

Uso de biomassa microalgal em alimentação em aquicultura: análise estratégica e do macroambiente nos próximos dez anos no Brasil

RESUMO – A aquicultura é um segmento pecuário em franco crescimento e com potencial de atender à demanda de proteínas para a segurança alimentar, sendo microalgas e cianobactérias exemplos de fontes alternativas. A competitividade da biomassa microalgal na alimentação animal está atrelada à sua versatilidade metabólica, ao potencial biotecnológico e ao teor alto e diversificado de nutrientes. O objetivo deste artigo é avaliar o uso e a competitividade da biomassa microalgal para o mercado de alimentação na aquicultura brasileira nos próximos dez anos com base em consulta a especialistas. Usou-se o método Delphi de consulta a especialistas brasileiros, que destacaram a viabilidade técnica e econômica e o desenvolvimento de programas de indução científica e tecnológica de processos produtivos como pontos importantes para a competitividade do uso de biomassa microalgal, relacionados diretamente com o aumento de escala de cultivo das microalgas e cianobactérias. Este estudo evidencia o potencial da biomassa de microalgas e cianobactérias como um bioinsumo estratégico, capaz de impulsionar a produção de alimentos mais sustentáveis e nutritivos na aquicultura brasileira. A biomassa microalgal também pode atender à demanda reprimida de novos ingredientes para produção de ração no Brasil, tornando-se uma alternativa à farinha de peixe e ao farelo de soja. No entanto, os gargalos técnicos e econômicos no cultivo e no processamento descritos nas fraquezas e ameaças minam a competitividade da biomassa microalgal na alimentação em aquicultura.

Termos para indexação: bioinsumo, cianobactérias, competitividade, microalgas, segurança alimentar.

Use of microalgal biomass in aquaculture feed: strategic and macro-environmental analysis in the next 10 years in Brazil

ABSTRACT – Aquaculture is a rapidly growing livestock segment with the potential to meet the demand for proteins for food security, with microalgae and cyanobacteria being examples of alternative sources. The competitiveness of microalgal biomass in animal feed is linked to its metabolic versatility, biotechnological potential and high and diverse nutrient content. The objective of this article is to evaluate the use and competitiveness of microalgal biomass for the feed market in Brazilian aquaculture over the next 10 years based on consultation with experts. The Delphi method was used to consult Brazilian experts, who highlighted the technical and economic viability and development of scientific and technological induction programs for production processes as important points for the competitiveness of the use of algal biomass, which are directly related to the increase in the scale of cultivation of microalgae and cyanobacteria. This study highlights the

Sérgio Saraiva Nazareno dos Anjos 
Embrapa Agroenergia, Brasília, DF, Brasil.
E-mail: sergio.saraiva@embrapa.br

Alexandre Nascimento de Almeida 
Campus Planaltina da Universidade
de Brasília, Brasília, DF, Brasil.
E-mail: alexalmeida@unb.br

Letícia Jungmann Cançado 
Embrapa Agroenergia, Brasília, DF, Brasil.
E-mail: leticia.jungmann@embrapa.br

✉ Autor correspondente

Recebido em
13/04/2024

Aprovado em
19/02/2025

Publicado em
06/08/2025

Como citar

ANJOS, S.S.N. dos; ALMEIDA, A.N. de; CANÇADO, L.J. Uso de biomassa microalgal em alimentação em aquicultura: análise estratégica e do macroambiente nos próximos dez anos no Brasil. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v.42, e27636, 2025. DOI: <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2025.v42.27636>.

potential of microalgae and cyanobacteria biomass as a strategic bio-input, capable of boosting the production of more sustainable and more nutritious feed in Brazilian aquaculture. Microalgal biomass can also meet the suppressed demand for new feed ingredients in Brazil, becoming an alternative to fishmeal and soybean meal. However, the technical and economic bottlenecks in cultivation and processing described in the weaknesses and threats undermine the competitiveness of microalgal biomass in aquaculture feed.

Index terms: bio-input, cyanobacteria, competitiveness, microalgae, food security.

INTRODUÇÃO

A garantia da disponibilidade de alimentos à sociedade mundial, tanto em quantidade quanto em qualidade, é um tópico cada vez mais importante diante das mudanças climáticas. Com isso, a busca de alternativas aos sistemas agropecuários atuais tornou-se uma necessidade premente, em resposta à pressão da sociedade e aos ajustes necessários no mercado e nas searas sociais, políticas e econômicas (Anjos & Almeida, 2024), e que fomenta a competitividade do setor agropecuário (Jerzak & Śmiglak-Krajewska, 2020). A aquicultura, um segmento pecuário em franco crescimento, é uma dessas alternativas, que teve produção de 87,5 milhões de toneladas de proteína animal em 2020 e que tem potencial de atender à demanda de proteínas para a segurança alimentar (FAO, 2018, 2022).

Assim como qualquer outra cadeia pecuária, o maior custo no manejo é o de alimentação. Um dos maiores desafios para expandir a viabilidade técnica e econômica da aquicultura é o desenvolvimento de formulações nutricionais que sejam palatáveis, tenham conversão energética eficiente, baixo custo e que sejam alternativas economicamente viáveis em relação às fontes usadas atualmente: farinha de peixe e farelo de soja. Farinha de peixe é um ingrediente com alta palatabilidade e nutricionalmente completo para as demandas metabólicas dos animais, mas é um produto importado pelo Brasil e com alta volatilidade de fornecimento e de preços. Já o farelo de soja

está disponível no mercado nacional a custos comparativamente menores que os da farinha de peixe, mas não contém aminoácidos importantes e apresenta fatores antinutricionais que exigem suplementação da dieta, resultando em aumento do custo final (Maisashvili et al., 2015; Soares, 2015; Rosa et al., 2020).

A competitividade das microalgas e das cianobactérias também está atrelada a dois fatores. O primeiro é sua pegada ambiental na captura de carbono e na sua versatilidade metabólica ao crescerem em diversos ambientes e serem aptas para uso em sistemas de biorrefinarias e fitorremediação de águas impróprias para consumo (Ahmad & Ashraf, 2023; Estevam et al., 2023; Victor et al., 2024).

