores de coluna vertical são compactos, baratos e fáceis de operar, sendo propícios para o cultivo em grande escala de microalgas e possuem um alto potencial de escalabilidade (BITOG et al., 2011).

Os fotobiorreatores são projetados com base nos requisitos fisiológicos das microalgas, como fornecimento de luz, suprimento de nutrientes, condições de cultura e mistura. O cultivo solar fotossintético das microalgas é considerado um processo promissor e

sustentável, tendo a luz solar como um dos fatores que mais influenciam a produtividade (GOETZ et al., 2011).

Para um melhor desempenho as microalgas requerem nutrientes, como carbono, nitrogênio e fósforo. O carbono é um fator limitante na cultura de microalgas; o nitrogênio e fósforo desempenham um papel no controle das taxas de crescimento e produção de lipídios. Além disso, outros nutrientes são essenciais, como hidrogênio, oxigênio, enxofre, cálcio, magnésio, sódio, potássio e cloro. Portanto, é de suma importância equilibrar os nutrientes sendo a base para um meio eficaz (KUNJAPUR et al., 2010).

O pH ideal da maioria das cepas de microalgas mantém-se na faixa de 7–9. Entretanto, algumas espécies toleram pH em faixas mais ácidas ou básicas. Digno de nota, é crucial manter o pH da cultura na faixa ideal, pois o declínio da cultura pode ocorrer devido à interrupção dos processos celulares por pH extremo (WANG et al., 2012).

A temperatura influencia diretamente nas atividades metabólicas, atividades enzimáticas e conformação de estruturas vitais. Os valores ideais de temperatura variam na faixa de 15 e 26 °C para a maioria das microalgas. No entanto, valores mais elevados podem inibir a atividade metabólica e reduzir a solubilidade dos componentes gasosos no meio de cultura. Por outro lado, valores baixos diminuem a cinética das atividades metabólicas. Notoriamente, existem algumas espécies de microalgas que podem crescer em temperaturas fora da faixa ideal (PIRES et al., 2017).

A mistura em fotobiorreatores é necessária para aprimorar a produtividade da biomassa. Em outras palavras, a mistura exerce um papel importante em garantir a distribuição da luz, transferência suficiente de CO₂ e manutenção do pH uniforme. Também é necessária para evitar a sedimentação de microalgas, evitando a fixação da célula na parede do reator; e garantir que todas as células fiquem igualmente expostas à luz e aos nutrientes. Além disso, melhora a troca gasosa entre o meio de cultura e o ar (BITOG et al., 2011).

2.4 COMPONENTES E APLICAÇÕES COMERCIAIS DE MICROALGAS

O uso de microalgas por humanos surgiu há cerca de 2.000 anos pelos chineses, devido à crise financeira e escassez de alimento em seu país. Atualmente, há uma vasta gama de aplicações comerciais e industriais das algas. Além do biocombustível, as microalgas também possuem elevada capacidade de produzir produtos importantes como polissacarídeos, minerais, vitaminas, pigmentos, antioxidantes, produtos farmacêuticos, cosméticos, ração animal, biofertilizante, bioeletricidade, suplemento alimentar essenciais e estabilizadores; mas

também produzem moléculas bioativas como proteínas, lipídios e polifenóis, com propriedades antibacterianas, antivirais, antifúngicas, entre outros (ENAMALA et al., 2018; HOLDT e KRAAN, 2011).

Os lipídios microalgais podem ser convertidos principalmente em biodiesel, enquanto os carboidratos (amido e celulose) podem ser transformados em bioetanol e biobutanol (combustível alternativo) por fermentação (DEPRÁ et al., 2018; ZHU, 2015). O teor de lipídios microalgais é constituído por cerca de 20 a 50% de seu peso seco. Adicionalmente, quando as microalgas são submetidas a certas condições de estresse, elas podem produzir elevados níveis de lipídios podendo chegar até 85% (SANTOS-SANCHEZ et al., 2016).

Os principais pigmentos microalgais incluem clorofila *a*, astaxantina, β -caroteno, ficocianina, xantofilas e ficoeritrina. Recentemente, há uma demanda crescente por corantes naturais que são usadas em alimentos, produtos farmacêuticos, cosméticos, têxteis e como tintas de impressão. Devido ao efeito tóxico que os corantes sintéticos produzem, há uma preferência crescente pelo uso de cores naturais, dessa maneira as microalgas surgem como uma opção de fonte natural, sendo sustentável e ecologicamente correta (DUFOSSÉ et al., 2005).

A concentração de carboidratos nas microalgas deve-se à fixação de CO₂ durante o processo fotossintético (CHEN et al., 2013). Os carboidratos são compostos por açúcares simples (ou monossacarídeos) e seus polímeros e podem ser utilizados para diversas tecnologias de conversão de biomassa, principalmente para a produção de bioetanol (MARKOU et al., 2012).

O elevado teor de proteínas de diversas espécies de microalgas se compara com o de outras proteínas alimentares. Notoriamente, as células microalgais são capazes de sintetizar todos os aminoácidos, fornecendo os essenciais ao homem e aos animais (RIZWAN et al., 2018). Nesse sentido, quando cultivadas heterotroficamente, as microalgas são capazes de gerar análogos de carne mais sustentáveis do que quaisquer outras fontes de proteína, sendo capaz de acumular mais de 50% de proteína em sua matéria seca. Além disso, as microalgas podem ser adicionadas em diversos alimentos devido às suas propriedades funcionais, como capacidade de absorção de água e gordura, gelificação, capacidade de formação de espuma e emulsificação (CAPORGNO et al., 2020).

2.5 LIMITES PLANETÁRIOS

É amplamente aceito que para as atividades humanas serem sustentáveis, devemos respeitar as restrições ecológicas sobre o que podemos fazer no e com o planeta terra. Uma intensa discussão científica ao longo dos últimos anos envolve o conceito de limites planetários seguros que trata da questão da sustentabilidade ambiental global. Esse conceito discute os limites operacionais seguros para a humanidade em relação a questões críticas decorrentes da ocupação humana na terra (ARTAXO, 2014).

Rockström et al. (2009) propôs uma forma de definir um espaço operacional seguro para a humanidade em termos de um conjunto de limites planetários, cada um enquadrado em termos científicos: a ideia é que manter as atividades humanas dentro dos limites planetários pode manter a terra no estado semelhante ao holoceno em que as sociedades humanas se desenvolveram por milênios. A abordagem de limites planetários é baseada em evidências científicas sobre a provável resiliência de vários sistemas da terra em resposta a um conjunto de pressões ambientais, mas abrange o julgamento de valor na definição dos limites da meta dentro da faixa de incerteza entre seguro e perigoso (CLIFT et al., 2017).

O conceito de fronteiras planetárias propõe limites globais para perturbações antropogênicas que demarcam um espaço operacional seguro no qual a humanidade pode se desenvolver sem desestabilizar o sistema terrestre. Desde sua publicação há uma década, o conceito ganhou muita atenção além do campo da ciência do sistema terrestre e foi adotado como uma nova forma de enquadrar o desenvolvimento sustentável por atores na política, empresas e sociedade civil. No entanto, a tomada de decisão real com base no conceito de limites planetários requer uma tradução do conceito de escala global para escalas menores, que são mais relevantes para a maioria das decisões sobre o uso de recursos e emissões. Os limites planetários podem apoiar a tomada de decisões estratégicas quando integrado à avaliação do ciclo de vida (uma técnica comumente usada para avaliar os impactos ambientais potenciais dos produtos) (BJØRN et al., 2019).

Segundo Steffen et al. (2015), a estrutura de limites planetários contém nove processos do sistema terrestre (semelhantes às categorias de impacto em ACV), que se mantidas dentro de determinados parâmetros, permitem que a humanidade possa continuar a se desenvolver e prosperar, mantendo as condições de sobrevivência para as gerações futuras. Uma avaliação do ciclo de vida baseada em limites planetários vincula o espaço operacional seguro planetário aos inventários de ciclo de vida por meio de fatores de caracterização dedicados a tal avaliação, um sistema de produto é comumente considerado ambientalmente sustentável se seu impacto ambiental não exceder sua parcela atribuída do espaço operacional seguro para qualquer categoria de impacto dos limites planetários (BJØRN et al., 2020).

O LP-ACV pode ser usado por empresas interessadas em comparar suas atividades com as fronteiras planetárias para apoiar decisões que ajudem a reduzir o risco das atividades humanas moverem o sistema terrestre para fora do estado do holoceno.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A avaliação do ciclo de vida foi determinada de acordo com a International Organization for Standardization 14040, utilizada para avaliar os aspectos ambientais e os impactos potenciais do consumo de energia elétrica de processos e produtos à base de microalgas. A metodologia de avaliação do ciclo de vida incluiu quatro etapas, como (I) definição de objetivo e escopo; (II) inventário ao ciclo de vida; (III) avaliação do impacto do ciclo de vida; e (IV) interpretação dos resultados (ISO, 2006).

O escopo do sistema cobre a demanda de energia elétrica, nutrientes e materiais de 1 tonelada/mês de cada produto comercial de microalgas, incluindo biomassa seca inteira, β -caroteno, ficocianina, astaxantina, ácido docosahexaenoico (DHA) e ácido eicosapentaenoico (EPA) (Tabela 1). A Figura 1 ilustra os limites do sistema, espécies de microalgas e modos de cultivo considerados no estudo de caso analisado. Os limites do sistema foram estabelecidos a partir do ciclo de vida cradle-to-gate de acordo com Jacob-Lopes et al. (2021). Os requisitos de materiais e energia para a operação em fotobiorreator do tipo *raceway pond*, fotobiorreator tubular e fermentador são apresentados na Tabela 2. O objetivo da aplicação da avaliação do ciclo de vida neste estudo foi avaliar os impactos de processos e produtos. É fundamental ressaltar que apenas a demanda de energia elétrica e materiais necessários à operação do sistema foi operacionalizada. A esterilização física foi estabelecida para fermentadores e biorreatores, e para fotobiorreatores abertos, a esterilização química foi considerada.

Tabela 1: Inventário de entradas/saídas do processo de produção de 1 ton/ano de biomassa seca integral, β -caroteno, ficocianina, astaxantina, DHA e EPA.

Processo	Unidade	<i>C. vulgaris</i>	<i>C. vulgaris</i>	<i>A. platensis</i>	<i>A. platensis</i>	<i>D. salina</i>	<i>H. pluvialis</i>	<i>C. cohnii</i>	<i>N. laevis</i>	<i>N. oculata</i>
		F. do tipo <i>Raceway</i> <i>pond</i>	F. tubular	F. do tipo <i>Raceway</i> <i>pond</i>	F. do tipo <i>Raceway</i> <i>pond</i>	F. do tipo <i>Raceway</i> <i>pond</i>	F. tubular e F. do tipo <i>Raceway</i> <i>pond</i>	Fermentador	Fermentador	F. tubular
Cultivo										
<i>Entrada</i>										
Enriquecimento de nutrientes										
Fosfato	kg/ano	3,99	1,14	2,50	33,33	22,22	66,66	1,00	4,79	38,09
Nitrato	kg/ano	5,99	1,72	3,75	49,99	33,33	99,99	20,04	95,99	57,14
Glicose	kg/ano	-	-	-	-	-	-	417,45	1.999,8	-
Fotobiorreator tubular	m ³	-	4,33	-	-	-	9,12	-	-	144,28
Esterilização química (hipoclorito de sódio)	kg/ano	-	2,59	-	-	-	5,47	-	-	86,57
Consumo de energia para refrigeração	kWh/ano	-	514.404,0	-	-	-	1.083.456,0	-	-	17.140.464,0

