



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UnB DE PLANALTINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

Sérgio Saraiva Nazareno dos Anjos

Análise econômica e de mercado de microalgas para alimentação em aquicultura:
uso de biomassa de *Chlorella sorokiniana* em formulação hipotética de dieta para
camarão-branco-do-Pacífico (*Penaeus vannamei*)

Brasília/DF

2024

Sérgio Saraiva Nazareno dos Anjos

Análise econômica e de mercado de microalgas para alimentação em aquicultura:
uso de biomassa de *Chlorella sorokiniana* em formulação hipotética de dieta para
camarão-branco-do-Pacífico (*Penaeus vannamei*)

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Ciências Ambientais da Universidade de
Brasília como requisito parcial para a obtenção do
título de Doutor em Ciências Ambientais, na área de
concentração Estrutura, dinâmica e conservação
ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Nascimento de
Almeida

Coorientadora: Dra. Letícia Jungmann Cançado

Brasília/DF

2024

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

AA599a Anjos, Sérgio Saraiva Nazareno dos
Análise econômica e de mercado de microalgas para
alimentação em aquicultura: uso de biomassa de *Chlorella*
sorokiniana em formulação hipotética de dieta para
camarão-branco-do-Pacífico (*Penaeus vannamei*) / Sérgio
Saraiva Nazareno dos Anjos; orientador Alexandre Nascimento
de Almeida; co-orientador Leticia Jungmann Cançado. --
Brasília, 2024.
158 p.

Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) -- Universidade de
Brasília, 2024.

1. Aquicultura. 2. Microalgas e cianobactérias. 3.
Contabilidade e Economia Ambientais. 4. Valoração. 5.
Bioeconomia. I. Almeida, Alexandre Nascimento de, orient.
II. Cançado, Leticia Jungmann, co-orient. III. Título.

Sérgio Saraiva Nazareno dos Anjos

Análise econômica e de mercado de microalgas para alimentação em aquicultura:
uso de biomassa de *Chlorella sorokiniana* em formulação hipotética de dieta para
camarão-branco-do-Pacífico (*Penaeus vannamei*)

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 26 de novembro de
2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Alexandre Nascimento de Almeida

Presidente

Universidade de Brasília (Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais)

Prof. Dr. Jorge Madeira Nogueira

Membro Interno

Universidade de Brasília (Programa de Pós-graduação em Economia)

Prof. Dr. Félix Gonçalves de Siqueira

Membro Externo

Embrapa Agroenergia

Prof^a. Dr^a. Michelle Pinheiro Vetorelli

Membro Externo

Universidade Federal da Grande Dourados

Prof. Dr. Celso Vila Nova de Souza Junior

Membro Suplente

Universidade de Brasília (Programa de Pós-graduação em Gestão Pública)

Dedicatória.
Ao meu irmão e meus pais.

AGRADECIMENTOS

À Universidade de Brasília, por mais essa oportunidade de formação acadêmica e apresentar ferramentas para o redirecionamento na carreira que eu busquei com o Doutorado;

À minha família: meu irmão (Humberto), por estar na minha vida; minha mãe (Maria Regina) pela serenidade e pelo colo; e meu pai (José de Ribamar), o primeiro doutor da família e minha referência científica, de ética e profissionalismo;

Ao Prof. Dr. Alexandre Nascimento de Almeida, pela liberdade na construção e execução do projeto de pesquisa e no delineamento da tese, além da formação em Métodos Quantitativos, que era um dos meus objetivos no Doutorado;

À Dr^a. Letícia Jungmann Cançado, por me apresentar o mundo das microalgas, nas quais acredito e vejo enorme potencial tecnológico, me incluir no projeto ALGATEC, por ser minha coorientadora e apresentar os fundamentos que me permitiram caminhar por conta própria no Doutorado;

À Dr^a. Janaína Mitsue Kimpara, apresentada pela minha coorientadora, que me apresentou o mundo da aquicultura e foi essencial para a execução da tese. Não tenho palavras para agradecer por tudo! Deixo registrado que vou pessoalmente a Campinas entregar um presente a você!

À Prof^a. Dr^a. Erina Vitório Rodrigues, pela receptividade no início do doutorado e pela sabedoria em gerir e conduzir o PPGCA no início da pandemia e com a perda do Prof. Dr. Antonio Felipe Couto Junior (*in memoriam*);

À banca de qualificação, Prof. Dr. Rodrigo Studart Corrêa e Dr^a. Janaína Mitsue Kimpara, pela avaliação, elogios e apontamentos que foram cruciais para a execução do projeto;

À banca de defesa, Prof. Dr. Jorge Madeira Nogueira, Dr. Félix Gonçalves de Siqueira e Prof^a. Dr^a. Michelle Pinheiro Vetorelli, por aceitarem o convite e pelos apontamentos feitos na defesa para a versão final desta tese e pelos ensinamentos;

Aos meus colegas da Embrapa Agroenergia, pelo incentivo para subir mais um degrau na formação, por revisar meus textos, por dar apoio quando bateu a vontade de desistir e por compreender minhas ausências nos encontros lúdicos;

Ao meu grupo de Trabalho de Conclusão de Curso do MBA Executivo em Gestão da Inovação e Capacidade Tecnológica (FGV *in company*), os colegas da Embrapa Fabiane Siqueira, Fernando Malavazi, Paula Silva e Rhuan Lima. Nosso trabalho foi frutífero e de grande valia para elaboração desta tese. Nossa proposta de ferramenta para valoração será um sucesso!

Aos bolsistas da Embrapa Agroenergia, Natália Viana e Douglas Mendes, por ajudarem na busca de dados para execução de etapas desta tese;

Ao Prof. Dr. Jorge Madeira Nogueira, do Programa de Pós-graduação em Economia (PPGCECO) da Universidade de Brasília. O senhor abriu as portas da UnB e da sua casa em 2019 sem me conhecer e foi essencial na construção da minha ideia para

doutorado. Não passei na seleção do PPGECO à época, mas consegui manter o vínculo durante minha trajetória no PPGCA e me acolheu na Economia do Meio Ambiente, um dos temas nos quais eu quero manter vínculo e desenvolver novas competências;

À Prof^a. Dr^a. Fátima de Souza Freire, do Programa de Pós-graduação em Ciências Contábeis (PPGCONT) da Universidade de Brasília, que me apresentou à Contabilidade Ambiental. A ideia de fazer sua disciplina partiu de leituras que fiz num voo entre Paris e São Paulo em Fevereiro de 2020. A senhora teve sabedoria para conduzir suas aulas durante a pandemia e desmistificou minhas “dificuldades” em Ciências Contábeis. A oportunidade de publicar capítulos no livro “Contabilidade Socioambiental” foi outro diferencial na minha formação. Espero manter o contato para novas parcerias e aprendizados na Valoração, que é outro tema no qual eu quero manter vínculo e me aperfeiçoar profissionalmente;

Ao Prof. Yuri Basile Tukoff-Guimarães, pela orientação no Trabalho de Conclusão de Curso do MBA Executivo em Gestão da Inovação e Capacidade Tecnológica (FGV *in company*), cursado concomitantemente ao Doutorado. Sua orientação me deu segurança para tocar este projeto, principalmente porque a ferramenta desenvolvida se mostrou a mais adequada para execução do projeto de tese. Espero manter o contato e a parceria!

Aos colegas do PPGCA, PPGCECO e PPGCONT, pelo companheirismo durante as aulas, pelas ajudas mútuas e pelas trocas de desabafos, preocupações e risadas;

A todos(as), meus sinceros agradecimentos!

The real voyage of discovery consists not in seeking new landscapes, but in having new eyes.

Marcel Proust

In any moment of decision, the best thing you can do is the right thing, the next best thing is the wrong thing, and the worst thing you can do is nothing.