O segundo fator competitivo é que microalgas e cianobactérias são microrganismos versáteis, de alto potencial biotecnológico e com teor de nutrientes alto e diversificado, como fibras alimentares, pigmentos, antioxidantes, carotenoides, aminoácidos, vitaminas, ácidos graxos poli-insaturados e minerais (Fernandes, 2021; Barbosa et al., 2023), de importância nutricional para a saúde humana, o que torna sua biomassa competitiva e com potencial para substituir a farinha de peixe e o farelo de soja. Seu potencial biotecnológico é reforçado pela possibilidade de uso de ferramentas de engenharia genética para o desenvolvimento de linhagens com características específicas (Gamboa-Delgado et al., 2023). Assim, o objetivo deste artigo é avaliar o uso e a competitividade do uso de biomassa microalgal para o mercado de alimentação na aquicultura brasileira nos próximos dez anos por meio de consulta a especialistas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este artigo teve caráter semiquantitativo e exploratório de análise estratégica e do macroambiente do uso de microalgas e cianobactérias no mercado de alimentação

e suplementação animal em aquicultura nos próximos dez anos. Usou-se o método Delphi de consulta a especialistas brasileiros que atuam em instituições nacionais ou internacionais, públicas ou privadas, em nutrição de animais aquícolas, os quais atuam com microalgas e cianobactérias para aproveitamento alimentar, nos focos em alimentação e nutrição, comportamento alimentar, economia circular, assuntos regulatórios, manejo e socioeconomia.

O método Delphi desempenha a função de avaliar e desenhar cenários futuros e é uma ferramenta usada para execução de estudos prospectivos por meio de consulta a especialistas usando-se a escala Likert (Freitas & Ferrarini, 2021). O Delphi é regido por quatro princípios: anonimato entre os especialistas selecionados, o que diminui vieses e torna a aplicação de questionários eletrônicos a ferramenta mais adequada; iteração, que se refere à realização de rodadas até o consenso em uma porcentagem predeterminada pelos pesquisadores; feedback controlado, que são os itens que compõem o questionário, para direcionar as respostas dos especialistas; e estatísticas, aplicadas para avaliação dos resultados obtidos (Borschiver & Silva, 2016; Freitas & Ferrarini, 2021).

O estudo partiu do relatório de tendências de futuro para pesquisa, desenvolvimento e inovação para microalgas e cianobactérias num horizonte temporal de dez anos. Foi apresentado por Anjos et al. (2024), que executou o estudo na Embrapa Agroenergia, usando o método Delphi de consulta a especialistas com questões para julgamento sobre desafios, oportunidades e cenários, mercados e produtos, processos de colheita e de cultivo e levantamento de pontos fortes e fracos pela aplicação de questões abertas. Foi usada a ferramenta PESTEL para análise do macroambiente e gerou-se uma matriz SWOT com base nas respostas às questões abertas.

Na primeira questão da seção de “Desafios e oportunidades”, foram solicitados que fossem

indicados os gêneros taxonômicos de microalgas e cianobactérias mais promissores para cultivo e aplicação na alimentação em aquicultura no Brasil nos próximos dez anos. A lista de gêneros apresentada, com base em Anjos et al. (2024), foi: *Arthrospira* sp., *Chlamydomonas* sp., *Chlorella* sp., *Desmodesmus* sp., *Dunaliella* sp., *Haematococcus* sp., *Nannochloropsis* sp., *Nostoc* sp., *Phaeodactylum* sp., *Porphyridium* sp. e *Scenedesmus* sp. Havia a opção “Não sei opinar”, e foi aberto um campo para que outros gêneros fossem indicados.

Na segunda questão da seção “Desafios e oportunidades”, os especialistas classificaram cada item de 1 (desafio e oportunidade de menor impacto) a 5 (desafio e oportunidade de maior impacto), em relação aos desafios científicos e tecnológicos para atender ao mercado brasileiro para aproveitamento de microalgas e cianobactérias para alimentação em aquicultura no Brasil nos próximos dez anos. Os itens na seção “Análise macroambiental” foram classificados de 1 (menor impacto) a 5 (maior impacto), considerando fatores políticos, econômicos, sociais, tecnológicos, ambientais e legais. Em ambos, também havia um campo aberto para inclusão de observações e apontamentos dos especialistas, se julgassem necessário. Os itens avaliados nas seções “Desafios e oportunidades” e “Análise macroambiental” foram semelhantes aos apresentados por Anjos et al. (2024), com adaptações para que fossem pertinentes aos desafios ligados à alimentação animal e à aquicultura.

Para avaliar o grau de consenso de respostas dos especialistas num questionário para aplicação do método Delphi, Marques & Freitas (2018) afirmam que não há critérios definidos para uma porcentagem de corte, o que permite que cada estudo defina seus critérios com base em quaisquer premissas. Marques & Freitas (2018) reforçam que não há critério específico para escolha de uma forma de convergência de respostas, já que depende dos objetivos de um

estudo. Com base nisso, permitiu-se que este estudo avaliasse os critérios em um segmento de mercado específico e foi aplicado um corte em respostas com convergência maior ou igual a 50% para a resposta com a maior nota na escala Likert (nota 5).

A avaliação do macroambiente foi executada com o uso da ferramenta PESTEL, uma ferramenta para gestão estratégica de determinado tema ou instituição que combina fatores políticos, ambientais, sociais, tecnológicos, econômicos e legais numa análise multifacetada (Menet, 2016; Song et al., 2017; Zhang, 2023). Seu objetivo é gerar subsídios para identificar variáveis que exerçam influência no segmento de mercado para o desenho de ações estratégicas (de longo prazo) para monitorar forças e fraquezas (ambiente interno) e oportunidades e ameaças (ambiente externo) do tema ou instituição em estudo (Menet, 2016; Melander et al., 2019; Jaoude et al., 2022; Zhang, 2023).

A matriz SWOT (sigla em inglês para *strengths, weaknesses, opportunities, threats*) é a representação gráfica multicamada das análises de ambientes interno e externo utilizando-se diversas fontes, tanto a aplicação da ferramenta PESTEL (Menet, 2016; Gheibi et al., 2023; Zhang, 2023) quanto entrevistas ou leitura de documentos (Gheibi et al., 2023). Um benefício importante da matriz SWOT é compor ações de melhoria de processos, produtos ou serviços (Siddiqui, 2021) de forma simplificada, o que permite análise simultânea de todos os ambientes concomitantemente (Gheibi et al., 2023).

O questionário do estudo-alvo deste artigo avaliou os mesmos desafios e oportunidades, incluindo gêneros de microalgas e cianobactérias (duas questões fechadas, com campos abertos para inclusão de informações pertinentes segundo os especialistas), critérios de análise macroambiental (uma questão fechada, com campo aberto para inclusão de informações pertinentes segundo os especialistas) e levantamento de pontos fortes e fracos pela

aplicação de duas questões abertas com base no estudo de Anjos et al. (2024), com foco no mercado de alimentação e suplementação animal, e depois afinando para o segmento de aquicultura.