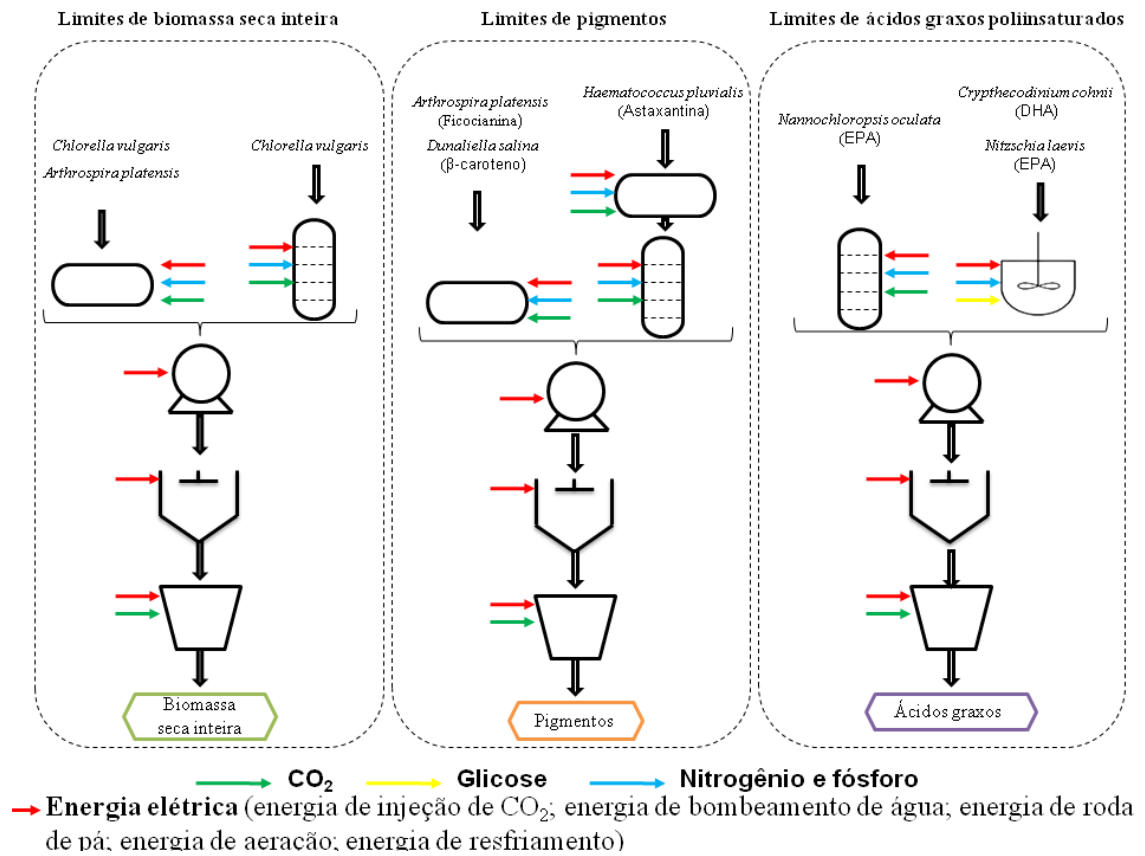
Energia de aeração	kWh/ ano	-	4.458,17	-	-	-	9.389,95	-	-	148.550,69
Bombeamento	kWh/ ano	-	32.578,92	-	-	-	68.618,88	-	-	1.085.562,72
Consumo de CO ₂	ton	-	1,5	-	-	-	1,80	-	-	107,13
Evaporação de água	m ³	-	0,009	-	-	-	0,018	-	-	0,288
Fermentador	m ³	-	-	-	-	-	-	2,53	12,12	-
Esterilização física	kWh/ ano	-	-	-	-	-	-	73,07	350,03	-
Agitação	kWh/ ano	-	-	-	-	-	-	146,27	700,73	-
Aeração	kWh/ ano	-	-	-	-	-	-	20.037,6	95.990,4	-
Fotobiorreatores do tipo <i>raceway</i> <i>pond</i>	m ³	15,15	-	9,47	126,24	84,18	243,38	-	-	-
Energia elétrica para roda de pás	kWh/ ano	64.793,52	-	40.501,29	539.903,23	360.021,02	1.040.887,58	-	-	-
Energia elétrica para bombeamento de água	kWh/ ano	11.998,8	-	7.500,24	99.982,08	66.670,56	192.756,96	-	-	-
Energia elétrica para injeção de	kWh/ ano	39.520,8	-	24.750,79	329.940,86	220.012,85	636.097,97	-	-	-

CO₂										
Consumo de CO ₂	ton	2,0	-	2,0	26,66	25,0	64,25			
Evaporação de água	m ³	1,97	-	1,23	16,41	10,94	31,64	-	-	-
Produtividade de biomassa	ton/m ³ /ano	0,066	0,231	0,106	0,106	0,148	0,132	3,3	0,247	0,495
<i>Saída</i>										
Líquido de algas	ton	11,76	11,42	12,69	71,09	83,3	222,2	44,42	16,0	380,9
Colheita										
<i>Entrada</i>										
Centrifugação do consumo de energia	kWh/ano	303,04	86,6	189,4	2.524,8	1.683,6	5.050,0	50,6	242,4	2.885,6
Secagem										
<i>Entrada</i>										
Biomassa úmida	ton	8,82	8,55	9,51	53,31	49,98	133,32	33,3	12,0	285,66
Spray-dryer	kWh/ano	9.613,8	9.319,5	10.365,9	58.107,9	54.478,2	145.318,8	36.297,0	13.080,0	311.369,4
<i>Saída</i>										
Biomassa seca inteira	ton	1	1	1	-	-	-	-	-	-

Extração										
<i>Entrada</i>										
Biomassa seca	ton	-	-	-	13,33	12,5	33,33	8,33	3,0	71,42
sCO ₂	kWh/ ano	-	-	-	10.664,8	10.000,0	26.664,0	6.664,0	2.400,0	57.136,0
<i>Saída</i>										
Pigmentos ricos em óleo	ton	-	-	-	1	1	1	-	-	-
Óleo	ton	-	-	-		-	-	1	1	1
Eletricidade	kWh/ ano	126.229,96	560.847,19	83.307,62	1.041.123,67	712.866,23	3.208.240,14	63.268,54	112.763,56	18.745.968,41

Siglas: DHA, Docosaheptaenoico; EPA, Eicosapentaenoico; sCO₂, extração supercrítica de CO₂.

Figura 1. Limites de sistemas para avaliação de produtos à base de microalgas.



DHA: Docosahexaenoico; EPA: Eicosapentaenoico. Adaptado de Deprá et al. (2020).

Tabela 2: Requisitos de materiais e energia para a operação em fotobiorreator do tipo *raceway pond*, fotobiorreator tubular e fermentador.

Processo	Unidade	Fotobiorreator do tipo <i>raceway pond</i>	Fotobiorreator tubular	Fermentador
Cultivo				
Fosfato	kg/m ³	0,008	0,008	0,012
Nitrato	kg/m ³	0,012	0,012	0,24
Glicose	kg/m ³	-	-	5
Consumo de energia para refrigeração	kWh/m ³	-	15	-
Energia de aeração	kWh/m ³	-	0,13	1
Agitação	kWh/m ³	-	-	0,0073
Esterilização química (hipoclorito de sódio)	kg/m ³	-	0,15	-
Esterilização física	kWh/m ³	-	-	7,22
Evaporação de água	m ³	1,3×10 ⁻¹	2×10 ⁻³	-
Energia elétrica para roda de pás	kWh/m ³	0,54	-	-
Energia elétrica para bombeamento de água	kWh/m ³	0,1	-	-
Bombeamento (riser e desgaseificador)	kWh/m ³	-	0,95	-
Energia elétrica para injeção de CO ₂	kWh/m ³	0,33	-	-

Colheita

Centrifugação do consumo de energia	kWh/m ³	1,25	1,25	1,25
-------------------------------------	--------------------	------	------	------

Secagem

Spray-dryer	kWh/kg água evaporada	1,09	1,09	1,09
-------------	-----------------------	------	------	------

Extração

sCO ₂	kWh/kg	0,8	0,8	0,8
------------------	--------	-----	-----	-----

Siglas: sCO₂, extração de CO₂ supercrítico. Adaptado de Deprá et al. (2020).

Os valores caracterizados das categorias de impacto ambiental foram estimados de acordo com Deprá et al. (2020). Os resultados dos indicadores para cada categoria de impacto foram quantificados por meio de modelagem matemática (Eq. 1):

$$[Ci = \sum (CF \times Ei)] \quad (1)$$

onde Ci é a categoria de impacto, CF é o fator de caracterização e Ei é o inventário de emissões (expresso em massa lançada no ambiente por unidade funcional).

As categorias de impacto consideradas foram: potencial de destruição da camada de ozônio (PDCO), potencial de aquecimento global (PAG), potencial de criação de oxidante fotoquímico (SMOG), potencial de acidificação (PA), potencial de eutrofização (PE), ecotoxicidade (ECO), recurso energético (RE), pegada hídrica (PH) e uso do solo (US). Os fatores de caracterização do impacto ambiental da eletricidade e dos materiais são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Fatores de caracterização dos impactos ambientais de materiais e energia nos processos.

		Pegada hídrica	Destruição do ozônio	Aquecimento global	SMOG	Acidificação	Eutrofização	Ecotoxicidade	Esgotamento de combustível fóssil
	Unidad e	m ³	(kg CFC-11 eq)	(kg CO ₂ eq)	(kg O ₃ eq)	(kg SO ₂ eq)	(kg N eq)	(CTUe)	(MJ excedente)
Nitrato de sódio	1 kg	-	$3,62 \times 10^{-7}$	4,94	$2,34 \times 10^{-1}$	$1,98 \times 10^{-2}$	$2,08 \times 10^{-2}$	$3,08 \times 10^{+1}$	4,12
Hipoclorito de sódio	1 kg	-	$1,2 \times 10^{-6}$	$9,3 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$3,16 \times 10^{-3}$	$2,29 \times 10^{-2}$	-	16,7
Fosfato	1 kg	-	$2,99 \times 10^{-7}$	1,88	$1,45 \times 10^{-1}$	$2,06 \times 10^{-2}$	$1,91 \times 10^{-2}$	$4,07 \times 10^{+1}$	2,92
Glicose	1 kg	-	-	$1,60 \times 10^{-1}$	-	$1,21 \times 10^{-3}$	$1,23 \times 10^{-3}$	-	14,23
CO ₂ de qualidade alimentar	1 kg	-	$3,28 \times 10^{-8}$	$9,54 \times 10^{-1}$	$1,12 \times 10^{-1}$	$2,75 \times 10^{-3}$	$1,65 \times 10^{-3}$	4,13	1,02
Eletricidade	1 kWh	$6,0 \times 10^{-4}$	$9,39 \times 10^{-8}$	$3,08 \times 10^{-1}$	$6,84 \times 10^{-3}$	$1,64 \times 10^{-3}$	$5,86 \times 10^{-4}$	2,18	0,665

3.2 LIMITES PLANETÁRIOS

Os limites planetários foram determinados usando a metodologia introduzida por Rockström et al. (2009), com o objetivo de estabelecer a capacidade de suporte ecológico do ecossistema na perspectiva da sustentabilidade ambiental absoluta dos processos de obtenção de produtos microalgas. Neste estudo, nove esferas planetárias foram reconhecidas para descrever o teto ambiental das fronteiras planetárias, que estão relacionadas às mudanças climáticas, mudanças no sistema terrestre, uso de água doce, acidificação dos oceanos, fluxos biogeoquímicos, poluição química, carregamento de aerossóis atmosféricos, destruição do ozônio estratosférico e integridade da biosfera (Tabela 4).

Tabela 4: Visão geral dos limites planetários propostos, limites da zona de incerteza, limite natural e espaço operacional seguro.

Processo do sistema	Unidade	Indicador¹ (variável de controle)	Limite planetário	Zona de incerteza de limite planetário	Limite natural	Segurança operacional espacial
Das Alterações Climáticas	ppm CO ₂	Concentração atmosférica de dióxido de carbono	350	350-450	278	72
Das Alterações Climáticas	W/m ²	Mudança no forçamento radiativo	1	1-1,5	0	1
Destruição do ozônio estratosférico	DU	Concentração de ozônio estratosférico (O ₃)	275,5	275,5-261	290	15
Acidificação do oceano	mol	Concentração de íons de carbonato, estado médio de saturação do oceano na superfície global em relação à aragonita	2,75	-	3,44	0,69
Fluxos biogeoquímicos - Fósforo	Tg P/ano	Fósforo (P) global: fluxo de P dos sistemas de água doce para o oceano	26,2	11-100	20	6,2
Fluxos biogeoquímicos - Nitrogênio	Tg N/ano	Nitrogênio (N) global: fixação biológica industrial e intencional de N	62	62-82	0	62
Mudança do sistema	%	Global: área de terras florestadas como % da	75	75-54	100	25

terrestre		cobertura florestal original				
Uso de água doce	km ³ /ano	Global: quantidade máxima de consumo de água	4000	4000–6000	0	4000
		azul				
Carregamento de	AOD	Regional: AOD como uma média sazonal em	0,25	0,25-0,50	0,14	0,11
aerossol atmosférico		uma região				

EC¹ (2017). Adaptado de Rockström et al. (2009); Steffen et al. (2015).