Theodore Roosevelt

RESUMO

Para uma população mundial em crescimento e com previsão de 9 bilhões de pessoas até 2050, a disponibilidade de alimentos a todos é um dos grandes desafios da (*Food and Agriculture Organization*), sendo o alvo do Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS 2), “Fome zero e agricultura sustentável”. A aquicultura é um segmento pecuário considerada pela FAO a alternativa de alto valor agregado para a promoção da segurança alimentar por meio do aumento da oferta de proteína à população mundial. No entanto, 70% do custo de manejo em aquicultura decorre de custos na ração, particularmente pela sazonalidade e flutuação de preços da farinha de peixe, um dos ingredientes principais. No Brasil, seu substituto é o farelo de soja pela disponibilidade, mas contém fatores antinutricionais, baixa digestibilidade e baixa palatabilidade. Microalgas são microrganismos cultiváveis em diferentes meios e condições ambientais cujas biomassas possivelmente são competitivas nutricionalmente para substituir farinha de peixe e farelo de soja. O objetivo geral desta tese é estimar o valor econômico e financeiro da biomassa de *Chlorella sorokiniana* e avaliar a competitividade da biomassa algal em formulação hipotética de ração para camarão-branco-do-Pacífico (*Penaeus vannamei*). Esta tese apresenta resultados de aplicação de metodologias de estudo de futuro que caracterizam o tema em estudo e que subsidiaram a avaliação financeira, que evidenciaram a inviabilidade do uso da biomassa no momento presente. Em contraponto, a biomassa é competitiva pelo seu teor nutricional e potencial para, em longo prazo, se tornar uma alternativa ao farelo de soja e compor formulações de rações substituindo até 40% da farinha de peixe, além de ser incluído ações de mitigação das mudanças climáticas e de garantia da segurança alimentar. A falta de viabilidade no estágio atual de desenvolvimento da cepa avaliada pode ser suplantada com o investimento em aumento de escala de cultivo e na formação de profissionais especializados para atuação em escala industrial de cultivo e processamento da biomassa.

Palavras-chaves: Carcinicultura; Biomassa algal; Valoração; Alimentação animal.

ABSTRACT

With a growing global population expected to reach 9 billion people by 2050, food availability for all is one of the major challenges of the Food and Agriculture Organization (FAO), and is the target of Sustainable Development Goal (SDG 2), “Zero Hunger and Sustainable Agriculture”. Aquaculture is a livestock segment considered by FAO to be a high-value-added alternative for promoting food security by increasing the supply of protein to the world population. However, 70% of the management costs in aquaculture are due to feed costs, particularly due to seasonality and price fluctuations of fishmeal, one of the main ingredients. In Brazil, soybean meal is a substitute due to its availability, but it contains antinutritional factors, low digestibility and low palatability. Microalgae are microorganisms that can be cultivated in different environments and environmental conditions, and their biomass is likely to be nutritionally competitive to replace fishmeal and soybean meal. The general objective of this thesis is to estimate the economic and financial value of *Chlorella sorokiniana* biomass and to evaluate the competitiveness of algal biomass in a hypothetical feed formulation for Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*). This thesis presents results from the application of future study methodologies that characterize the topic under study and that supported the financial evaluation, which demonstrated the unfeasibility of using biomass at the present time. In contrast, biomass is competitive due to its nutritional content and potential to, in the long term, become an alternative to soybean meal and compose feed formulations, replacing up to 40% of fishmeal, in addition to being included in actions to mitigate climate change and guarantee food security. The lack of viability at the current stage of development of the strain evaluated can be overcome by investing in increasing the scale of cultivation and in the training of specialized professionals to work on an industrial scale in biomass cultivation and processing.

Key words: Shrimp farming; Algal biomass; Valuation; Animal feed.

LISTA DE GRÁFICO E FIGURAS

Capítulo 1	Gráfico 1: Histograma da quantidade de documentos recuperados nos anos de publicação	34
Capítulo 1	Figura 1: Mapa de distribuição de publicações em 93 países.	35
Capítulo 1	Gráfico 2: Autocorrelação entre as 16 palavras-chaves obtidas da mineração no software VantagePoint® de palavras-chaves em publicações científicas sobre segurança alimentar, economia ambiental e contabilidade ambiental entre 1986 e 2023	37
Capítulo 1	Gráfico 3: Mapa de co-ocorrência de “food security” com “Environmental economics” e “Environmental accountability” . Fonte: elaborado pelos autores.	39
Capítulo 1	Figura 2: Países com publicações apenas sobre economia ambiental.	39
Capítulo 1	Figura 3: Países com publicações apenas sobre contabilidade ambiental.	39
Capítulo 2	Figure 1: Geographic distribution of the countries of bibliometric data search of microalgae/cyanobacteria in aquaculture..	51
Capítulo 2	Figure 2: Geographic distribution of the countries of patentometric data search of microalgae / cyanobacteria for aquaculture	52
Capítulo 2	Figure 3: Geographic distribution of family member countries of patentometric data of microalgae / cyanobacteria for aquaculture feed.	52
Capítulo 2	Figure 4: Line graph with the evolution of the records per year of the countries with ten and more scientific documents of microalgae/cyanobacteria for aquaculture feed	53
Capítulo 2	Figure 5: Line graph of the evolution of the yearly records of the priority countries with ten and more patent documents of microalgae/cyanobacteria for aquaculture feed	54
Capítulo 2	Figure 6: Line graph with the evolution of the yearly records of the family member countries with ten and more patent documents of microalgae/cyanobacteria for aquaculture feed	54
Capítulo 2	Figure 7: Bubble chart of co-occurrence of microalgae / cyanobacteria and zooplankton species with bibliometric data for aquaculture feed (According to Table 4 and Table 8)	60
Capítulo 2	Figure 8: Bubble chart of co-occurrence of microalgae / cyanobacteria and zooplankton species with patentometric data for aquaculture feed (According to Table 5 and Table 9)	60
Capítulo 2	Figure 9: Bubble chart of co-occurrence of microalgae / cyanobacteria, and aquaculture species with bibliometric data for aquaculture feed (According to Table 4 and Table 6)	61

Capítulo 2	Figure 10: Bubble chart of co-occurrence of microalgae / cyanobacteria, and aquaculture species with patentometric data for aquaculture feed (According to Table 5 and Table 7)	62
Capítulo 2	Figure 11: Bubble chart of co-occurrence of aquaculture and zooplankton species with bibliometric data for aquaculture feed (According to Table 6 and Table 8)	63
Capítulo 2	Figure 12: Bubble chart of co-occurrence of aquaculture and zooplankton species with patentometric data for aquaculture feed (According to Table 7 and Table 9)	63
Capítulo 2	Figure 13: Bubble chart with year evolution of the WOS categories (bibliometric data) of the use of microalgae / cyanobacteria for aquaculture feed	67
Capítulo 2	Figure 14: Bubble chart with year evolution of the IPCs subdivisions (patentometric data) of use of microalgae/cyanobacteria for aquaculture feed	67
Capítulo 3	Gráfico 1: Gráfico de barras empilhadas de co-ocorrência dos gêneros taxonômicos de microalgas e cianobactérias com os mercados analisados, segundo os especialistas	81
Capítulo 4	Figura 1: Gráfico de histograma com as respostas dadas à questão sobre gêneros taxonômicos	106
Capítulo 4	Figura 2: Gráfico de histograma com quantidade de respostas para cada item apresentado aos especialistas na segunda rodada na opção “Desafios e oportunidades”	114
Capítulo 4	Figura 3: Gráfico de histograma com quantidade de respostas para cada item apresentado aos especialistas na segunda rodada na opção “Análise Macroambiental”	115
Capítulo 5	Figura 1: Gráfico de linhas de preços por ano de farinha de peixe e de farelo de soja entre 1979 e 2023	130
Capítulo 5	Figura 2: Níveis de maturidade tecnológica	133
Capítulo 5	Figura 3: Cenários, modelos de negócios e indicadores financeiros com resultado da modelagem de valoração da formulação hipotética de ração para <i>P. vannamei</i> com biomassa de <i>C. sorokiniana</i>	141
Capítulo 5	Figura 4: Gráfico do fluxo de caixa descontado.	142