Para execução do estudo, foram prospectados 137 especialistas por meio de uma busca ativa entre coautores brasileiros de publicações científicas recuperadas na base de dados *Web of Science*, e posterior consulta à plataforma Lattes/CNPq e à plataforma LinkedIn. Desses, 114 (83,2%) atuam em Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICTs), na esfera pública e órgãos públicos (universidades federais e estaduais, órgãos de extensão rural e de pesquisa agropecuária), 16 (11,7%) em empresas privadas (universidades privadas, startups, sindicatos, empresas de consultoria e multinacionais), 5 (3,6%) em instituições internacionais na Austrália, na Nova Zelândia e em Portugal, e 2 (1,5%) em outros tipos de instituições (organização internacional e um serviço social autônomo).

A primeira rodada começou em 13/2/2023, com posterior reenvio em quatro outros momentos (27/2/2023, 12/3/2023, 26/3/2023 e 12/4/2023), com finalização em 17/4/2023. Ao todo, 18 especialistas responderam ao questionário, e, destes, apenas 2 indicaram que não participariam de uma segunda rodada. Assim, houve 13,1% de retorno na primeira rodada, e 11,7% foram incluídos para execução da segunda rodada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Entre os gêneros taxonômicos indicados pelos especialistas como os mais promissores para uso da biomassa na alimentação em aquicultura no Brasil nos próximos dez anos, houve destaque para *Chlorella* sp. (Figura 1), que é um dos gêneros de microalgas mais explorados comercialmente, sendo os principais players desse mercado as empresas EID Parry (Índia),

Pond Technologies (Canadá) e Taiwan Chlorella (China), com taxa de crescimento anual composto de 6,79% entre 2024 e 2030 (de US\$ 205,17 milhões a US\$ 305,76 milhões) (Estevam et al., 2023; Research and Markets, 2024).

A biomassa de *Chlorella* sp. tem alto teor proteico (pode chegar a 68%), teor de carboidratos entre 15% e 47%, teor de lipídeos entre 8% e 28%, carotenoides, ácidos graxos e vitaminas (Pantami et al., 2020; Estevam et al., 2023). O estudo de Pantami (2020) detectou, na biomassa de *C. vulgaris*, 20 ácidos graxos diferentes, com predomínio de ácido palmítico, ácido linoleico e ácido 7,10-hexadecadienoico, além de carotenoides como luteína, astaxantina e betacaroteno, e vitaminas B3 (ácido nicotínico) e B5 (ácido pantotênico). O alto teor proteico torna a *Chlorella* sp. uma fonte alternativa de matéria-prima para alimentação em cadeias pecuárias que atenderão à demanda cada vez

maior de proteína para alimentar 9 bilhões de pessoas até 2050 (Bessada et al., 2019; Ahmad & Ashraf, 2023), com destaque para a aquicultura para fortalecimento de ações que visam à segurança alimentar (Anjos et al., 2023). Outros fatores que conferem competitividade à *Chlorella* sp. em comparação com outros gêneros são: alta eficiência fotossintética, rápido crescimento e alta capacidade de sequestro de carbono (Ahmad & Ashraf, 2023; Estevam et al., 2023), o que pode explicar o predomínio de respostas ao gênero em questão.

Foram avaliados 15 desafios e oportunidades científicos e tecnológicos e 19 aspectos macroambientais que influenciam o mercado brasileiro para aproveitamento de microalgas e cianobactérias para alimentação em aquicultura no Brasil nos próximos 10 anos, segundo os especialistas consultados. As notas dadas foram tabuladas em planilha eletrônica e, em ambos os