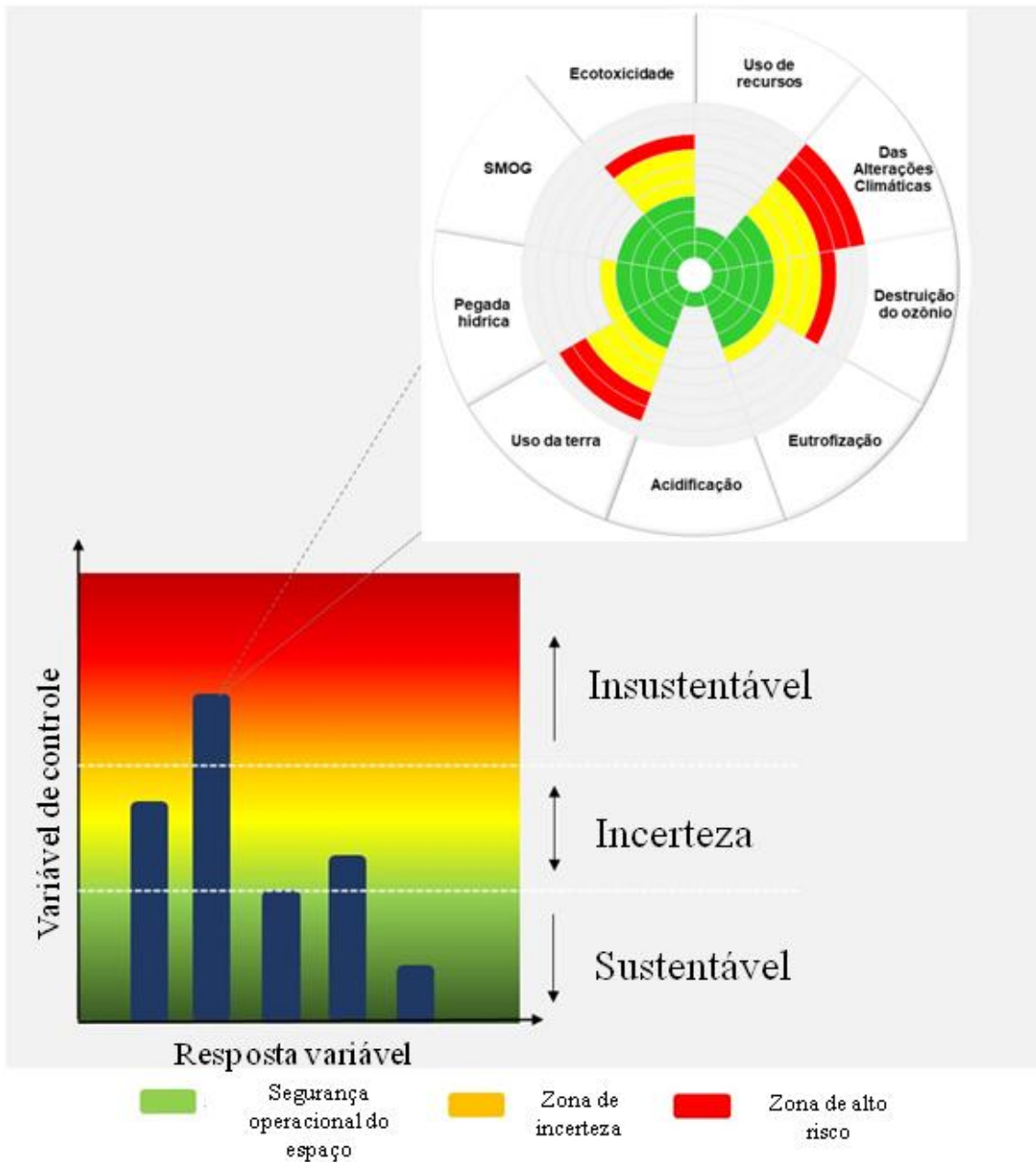
Paralelamente, os limites planetários foram quantificados por meio de uma abordagem conservadora e avessa ao risco que respeita o alto grau de incerteza, por meio da determinação do espaço operacional seguro (SOS). O SOS é definido como um n-hipervolume, com impactos ambientais como eixos ou dimensões, onde os ecossistemas naturais devem ser retidos para manter um estado de conservação desejável (Eq. 2):

$$\text{SOS} = \text{LP-LN} \quad (2)$$

onde, *SOS* é a segurança operacional do espaço, *LP* é a fronteira planetária e *LN* é o limite natural (as unidades foram estabelecidas de acordo com a categoria indicada).

Posteriormente, são apresentados os limites planetários, a integração da avaliação do impacto do ciclo de vida, os espaços operacionais seguros e os limites naturais resultaram em zonas de operação (Figura 2). Os limites das cores verde, amarelo e vermelho são usuais para se referir à zona de operação segura, zona de incerteza (risco crescente) e zona de alto risco, respectivamente. Portanto, os valores são apresentados na Tabela 5.

Figura 2. A estrutura conceitual para a abordagem do limite planetário, mostrando o espaço operacional seguro, a zona de incerteza, a posição do limite (onde é provável que exista) e a área de alto risco.



Adaptado de Steffen et al. (2015).

Tabela 5: Limites planetários globais e per capita das zonas verde, amarela e vermelha.

Categoria de impacto	PB-LCIA global	PB-LCIA global	PB-LCIA global	PB-LCIA per capita	PB-LCIA per capita	PB-LCIA per capita
	Zona verde	Zona amarela	Zona vermelha	Zona verde	Zona amarela	Zona vermelha
Uso de recursos	$\leq 2,24 \times 10^{14}$	$2,24 \times 10^{14} - 3,36 \times 10^{14}$	$\geq 3,36 \times 10^{14}$	$\leq 3,24 \times 10^4$	$3,24 \times 10^4 - 4,86 \times 10^4$	$\geq 4,86 \times 10^4$
Das Alterações Climáticas	$\leq 6,81 \times 10^{12}$	$6,81 \times 10^{12} - 8,71 \times 10^{12}$	$\geq 8,71 \times 10^{12}$	$\leq 9,85 \times 10^2$	$9,85 \times 10^2 - 1,26 \times 10^3$	$\geq 1,26 \times 10^3$
Destruição do ozônio	$\leq 5,39 \times 10^8$	$5,39 \times 10^8 - 5,71 \times 10^8$	$\geq 5,71 \times 10^8$	$\leq 7,80 \times 10^{-2}$	$7,80 \times 10^{-2} - 8,26 \times 10^{-2}$	$\geq 8,26 \times 10^{-2}$
Eutrofização, marinha	$\leq 2,01 \times 10^{11}$	$2,01 \times 10^{11} - 2,65 \times 10^{11}$	$\geq 2,65 \times 10^{11}$	$\leq 2,90 \times 10^1$	$2,90 \times 10^1 - 3,82 \times 10^1$	$\geq 3,82 \times 10^1$
Acidificação	$\leq 1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{12} - 1,25 \times 10^{12}$	$\geq 1,25 \times 10^{12}$	$\leq 1,45 \times 10^2$	$1,45 \times 10^2 - 1,81 \times 10^2$	$\geq 1,81 \times 10^2$
Uso da terra	$\leq 1,03 \times 10^{14}$	$1,03 \times 10^{14} - 1,31 \times 10^{14}$	$\geq 1,31 \times 10^{14}$	$\leq 1,49 \times 10^4$	$1,49 \times 10^4 - 1,90 \times 10^4$	$\geq 1,90 \times 10^4$
Pegada hídrica	$\leq 1,82 \times 10^{14}$	$1,82 \times 10^{14} - 2,73 \times 10^{14}$	$\geq 2,73 \times 10^{14}$	$\leq 2,63 \times 10^4$	$2,63 \times 10^4 - 3,94 \times 10^4$	$\geq 3,94 \times 10^4$
SMOG	$\leq 4,07 \times 10^{11}$	$4,07 \times 10^{11} - 4,30 \times 10^{11}$	$\geq 4,30 \times 10^{11}$	$\leq 5,88 \times 10^1$	$5,88 \times 10^1 - 6,11 \times 10^1$	$\geq 6,11 \times 10^1$
Ecotoxicidade	$\leq 1,31 \times 10^{14}$	$1,31 \times 10^{14} - 2,62 \times 10^{14}$	$\geq 2,62 \times 10^{14}$	$\leq 1,90 \times 10^4$	$1,90 \times 10^4 - 3,80 \times 10^4$	$\geq 3,80 \times 10^4$

A integração entre limites planetários e métricas de sustentabilidade foi realizada por meio do desenvolvimento de avaliação de impacto específica, conforme proposto por Ryberg et al. (2018), onde os escores de impacto ambiental foram calculados usando o método LP-AICV (Tabela 6).

Tabela 6: Pontuações de integração entre fronteiras planetárias e avaliação do impacto do ciclo de vida (LP-AICV).

Categoria de impacto	Unidade	LP-AICV global	LP-AICV per capita
Uso de recursos	MJ	$2,24 \times 10^{14}$	$3,24 \times 10^4$
Das Alterações Climáticas	kg CO ₂ eq	$6,81 \times 10^{12}$	$9,85 \times 10^2$
Destruição do ozônio	kg CFC-11 eq	$5,39 \times 10^8$	$7,80 \times 10^{-2}$
Eutrofização, marinha	kg N eq	$2,01 \times 10^{11}$	$2,90 \times 10^1$
Eutrofização, água doce	kg P eq	$5,81 \times 10^9$	$8,40 \times 10^{-1}$
Acidificação	mole H ⁺ eq	$1,0 \times 10^{12}$	$1,45 \times 10^2$
Uso da terra	kg m ² perda de biodiversidade	$1,03 \times 10^{14}$	$1,49 \times 10^4$
Pegada hídrica	m ³ mundo eq	$1,82 \times 10^{14}$	$2,63 \times 10^4$
Formação fotoquímica de ozônio	kg NMVOC eq	$4,07 \times 10^{11}$	$5,88 \times 10^1$
Ecotoxicidade	CTUe	$1,31 \times 10^{14}$	$1,90 \times 10^4$

Bjørn e Hauschild (2015); Sala et al. (2020).

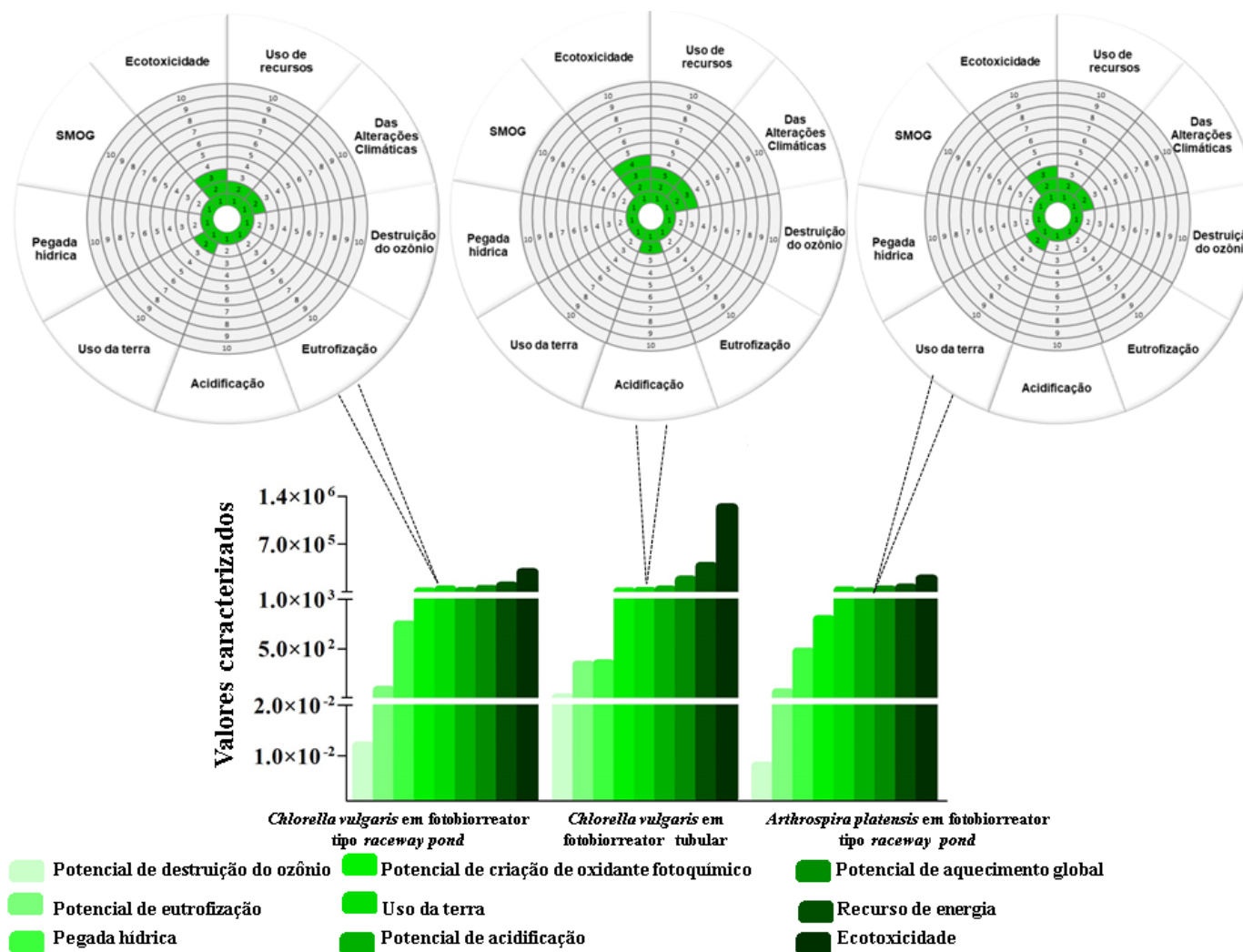
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 A RELEVÂNCIA DAS MÉTRICAS DE SUSTENTABILIDADE DEVIDO À PRODUÇÃO E CONSUMO DE PRODUTOS À BASE DE MICROALGAS