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Capítulo 1	Tabela 1: Dezesesseis palavras-chaves mineradas dos documentos recuperados da busca de publicações científicas sobre segurança alimentar, economia ambiental e contabilidade entre 1986 e 2023	32
Capítulo 2	Table 1: Search strategies and number of documents retrieved between 2001 and 2021	50
Capítulo 2	Table 2: Ten first-author affiliations with more publications on the bibliometric search of microalgae/cyanobacteria for aquaculture	55
Capítulo 2	Table 3: Ten first patent applications on the patentometric search of microalgae/cyanobacteria for aquaculture	56
Capítulo 2	Table 4: The first ten species or genera of microalgae (identified as "M") and cyanobacteria (identified as C) in bibliometric data for aquaculture feed	57
Capítulo 2	Table 5: Species or genera of microalgae (identified as "M") and cyanobacteria (identified as "C") in patentometric data for aquaculture feed	57
Capítulo 2	Table 6: The first ten aquaculture species in bibliometric data for using microalgae and cyanobacteria as feed sources.	58
Capítulo 2	Table 7: Aquaculture species with patentometric data for using microalgae and cyanobacteria as feed sources with two records.	58
Capítulo 2	Table 8: Bibliometric data shows zooplankton species associated with using microalgae and cyanobacteria as aquaculture feed sources.	58
Capítulo 2	Table 9: Zooplankton species associated with using microalgae and cyanobacteria as aquaculture feed sources in the patentometric data.	59
Capítulo 2	Table 10: The ten first WOS categories of bibliometric data of microalgae and cyanobacteria for aquaculture feed with forty or more records	66
Capítulo 2	Table 11: The ten first IPCs of the patentometric data of microalgae and cyanobacteria for aquaculture feed with ten or more records	66
Capítulo 3	Tabela 1: Processos de cultivo em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas "5"	83
Capítulo 3	Tabela 2: Processos de colheita em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas "5"	83
Capítulo 3	Tabela 3: Desafios e oportunidades em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas "5"	85
Capítulo 3	Tabela 4: Respostas à ferramenta PESTEL ordem decrescente	87

	de porcentagem de respostas notas “5”	
Capítulo 3	Tabela 5: Matriz SWOT	90
Capítulo 4	Quadro 1: Porcentagem de respostas aos “Desafios e oportunidades” por nota na escala Likert	107
Capítulo 4	Quadro 2: Porcentagem de respostas à “Análise Macroambiental” por nota na escala Likert	109
Capítulo 4	Quadro 3: Desafios e oportunidades e critérios macroambientais selecionados na primeira etapa do Delphi	112
Capítulo 4	Quadro 3: Matriz SWOT	117
Capítulo 5	Quadro 1: Premissas para modelagem e aplicação do método de FCD adaptado por Siqueira et al. (2024)	134
Capítulo 5	Quadro 2: Fatores de incerteza aplicados para cálculo da Taxa Mínima de Atratividade	135
Capítulo 5	Quadro 3: Caracterização bioquímica da cepa de <i>C. sorokiniana</i> BRM 051899 cultivada em meio de cultivo comercial BG11	137
Capítulo 5	Quadro 4: Composição base da formulação hipotética	137
Capítulo 5	Quadro 5: Formulação hipotética de ração para <i>P. vannamei</i> com biomassa de <i>C. sorokiniana</i> , a partir da composição base	138
Capítulo 5	Quadro 6: Modelagem da valoração a partir da fórmula do Quadro 4 e dados de mercado para o modelo de base de potencial de mercado	138
Capítulo 5	Quadro 7: Fatores de incerteza aplicados para cálculo da Taxa Mínima de Atratividade	139
Capítulo 5	Quadro 8: Quadro comparativo de vantagens e desvantagens de farelo de soja, farinha de peixe e biomassa de <i>C. sorokiniana</i>	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

21ª conferência das partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima	COP 21
26ª conferência das partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima	COP 26
27ª conferência das partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima	COP 27
<i>Arachidonic acid</i> (tradução: ácido araquidônico)	ARA
Coleção de Microrganismos e Microalgas Aplicados à Agroenergia e Biorrefinarias	CMMAABio
<i>Compound Annual Growth Rate</i>	CAGR
Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável	Rio+20
Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima	UNFCCC
Dióxido de carbono	CO ₂
<i>Docosahexaenoic acid</i> (tradução: ácido docosahexaenoico)	DHA
<i>Eicosapentaenoic acid</i> (tradução: ácido eicosapentaenoico)	EPA
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária	Embrapa
<i>Environmental, Social, Governance</i>	ESG
<i>European Food Safety Authority</i>	EFSA
Fluxo de Caixa Descontado	FCD
<i>Food and Agriculture Organization</i>	FAO
<i>Food and Drug Administration</i>	FDA
Fundação Oswaldo Cruz	Fiocruz
<i>Infectious Myonecrosis Virus</i> (tradução: Vírus da mionecrose infecciosa)	IMNV
<i>Integrated MultiTrophic Aquaculture</i>	IMTA
<i>International Patent Classification</i> (tradução: Classificação Internacional de Patente)	IPC
Ministério da Agricultura e Pecuária	MAPA
Objetivos do Desenvolvimento do Milênio	ODM
Objetivos do Desenvolvimento Sustentável	ODS

Organismo Geneticamente Modificado	OGM
<i>Penaeus stylirostris</i> densovirus	PstDNV
Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação	PD&I
<i>Polyunsaturated fatty acids</i> (tradução: Ácidos graxos poliinsaturados)	PUFAs
Produto Interno Bruto Verde	PIV ou PIB Verde
<i>Research, Development and Innovation</i>	RD&I
<i>Sustainable Development Goals</i>	SDG
Taxa Interna de Retorno	TIR
Taxa Mínima de Atratividade	TMA
<i>Technology Readiness Level</i>	TRL
<i>United Nations Food and Agriculture Organization</i> (tradução: Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura)	FAO
<i>United States of America</i>	USA
Valor Presente Líquido	VPL
<i>Web of Science</i>	WOS
<i>White spot syndrome virus</i> (tradução: Vírus da doença da mancha branca)	WSSV

PRODUÇÃO CIENTÍFICA DURANTE O DOUTORADO

1) Produção sem vínculo com a tese:

a) Artigos:

ANJOS, S. S. N. dos. Análise bibliométrica da produção científica de valoração econômica de biotecnologia entre os anos de 1945 e 2019. **Revista de Economia da UEG**, v. 16, p. 71-86, 2020. <https://www.revista.ueg.br/index.php/economia/article/view/10411>.

ANJOS, S. S. N. dos; NASCIMENTO NETO, J. O. Avaliação do impacto de política de subvenção econômica na cadeia produtiva de biodiesel de babaçu. **RAMA - Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, p. e8348, 2021. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14Supl.1.e8348>.

DOS ANJOS, J.; FRAGOSO, R.; DIANESE, A.; TAMEIRÃO, S.; DOS ANJOS, S. Molecular identification and pathogenicity of *Curvularia spicifera* isolated from seeds of the hybrid elephant grass cultivar BRS Capileto (*Pennisetum purpureum* × *Pennisetum glaucum*) in Brazil. **New Disease Reports**, v. 50, p. e12294, 2024. <https://doi.org/10.1002/ndr2.12294>.

FONSECA, F. N. DE A.; BUSTAMANTE, M. M. DA C.; ANJOS, S. S. N. DOS. Nature's Contributions to People: Systematic Mapping of Studies and Inventory of Methodologies and Indicators for Quantifying Hydrological Ecosystem Services. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 10, e08340, 2024. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n10-211>

SANTOS, A. C. ; ANJOS, S. S. N. dos ; BRAGA, M. ; VIANA, N. M. ; SOARES, I. P. . Aplicação industrial de óleos vegetais em biocombustível: um estudo prospectivo e análise de sinais para apontar tendências de mercado. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 39, p. e26995, 2022. <http://dx.doi.org/10.35977/0104-1096.cct2022.v39.26995>.

b) Trabalhos publicados em anais de congressos:

ANJOS, S. S. N.; GONCALVES, V. C. C. P. H. ; BRAGA, M. ; DAMASO, M. C. T. . Análise patentométrica e bibliométrica de microrganismos-chave para produção de ácidos carboxílicos de relevância estratégica. In: VI Encontro de Pesquisa e Inovação da Embrapa Agroenergia, 2020, Brasília. **Anais...** Brasília: Embrapa Agroenergia, 2020. v. 1. p. 57-64. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1127076/analise-patentometrica-e-bibliometrica-de-microrganismos-chave-para-producao-de-acidos-carboxilicos-de-relevancia-estrategica>.