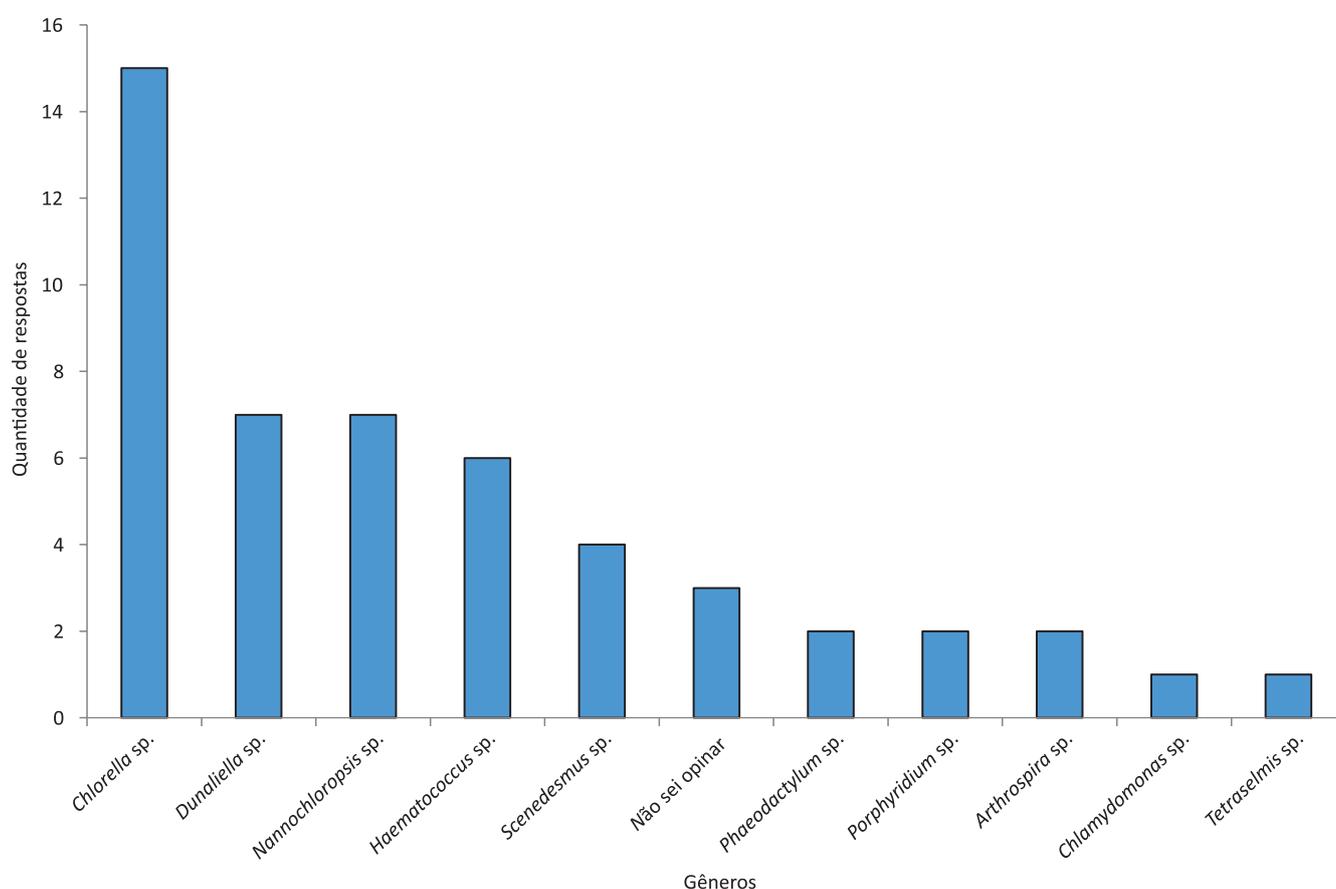


Figura 1. Gráfico de histograma com as respostas dadas à questão sobre gêneros taxonômicos.

casos, havia a opção “Não sei opinar” para cada item. Essas respostas foram excluídas da análise e, posteriormente, com base na quantidade de respostas válidas (notas de 1 a 5 da escala Likert), foram calculadas as porcentagens proporcionais de incidência de cada nota por item de cada questão.

Na avaliação dos desafios e oportunidades científicos e tecnológicos, os especialistas usaram uma escala Likert para avaliação de cada item, considerando as escalas de 1 (desafio

e oportunidade de menor impacto) a 5 (desafio e oportunidade de maior impacto) (Tabela 1).

Com exceção do item “Capacitação de mão de obra em tecnologias de cultivo e processamento da biomassa de microalgas e cianobactérias”, no qual predominou a nota 3 (desafio e oportunidade de médio impacto), todos os itens avaliados tiveram maior concentração de respostas nas notas 4 e 5. Entre os itens que se enquadram na porcentagem de corte (50%) para a segunda rodada, destacaram-se:

Tabela 1. Porcentagem de respostas aos “Desafios e oportunidades” por nota na escala Likert.

Item	5 (%)	4 (%)	3 (%)	2 (%)	1 (%)
Uso de ferramentas de edição gênica no melhoramento genético e no desenvolvimento de cepas promissoras	60,00	26,67	6,67	6,67	0
Uso de ferramentas “ômicas” (genômica, transcriptômica, proteômica, metabolômica e lipidômica) no melhoramento genético e no desenvolvimento de cepas promissoras	53,33	33,33	6,67	6,67	0
Desenvolvimento de programas para indução científica e tecnológica para viabilização das tecnologias baseadas em microalgas e cianobactérias	50,00	31,25	18,75	0	0
Desenvolvimento tecnológico e expansão de cadeias produtivas e de suprimentos	47,06	41,18	5,88	0	5,88
Uso de biomassa de microalgas e cianobactérias geneticamente modificadas na alimentação em aquicultura	47,06	23,53	17,65	11,76	0
Viabilização de sistemas de produção para fornecimento de biomassa no mercado nacional	43,75	50,00	6,25	0	0
Reúso de águas poluídas ou residuais de outros processos agroindustriais (vinhaça, manipueira, POME, etc.) no cultivo de microalgas e cianobactérias	43,75	37,50	6,25	12,50	0
Uso de microalgas e cianobactérias como fontes de produtos de alto valor agregado (carotenoides e PUFA, por exemplo)	37,50	50,00	6,25	6,25	0
Uso de microalgas e cianobactérias na biofixação e mitigação de dióxido de carbono, visando à redução da concentração deste na atmosfera	37,50	50,00	6,25	6,25	0
Aproveitamento de coprodutos e resíduos algais para integração de processos produtivos em conceito de biorrefinarias	33,33	33,33	20,00	13,33	0
Estabilidade no suprimento de biomassa de microalgas e cianobactérias para aplicação industrial	33,33	60,00	6,67	0	0
Construção de análises de ciclo de vida de processos, utilizando microalgas e cianobactérias, para subsidiar entrada no mercado de carbono	31,25	43,75	18,75	6,25	0
Capacitação de mão de obra em tecnologias de cultivo e processamento da biomassa de microalgas e cianobactérias	29,41	29,41	41,18	0	0
Incentivo à adoção de tecnologias baseadas em microalgas e cianobactérias pela iniciativa privada e pelo terceiro setor	23,53	58,82	17,65	0	0
Escalonamento de processos de cultivo	20,00	60,00	20,00	0	0

- Uso de ferramentas de edição gênica no melhoramento genético e no desenvolvimento de cepas promissoras (60%).
- Uso de ferramentas “ômicas” (genômica, transcriptômica, proteômica, metabolômica e lipidômica) no melhoramento genético e no desenvolvimento de cepas promissoras (53,33%).
- Desenvolvimento de programas para indução científica e tecnológica, para

viabilização das tecnologias baseadas em microalgas e cianobactérias (50%).

Na avaliação dos aspectos macroambientais (PESTEL) que influenciarão o uso industrial de microalgas e cianobactérias para alimentação em aquicultura, considerando o cenário brasileiro no horizonte temporal de 10 anos, os especialistas usaram uma escala Likert, para avaliação de cada item, de 1 (fator de menor impacto) a 5 (fator de maior impacto) (Tabela 2).

Tabela 2. Porcentagem de respostas à “Análise macroambiental” por nota na escala Likert.