4.1.1 Biomassa seca total

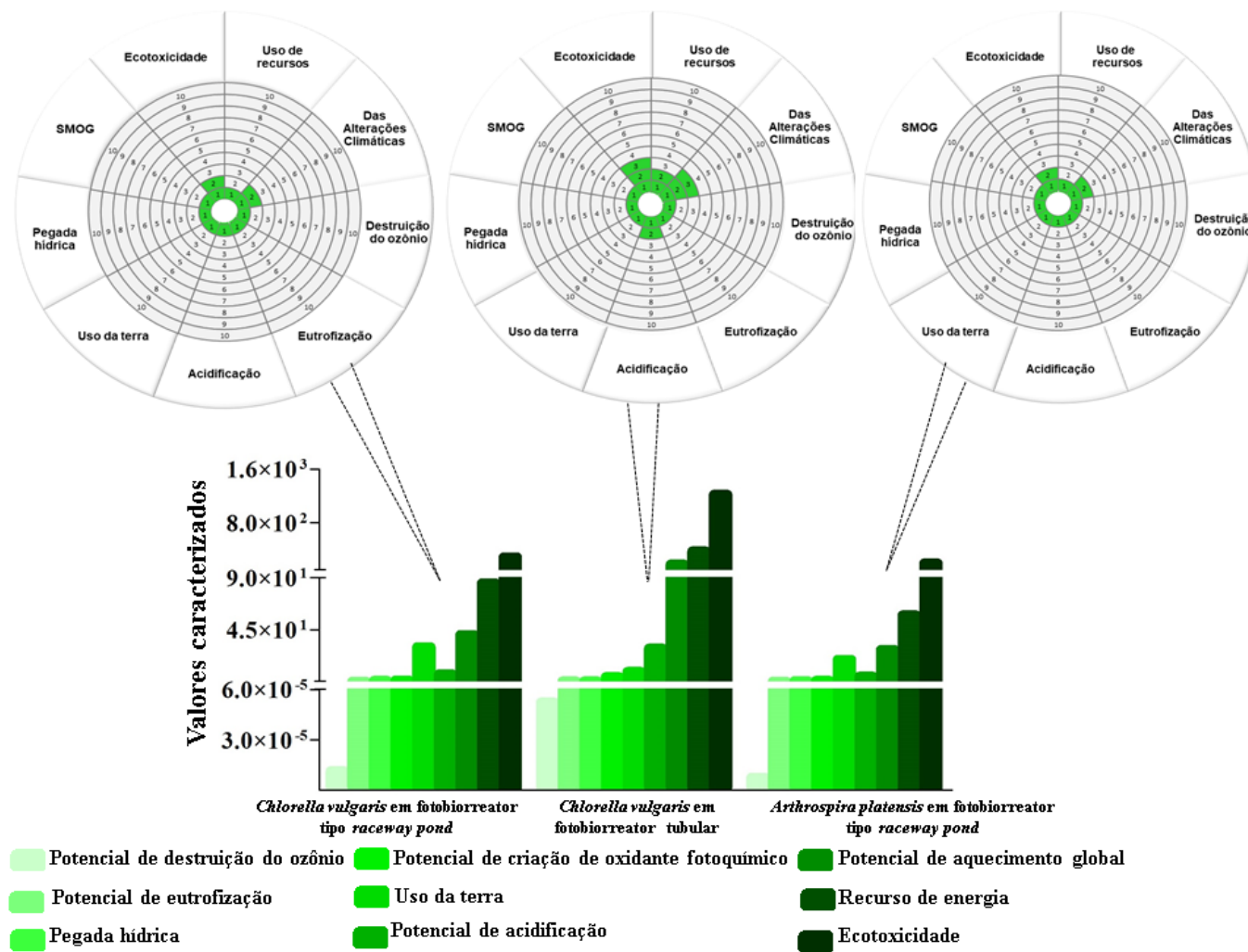
Atualmente, o produto à base de microalgas mais importante para uso como composto alimentar bioativo é a proteína unicelular (biomassa seca inteira) vendida diretamente como suplementos dietéticos (JACOB-LOPES et al., 2019). A fim de avaliar a importância dos encargos ambientais na produção desse produto, a Figura 3 mostra os principais impactos ambientais, em nível global.

Figura 3. Impactos ambientais da produção de biomassa seca total das microalgas *Chlorella vulgaris* e *Arthrospira platensis*, aplicados às fronteiras planetárias em nível global.



A Figura 3 mostra os valores caracterizados pela produção de 1 tonelada de biomassa seca inteira em sistemas de produção consolidados. As nove categorias se enquadram em uma faixa de baixo impacto para PDCO com $1,19 \times 10^{-2}$, $5,27 \times 10^{-2}$ e $7,89 \times 10^{-3}$ kg CFC-11 eq, PE com $7,75 \times 10^1$, $3,31 \times 10^2$ e $5,22 \times 10^1$ kg N eq e PH com $7,41 \times 10^2$, $3,44 \times 10^2$ e $4,65 \times 10^2$ m³, médio impacto para SMOG com $1,09 \times 10^3$, $4,00 \times 10^3$ e $7,95 \times 10^2$ kg O₃ eq, US com $3,03 \times 10^4$, $8,66 \times 10^3$ e $1,89 \times 10^4$ kg m² e PA com $6,65 \times 10^3$, $2,89 \times 10^4$, $4,45 \times 10^3$ mol H⁺ eq, e alto impacto para PAG com $4,08 \times 10^4$, $1,74 \times 10^5$ e $2,76 \times 10^4$ kg CO₂ eq, RE com $8,60 \times 10^4$, $3,75 \times 10^5$ e $5,75 \times 10^4$ MJ e ECO com $2,84 \times 10^5$, $1,23 \times 10^6$ e $1,90 \times 10^5$ CTUe, do cultivo da espécie *Chlorella vulgaris* em fotobiorreator do tipo *raceway pond* e fotobiorreator tubular e da espécie *Arthrospira platensis* em fotobiorreator do tipo *raceway pond*.

Figura 4. Impactos ambientais da produção de biomassa seca total das microalgas *Chlorella vulgaris* e *Arthrospira platensis*, aplicados às fronteiras planetárias em nível per capita.



Por outro lado, a Figura 4 mostra os valores caracterizados pela produção de 1 kg de biomassa seca total em nível per capita. As nove categorias se enquadram em uma faixa de baixo impacto para PDCO com $1,18 \times 10^{-5}$, $5,24 \times 10^{-5}$ e $7,91 \times 10^{-6}$ kg CFC-11 eq, PE com $7,68 \times 10^{-2}$, $3,29 \times 10^{-1}$ e $5,24 \times 10^{-2}$ kg N eq e PH com $7,34 \times 10^{-1}$, $3,41 \times 10^{-1}$ e $4,70 \times 10^{-1}$ m³, médio impacto para SMOG com 1,08, 3,98 e $7,97 \times 10^{-1}$ kg O₃ eq, US com $3,00 \times 10^1$, 8,60 e $1,90 \times 10^1$ kg m² e PA com 6,59, $2,87 \times 10^1$ e 4,46 mol H⁺ eq, e alto impacto para PAG com $4,05 \times 10^1$, $1,73 \times 10^2$ e $2,77 \times 10^1$ kg CO₂ eq, RE com $8,53 \times 10^1$, $3,72 \times 10^2$ e $5,76 \times 10^1$ MJ e ECO com $2,81 \times 10^2$, $1,22 \times 10^3$ e $1,91 \times 10^2$ CTUe, do cultivo da espécie *Chlorella vulgaris* em fotobiorreator do tipo *raceway pond* e fotobiorreator tubular e da espécie *Arthrospira platensis* em fotobiorreator do tipo *raceway pond*.

A título de comparação, os estudos de Porcelli et al. (2020) avaliaram os indicadores ambientais para processos de 1 kg de biomassa total por *Phaeodactylum tricornutum* em um fotobiorreator de coluna, apresentando valores de impacto menores com o presente estudo no PDCO de $1,69 \times 10^{-7}$ kg CFC-11 eq, PE de $1,69 \times 10^{-1}$ kg N eq, SMOG de $4,34 \times 10^{-1}$ kg O₃ eq, PA de $8,15 \times 10^{-1}$ kg SO₂ eq, ECO de $2,70 \times 10^1$ CTUe, e PAG de $2,57 \times 10^2$ kg CO₂ eq, usando CO₂ residual. Em contraste, os resultados da operação em escala piloto para simular uma planta em grande escala baseada em fotobiorreator tipo *raceway pond*, de 1 kg de biomassa por *Chlorella vulgaris* também mostraram valores de impactos menores com o presente estudo na ordem de 1014,8 kg CO₂ eq para PAG, 274,5 kg de óleo eq para RE, 0,529 kg PO₄ para PE e 211,6 kg 1,4-DB eq para ECO (YADAV et al., 2020).

Diante disso, pode-se afirmar que a maioria das categorias de impacto, estão relacionados à demanda de energia e nutrientes. Em consideração a isso, deve-se destacar alguns métodos, como a centrifugação e o spray dryer que enfrentam problemas de alto consumo de energia e resultam em alto custo de produção (NAJJAR e ABU-SHAMLEH, 2020).

Posteriormente, para a produção de biomassa seca integral foram encontrados valores de consumo de energia fóssil em aproximadamente 126.229,96 kWh/ano para *Chlorella vulgaris* em fotobiorreator do tipo *raceway pond*, 560.847,19 kWh/ano para *Chlorella vulgaris* em fotobiorreator tubular e 83.307,62 kWh/ano para *Arthrospira platensis* em fotobiorreator do tipo *raceway pond*.

Vale acrescentar que, os tanques abertos são o sistema de cultivo mais básico e econômico para a produção de microalgas. Em escala comercial, aproximadamente 95% da produção de algas em todo o mundo é realizada em fotobiorreatores tipo *raceway pond*. Embora os sistemas abertos tenham pouco controle sobre as condições de operação que

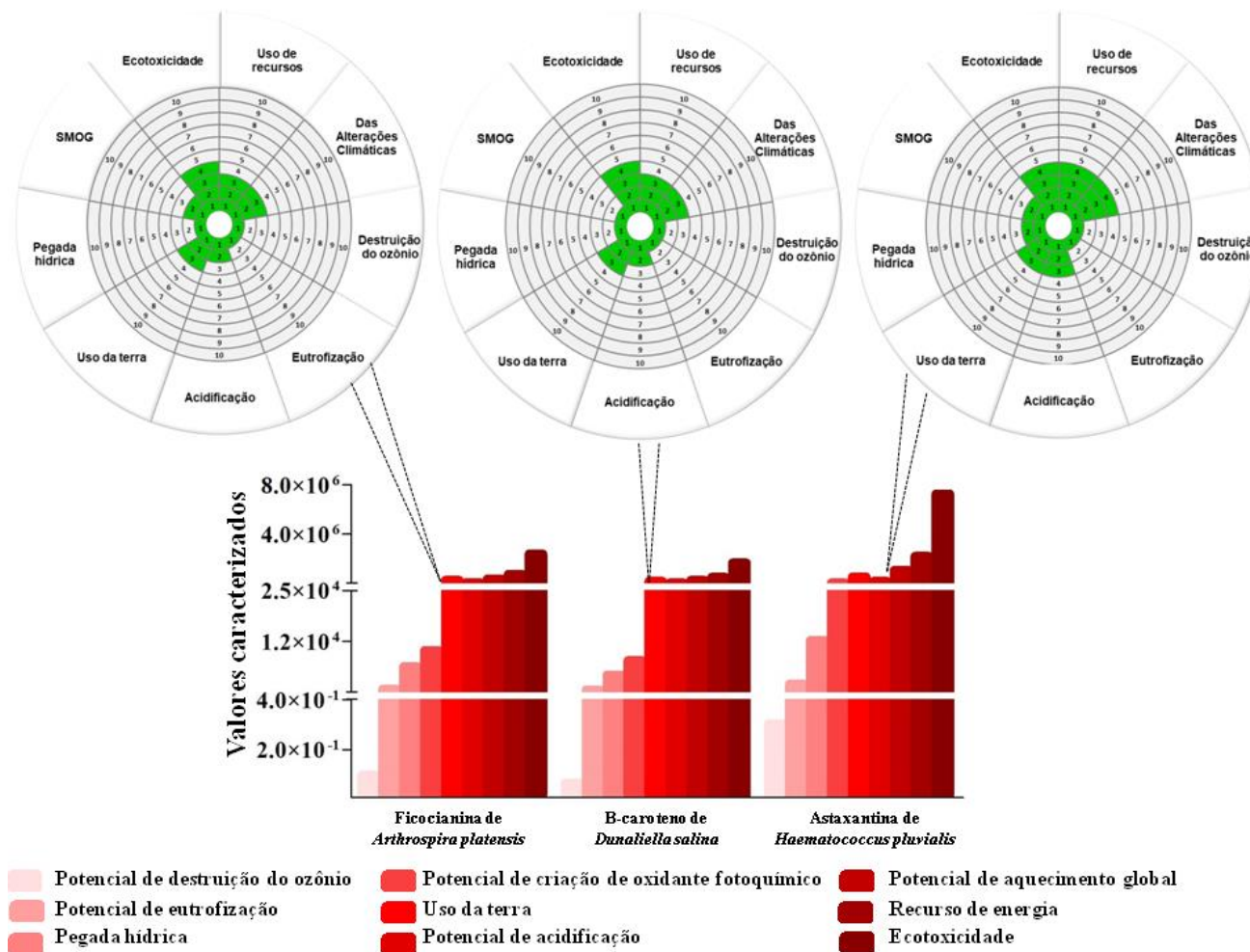
diminuem a produtividade final, isso geralmente é compensado pelo baixo custo de construção, facilidade de aumento de escala e baixo nível de uso de energia. Uma desvantagem do sistema é a menor produtividade da biomassa, o que leva a maiores exigências de colheita e processamento a jusante. Além disso, vários sistemas fechados são desenvolvidos para tentar superar as principais limitações das lagoas abertas (TAELEMAN et al., 2015). Portanto, os sistemas operacionais de produção de microalgas devem considerar uma série de variáveis que determinam e reduzem os impactos ambientais, como o uso de energia (DE SOUZA SCHNEIDER et al., 2018).