VIANA, N. M.; ANJOS, S. S. N. dos. Hidrogênio carbono neutro ou negativo a partir de biomassas e biocombustíveis no Brasil: uma análise webométrica. In: 62º Congresso da SOBER, 2024, UFT. **Anais...** Palmas: SOBER, 2024. DOI: 10.29327/62-congresso-da-sober-397784.815587.

VIANA, N. M.; ARAÚJO, A. R. ; SCHULTZ, E. L. ; SANTOS, A. C. ; GAMBETTA, R. ; ANJOS, S. S. N. dos. Biomassas e biocombustíveis competitivos para estruturação do mercado brasileiro de hidrogênio carbono neutro ou negativo. In: VII Encontro de Pesquisa e Inovação da Embrapa Agroenergia (VII EnPI), 2023, Brasília. **Anais...**

Brasília: Embrapa Agroenergia, 2023. v. 1. p. 1-273.
<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/11583471>.

VIANA, N. M.; FAVARO, S. P.; ANJOS, S. S. N. dos. Análise prospectiva de tecnologias na cadeia de valor da macaúba. In: 62º Congresso da SOBER, 2024, UFT. **Anais...** Palmas: SOBER, 2024. DOI: 10.29327/62-congresso-da-sober-397784.817991.

VIANA, N. M. ; SANTOS, A. C. ; ANJOS, S. S. N. ; MIRANDA, C. H. B. . Caracterização do mercado de betacaroteno a partir da microalga *Dunaliella* sp.. In: VI Encontro de Pesquisa e Inovação da Embrapa Agroenergia, 2020, Brasília. **Anais...** Brasília: Embrapa Agroenergia, 2020. v. 1. p. 22-28. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1127051/caracterizacao-do-mercado-de-betacaroteno-a-partir-da-microalga-dunaliella-sp>.

c) Documentos Série Embrapa:

SCHULTZ, E. L. ; QUINTINO, R. P. ; ANJOS, S. S. N. dos . **Estudo prospectivo de tecnologias baseadas na biomassa de microalgas e cianobactérias: abordagens bibliométrica e patentométrica.** Brasília: Embrapa Agroenergia, 2021. 59 p. (Embrapa Agroenergia. Documentos, 39). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1134493/1/Estudo-prospectivo-de-tecnologias-baseadas-2021.pdf>.

2) Produção com vínculo à tese e/ou à Universidade de Brasília:

a) Documentos Série Embrapa:

ANJOS, S. S. N. dos; BRAGA, M.; SOUZA, C. R. P. de; GHESTI, G. F.; MARTIN, A. R. **Avaliação e valoração de ativos tecnológicos em instituições científicas, tecnológicas e de inovação (ICTs): o caso das tecnologias em estágio inicial.** Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2021. 75 p. (Embrapa Agroenergia. Documentos, 33). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/222430/1/Avaliac807a771o-e-valorac807a771o-de-ativos-tecnolo769gicos.pdf>.

b) Trabalhos publicados em anais de congressos:

ANJOS, S. S. N. dos; ALMEIDA, A. N. de. Segurança alimentar e sua conexão com Economia e Contabilidade Ambientais: uma análise bibliométrica. In: VIII Conferência Sulamericana de Contabilidade Ambiental, 2023, UFMG. **Anais...** Belo Horizonte: CSCA, 2023. https://drive.google.com/file/d/1Dfor7BVXzPy-T2isltP_rL_5j07P6x67/view

ANJOS, S. S. N. dos; KIMPARA, J. M. ; ALMEIDA, A. N. ; JUNGSMANN, L. . Cálculo do Emergence Score de microalgas e cianobactérias para alimentação em aquicultura: futuros destaques tecnológicos. In: XIX Feira Nacional do Camarão, 2023, Natal. **Anais...** Natal: Associação Brasileira de Criadores de Camarão, 2023. v. 1. p. 107-107.

c) Capítulos de livro:

ANJOS, S. S. N. dos; ISSIFOU, M.. Métodos de Valoração Econômica de Ativos Culturais e Ambientais. In: Fátima de Souza Freire, Cesar Augusto Tibúrcio Silva, Sonia Maria da Silva Gomes e Luciana da Silva Moraes Sardeiro. (Org.).

Contabilidade Socioambiental. 1ed. Curitiba: Juruá, 2022, v. 1, p. 135-154.

GOIS, A. B. ; ISSIFOU, M. ; ANJOS, S. S. N. dos. Responsabilidade Socioambiental e Desenvolvimento Sustentável. In: Fátima de Souza Freire, Cesar Augusto Tibúrcio Silva, Sonia Maria da Silva Gomes e Luciana da Silva Moraes Sardeiro. (Org.). **Contabilidade Socioambiental**. 1ed. Curitiba: Juruá, 2022, v. 1, p. 15-44.

3) Artigos da tese

a) Publicados

Capítulo 1: 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, n. 3, p. e04190, 2023. DOI: 10.24857/rgsa.v18n3-010.

Capítulo 3: ANJOS, S. S. N. dos; VIANA, N. M.; MENDONÇA, S.; JUNGSMANN, L.; 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, n. 4, p. 10–28, 2024. DOI: 10.21664/2238-8869.2024v13i4.p10-28.

b) Aprovado com ajustes

Capítulo 2: ANJOS, S. S. N. dos; KIMPARA, J. M. ; ALMEIDA, A. N. de; JUNGSMANN, L. Microalgae and cyanobacteria biomass in aquaculture feed: analysis of 2001-2021 data using bibliometric and patentometric methods. **Aquaculture Nutrition** (<https://www.hindawi.com/journals/anu/>). Status: aprovado com ajustes, em andamento.

c) Submetido e em análise

Capítulo 4: ANJOS, S. S. N. dos; ALMEIDA, A. N. de; JUNGSMANN, L. Uso de biomassa algal em alimentação em aquicultura: análise estratégica e do macroambiente nos próximos 10 anos no Brasil. **Cadernos de Ciência & Tecnologia** (<https://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct>).

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
PRODUÇÃO CIENTÍFICA DURANTE O DOUTORADO	17
INTRODUÇÃO DA TESE	22
REFERÊNCIAS DA INTRODUÇÃO	24
CAPÍTULO 1: Segurança alimentar e sua conexão com Economia e Contabilidade Ambientais: uma análise bibliométrica	25
RESUMO	25
ABSTRACT	26
INTRODUÇÃO	26
REVISÃO DE LITERATURA	28
MATERIAIS E MÉTODOS	31
RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
CAPÍTULO 2: Microalgae and cyanobacteria biomass in aquaculture feed: analysis of 2001-2021 data using bibliometric and patentometric methods	46
Abstract	46
Introduction	46
Materials and Methods	49
Results and Discussion	50
Conclusions	68
References	69
CAPÍTULO 3: Estudo prospectivo sobre biomassa algal: identificação de oportunidades para fortalecimento da bioeconomia brasileira.	75
RESUMO	75
ABSTRACT	75
INTRODUÇÃO	76
MATERIAIS E MÉTODOS	77
RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
CAPÍTULO 4: Uso e competitividade de biomassa algal em alimentação em aquicultura: análise estratégica e do macroambiente nos próximos 10 anos no Brasil	100
RESUMO	100
ABSTRACT	100
INTRODUÇÃO	101
MATERIAIS E MÉTODOS	102
RESULTADOS E DISCUSSÃO	105
CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
REFERÊNCIAS	120
CAPÍTULO 5: Análise financeira e de mercado de biomassa de <i>Chlorella sorokiniana</i> em formulação hipotética de dieta para camarão-branco-do-Pacífico (<i>Penaeus</i>	

vannamei)	124
RESUMO	124
ABSTRACT	125
INTRODUÇÃO	125
REVISÃO DE LITERATURA	127
Carcinicultura no Brasil	127
Alimentação para carcinicultura	128
<i>Chlorella sorokiniana</i>	130
MATERIAIS E MÉTODOS	132
RESULTADOS E DISCUSSÃO	136
CONSIDERAÇÕES FINAIS	145
AGRADECIMENTOS	146
REFERÊNCIAS	146
CONSIDERAÇÕES FINAIS DA TESE	157
IMPACTOS E PRÓXIMAS ETAPAS	158