Pestel	5 (%)	4 (%)	3 (%)	2 (%)	1 (%)
Viabilidades técnica e econômica que garantam a sustentabilidade dos processos produtivos baseados em microalgas e cianobactérias	62,50	31,25	0	6,25	0
Disponibilidade de recursos para investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação	61,11	22,22	11,11	5,56	0
Custo de produção e processamento de biomassa de microalgas e cianobactérias no Brasil	52,94	29,41	17,65	0	0
Menor ocupação de espaço para cultivo, incluindo cultivo vertical e áreas não agricultáveis	47,06	35,29	11,76	5,88	0
Diversificação de biomassa para maior competitividade do mercado de alimentação para aquicultura	43,75	31,25	25,00	0	0
Produtos de microalgas e cianobactérias disponíveis no mercado brasileiro com preços acessíveis ao consumidor	43,75	43,75	0	12,50	0
Dificuldade para desregulamentação de microalgas e cianobactérias geneticamente modificadas para comercialização	43,75	31,25	12,50	12,50	0
Preferência pelo uso de biomassa de microalgas e cianobactérias nativas na alimentação em aquicultura em detrimento de cepas exóticas	41,18	17,65	17,65	17,65	5,88
Uso de águas não potáveis e reúso de águas residuais (água salobra, efluentes domésticos, efluentes industriais, etc.) no cultivo de microalgas e cianobactérias	35,29	23,53	29,41	11,76	0
Mercado de créditos de carbono	35,29	41,18	23,53	0	0
Pressão mundial por processos agropecuários mais sustentáveis	35,29	35,29	11,76	5,88	11,76
Dependência de importação de biomassa e de produtos derivados de microalgas e cianobactérias	29,41	35,29	11,76	17,65	5,88
Políticas públicas para mitigação de emissões de gases de efeito estufa	23,53	35,29	29,41	11,76	0
Demanda consumidora crescente por produtos de origem natural	23,53	52,94	11,76	5,88	5,88
Inclusão de microempresas, pequenas empresas e startups no mercado	18,75	62,50	18,75	0	0
Resistência pelo mercado consumidor ao consumo de microalgas e cianobactérias geneticamente modificadas	17,65	41,18	11,76	17,65	11,76
Impacto do programa RenovaBio para a segurança energética, metas e créditos de descarbonização, contextualizado em biorrefinarias	14,29	35,71	28,57	14,29	7,14
Novos hábitos do consumidor que influenciam o desenvolvimento de bioprodutos de microalgas e cianobactérias	11,76	58,82	17,65	5,88	5,88
Demanda consumidora crescente por produtos e processos produtivos com certificação ambiental	11,76	47,06	29,41	5,88	5,88

Notou-se concentração de itens nas notas 4 e 5 na escala Likert, e, entre os itens que se enquadram na porcentagem de corte (50%) para a segunda rodada, destacaram-se:

Viabilidades técnica e econômica que garantam a sustentabilidade dos processos produtivos baseados em microalgas e cianobactérias (62,5%).

Disponibilidade de recursos para investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (61,1%).

Custo de produção e processamento de biomassa de microalgas e cianobactérias no Brasil (52,94%).

Na segunda rodada, os desafios e oportunidades, indicados na primeira etapa, com convergência maior ou igual a 50% para a resposta “maior desafio” (nota 5) e critérios macroambientais (PESTEL), indicados na primeira etapa, com convergência maior ou igual a 50% para a resposta “maior impacto” foram selecionados para reavaliação pelos 16 especialistas que aceitaram participar da nova rodada. O questionário foi submetido em quatro momentos (29/5/2023, 12/6/2023, 26/6/2023 e 17/7/2023) e finalizado em 13/8/2023. Dos 16 especialistas consultados, 7 responderam ao questionário (43,75%). A Tabela 3 sintetiza os itens selecionados para a segunda rodada.

Entre os “Desafios e oportunidades” selecionados na primeira etapa e que atenderam ao corte de 50% nas respostas para “maior

desafio” (nota 5 da escala Likert), pediu-se aos especialistas que indicassem os itens que consideram mais estratégicos para uso industrial de biomassa de microalgas e cianobactérias para alimentação em aquicultura no Brasil nos próximos 10 anos (Figura 2).

Entre os itens de “Análise macroambiental” selecionados na primeira etapa e que atenderam ao corte de 50% nas respostas para “maior impacto” (nota 5 da escala Likert), pediu-se aos especialistas que indicassem os itens que consideram de maior impacto para uso industrial de biomassa de microalgas e cianobactérias para alimentação em aquicultura no Brasil nos próximos 10 anos (Figura 3).

Após a primeira e segunda rodadas, foram destacados pelos especialistas o desafio e oportunidade “Desenvolvimento de programas para indução científica e tecnológica para viabilização das tecnologias baseadas em microalgas e cianobactérias” e o aspecto macroambiental “Viabilidades técnica e econômica que garantam a sustentabilidade dos processos produtivos baseados em microalgas e cianobactérias” no uso de biomassa algal na aquicultura no Brasil nos próximos dez anos. Ambos podem ser associados ao desenvolvimento de tecnologias eficientes de escalonamento do cultivo, que ainda são de alto custo, o que impacta diretamente no uso industrial de microalgas, transformadas geneticamente ou não (Estevam et al., 2023; Mordor Intelligence, 2023).

Tabela 3. Desafios e oportunidades e critérios macroambientais selecionados na primeira etapa do Delphi.

Desafios e oportunidades	Análise macroambiental
<ul style="list-style-type: none"> • Uso de ferramentas de edição gênica no melhoramento genético e no desenvolvimento de cepas promissoras. 	<ul style="list-style-type: none"> • Viabilidades técnica e econômica que garantam a sustentabilidade dos processos produtivos baseados em microalgas e cianobactérias.
<ul style="list-style-type: none"> • Uso de ferramentas “ômicas” (genômica, transcriptômica, proteômica, metabolômica e lipidômica) no melhoramento genético e no desenvolvimento de cepas promissoras. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade de recursos para investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação.
<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolvimento de programas para indução científica e tecnológica para viabilização das tecnologias baseadas em microalgas e cianobactérias. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de produção e processamento de biomassa de microalgas e cianobactérias no Brasil.

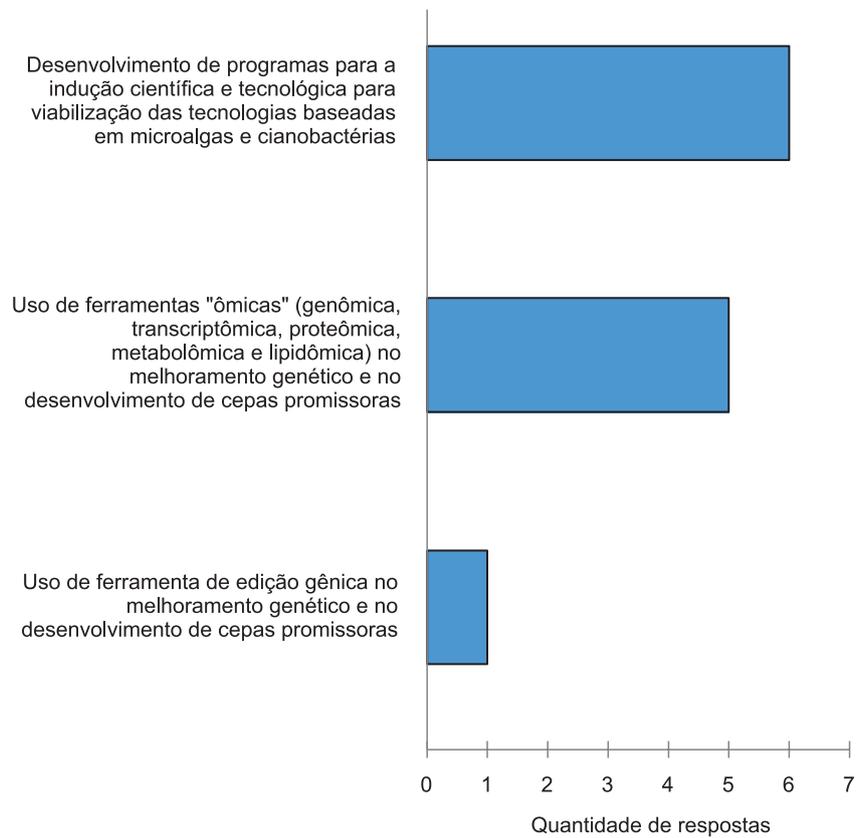


Figura 2. Gráfico de histograma com quantidade de respostas para cada item apresentado aos especialistas na segunda rodada na opção “Desafios e oportunidades”.