No que diz respeito à produção de proteínas, o uso de proteínas à base de plantas em formulações de alimentos tornou-se recentemente de interesse devido à maior sustentabilidade e menores custos de produção (GORISSEN et al., 2018). Mesmo que as proteínas à base de plantas apresentem essas vantagens, as microalgas oferecem benefícios agregados à saúde que as plantas não oferecem, por exemplo, na redução da pressão arterial, diminuição dos níveis de colesterol e glicemia, aceleração da cicatrização de feridas e melhora das funções imunológicas. *Chlorella sp.* e *Spirulina sp.* contêm altos teores de proteína (mais de 50% do peso seco), apresentam maior qualidade nutricional quando comparadas às plantas convencionais, principalmente a soja (ANDRADE et al., 2018).

4.1.2 Pigmentos

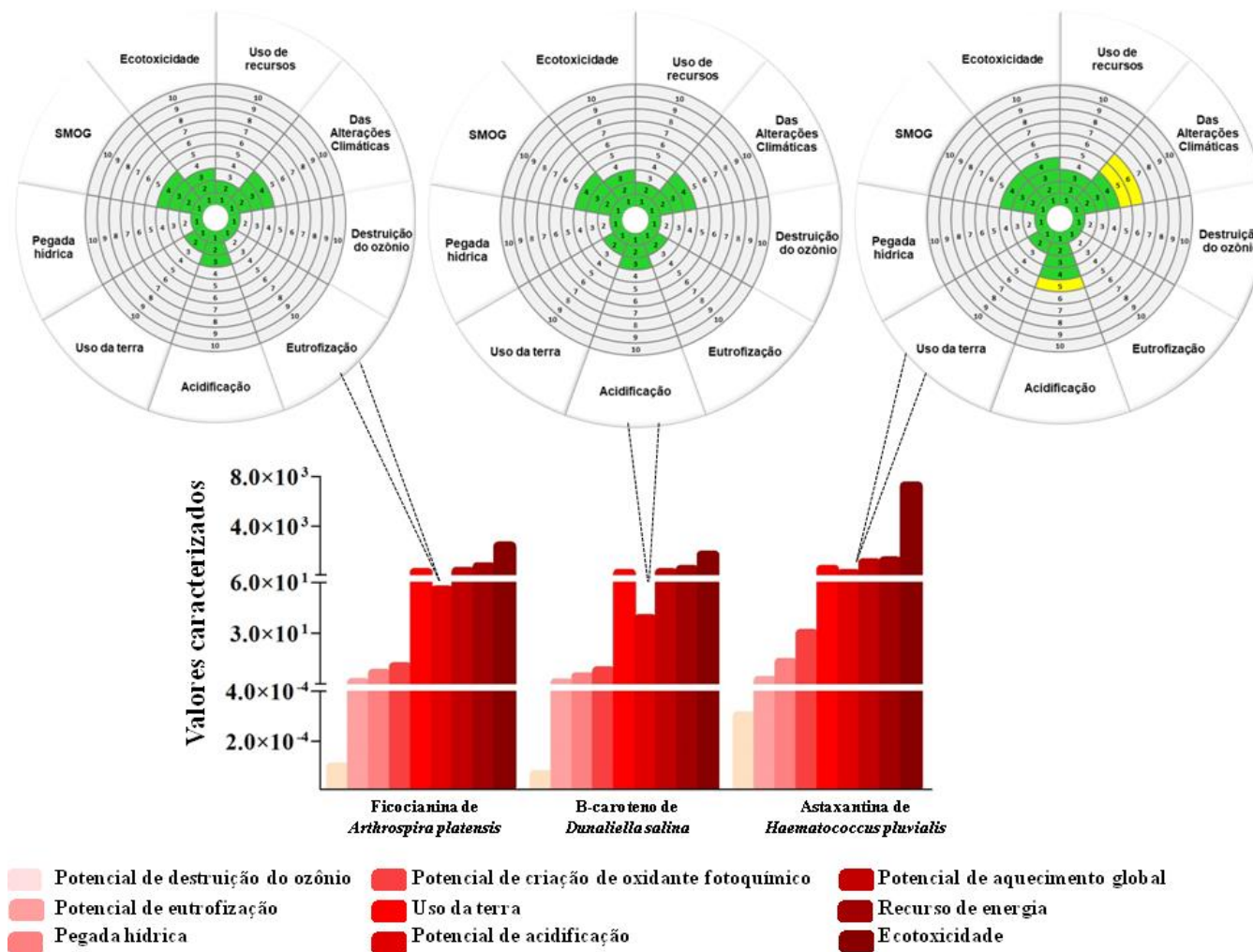
As microalgas são capazes de produzir vários pigmentos (por exemplo, clorofilas, carotenoides, xantofilas e ficobiliproteínas) e exploradas inicialmente como uma fonte de corantes naturais (NWOBA et al., 2020). Atualmente o interesse reside no fato que os pigmentos naturais são uma classe essencial de compostos bioativos com propriedades nutraceuticas proeminentes que têm sido cada vez mais utilizados em alimentos ou suplementos alimentares. Os carotenoides são pigmentos lipossolúveis naturais encontrados nas algas, constituídos por hidrocarbonetos e seus derivados oxigenados. Um dos principais carotenoides de importância comercial é a astaxantina, que é conhecida por suas propriedades antioxidantes, anticancerígenas, antidiabéticas, cardio e neuro protetoras (JAIN et al., 2021). Nesse sentido, os impactos ambientais associados à produção de pigmentos à base de microalgas foram examinados e os resultados são apresentados na Figura 5, em nível global.

Figura 5. Impactos ambientais da produção de ficocianina de *Arthrospira platensis*, β -caroteno de *Dunaliella salina* e astaxantina de *Haematococcus pluvialis*, aplicados às fronteiras planetárias em nível global.



Em nível global, a Figura 5 mostra os resultados da produção de pigmentos das espécies *Arthrospira platensis*, *Dunaliella salina* e *Haematococcus pluvialis* apresentando baixo impacto para PDCO com $9,87 \times 10^{-2}$, $6,78 \times 10^{-2}$ e $3,03 \times 10^{-1}$ kg CFC-11 eq, PE com $6,56 \times 10^2$, $4,60 \times 10^2$ e $1,90 \times 10^3$ kg N eq e PH com $6,17 \times 10^3$, $4,12 \times 10^3$ e $1,26 \times 10^4$ m³, médio impacto para SMOG com $1,01 \times 10^4$, $7,69 \times 10^3$ e $2,94 \times 10^4$ kg O₃ eq, US com $2,52 \times 10^5$, $1,68 \times 10^5$ e $5,05 \times 10^5$ kg m² e PA com $5,57 \times 10^4$, $3,87 \times 10^4$ e $1,70 \times 10^5$ mol H⁺ eq, e alto impacto para PAG com $3,46 \times 10^5$, $2,44 \times 10^5$ e $1,05 \times 10^6$ kg CO₂ eq, RE com $7,20 \times 10^5$, $5,00 \times 10^5$ e $2,20 \times 10^6$ MJ e ECO com $2,38 \times 10^6$, $1,66 \times 10^6$ e $7,27 \times 10^6$ CTUe, de ficocianina, β-caroteno e astaxantina, respectivamente.

Figura 6. Impactos ambientais da produção de pigmentos, como ficocianina de *Arthrospira platensis*, β -caroteno de *Dunaliella salina* e astaxantina de *Haematococcus pluvialis*, aplicados às fronteiras planetárias em nível per capita.



Notoriamente, em nível per capita a Figura 6 mostra os resultados da produção de pigmentos das espécies *Arthrospira platensis*, *Dunaliella salina* e *Haematococcus pluvialis*, apresentando baixo impacto para PDCO com $9,85 \times 10^{-5}$, $6,76 \times 10^{-5}$ e $3,02 \times 10^{-4}$ kg CFC-11 eq, PE com $6,55 \times 10^{-1}$, $4,59 \times 10^{-1}$ e $1,99$ kg N eq e PH com $6,16$, $4,11$ e $1,26 \times 10^1$ m³, médio impacto para SMOG com $1,01 \times 10^1$, $7,68$ e $2,98 \times 10^1$ kg O₃ eq, US com $2,52 \times 10^2$, $1,68 \times 10^2$ e $5,06 \times 10^2$ kg m² e PA com $5,56 \times 10^1$, $3,86 \times 10^1$ e $1,70 \times 10^2$ mol H⁺ eq, e alto impacto para PAG com $3,46 \times 10^2$, $2,43 \times 10^2$ e $1,05 \times 10^3$ kg CO₂ eq, RE com $7,19 \times 10^2$, $4,99 \times 10^2$ e $1,19 \times 10^3$ MJ e ECO com $2,38 \times 10^3$, $1,66 \times 10^3$ e $7,25 \times 10^3$ CTUe, de ficocianina, β-caroteno e astaxantina, respectivamente.

Comparativamente, o estudo de Papadaki et al. (2017) avaliou a produção de 1 kg de ficocianina sob recuperação de biomassa úmida por *Arthrospira platensis* que resultou em impactos menores em relação ao presente trabalho nas categorias de PA de $4,27 \times 10^1$ kg SO₂ eq, PE de $1,51$ kg PO₄⁻³ eq, PAG de $6,72 \times 10^3$ kg CO₂ eq e PDCO de $4,68 \times 10^{-4}$ kg CFC-11 eq. Em contraste, estudos de Kyriakopoulou et al. (2015) avaliaram a produção de 1 kg de β-caroteno pela microalga *Dunaliella salina*, em lagoa de adução apresentando menores impactos ao presente estudo associados às categorias de PA de $1,27 \times 10^{-2}$ kg SO₂ eq, PE de $4,74 \times 10^{-4}$ kg PO₄ eq, PAG de $1,99$ kg CO₂ eq, PDCO de $2,17 \times 10^{-7}$ kg CFC-11 eq. Por fim, a produção de 1 kg de astaxantina por *Haematococcus pluvialis*, em sistemas tubular horizontal unilayer, teve impactos menores em relação a este estudo nas categorias PAG de $20,93$ kg CO₂ eq, PE de 0 kg P eq, PDCO de 0 kg CFC-11 eq, PA de $0,12$ kg SO₂ eq, US de $0,29$ m², PH de $148,54$ m³ (ONORATO e RÖSCH, 2020).

Diante dos resultados deste estudo, os principais insumos relevantes que afetam o desempenho ambiental dos pigmentos microalgais foram o consumo de eletricidade e os nutrientes. Quanto à eletricidade, a produção de pigmentos obteve consumo de energia fóssil de aproximadamente $1.041.123,67$ kWh/ano para β-caroteno, $712.866,23$ kWh/ano para astaxantina e $3.208.240,14$ kWh/ano para ficocianina, sendo que os métodos de centrifugação, secagem por spray dryer e extração foram os mais intensivos em consumo de energia. Portanto, a seleção de sistemas energeticamente eficientes é importante para resultar em menor consumo de energia e menores emissões. Já, os impactos ambientais gerados pela adição de nutrientes estão relacionados à inserção de nutrientes durante a fase de cultivo. No entanto, esses requisitos podem ser reduzidos por abordagens de integração de processos como reciclagem de nutrientes.

No que se refere à produção de pigmentos, os pigmentos sintéticos geralmente são racêmicos e não têm as mesmas propriedades benéficas que os naturais (MUSSAGY et al.,

2021). Além disso, os pigmentos naturais de microalgas apresentam benefícios à saúde (antioxidante, anticancerígeno e anti-inflamatório) e podem substituir os artificiais com vantagens (SILVA et al., 2020). Já, os pigmentos sintéticos são altamente citotóxicos e cancerígenos e atuam como promotores de tumores hepáticos (SINHA et al., 2012). Embora as formas sintéticas sejam muito mais baratas do que as naturais, os carotenoides de microalgas têm a vantagem de fornecer isômeros naturais (SPOLAORE et al., 2006).