INTRODUÇÃO DA TESE

O termo “bioeconomia” está em voga ao associar atividades econômicas ao acesso e beneficiamento de recursos naturais, e remete ao termo “nova bioeconomia”, ligada ao Desenvolvimento Sustentável apresentado pelo Relatório Brundtland em 1987 e que conflui eficiência econômica, equilíbrio ambiental e equidade social (ANDRADE, 2017; SILVA et al., 2018; GOIS et al., 2022). Um dos focos da bioeconomia é a segurança alimentar, conceito preconizado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) que representa o acesso físico, social e econômico a alimentos que garantam saúde e bem-estar à população humana e ao suprimento diário de alimentos para a sociedade, em qualidade e quantidade suficientes para sobrevivência (FAO, 2018).

A aquicultura é uma das apostas da FAO para o fortalecimento de ações de garantia da segurança alimentar, particularmente o aumento da oferta de proteínas à população mundial. O segmento aquícola é considerado o de produção de alimentos com crescimento mais rápido em escala global, cujo mercado mundial em 2022 foi de USD 313 bilhões e uma produtividade de 130,9 milhões de toneladas e uma taxa de crescimento anual composta de mais de 9% (LUBCHENCO et al., 2020; FAO, 2024).

Biomassa de microalgas e cianobactérias é uma alternativa competitiva à farinha de peixe, ingrediente de alto custo e com disponibilidade sazonal, e ao farelo de soja (baixa palatabilidade, baixa digestibilidade e presença de fatores antinutricionais). As vantagens de usar microalgas e cianobactérias são o aparente baixo custo de produção e seu alto valor agregado, que demanda apenas luz solar e dióxido de carbono (CO₂) para seu crescimento. Sua versatilidade metabólica é ponto a favor, que permite agregar às formulações de rações fatores nutricionais como ômega 3, ômega 6, antioxidantes e corantes.

O objetivo geral desta tese é estimar o valor econômico e financeiro e avaliar a competitividade de biomassa de microalga *Chlorella sorokiniana* em formulação hipotética de ração para camarão-branco-do-Pacífico (*Penaeus vannamei*). Para o cumprimento do objetivo geral, são os objetivos específicos:

- Caracterizar cenário científico e tecnológico de uso de microalgas e cianobactérias na produção de alimentação para aquicultura;
- Descrever o potencial do mercado brasileiro para alimentação em aquicultura utilizando-se produtos contendo microalgas e cianobactérias, a partir da

percepção de especialistas e de empresários do setor, incluindo regulação, gargalos e tendências futuras; e

- Executar estudo de análise econômica, financeira e de mercado de uso de biomassa de microalga *C. sorokiniana* em formulação hipotética de ração para camarão-branco-do-Pacífico.

Esta tese é composta por cinco capítulos:

- O Capítulo 1 é um artigo publicado no periódico “Revista de Gestão Social e Ambiental” (DOS ANJOS; DE ALMEIDA, 2023) que apresenta o estado da arte científica sobre segurança alimentar e sua conexão com a Economia e a Contabilidade Ambientais, uma das bases teóricas da tese;
- O Capítulo 2 é um artigo que apresenta o cenário atual do uso global de microalgas e cianobactérias na alimentação animal na aquicultura e indica tendências científicas e tecnológicas futuras usando dados entre 2001 e 2021, a partir de dados bibliométricos e patentométricos;
- O Capítulo 3 é um artigo publicado no periódico “Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science” (ANJOS et al., 2024) que identificou oportunidades científicas e tecnológicas para microalgas e cianobactérias no Brasil nos próximos dez anos a partir da consulta a especialistas usando o método Delphi;
- O Capítulo 4 é um recorte do Capítulo 3 no mercado de alimentação animal na aquicultura brasileira e que focou na análise estratégica e do macroambiente do tema nos próximos 10 anos no Brasil;
- O Capítulo 5 apresenta uma análise financeira e de mercado de uso de biomassa de cepa de *Chlorella sorokiniana* da Embrapa em formulação hipotética de dieta para camarão-branco-do-Pacífico (*Penaeus vannamei*).

REFERÊNCIAS DA INTRODUÇÃO

ANDRADE, K. M. P. de. **Bioeconomia: um estudo das vocações, fragilidades e possibilidades para o desenvolvimento no estado do Amazonas**. 2017. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/5985>. Acesso em: 14 out. 2024.

ANJOS, S. S. N. dos; VIANA, N. M.; MENDONÇA, S.; JUNGSMANN, L.; 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, n. 4, p. 10–28, 2024. DOI: 10.21664/2238-8869.2024v13i4.p10-28.

DOS ANJOS, S. S. N.; DE ALMEIDA, A. N. Segurança alimentar e sua conexão com Economia e Contabilidade Ambientais: uma análise bibliométrica. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. e04190, 2023. DOI: 10.24857/rgsa.v18n3-010.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The state of world fisheries and aquaculture 2018: meeting the sustainable development goals**. Rome: FAO, 2018. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i9540EN/i9540en.pdf>. Acesso em: 17 Jul. 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in action**. Rome: FAO, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cd0683en>. Acesso em: 28 ago. 2024.

GOIS, A. B. ; ISSIFOU, M. ; ANJOS, S. S. N. dos. Responsabilidade Socioambiental e Desenvolvimento Sustentável. In: FREIRE, F. de S.; SILVA, C. A. T.; GOMES, S. M. da S.; SARDEIRO, L. da S. M. (Org.). **Contabilidade Socioambiental**. 1ed. Curitiba: Juruá, 2022, v. 1, p. 15-44.

LUBCHENCO, J.; HAUGAN, P. M.; PANGESTU, M. E. Five priorities for a sustainable ocean economy. **Nature**, n. 588, p. 30–32, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d41586-020-03303-3>. Acesso em: 14 out. 2024.

SILVA, M. F. de O.; PEREIRA, F. dos S.; MARTINS, J. V. B. A bioeconomia brasileira em números. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 47, p. 277-331, 2018. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15383/1/BS47_Bioeconomia_FECHADO.pdf. Acesso em: 14 out. 2024.

CAPÍTULO 1: Segurança alimentar e sua conexão com Economia e Contabilidade Ambientais: uma análise bibliométrica

Artigo publicado: DOS ANJOS, S. S. N.; DE ALMEIDA, A. N. Segurança alimentar e sua conexão com Economia e Contabilidade Ambientais: uma análise bibliométrica. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. e04190, 2023. DOI: 10.24857/rgsa.v18n3-010.

RESUMO

Objetivo: mapear e apresentar o estado da arte científica sobre segurança alimentar e sua conexão com a Economia e a Contabilidade Ambiental.

Referencial Teórico: Os limites de uso econômico dos serviços ecossistêmicos foram extrapolados, cujas evidências estão nas mudanças climáticas e posterior disponibilidade heterogênea de alimentos. Nessa perspectiva, os impactos contábeis e econômicos das mudanças ambientais são, aparentemente, subestimados por cadeias industriais que exploram o capital natural.

Método: Executou-se uma análise bibliométrica de artigos científicos, prospectadas na base de dados Scopus. Foram recuperadas 377 publicações científicas publicadas entre 1986 e 2023. A mineração e a análise da correlação entre a Economia e a Contabilidade com a segurança alimentar foi feita a partir da co-ocorrência das palavras-chaves indicadas pelos autores dos documentos recuperados, usando o software VantagePoint®.