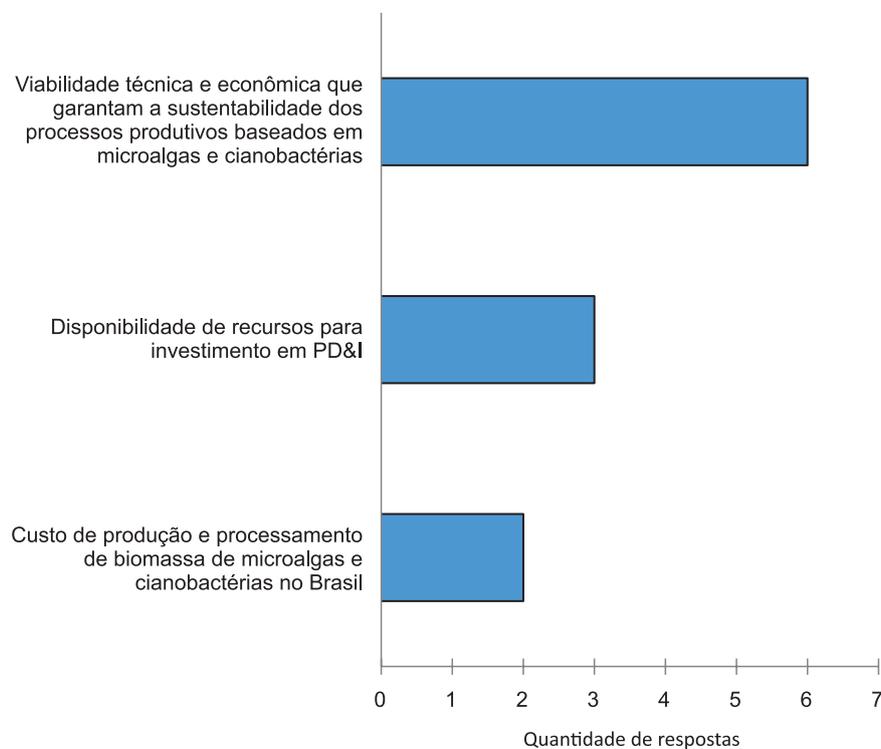


Figura 3. Histograma com quantidade de respostas para cada item apresentado aos especialistas na segunda rodada na opção “Análise macroambiental”.

De forma complementar, o desafio e oportunidade “Uso de ferramentas “ômicas” (genômica, transcriptômica, proteômica, metabolômica e lipidômica) no melhoramento genético e no desenvolvimento de cepas promissoras”, que também teve destaque entre os especialistas, é uma metodologia de biotecnologia avançada que consiste nos procedimentos para ações de melhoramento genético e desenvolvimento de cepas promissoras e adaptadas às necessidades do mercado-alvo (Santana, 2020). Associada ao aspecto macroambiental “Viabilidades técnica e econômica que garantam a sustentabilidade dos processos produtivos baseados em microalgas e cianobactérias”, a biotecnologia pode gerar linhagens com características como alta produtividade de biomassa, biofábrica para expressão heteróloga de alguma substância de alto valor agregado e resistência a alguma condição ambiental, incluindo meio de cultivo (Santana, 2020). Assim, com base nos dados

tratados dos apontamentos nas questões abertas dos especialistas consultados, foi construída uma matriz SWOT (Tabela 4).

Na matriz SWOT, os principais pontos fortes são a diversificação de fonte alimentícia para ração, aumento da qualidade nutricional e fortalecimento do mercado aquícola brasileiro, além da possibilidade de melhoramento genético para atender a demandas específicas como a maior concentração de determinado nutriente. No entanto, os aspectos positivos são fortemente impactados pelos pontos fracos, que apontam a necessidade de escalonamento no cultivo de microalgas e cianobactérias para que sua extração e beneficiamento tenham viabilidade técnica, financeira e econômica. O estudo de Anjos et al. (2024) chegou a um resultado similar ao avaliar outros mercados além da alimentação animal, como farmacêutico e cosmético, bioinsumos para agricultura, biocombustíveis e química

Tabela 4. Matriz SWOT.

	Oportunidades	Ameaças
Ambiente externo	<ul style="list-style-type: none"> • Adoção de novas tecnologias/ferramentas sustentáveis que estão em alta na alimentação animal. • Introdução de novos insumos com características de sustentabilidade ambiental e econômica, para fortalecimento da segurança alimentar. • Possibilidade de aumento na qualidade nutricional das rações, com melhoria de perfil lipídico e do perfil de aminoácidos. • Ausência de ingredientes ricos em ácidos graxos poli-insaturados que sejam substitutos de óleo e/ou farinha de peixe. • Melhoramento genético para desenvolvimento de linhagens promissoras. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de estudos que demonstrem a eficácia para alimentação de peixes e camarões com microalgas em escala piloto ou industrial. • Custos de produção elevados e falta de escala do processo produtivo de microalgas para fornecimento regular às fábricas de ração. • Indisponibilidade de recursos para investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação. • Necessidade de desenvolvimento de programas para indução científica e tecnológica para viabilização das tecnologias baseadas em microalgas e cianobactérias.
	Forças	Fraquezas
Ambiente interno	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento da aquicultura nacional e necessidade de novos ingredientes para alimentação animal. • Demanda reprimida de novos ingredientes para produção de ração no Brasil. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa divulgação das propriedades nutricionais das microalgas. • Alto custo de produção e processamento de biomassa de microalgas e cianobactérias no Brasil. • Biomassa de microalgas apresenta alto valor de mercado e baixa disponibilidade para uso em escala industrial. • Falta de viabilidade técnica e econômica que garantam a sustentabilidade dos processos produtivos baseados em microalgas e cianobactérias.

verde, com o apontamento de fraqueza de disponibilidade de tecnologias em baixa escala de maturidade, baixo investimento em formação de profissionais e baixo investimento para escalonamento das tecnologias.