4.1.3 Ácidos graxos poliinsaturados

O ácido docosaheptaenoico e o ácido eicosapentaenoico são os ácidos graxos poli-insaturados de cadeia longa (LC-PUFA) da classe ômega-3 mais representativos e conquistaram um mercado crescente de microalgas nos últimos anos, devido aos seus muitos efeitos positivos para a saúde humana (SUN et al., 2018). Diante disso, os principais impactos ambientais relacionados à produção de ácidos graxos poli-insaturados à base de microalgas em nível global foram examinados, e os resultados são apresentados na Figura 7.

Os resultados apresentados na Figura 7, em nível global indicam impactos para a produção de ácidos graxos das espécies *Cryptothecodinium cohnii* em cultivo heterotrófico, *Nitzschia laevis* em cultivo heterotrófico e *Nannochloropsis oculata* em cultivo autotrófico apresentaram baixo impacto para PDCO com $5,95 \times 10^{-3}$, $1,06 \times 10^{-2}$ e $1,76$ kg CFC-11 eq, PE com $3,80 \times 10^1$, $7,06 \times 10^1$ e $1,12 \times 10^4$ kg N eq e PH com $4,05 \times 10^1$, $7,98 \times 10^1$ e $1,15 \times 10^4$ m³, médio impacto para SMOG com $4,38 \times 10^2$, $7,94 \times 10^2$ e $1,40 \times 10^5$ kg O₃ eq, US com $5,06 \times 10^3$, $2,42 \times 10^4$ e $2,89 \times 10^5$ kg m² e PA com $3,27 \times 10^3$, $5,92 \times 10^3$ e $9,70 \times 10^5$ mol H⁺ eq, e alto impacto para PAG com $1,97 \times 10^4$, $3,55 \times 10^4$ e $5,88 \times 10^6$ kg CO₂ eq, RE com $4,81 \times 10^4$, $1,04 \times 10^5$ e $1,26 \times 10^7$ MJ e ECO com $1,39 \times 10^5$, $2,49 \times 10^5$ e $4,13 \times 10^7$ CTUe, de ácido docosahexaenoico, ácido eicosapentaenoico e ácido eicosapentaenoico, respectivamente.

Em relação à produção de ácidos graxos, peixes e óleo de peixes também são fontes comuns para obtenção de ácidos graxos, mas a aplicação como aditivo alimentar é limitado devido ao possível acúmulo de toxinas, odor de peixe, sabor desagradável, baixa estabilidade oxidativa e presença de ácidos graxos mistos. A maior concentração de ácidos graxos em peixes pode ser causada pelo consumo de microalgas, o que é uma razão para considerar as microalgas como uma fonte potencial de ácidos graxos (SATHASIVAM et al., 2019; SPOLAORE et al., 2006). No entanto, a produção de óleo de algas tem potencial para expandir e atender a múltiplas demandas do crescente setor de aquicultura, ao mesmo tempo em que reduz a carga sobre a pesca selvagem e diminui o uso de recursos bióticos (BARTEK et al., 2021). Conseqüentemente, os produtos de algas têm um impacto relativamente maior no material particulado do que os óleos de peixe, o que está relacionado com a produção de energia (DAVIS et al., 2021). Portanto, mesmo que os ácidos graxos de peixes sejam menos impactantes que o de algas, o consumo de suplementos de EPA e DHA de microalgas possui benefícios à saúde que o de peixe não oferece como prevenir doenças cardiovasculares, do sistema nervoso e inflamatório, devido à presença de outros compostos lipídicos que apresentam bioatividade (ADARME-VEJA et al., 2012).

A Figura 8, em nível per capita, indica para a produção de ácidos graxos das espécies *Cryptocodinium cohnii* em cultivo heterotrófico, *Nitzschia laevis* em cultivo heterotrófico e *Nannochloropsis oculata* em cultivo autotrófico apresentaram baixo impacto para PDCO com $5,93 \times 10^{-6}$, $1,05 \times 10^{-5}$ e $1,76 \times 10^{-3}$ kg CFC-11 eq, PE com $3,79 \times 10^{-2}$, $7,00 \times 10^{-2}$ e $1,11 \times 10^1$ kg N eq e PH com $4,03 \times 10^{-2}$, $7,91 \times 10^{-2}$ e $1,15 \times 10^1$ m³, médio impacto para SMOG com $4,36 \times 10^{-1}$, $7,88 \times 10^{-1}$ e $1,40 \times 10^2$ kg O₃ eq, US com 5,00, $2,40 \times 10^1$ e $2,88 \times 10^2$ kg m² e PA com 3,26, 5,87 e $9,68 \times 10^2$ mole H⁺ eq, e alto impacto para PAG com $1,96 \times 10^1$, $3,52 \times 10^1$ e $5,87 \times 10^3$ kg CO₂ eq, RE com $4,79 \times 10^1$, $1,03 \times 10^2$ e $1,26 \times 10^4$ MJ e ECO com $1,38 \times 10^2$, $2,47 \times 10^2$ e $4,12 \times 10^4$ CTUe, de ácido docosahexaenoico, ácido eicosapentaenoico e ácido eicosapentaenoico, respectivamente.

Paralelamente, os resultados apresentados indicam que, em geral, o cultivo heterotrófico e os sistemas autotróficos contribuem para um impacto relevante nas categorias de ECO, RE, PAG e SMOG. Essas quatro categorias principais estão relacionadas principalmente aos efeitos indiretos do consumo de energia fóssil. Além disso, esta disparidade de dados está associada à demanda de energia necessária em regimes autotróficos em comparação com a produção heterotrófica.

Do ponto de vista econômico, o cultivo heterotrófico pode ser muito mais benéfico do que o cultivo fotoautotrófico. A taxa de conversão de energia de entrada para ATP é maior para o cultivo heterotrófico (18% da energia obtida pode ser convertida em ATP, enquanto apenas 10% podem ser convertidos em condições fotoautotróficas) (HU et al., 2018). Por outro lado, a utilização do fermentador para o cultivo de microalgas envolve equipamentos mais compactos e otimizados, refletindo em uma planta de beneficiamento com menor ocupação do espaço físico e com menor consumo de água quando comparado ao uso do fotobiorreator tubular para o cultivo de microalgas (DEPRÁ et al., 2020).

Notoriamente, os encargos ambientais relacionados a essas rotas tecnológicas que afetam o desempenho ambiental dos ácidos graxos microalgais foram o consumo de eletricidade e os nutrientes. Aqui as etapas de aeração, agitação, centrifugação, secagem por spray dryer e extração apresentaram valores intensivos em energia. Em geral, para a produção de ácidos graxos foram encontrados valores de energia fóssil em aproximadamente 63.268,54 kWh/ano para DHA em cultivo heterotrófico, 112.763,56 kWh/ano para EPA em cultivo heterotrófico e 18.745.968,41 kWh/ano para EPA em cultivo autotrófico.

4.1.4 Discussão geral

Cerca de 98% dos impactos ambientais referem-se à demanda de energia nas fases a montante e a jusante (DEPRÁ et al., 2020), e os outros 2% referem-se a gastos com nutrientes. A eletricidade contribuiu para todos os cenários, devido a mais etapas que precisam de energia para aquecimento, agitação, centrifugação, entre outros. Portanto, é claro que qualquer redução do consumo de eletricidade resultará em uma grande redução do impacto ambiental total. Como a produção de eletricidade é o principal fardo ambiental da cadeia de processo, a unidade de produção de algas também pode hospedar produtores alternativos de eletricidade. No entanto, o consumo *in situ* de eletricidade deve reduzir o impacto ambiental e melhorar a proporção de energia de todo o sistema de emissões (COLLET et al., 2011).

De modo geral, em uma perspectiva global a produção de 1 tonelada de biomassa seca inteira, pigmentos e ácidos graxos cultivados em diferentes configurações e aplicados às fronteiras planetárias, conforme mostrado nas Figuras 3, 4, 5 e 7, que permanecem dentro da zona verde (segurança operacional do espaço) não apresentando grandes problemas ambientais ao ecossistema. Já para a perspectiva per capita, conforme Figuras 6 e 8, foram encontrados ultrapassagem da segurança operacional do espaço no cultivo de *Haematococcus pluvialis* pelas categorias PA e PAG encontrados dentro da zona de incerteza e no cultivo de *Nannochloropsis oculata* para as categorias ECO, PAG, PA e SMOG, encontrados na zona de perigo. Nas demais categorias, os impactos ambientais permaneceram dentro do espaço operacional seguro.

Evidentemente, a demanda per capita de produtos à base de microalgas excederem as premissas feitas no presente trabalho, sendo assim algumas medidas devem ser tomadas. Em vista disso, mesmo permanecendo dentro da zona de segurança operacional do espaço, uma alternativa de melhoria a fim de reduzir as emissões causadas pela eletricidade, é utilizando uma energia limpa, como eólica, solar e outras energias renováveis em vez da energia fóssil. Já, para as emissões causadas pelos nutrientes, à alternativa é reciclar o meio de cultura.

Notoriamente, investir em energia limpa está se tornando uma tendência e, no setor de microalgas, a iniciativa pode melhorar a sustentabilidade de processos e produtos. Essas fontes renováveis de eletricidade podem ser facilmente instaladas de forma autônoma por indústrias em setores intensivos em energia para alimentar suas operações (GUEZGOUZ et al., 2021). Conseqüentemente, a tecnologia limpa é um conceito geral sob o qual se buscam formas sustentáveis de suprir as necessidades humanas. Os benefícios desta tecnologia podem incluir a redução do uso de recursos e danos ambientais em comparação com tecnologias alternativas. A implementação dessas tecnologias em escalas maiores, especialmente para

reduzir as emissões, pode reduzir as ameaças graves de poluição. É possível aumentar o desempenho econômico das indústrias e potencialmente economizar água, energia, matérias-primas e resíduos usando tecnologia limpa (DE SOUZA et al., 2019).

No que diz respeito ao consumo de nutrientes, os impactos ambientais gerados pela adição de nutrientes estão relacionados à sua inserção durante a fase de cultivo. No entanto, esses requisitos podem ser reduzidos por abordagens de integração de processos, como reciclagem de nutrientes (BOROWITZKA, 2018). Além disso, a maioria dos nutrientes necessários para o crescimento de algas, exceto carbono, pode ser obtida de águas residuais com a função de remoção de nutrientes (MEDEIROS et al., 2015).

Ademais, reciclar o meio de cultura é uma abordagem sustentável para reduzir custos durante o cultivo de microalgas, especialmente para fotobiorreatores do tipo *raceway pond*. Além disso, existem quantidades substanciais de nutrientes na água de colheita que não atendem aos requisitos de descarga. Os fluxos de águas residuais contêm muitos nutrientes, o que pode ser uma solução melhor para economizar água e nutrientes para o cultivo de microalgas (WANG et al., 2018).

Portanto, medir até que ponto os produtos à base de microalgas estão dentro da capacidade de carga da terra é necessário para avançar para um consumo e produção mais responsáveis e garantir viver bem dentro dos limites do planeta, sem impactar substancialmente os ecossistemas.

5 CONCLUSÃO GERAL

Como resultado, conclui-se que os limites em nível per capita são ultrapassados na produção de astaxantina da microalga *Haematococcus pluvialis* nas categorias de acidificação ($1,70 \times 10^2$ mol H^+ eq) e potencial de aquecimento global ($1,05 \times 10^3$ kg CO_2 eq), encontrando-se dentro da zona amarela (área de incerteza). E na produção de EPA da microalga *Nannochloropsis oculata*, nas categorias de ecotoxicidade ($4,12 \times 10^4$ CTUe), potencial de aquecimento global ($5,87 \times 10^3$ kg CO_2 eq), potencial de acidificação ($9,68 \times 10^2$ mole H^+ eq) e o potencial de criação de oxidante fotoquímico ($1,40 \times 10^2$ kg O_3 eq), encontrado-se na faixa vermelha (área de alto risco). De acordo com os resultados, as necessidades de eletricidade representaram o maior contribuinte para os encargos ambientais entre as atividades envolvidas na produção de biomassa seca integral, pigmentos e ácidos graxos poli-insaturados.

O detalhamento dos impactos ambientais aplicados aos limites planetários previstos neste estudo permitiu aconselhar sobre as melhorias necessárias para que as atividades permaneçam dentro dos limites planetários, considerando os gargalos de desenvolvimento e otimização dos parâmetros operacionais dos processos e produtos baseados em microalgas. Além disso, os resultados encontrados indicaram que a principal medida imediata a ser tomada é a simplificação dos insumos de energia em todas as etapas de processamento e reaproveitamento do meio de cultura.