Resultados: Os resultados da busca bibliométrica mostram um maior avanço das pesquisas em economia ambiental. Em sentido contrário, as lacunas na valoração de ativos ambientais, a ausência de indicadores validados para inclusão do capital natural em sistemas de contas nacionais e o caráter voluntário do *disclosure* de dados contábeis e, financeiras e socioambientais podem ser as explicações para a inexistência de conexão entre segurança alimentar e contabilidade ambiental.

Implicações da pesquisa: Avanços científicos no cálculo do Produto Interno Bruto Verde e/ou na adaptação da metodologia SEEA (*System of Environmental-Economic Accounts*) pode gerar dados contábeis e econômicos a partir da organização de estoques de ativos ambientais e favorecer a disponibilidade de alimentos.

Palavras chaves: Capital natural; Disponibilidade de alimentos; Desenvolvimento Sustentável; Disclosure; Macroeconomia

Food security and its connection with Environmental Economics and Accounting: a bibliometric analysis

ABSTRACT

Objective: map and present the state of the scientific art on food security and its connection with Economics and Environmental Accounting.

Theoretical framework: The limits of economic use of ecosystem services were extrapolated, the evidence of which lies in climate change and subsequent heterogeneous food availability. From this perspective, the accounting and economic impacts of environmental changes are apparently underestimated by industrial chains that exploit natural capital.

Method: A bibliometric analysis of scientific publications was carried out, that were prospected in the Scopus database. 377 scientific publications published between 1986 and 2023 were retrieved. The mining and analysis of the correlation between Economics and Accounting with food security was carried out based on of the co-occurrence of keywords indicated by the authors of the retrieved documents, using the VantagePoint® software.

Results: The results of the bibliometric search show greater progress in research in environmental economics. Conversely, the gaps in the valuation of environmental assets, the absence of validated indicators for the inclusion of natural capital in national accounting systems and the voluntary nature of the disclosure of accounting, financial and socio-environmental data may be the explanations for the lack of connection between food safety and environmental accounting.

Research implications: Scientific advances in the calculation of the Green Gross Domestic Product and/or in the adaptation of the SEEA (System of Environmental-Economic Accounts) methodology can generate accounting and economic data from the organization of stocks of environmental assets and favor the availability of food.

Key words: Natural capital; Food availability; Sustainable development; Disclosure; Macroeconomics.

INTRODUÇÃO

Em qualquer crise, seja ela econômica ou social, a disponibilidade de alimentos está sempre na linha de frente para garantir a sobrevivência, atrelada ao meio ambiente, tanto para alimentação quanto para moradia e subsistência (Lang, 2020).

A adoção de um modelo de economia circular para produção agropecuária, que atenda à demanda por alimentos para uma população cada vez maior, é um dos desafios globais (Babu et al., 2020).

A vida no planeta Terra está vinculada à capacidade de provisão de serviços ecossistêmicos, e este se tornou o conceito usado para expressar valores atribuídos aos bens e serviços providos pelo meio ambiente, como o lazer, a provisão de alimentos e a polinização de plantas (MEA, 2005; TEEB, 2008; Bennett et al., 2015). Neste escopo está a segurança alimentar, conceito criado pela FAO (*Food and Agriculture Organization*), o qual representa a garantia do acesso universal (físico, social e econômico) a alimentos em qualidade e quantidade necessárias para a saúde e o bem-estar da sociedade, baseado nos pilares de disponibilidade e acessibilidade de alimentos e estabilidade no fornecimento (Bishopp e Lynch, 2015; Erokhin, 2017; FAO, 2018).

A biodiversidade é o principal elo para o fornecimento de serviços ecossistêmicos, com uma forte pressão antropogênica que gerou, por exemplo, a queda de 60% de vertebrados, na população mundial, desde a década de 1970 e, com tendência de aumento (Newbold et al., 2019). Num cenário como esse, a valoração e a valorização de serviços ecossistêmicos e o cumprimento de compromissos internacionais, como a Convenção da Diversidade Biológica e o Protocolo de Nagoya, além dos Objetivos do Desenvolvimento do Milênio (ODM) e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), tornam-se ferramentas cruciais, visando o manejo sustentável e a garantia de serviços ecossistêmicos, que garantirão a segurança alimentar, como polinização e precipitação hídrica (Joly et al., 2011).

Syvitski et al. (2020) atestam que se excederam os limites de uso econômico dos serviços ecossistêmicos para produção de alimentos e energia ou oferta de serviços industriais e de saúde. No contexto empresarial, adotar a visão de futuro esgotamento de ativos ambientais e a falta de substitutos, a implantação e evidenciação de ações de responsabilidade socioambiental, tornaram-se vantagens competitivas diante da avaliação positiva de *stakeholders*, clientes e mercado e visão estratégica (longo prazo) (Nogueira, Medeiros & Arruda, 2000; Santos, Issifou & Dias, 2022). Assim, Seddon et al. (2020) indicam que as soluções tecnológicas e decisões sociais e econômicas com o meio ambiente devem convergir para três desafios:

mitigar mudanças climáticas, proteger biodiversidade e garantir o bem-estar da população humana, incluindo a disponibilidade de alimentos.

Um dos impactos negativos à limitação do uso econômico de serviços ecossistêmicos, é a disponibilidade de alimentos a uma população mundial cada vez maior, onde aumenta a pressão por alternativas alimentares e a necessidade de adaptações de mercado para novos cenários sociais, políticos e econômicos. Os ajustes para garantir a segurança alimentar se dão por diversos motivos, dentre eles as condições ambientais cada vez mais desfavoráveis (aumento da temperatura ambiental, desmatamento, emissão de gases de efeito estufa) as quais são as responsáveis pelas consequências de danos irreversíveis nos ecossistemas, a ponto de não se recuperarem mais e tornar as ações de mitigação insustentáveis (Carleton e Hsiang, 2016).

Ehrlich e Harte (2015), Bishopp e Lynch (2015) e Goldstein, Turner, Gladstone e Hole (2019) apontaram que os impactos contábeis e econômicos das mudanças ambientais, foram subestimadas pelos diversos segmentos industriais que usufruem do capital natural, que representa o estoque de produtos (água, ar, solo, biodiversidade e florestas, por exemplo) e serviços (polinização, qualidade do ar, regime de chuvas, por exemplo) que o meio ambiente provê para a sobrevivência humana (Monzoni & Vendramini, 2017). Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é mapear e apresentar o estado da arte científico sobre segurança alimentar e sua conexão com a Economia e a Contabilidade Ambientais.

REVISÃO DE LITERATURA

FAO, IFAD, UNICEF, WFP e WHO (2019) estimam que há 690 milhões de pessoas no mundo (8,9% da população mundial) em algum estágio de insegurança alimentar, como desnutrição, sobrepeso, obesidade ou condições metabólicas advindas de desbalanços na alimentação (doenças crônicas não transmissíveis como diabetes, hipertensão arterial sistêmica e hipercolesterolemia). Bocchi et al. (2020) complementam essas informações, ao associar o acesso a alimentos com a renda familiar e índices de pobreza, sendo o maior gargalo na insegurança alimentar, a indisponibilidade de proteínas e de altos com teor calórico adequado.

O objetivo do Acordo de Paris, assinado na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), durante a 21ª Conferência das Partes (COP-21), é frear o aquecimento global para que não ultrapasse o aumento de 2°C e

reforçar a capacidade de adaptação às mudanças climáticas com foco na segurança alimentar, na economia de baixo carbono e na transparência contábil (Bruno, Frozza & Fraga, 2017; Lipper, Cavatassi, Symons, Gordes & Page, 2021).