As perspectivas da FAO (2022) para o segmento aquícola são de crescimento da produção, do consumo e do comércio de proteína até 2030, com produção de 202 milhões de toneladas de animais em 2030, coincidindo com o ano de vigência dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). A FAO (2022) também aponta que houve um crescimento de mais de 570% no consumo global de alimentos produzidos utilizando-se animais aquáticos entre 1961 e 2020, com tendência de aumento de 5,9% entre 2020 e 2030, com consumo médio de 21,4 kg per capita, o que permite vincular o contexto deste artigo ao ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), particularmente a meta 2.4 (garantia de sistemas sustentáveis de produção de alimentos e resilientes às mudanças climáticas), e a meta 12.2 do ODS 12, “Consumo e produção sustentáveis” (alcance de um processo de gestão sustentável e uso eficiente do capital natural) (Nações Unidas Brasil, 2024).

Os resultados apresentados na matriz SWOT têm relação direta com o apontamento da FAO (2022) de inclusão de proteína de animais aquáticos em estratégias nacionais de segurança alimentar, aumento da disponibilidade desses alimentos e consequente cumprimento da Agenda 2030. Já a disponibilidade tem relação direta com o desenvolvimento de soluções tecnológicas que promovam o crescimento do mercado aquícola e estimulem ações que tornem o uso de biomassa algal viável técnica e economicamente, promovendo o vínculo deste estudo com a meta 9.5 do ODS 9, “Indústria, inovação e infraestrutura”: fortalecimento de ações de pesquisa científica, desenvolvimento tecnológico e inovação, e com a meta 12.2 do ODS 12, descrita no parágrafo anterior (Nações Unidas Brasil, 2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A diversificação de biomassa para produção de ração para aquicultura é o caminho mais estratégico para superar as flutuações de preços e de disponibilidade de farinha de peixe e para substituir o farelo de soja na formulação, cujos fatores antinutricionais e baixa palatabilidade aumentam o custo da ração pelo acréscimo de suplementos. Além disso, a vinculação com os ODS e o alinhamento do processo fabril e da seleção de matérias-primas com requisitos socioambientais são uma das exigências do mercado, além de certificações que permitem a rastreabilidade do produto final.

O mercado nacional de aquicultura está em crescimento, o que exige a disponibilidade de matérias-primas para atender à demanda atualmente reprimida. Além da versatilidade das microalgas e cianobactérias para crescerem em diversos meios e a possibilidade de produzirem diversos metabólitos de alto valor agregado, o cultivo não compete por terras aráveis e é promovido em qualquer região e qualquer bioma que permita a diminuição de custos de logística. Com isso, é possível dirimir parte da falta de viabilidade para garantir a sustentabilidade econômica e ambiental dos processos de cultivo e processamento da biomassa.

Suscita-se, neste estudo, que a biomassa de microalgas e cianobactérias é um bioinsumo estratégico, tem potencial de expansão no mercado brasileiro, com competitividade em relação à farinha de peixe e ao farelo de soja, e está associada à sustentabilidade ambiental e ao aumento na qualidade nutricional das rações, com menor demanda de suplementação. No entanto, os gargalos técnicos e econômicos no cultivo e no processamento descritos nas fraquezas e ameaças minam a competitividade da biomassa microalgal na alimentação em aquicultura nos dez anos avaliados neste estudo. Além disso, não há escala de produção para fornecimento de biomassa em quantidade e custo acessíveis para avaliação da eficácia da biomassa na alimentação em aquicultura.

A indisponibilidade de recursos destinados a pesquisa científica, desenvolvimento tecnológico e inovação é apontada pelos especialistas consultados neste estudo como uma ameaça que deve ser dirimida para que a biomassa microalgal tenha viabilidade econômica. A análise apresentada neste artigo pode ser replicada para avaliar o uso de biomassa de microalgas e seus derivados em outros segmentos industriais, como nutracêutica, cosmecêutica, farmacêutica, biofertilizantes, biocombustíveis (hidrogênio verde-musgo e biogás, por exemplo) e suplementos alimentares humanos e animais.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, A.; ASHRAF, S.S. Sustainable food and feed sources from microalgae: food security and the circular bioeconomy. **Algal Research**, v.74, art.103185, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103185>.
- ANJOS, S.S.N. dos; ALMEIDA, A.N. de. Food security and its connection with environmental economics and accounting: a bibliometric analysis. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v.18, e04190, 2024. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n3-010>.
- ANJOS, S.S.N. dos; KIMPARA, J.M.; ALMEIDA, A.N. de; CANÇADO, L.J. Cálculo do *Emergence score* de microalgas e cianobactérias para alimentação em aquicultura: futuros destaques tecnológicos. In: FEIRA NACIONAL DO CAMARÃO, 19., 2023, Natal. **Resumos**. Natal: Associação Brasileira de Criadores de Camarão, 2023. p.107. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1158712/1/fenacam-este-20112023-132540-Sergio-Saraiva-Nazarenos-Anjos.pdf>>. Acesso em: 6 abr. 2024.
- ANJOS, S.S.N. dos; VIANA, N.M.; MENDONÇA, S.; CANÇADO, L.J.; DAMASO, M.C.T. Estudo prospectivo sobre biomassa algal: identificação de oportunidades para fortalecimento da bioeconomia brasileira. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v.13, p.10-28, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2024v13i4.p10-28>.
- BARBOSA, B.P.; LEITE, L.O.; MESQUITA, A. de F.N.; BANDEIRA, L.L.; MARTINS, S.C.S.; MARTINS, C.M. Produtos biotecnológicos de microalgas: uma análise de tendências. **Scientific Electronic Archives**, v.16, p.85-104, 2023. DOI: <https://doi.org/10.36560/161120231849>.
- BESSADA, S.M.F.; BARREIRA, J.C.M.; OLIVEIRA, M.B.P.P. Pulses and food security: dietary protein, digestibility, bioactive and functional properties. **Trends in Food Science & Technology**, v.93, p.53-68, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.08.022>.
- BORSCHIVER, S.; SILVA, A.L.R. da. (Org.). **Technology Roadmap: planejamento estratégico para alinhar mercado-produtor-tecnologia**. Rio de Janeiro: Interciência, 2016. 120p.
- ESTEVAM, B.R.; PINTO, L.F.R.; MACIEL FILHO, R.; FREGOLENTE, L.V. Growth and metabolite production in *Chlorella* sp.: analysis of cultivation system and nutrient reduction. **BioEnergy Research**, v.16, p.1829-1840, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10532-z>.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The state of world fisheries and aquaculture 2018: meeting the sustainable development goals**. Rome, 2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/I9540EN/I9540en.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2020.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The state of world fisheries and aquaculture 2022: towards blue transformation**. Rome, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4060/cc0461en>.
- FERNANDES, A.S. **Carotenóides e clorofilas microalgais: ênfase na caracterização e bioacessibilidade**. 2021. 180p. Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- FREITAS, C.K.; FERRARINI, A.V. Delphi como alternativa metodológica de pesquisa em ciências sociais: uma experiência sobre consumo colaborativo. **Revista Humanidades & Inovação**, v.8, p.46-62, 2021. Disponível em: <<https://revista.unitins.br/index.php/humanidadeseinovacao/article/view/4772>>. Acesso em: 6 abr. 2024.
- GAMBOA-DELGADO, J.; MÁRQUEZ-REYES, J.M.; GODÍNEZ-SIORDIA, D.E. Producción masiva de microorganismos para la obtención de proteína sustentable con alto valor biológico. **CIENCIA ergo-sum**, v.30, e215, 2023. DOI: <https://doi.org/10.30878/ces.v30n3a11>.
- GHEIBI, M.; CHAHKANDI, B.; BEHZADIAN, K.; AKRAMI, M.; MOEZZI, R. Evaluation of ceramic water filters' performance and analysis of managerial insights by SWOT matrix. **Environmental Industry Letters**, v.1, p.1-9, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15157/eil.2023.1.1.1-9>.
- JAOUDE, G.A.; MUMM, O.; CARLOW, V.M. An overview of scenario approaches: a guide for urban design and planning. **Journal of Planning Literature**, v.37, p.467-487, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1177/08854122221083546>.
- JERZAK, M.A.; ŚMIGLAK-KRAJEWSKA, M. Globalization of the market for vegetable protein feed and its impact on sustainable agricultural development and food security in EU countries illustrated by the example of Poland.