Sob as premissas deste estudo, fontes de energia renováveis com impactos menores podem ser usadas para fins de produção de eletricidade, por exemplo, substituir a energia fóssil pela energia limpa. No caso dos nutrientes, uma opção sustentável para reduzir custos durante o cultivo de microalgas é a reciclagem do meio de cultura. Por fim, em perspectivas futuras, espera-se o desejado selo economicamente viável e ambientalmente sustentável de processos e produtos à base de microalgas.

REFÊRENCIAS

ADARME-VEGA, T. C.; LIM, D. K.; TIMMINS, M.; VERNEN, F.; LI, Y.; SCHENK, P. M. Microalgal biofactories: a promising approach towards sustainable omega-3 fatty acid production. **Microbial cell factories**, 11(1), 1-10, 2012. Doi: 10.1186/1475-2859-11-96.

ANDRADE, L. M.; ANDRADE, C. J.; DIAS, M.; NASCIMENTO, C.; MENDES, M. A. *Chlorella* and *Spirulina* microalgae as sources of functional foods. **Nutraceuticals, and Food Supplements**, 6(1), 45-58, 2018. Doi: 10.15406/mojfpt.2018.06.00144.

ANWAR, M.; LOU, S.; CHEN, L.; LI, H.; HU, Z. Recent advancement and strategy on bio-hydrogen production from photosynthetic microalgae. **Bioresource technology**, v. 292, p. 121972, 2019. Doi: 10.1016/j.biortech.2019.121972.

ARAVANTINO, A. F.; THEODORAKOPOULOS, M. A.; MANARIOTIS, I. D. Selection of microalgae for wastewater treatment and potential lipids production. **Bioresource technology**, v. 147, p. 130-134, 2013. Doi: 10.1016/j.biortech.2013.08.024.

ARTAXO, P. Uma nova era geológica em nosso planeta: o Antropoceno?. **Revista USP**, (103), p. 13-24, 2014. Doi:10.11606/issn.2316-9036.v0i103p13-24.

BANERJEE, A.; KUMAR, N.; VARJANI, S. J.; GURIA, C.; BANDOPADHYAY, R.; SHUKLA, P.; BANERJEE, C. Computational modelling and prediction of microalgae growth focused towards improved lipid production. In **Biosynthetic technology and environmental challenges**, pp. 223-232, 2018. Springer, Singapore. Doi: 10.1007/978-981-10-7434-9_13.

BARTEK, L.; STRID, I.; HENRYSON, K.; JUNNE, S.; RASI, S.; ERIKSSON, M. Life cycle assessment of fish oil substitute produced by microalgae using food waste. **Sustainable Production and Consumption**, 27, 2002-2021, 2021. Doi: 10.1016/j.spc.2021.04.033.

BITOG, J. P.; LEE, I. B.; LEE, C. G.; KIM, K. S.; HWANG, H. S.; HONG, S. W.; SEO, I. H.; KWON, K. S.; MOSTAFA, E. Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 76, n. 2, p. 131-147, 2011. Doi: 10.1016/j.compag.2011.01.015.

BJØRN, A.; HAUSCHILD, M. Z. Introducing carrying capacity-based normalisation in LCA: framework and development of references at midpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 20(7), 1005-1018, 2015. Doi: 10.1007/s11367-015-0899-2.

BJØRN, A.; SIM, S.; KING, H.; KEYS, P.; WANG-ERLANDSSON, L.; CORNELL, S. E.; MARGNI, M.; BULLE, C. Challenges and opportunities towards improved application of the planetary boundary for land-system change in life cycle assessment of products. **Science of The Total Environment**, 696, 133964, 2019. Doi: /10.1016/j.scitotenv.2019.133964.

BJØRN, A.; CHANDRAKUMAR, C.; BOULAY, A. M.; DOKA, G.; FANG, K.; GONDRAN, N.; HAUSCHILD, M. Z.; KERKHOF, A.; KING, H.; MARGNI, M.; MCLAREN, S.; MUELLER, C.; OWSIANIAK, M.; PETERS, G.; ROOS, S.; SALA, S.; SANDIN, G.; SIM, S.; VARGAS-GONZALEZ, M.; RYBERG, M. Review of life-cycle

based methods for absolute environmental sustainability assessment and their applications. **Environmental Research Letters**, 15(8), 083001, 2020. Doi: 10.1088/1748-9326/ab89d7.

BLANKEN, W.; POSTMA, P. R.; DE WINTER, L.; WIJFFELS, R. H.; JANSSEN, M. Predicting microalgae growth. **Algal research**, v. 14, p. 28-38, 2016. Doi: 10.1016/j.algal.2015.12.020.

BOROWITZKA, M. Commercial-Scale Production of Microalgae for Bioproducts. **Blue biotechnology: production and use of marine molecules**, 1, 33-65, 2018. Doi: 10.1002/9783527801718.ch2.

CAPORGNO, M. P.; BÖCKER, L.; MÜSSNER, C.; STIRNEMANN, E.; HABERKORN, I.; ADELMANN, H.; HANDSCHIN, S.; WINDHAB, E. J.; MATHYS, A. Extruded meat analogues based on yellow, heterotrophically cultivated *Auxenochlorella protothecoides* microalgae. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 59, p. 102275, 2020. Doi: 10.1016/j.ifset.2019.102275.

CARVALHO, A. P.; SILVA, S. O.; BAPTISTA, J. M.; MALCATA, F. X. Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 89, n. 5, p. 1275-1288, 2011. Doi: 10.1007/s00253-010-3047-8.

CHEN, C. Y.; YEH, K. L.; AISYAH, R.; LEE, D. J.; CHANG, J. S. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. **Bioresource technology**, v. 102, n. 1, p. 71-81, 2011. Doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.159.

CHEN, C. Y.; ZHAO, X. Q.; YEN, H. W.; HO, S. H.; CHENG, C. L.; LEE, D. J.; BAI, F. W.; CHANG, J. S. Microalgae-based carbohydrates for biofuel production. **Biochemical Engineering Journal**, v. 78, p. 1-10, 2013. Doi: 10.1016/j.bej.2013.03.006.

CHEN, C.; CHAUDHARY, A.; MATHYS, A. Nutritional and environmental losses embedded in global food waste. **Resources, Conservation and Recycling**, 160, 104912, 2020. Doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104912.

CHEW, K. W.; CHIA, S. R.; SHOW, P. L.; YAP, Y. J.; LING, T. C.; CHANG, J. S. Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, 2018. Doi: 10.1016/j.jtice.2018.05.039.

CLIFT, R.; SIM, S.; KING, H.; CHENOWETH, J. L.; CHRISTIE, I.; CLAVREUL, J.; MUELLER, C.; POSTHUMA, L.; BOULAY, A. M.; CHAPLIN-KRAMER, R.; CHATTERTON, J.; DECLERCK, F.; DRUCKMAN, A.; FRANCE, C.; FRANCO, F.; GERTEN, D.; GOEDKOOP, M.; HAUSCHILD, M. Z.; HUIJBREGTS, M. A. J.; KOELLNER, T.; LAMBIN, E. F.; LEE, J.; MAIR, S.; MARSHALL, S.; MCLACHLAN, M. S.; CANALS, L. M. I.; MITCHELL, C.; PRICE, E.; ROCKSTRÖM, J.; SUCKLING, J.; MURPHY, R. The challenges of applying planetary boundaries as a basis for strategic decision-making in companies with global supply chains. **Sustainability**, 9(2), 279, 2017. Doi: 10.3390/su9020279.

COLLET, P.; HÉLIAS, A.; LARDON, L.; RAS, M.; GOY, R. A.; STEYER, J. P. Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. **Bioresource technology**, 102(1), 207-214, 2011. Doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.154.

DAVIS, D.; MORAO, A.; JOHNSON, J. K.; SHEN, L. Life cycle assessment of heterotrophic algae omega-3. **Algal Research**, 60, 102494, 2021. Doi: 10.1016/j.algal.2021.102494.

DE SOUZA SCHNEIDER, R. D. C.; DE MOURA LIMA, M.; HOELTZ, M.; DE FARIAS NEVES, F.; JOHN, D. K.; DE AZEVEDO, A. Life cycle assessment of microalgae production in a raceway pond with alternative culture media. **Algal research**, 32, 280-292, 2018. Doi: 10.1016/j.algal.2018.04.012.

DE SOUZA, M. P.; HOELTZ, M.; BRITTES BENITEZ, L.; MACHADO, Ê. L.; DE SOUZA SCHNEIDER, R. D. C. Microalgae and clean technologies: a review. **CLEAN—Soil, Air, Water**, 47(11), 1800380, 2019. Doi: 10.1002/clen.201800380.

DEPRÁ, M. C.; DOS SANTOS, A. M.; SEVERO, I. A.; SANTOS, A. B.; ZEPKA, L. Q.; JACOB-LOPES, E. Microalgal biorefineries for bioenergy production: can we move from concept to industrial reality?. **BioEnergy Research**, v. 11, n. 4, p. 727-747, 2018. Doi: 10.1007/s12155-018-9934-z.

DEPRA, M. C.; SEVERO, I. A.; DOS SANTOS, A. M.; ZEPKA, L. Q.; JACOB-LOPES, E. Environmental impacts on commercial microalgae-based products: Sustainability metrics and indicators. **Algal Research**, 51, 102056, 2020. Doi: 10.1016/j.algal.2020.102056.

DUFOSSÉ, L.; GALAUP, P.; YARON, A.; ARAD, S. M.; BLANC, P.; MURTHY, K. N. C.; RAVISHANKAR, G. A. Microorganisms and microalgae as sources of pigments for food use: a scientific oddity or an industrial reality?. **Trends in Food Science & Technology**, v. 1, n. 9, p. 389-406, 2005. Doi: 10.1016/j.tifs.2005.02.006.

ENAMALA, M. K.; ENAMALA, S.; CHAVALI, M.; DONEPUDI, J.; YADAVALLI, R.; KOLAPALLI, B.; ARADHYULA, T. V.; VELPURI, J.; KUPPAM, C. Production of biofuels from microalgae-A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 49-68, 2018. Doi: 10.1016/j.rser.2018.05.012.

EUROPEAN COMMISSION (EC). PEFCR Guidance Document—Guidance for the Development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs), Version 6.3, 2017.

FRANCISCO, É. C.; FRANCO, T. T.; WAGNER, R.; JACOB-LOPES, E. Assessment of different carbohydrates as exogenous carbon source in cultivation of cyanobacteria. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 37, n. 8, p. 1497-1505, 2014. Doi: 10.1007/s00449-013-1121-1.

GOETZ, V.; LE BORGNE, F.; PRUVOST, J.; PLANTARD, G.; LEGRAND, J. A generic temperature model for solar photobioreactors. **Chemical Engineering Journal**, v. 175, p. 443-449, 2011. Doi: 10.1016/j.cej.2011.09.052.

GORISSEN, S. H.; CROMBAG, J. J.; SENDEN, J. M.; WATERVAL, W. H.; BIERAU, J.; VERDIJK, L. B.; VAN LOON, L. J. Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates. **Amino acids**, 50(12), 1685-1695, 2018. Doi: 10.1007/s00726-018-2640-5.

GRESSLER, P. D. Desenvolvimento de sistema para cultivo de microalgas e ensaio Ecofisiológico para aplicação em biotecnologia ambiental, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/175790>>. Acessado 26 de novembro de 2021.

GUEZGOUZ, M.; JURASZ, J.; CHOUAI, M.; BLOOMFIELD, H.; BEKKOUCHE, B. Assessment of solar and wind energy complementarity in Algeria. **Energy Conversion and Management**, 238, 114170, 2021. Doi: 10.1016/j.enconman.2021.114170.

HERRERA, A.; D'IMPORZANO, G.; FERNANDEZ, F. G. A.; ADANI, F. Sustainable production of microalgae in raceways: Nutrients and water management as key factors influencing environmental impacts. **Journal of Cleaner Production**, 287, 125005, 2021. Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125005.

HILDEBRAND, G.; POOJARY, M. M.; O'DONNELL, C.; LUND, M. N.; GARCIA-VAQUERO, M.; TIWARI, B. K. Ultrasound-assisted processing of *Chlorella vulgaris* for enhanced protein extraction. **Journal of Applied Phycology**, 32(3), 1709-1718, 2020. Doi: 10.1007/s10811-020-02105-4.

HOLDT, S. L.; KRAAN, S. Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation. **Journal of Applied Phycology**, v. 23, n. 3, p. 543-597, 2011. Doi: 10.1007/s10811-010-9632-5.

HOSIKIAN, A.; LIM, S.; HALIM, R.; DANQUAH, M. K. Chlorophyll extraction from microalgae: a review on the process engineering aspects. **International journal of chemical engineering**, 2010. Doi: 10.1155/2010/391632.

HU, J.; NAGARAJAN, D.; ZHANG, Q.; CHANG, J. S.; LEE, D. J. Heterotrophic cultivation of microalgae for pigment production: A review. **Biotechnology advances**, 36(1), 54-67, 2018. Doi: 10.1016/j.biotechadv.2017.09.009.