O estudo de Van Dijk, Morley, Rau e Saghai (2021) desenvolveu cinco cenários que abarcam futuros socioeconômicos divergentes e, ao mesmo tempo, plausíveis entre 2010 e 2050. Os autores concluíram que a disponibilidade de alimentos está diretamente associada às mudanças climáticas: a demanda de alimentos cresceu de 30% em 2010 para 62% em 2050. Assim, Erokhin (2017) apontou que, em 2016, as principais causas de insegurança alimentar foram desastres naturais e eventos de temperaturas extremas, particularmente em países com capacidades inadequadas de resposta a esses eventos climáticos, além da má distribuição de alimentos, aumento de demanda por alimentos no mundo e instabilidade em cultivos e criações agropecuárias domésticas.

Ehrlich e Harte (2015), Bishopp e Lynch (2015), Carleton e Hsiang (2016) e Goldstein et al. (2019) apontam as consequências das mudanças climáticas em cadeias agropecuárias pela segurança alimentar:

- Aumento da incidência de estresses bióticos (pragas agrícolas) e abióticos (extremos de temperatura e irregularidade de chuvas, por exemplo) que impactam negativamente os setores agropecuário e agroindustrial que, por sua vez, aumentam o preço final de alimentos para o consumidor;
- Aumento do uso da terra em atividades agropecuárias, que levam à queda da qualidade e quantidade de água disponível;
- Degradação e perda de fertilidade do solo em decorrência de erosões;
- Contaminação do solo pelo uso excessivo de pesticidas;
- Perda de biodiversidade nativa e diminuição da diversidade genética de plantas cultivadas, aumentando custos posteriores de beneficiamento;
- Perda de controle de pragas agrícolas em decorrência de mudanças climáticas;
- Diminuição de animais polinizantes em decorrência de mudanças na umidade do ar, na disponibilidade de alimentos e no uso excessivo de agroquímicos;
- Maior dependência de culturas marginais e pastagens;
- Baixo acesso a informações por pequenos agricultores, incluindo agricultura familiar e comunidades tradicionais.

As Ciências Contábeis e Econômicas se referem a indicadores e dados que permitam avaliar questões financeiras envolvidas na produção e oferta de alimentos,

indicadores de desempenho de organizações públicas e privadas, em temas ambientais, bem como na Responsabilidade Socioambiental e inclusão do capital natural no cálculo de agregados macroeconômicos e em sistemas de contas nacionais. Em suma, no escopo da segurança ambiental, dados financeiros e econômicos permitem avaliar a efetividade de políticas públicas e apoiar o setor agropecuário para a oferta de alimentos a custos acessíveis à sociedade (Moura, 2016), contemplados no escopo do Antropoceno (Bebbington & Rubin, 2022).

O envolvimento das Ciências Contábeis com as questões ambientais data da década de 1970, com estudos que apontaram que a inclusão de indicadores ambientais na gestão empresarial, auxiliaria na solução de problemas financeiros e contábeis e, que refletiria seu posicionamento no mercado (Ribeiro, 2010). Já o envolvimento preponderante das Ciências Econômicas com o desenvolvimento intelectual, promovido pelo Clube de Roma a partir da teoria populacional de Thomas Malthus, tem como um dos expoentes a publicação do relatório “Os Limites do Crescimento”, em 1972. Esse relatório apresentou uma nova percepção de que o meio ambiente deixou de ser intocado e infinito e propondo que a exploração de ativos ambientais deve ser feita de forma controlada diante da iminência da esgotabilidade (Gois, Issifou & Anjos, 2022; Santos et al., 2022).

O capital natural compõe o grupo de tipos de capitais relevantes e que agregam valor às organizações (os outros são: financeiro, manufaturado, intelectual, humano, social e de relacionamento), sendo o capital natural o que não tem valor econômico explícito e que não têm substitutos (Nogueira et al., 2000; Monzoni & Vendramini, 2017). Denota-se falhas na mensuração e posterior atribuição de valores que, por sua vez, geram dados imprecisos nas contas nacionais e na contabilidade de empresas, sem contar a exploração excessiva do capital natural por falta de parâmetros do limite (Nogueira et al., 2000; Monzoni & Vendramini, 2017). Assim, a monetarização e a valorização do capital natural não são praticadas a contento, pela falta de indicadores que permitam a inclusão do meio ambiente e a sua degradação em sistemas de contas nacionais, além da dificuldade em estabelecer indicadores já desenvolvidos e a relativa intangibilidade de ativos ambientais (Nogueira et al., 2000; Monzoni & Vendramini, 2017; Gois & Nogueira, 2020; Dasgupta, 2021; King et al., 2021). O gerenciamento de expectativas com a precisão e viabilidade de avaliação monetária de ativos ambientais, é difícil pela limitação de acesso a dados reais e por interesses individuais na obtenção de valor financeiro (Vogl et al., 2017).

Dasgupta (2021) complementa Nogueira et al. (2000) e Monzoni e Vendramini (2017), reforçando os problemas das distorções mencionadas ao apresentar dados de saúde global *per capita*, entre 1992 e 2014. A partir de contas nacionais que atestam o crescimento de 100% do capital de produção, aumento de 13% do capital humano e queda de 40% do capital natural (estoques para silvicultura, piscicultura e agricultura), que não está contabilizado e que, podem impactar negativamente o setor agropecuário e, por conseguinte, na disponibilidade de alimentos a custos acessíveis.

As alternativas para driblar as inseguranças alimentares são desenvolvidas e aplicadas em todo o mundo, seja para oferecer outras opções de proteínas ou para estimular o cenário econômico, a balança comercial e a oferta de alimentos a custos acessíveis. Maggio, Van Criekeing e Malingreau (2015) elencam mais alternativas:

- Desenvolvimento de novos sistemas de produção agropecuária, com maior rendimento a custos menores e com viabilidade técnica e econômica;
- Promoção do desenvolvimento e da gestão rural, incluindo ferramentas de gestão de propriedades e de fortalecimento de cadeias de logística para transporte dos produtos a custos competitivos;
- Desenvolvimento de um sistema alimentar orientado pela demanda, na qual produção e consumo são equilibrados nos níveis locais, regionais e globais;
- Alinhamento da demanda por alimentos a preceitos sustentáveis, promovendo mudanças no comportamento do consumidor.

MATERIAIS E MÉTODOS

A bibliometria é uma análise quantitativa de um conjunto de publicações científicas para análise, avaliação e monitoramento de atividades de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), para correlacionar dados científicos com dados tecnológicos (Ribeiro, 2017; Santos et al., 2018). Este estudo bibliométrico tem caráter exploratório e quantitativo, com foco na evidenciação de dados para explicar ou prever fenômenos a partir de evidências presentes em documentos formais (Popper, 2008). Partindo dessa premissa, foram prospectados e recuperados artigos científicos na base de dados *Scopus* que apresentassem as palavras-chaves “segurança alimentar”, “economia ambiental” e “contabilidade ambiental” na língua inglesa.

A estratégia de busca adotada (“(*TITLE-ABS-KEY ("food securit*") AND TITLE-ABS-KEY ("environ* econom*" OR "econom* environ* ") OR TITLE-ABS-KEY ("environ* account*" OR "account* environ*")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE*

, "ar"))") recuperou 377 documentos. A busca foi feita em 29/03/2023 e não foi usada data limite de publicação dos documentos até aquele momento. Optou-se por não incluir revisões de literatura, capítulos de livro, publicações em anais de congressos e editoriais.

Usou-se o *software* VantagePoint® (*Search Technology*) para mineração e limpeza dos dados, que permite eliminar redundâncias e implantar critérios mínimos para inclusão ou exclusão dos termos para posterior interpretação dos dados bibliométricos (Miles, Saritas, Sokolov, 2016). Neste artigo, para avaliar o estado da arte de pesquisas científicas em segurança alimentar nas searas econômica e contábil, foram selecionadas e mineradas as palavras-chaves dos documentos recuperados, os anos de publicação e os países publicadores. Termos similares foram aglutinados em outros mais amplos e aqueles com ocorrência menor do que 5 foram eliminados.