Sustainability, v.12, art.888, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12030888>.

MAISASHVILI, A.; BRYANT, H.; RICHARDSON, J.; ANDERSON, D.; WICKERSHAM, T.; DREWERY, M. The values of whole algae and lipid extracted algae meal for aquaculture. **Algal Research**, v.9, p.133-142, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.03.006>.

MARQUES, J.B.V.; FREITAS, D. de. Método DELPHI: caracterização e potencialidades na pesquisa em Educação. **Pro-Posições**, v.29, p.389-415, 2018. DOI <https://doi.org/10.1590/1980-6248-2015-0140>.

MELANDER, L.; DUBOIS, A.; HEDVALL, K.; LIND, F. Future goods transport in Sweden 2050: Using a Delphi-based scenario analysis. **Technological Forecasting & Social Change**, v.138, p.178-189, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.08.019>.

MENET, G. The importance of strategic management in international business: expansion of the PESTEL method". **International Business and Global Economy**, n.2, p.261-270, 2016. Disponível em: <<https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=532082>>. Acesso em: 13 abr. 2024.

MORDOR INTELLIGENCE. **Chlorella Ingredients Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2024 - 2029)**. 2023. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/chlorella-ingredients-market>>. Acesso em: 6 abr. 2024.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2024. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 12 abr. 2024.

PANTAMI, H.A.; BUSTAMAM, M.S.A.; LEE, S.Y.; ISMAIL, I.S.; FAUDZI, S.M.M.; NAKAKUNI, M.; SHAARI, K. Comprehensive GCMS and LC-MS/MS metabolite profiling of *Chlorella vulgaris*. **Marine Drugs**, v.18, art.367, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/md18070367>.

RESEARCH AND MARKETS. **Global Chlorella Ingredients Market by Distribution Channel (Offline, Online), Application (Cosmetics & Personal Care, Food & Beverage) - Forecast 2024-2030**. 2024. Disponível em: <https://www.researchandmarkets.com/report/chlorella?utm_source=BW&utm_

[medium=PressRelease&utm_code=gs52q9&utm_campaign=1870800+-+Europe+Chlorella+Market+Forecast+to+2030+-+Chlorella+Powder+Dominates+the+Market+with+Strong+Coloring+Properties+and+Health+Benefits&utm_exec=chdo54prd](https://www.researchandmarkets.com/report/chlorella?utm_source=BW&utm_medium=PressRelease&utm_code=gs52q9&utm_campaign=1870800+-+Europe+Chlorella+Market+Forecast+to+2030+-+Chlorella+Powder+Dominates+the+Market+with+Strong+Coloring+Properties+and+Health+Benefits&utm_exec=chdo54prd)>. Acesso em: 6 abr. 2024.

ROSA, A.P.C. da; CARVALHO, L.F. de; GOLDBECK, L.; ENKE, D.B.S.; ROCHA, C.B.; SOUZA-SOARES, L.A. de; POUHEY, J.L.O.F.; COSTA, J.A.V. Productive performance and fatty acid profile of Hungarian carp fingerlings fed with Spirulina enriched feed. **Research, Society and Development**, v.9, e116932301, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i3.2301>.

SANTANA, H. **Potencial biotecnológico de microalgas verdes (*Chlorophyta*) cultiváveis em sistemas a base de vinhaça e gás carbônico**. 2020. 151p. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília.

SIDDIQUI, A. SWOT analysis (or SWOT Matrix) tool as a strategic planning and management technique in the health care industry and its advantages. **Biomedical Journal of Scientific & Technical Research**, v.40, p.32035-32042, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2021.40.006419>.

SOARES, D.R.P. **Substituição de farinha de peixe por farelo de soja para juvenis de pacamã (*Lophiosilurus alexandri*)**. 2015. 47p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Veterinária, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SONG, J.; SUN, Y.; JIN, L. PESTEL analysis of the development of the waste-to-energy incineration industry in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.80, p.276-289, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.066>.

VICTOR, M.M.; MOUTINHO, F.L.B.; RIATTO, V.B. Microalgas: uma estratégia sustentável na transformação e obtenção de compostos orgânicos. **Química Nova**, v.47, e-20230107, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20230107>.

ZHANG, H. The innovation of the Pest Analysis Model in public sector strategy formulation. **Academic Journal of Management and Social Sciences**, v.2, p.85-88, 2023. DOI: <https://doi.org/10.54097/ajmss.v2i1.6376>.