ISO, ISO-14040 Environmental management–life cycle assessment–principles and framework: International Organization for Standardization, 2006.

JACOB-LOPES, E.; MARONEZE, M. M.; DEPRÁ, M. C.; SARTORI, R. B.; DIAS, R. R.; ZEPKA, L. Q. Bioactive food compounds from microalgae: An innovative framework on industrial biorefineries. **Current Opinion in Food Science**, 25, 1-7, 2019. Doi: 10.1016/j.cofs.2018.12.003.

JACOB-LOPES, E.; ZEPKA, L. Q.; DEPRA, M. C. Sustainability Metrics and Indicators of Environmental Impact: **Industrial and Agricultural Life Cycle Assessment**. Elsevier, 2021.

JAIN, A.; BEHERA, B.; PARAMASIVAN, B. Evaluation of physicochemical procedures for pigment extraction from mixed microalgal consortium. **Bioresource Technology Reports**, 100775, 2021. Doi: 10.1016/j.biteb.2021.100775.

KIM, D.; THOMA, G.; NUTTER, D.; MILANI, F.; ULRICH, R.; NORRIS, G. Life cycle assessment of cheese and whey production in the USA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 18(5), 1019-1035, 2013. Doi: 10.1007/s11367-013-0553-9.

KIRAN, B.; KUMAR, R.; DESHMUKH, D. Perspectives of microalgal biofuels as a renewable source of energy. *Energy Conversion and Management*, 88, 1228-1244, 2014. Doi: 10.1016/j.enconman.2014.06.022.

KUNJAPUR, A. M.; ELDRIDGE, R. B. Photobioreactor design for commercial biofuel production from microalgae. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 49, n. 8, p. 3516-3526, 2010. Doi: 10.1021/ie901459u.

KYRIAKOPOULOU, K.; PAPADAKI, S.; KROKIDA, M. Life cycle analysis of β -carotene extraction techniques. **Journal of Food Engineering**, 167, 51-58, 2015. Doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.03.008.

LAMERS, P. P.; JANSSEN, M.; DE VOS, R. C.; BINO, R. J.; WIJFFELS, R. H. Exploring and exploiting carotenoid accumulation in *Dunaliella salina* for cell-factory applications. **Trends in biotechnology**, 26(11), 631-638, 2008. Doi: 10.1016/j.tibtech.2008.07.002.

LOWREY, J.; ARMENTA, R. E.; BROOKS, M. S. Nutrient and media recycling in heterotrophic microalgae cultures. **Applied microbiology and biotechnology**, 100(3), 1061-1075, 2016. Doi: 10.1007/s00253-015-7138-4.

MARKOU, G.; ANGELIDAKI, I.; GEORGAKAKIS, D. Microalgal carbohydrates: an overview of the factors influencing carbohydrates production, and of main bioconversion technologies for production of biofuels. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 96, n. 3, p. 631-645, 2012. Doi: 10.1007/s00253-012-4398-0.

MAZOKOPAKIS, E. E.; STARAKIS, I. K.; PAPADOMANOLAKI, M. G.; MAVROEIDI, N. G.; GANOTAKIS, E. S. The hypolipidaemic effects of *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) supplementation in a Cretan population: a prospective study. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 94(3), 432-437, 2014. Doi: 10.1002/jsfa.6261.

MEDEIROS, D. L.; SALES, E. A.; KIPERSTOK, A. Energy production from microalgae biomass: carbon footprint and energy balance. **Journal of Cleaner Production**, 96, 493-500, 2015. Doi: 10.1016/j.jclepro.2014.07.038.

MOLINO, A.; RIMAURO, J.; CASELLA, P.; CERBONE, A.; LAROCCA, V.; CHIANESE, S.; KARATZA, D.; MEHARIYA S.; FERREIRA, Â.; HRISTOFOROU, E.; MUSMARRA, D. Extraction of astaxanthin from microalga *Haematococcus pluvialis* in red phase by using generally recognized as safe solvents and accelerated extraction. **Journal of biotechnology**, 283, 51-61, 2018. Doi: 10.1016/j.jbiotec.2018.07.010.

MUSSAGY, C. U.; KHAN, S.; KOT, A. M. Current developments on the application of microbial carotenoids as an alternative to synthetic pigments. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 1-15, 2021. Doi: 10.1080/10408398.2021.1908222.

NAJJAR, Y. S.; ABU-SHAMLEH, A. Harvesting of microalgae by centrifugation for biodiesel production: A review. **Algal Research**, 51, 102046, 2020. Doi: 10.1016/j.algal.2020.102046.

NWOBA, E. G.; OGBONNA, C. N.; ISHIKA, T.; VADIVELLOO, A. Microalgal pigments: a source of natural food colors. In **Microalgae Biotechnology for Food, Health and High Value Products**, pp. 81-123, 2020. Springer, Singapore. Doi: 10.1007/978-981-15-0169-2_3.

ONORATO, C.; RÖSCH, C. Comparative life cycle assessment of astaxanthin production with *Haematococcus pluvialis* in different photobioreactor technologies. **Algal Research**, 50, 102005, 2020. Doi: 10.1016/j.algal.2020.102005.

OTA, A. C. M. Revisão Sistemática da Literatura do Potencial de Aplicação Biotecnológica das Algas (Bachelor's thesis), 2021.

PAPADAKI, S.; KYRIAKOPOULOU, K.; TZOVENIS, I.; KROKIDA, M. Environmental impact of phycocyanin recovery from *Spirulina platensis* cyanobacterium. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 44, 217-223, 2017. Doi: 10.1016/j.ifset.2017.02.014.

PIRES, J. C.; ALVIM-FERRAZ, M. C.; MARTINS, F. G. Photobioreactor design for microalgae production through computational fluid dynamics: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 248-254, 2017. Doi: 10.1016/j.rser.2017.05.064.

PORCELLI, R.; DOTTO, F.; PEZZOLESI, L.; MARAZZA, D.; GREGGIO, N.; RIGHI, S. Comparative life cycle assessment of microalgae cultivation for non-energy purposes using different carbon dioxide sources. **Science of The Total Environment**, 721, 137714, 2020. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137714.

PRUVOST, J.; LE GOUIC, B.; LEPINE, O.; LEGRAND, J.; LE BORGNE, F. Microalgae culture in building-integrated photobioreactors: Biomass production modelling and energetic analysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 284, p. 850-861, 2016. Doi: 10.1016/j.cej.2015.08.118.

QIU, R.; GAO, S.; LOPEZ, P. A.; OGDEN, K. L. Effects of pH on cell growth, lipid production and CO₂ addition of microalgae *Chlorella sorokiniana*. **Algal research**, v. 28, p. 192-199, 2017. Doi: 10.1016/j.algal.2017.11.004.

RANGLOVÁ, K.; LAKATOS, G. E.; MANOEL, J. A. C.; GRIVALSKÝ, T.; MASOJÍDEK, J. Rapid screening test to estimate temperature optima for microalgae growth using photosynthesis activity measurements. **Folia microbiologica**, v. 64, n. 5, p. 615-625, 2019. Doi: 10.1007/s12223-019-00738-8.

RICHMOND, A.; HU, Q. Handbook of microalgal culture: applied phycology and biotechnology. **John Wiley & Sons**, 2013.

RIZWAN, M.; MUJTABA, G.; MEMON, S. A.; LEE, K.; RASHID, N. Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, p. 394-404, 2018. Doi: 10.1016/j.rser.2018.04.034.

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, Å.; CHAPIN, F. S.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T. M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H. J.; NYKVIST, B.; DE WIT, C. A.; HUGHES, T.; VAN DER LEEUW, S.; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P. K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R. W.; FABRY, V. J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J. A. A safe operating space for humanity. **Nature**, 461 (7263), 472-475, 2009.

RUIZ, J.; OLIVIERI, G.; DE VREE, J.; BOSMA, R.; WILLEMS, P.; REITH, J. H.; EPPINK, M. H. M.; KLEINEGRIS, D. M. M.; WIJFFELS, R. H.; BARBOSA, M. J. Towards industrial products from microalgae. **Energy & Environmental Science**, 9(10), 3036-3043, 2016. Doi: 10.1039/C6EE01493C.

RYBERG, M. W.; ANDERSEN, M. M.; OWSIANIAK, M.; HAUSCHILD, M. Z. Downscaling the Planetary Boundaries in absolute environmental sustainability assessments—a review. **Journal of Cleaner Production**, 123287, 2020. Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123287.

RYBERG, M. W.; OWSIANIAK, M.; RICHARDSON, K.; HAUSCHILD, M. Z. Challenges in implementing a planetary boundaries based life-cycle impact assessment methodology. **Journal of Cleaner Production**, 139, 450-459, 2016. Doi: 10.1016/j.jclepro.2016.08.074.

RYBERG, M. W.; OWSIANIAK, M.; RICHARDSON, K.; HAUSCHILD, M. Z. Development of a life-cycle impact assessment methodology linked to the Planetary Boundaries framework. **Ecological Indicators**, 88, 250-262, 2018. Doi: 10.1016/j.ecolind.2017.12.065.

SALA, S.; CRENNNA, E.; SECCHI, M.; SANYÉ-MENGUAL, E. Environmental sustainability of European production and consumption assessed against planetary boundaries. **Journal of environmental management**, 269, 110686, 2020. Doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110686.

SANTOS-SANCHEZ, N. F.; VALADEZ-BLANCO, R.; HERNÁNDEZ-CARLOS, B.; TORRES-ARIÑO, A.; GUADARRAMA-MENDOZA, P. C.; SALAS-CORONADO, R. Lipids rich in ω -3 polyunsaturated fatty acids from microalgae. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 100, n. 20, p. 8667-8684, 2016. Doi: 10.1007/s00253-016-7818-8.

SATHASIVAM, R.; RADHAKRISHNAN, R.; HASHEM, A.; ABD_ALLAH, E. F. Microalgae metabolites: A rich source for food and medicine. **Saudi journal of biological sciences**, 26(4), 709-722, 2019. Doi: 10.1016/j.sjbs.2017.11.003.

SILVA, S. C.; FERREIRA, I. C.; DIAS, M. M.; BARREIRO, M. F. Microalgae-derived pigments: A 10-year bibliometric review and industry and market trend analysis. **Molecules**, 25(15), 3406, 2020. Doi: 10.3390/molecules25153406.

SINHA, K.; SAHA, P. D.; DATTA, S. Extraction of natural dye from petals of Flame of forest (*Butea monosperma*) flower: process optimization using response surface methodology (RSM). **Dyes and Pigments**, 94(2), 212-216, 2012. Doi: 10.1016/j.dyepig.2012.01.008.

SPOLAORE, P.; JOANNIS-CASSAN, C.; DURAN, E.; ISAMBERT, A. Commercial applications of microalgae. **Journal of bioscience and bioengineering**, 101(2), 87-96, 2006. Doi: 10.1263/jbb.101.87.

STEFFEN, W.; RICHARDSON, K.; ROCKSTRÖM, J.; CORNELL, S. E.; FETZER, I.; BENNETT, E. M.; BIGGS, R.; CARPENTER, S. R.; DE VRIES, W.; DE WIT, C. A.; FOLKE, C. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. **Science**, 13, 347(6223), 2015. Doi: 10.1126/science.1259855.

SUN, X. M.; GENG, L. J.; REN, L. J.; JI, X. J.; HAO, N.; CHEN, K. Q.; HUANG, H. Influence of oxygen on the biosynthesis of polyunsaturated fatty acids in microalgae. **Bioresource technology**, 250, 868-876, 2018. Doi: 10.1016/j.biortech.2017.11.005.

TAELMAN, S. E.; DE MEESTER, S.; VAN DIJK, W.; DA SILVA, V.; DEWULF, J. Environmental sustainability analysis of a protein-rich livestock feed ingredient in The Netherlands: Microalgae production versus soybean import. **Resources, Conservation and Recycling**, 101, 61-72, 2015. Doi: 10.1016/j.resconrec.2015.05.013.

WANG, B.; LAN, C. Q.; HORSMAN, M. Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. **Biotechnology advances**, v. 30, n. 4, p. 904-912, 2012. Doi: 10.1016/j.biotechadv.2012.01.019.

WANG, X.; LIN, L.; LU, H.; LIU, Z.; DUAN, N.; DONG, T.; XIAO, H.; LI, B.; XU, P. Microalgae cultivation and culture medium recycling by a two-stage cultivation system. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, 12(6), 1-10, 2018. Doi: 10.1007/s11783-018-1078-z.

YADAV, G.; DUBEY, B. K.; SEN, R. 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**, 258, 120703, 2020. Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120703.

ZHU, L. Biorefinery as a promising approach to promote microalgae industry: An innovative framework. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 41, p. 1376-1384, 2015. Doi: 10.1016/j.rser.2014.09.040.

ZUCCARO, G.; YOUSUF, A.; POLLIO, A.; STEYER, J. P. Microalgae Cultivation Systems. **Microalgae Cultivation for Biofuels Production**, p. 11-29, 2020. Doi:10.1016/b978-0-12-817536-1.00002-3.