Os 377 documentos tinham 2.836 palavras-chaves. Após a mineração e limpeza dos dados, restaram 16 palavras-chaves que remetem a Segurança Alimentar, Economia Ambiental, Contabilidade Ambiental e fatores sociais, políticos, tecnológicos e ambientais inerentes aos temas em estudo (Tabela 1):

Tabela 1: Dezesesseis palavras-chaves mineradas dos documentos recuperados da busca de publicações científicas sobre segurança alimentar, economia ambiental e contabilidade entre 1986 e 2023

Ordem decrescente	Quantidade de documentos	Palavras-chaves
1	270	<i>Food security</i>
2	222	<i>Sustainable development</i>
3	219	<i>Agriculture and Livestock</i>
4	164	<i>Environmental economics</i>
5	101	<i>Climate change and GHG emissions</i>
6	95	<i>Soil and land use</i>
7	88	<i>Food chain</i>
8	85	<i>Natural resources and biodiversity</i>
9	81	<i>Policies</i>

10	78	<i>Livelihood of the society</i>
11	68	<i>Water management</i>
12	44	<i>Energy production and consumption</i>
13	36	<i>Waste management</i>
14	16	<i>Biotechnology</i>
15	12	<i>ST&I (science, technology, and innovation)</i>
16	6	<i>Environmental accountability</i>

Fonte: elaborado pelos autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os documentos recuperados foram publicados entre 1986 e 2023. Nesse período foram lançados o Relatório Brundtland (1987), os oito Objetivos do Desenvolvimento do Milênio – ODM (2000 a 2015) e os quinze Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS (2015 a 2030). O Gráfico 1 mostra um aumento de publicações a partir de 2011, correspondente aos últimos quatro anos de vigência dos ODM, mesmo período da realização da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio+20) em 2012, posterior publicação dos ODS em 2015 e assinatura em 2015 e vigência a partir de 2016 do Acordo de Paris.

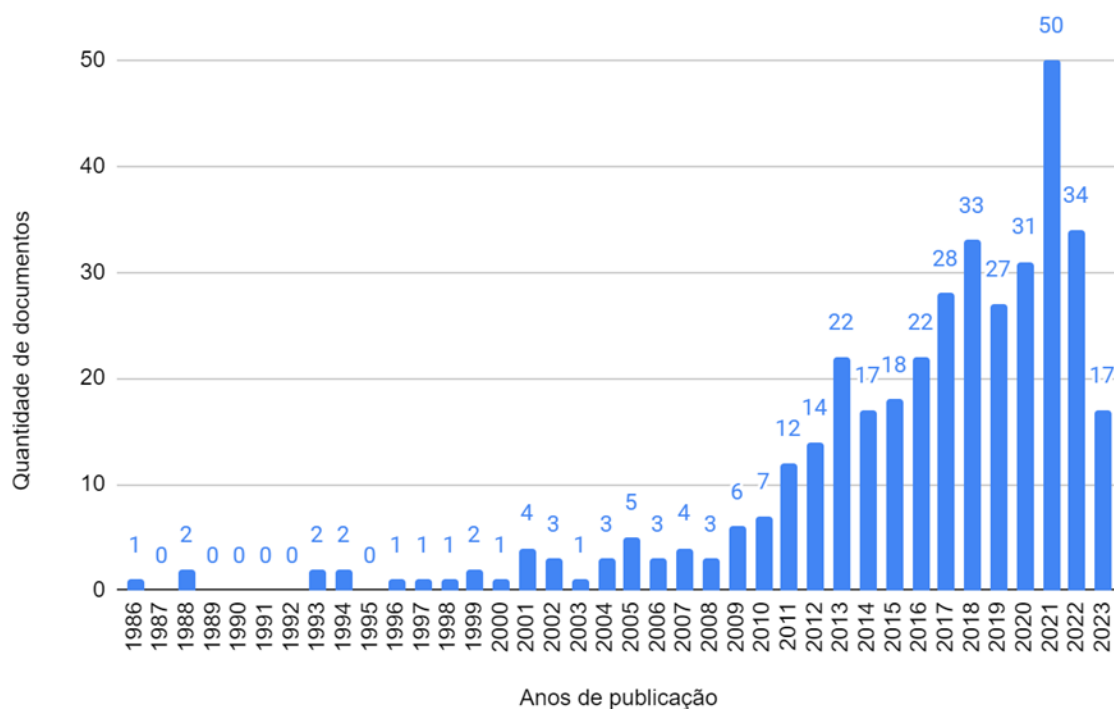


Gráfico 1: Histograma da quantidade de documentos recuperados nos anos de publicação (elaborada pelos autores). Fonte: elaborado pelos autores.

Os documentos recuperados foram publicados em 93 países, em todos os continentes, com destaque para Estados Unidos da América, China, Reino Unido, Itália, Austrália, Alemanha e Países Baixos (Figura 1). A abrangência global de publicações científicas que abordam a conexão entre segurança alimentar, contabilidade e economia ambientais reflete as ações e metas propostas pelos ODS e em curso pela FAO para garantir a segurança alimentar alinhada às mudanças climáticas.

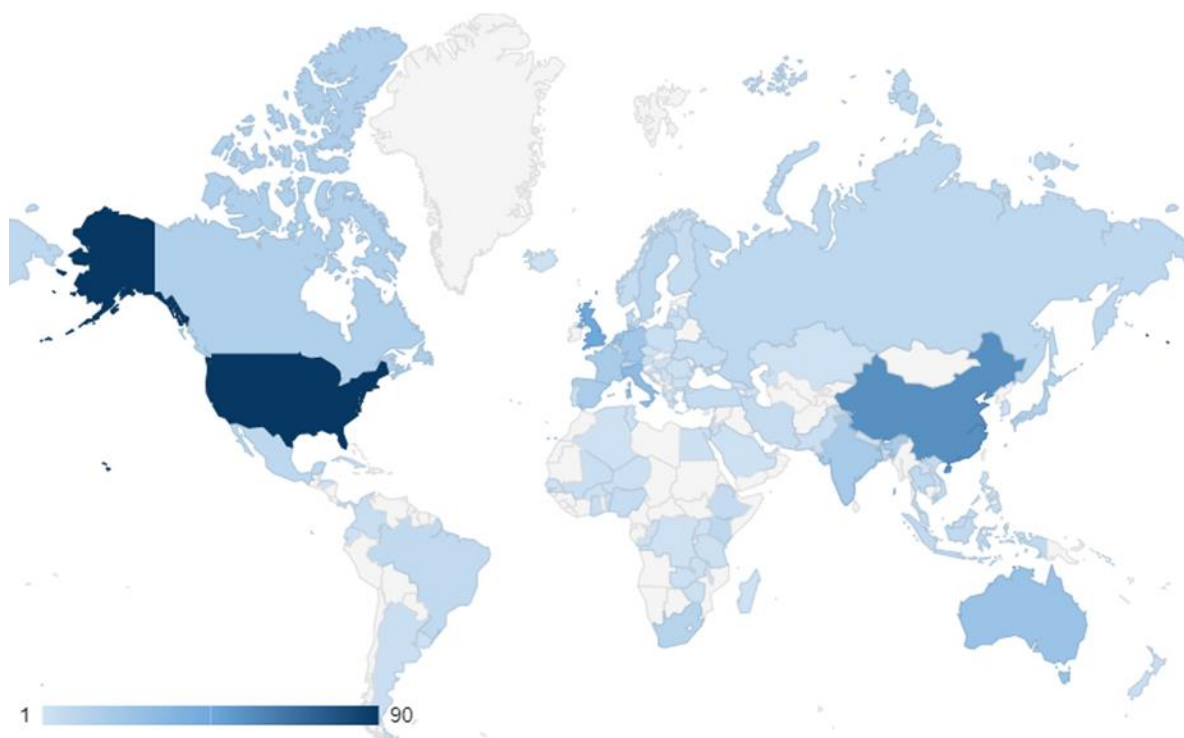


Figura 1: Mapa de distribuição de publicações em 93 países. Fonte: elaborado pelos autores.

As 16 palavras-chaves listadas na Tabela 1 foram plotadas em um mapa de autocorrelação, que apresenta a relação das palavras-chaves entre si formando clusters e as conexões entre si (Gráfico 2). A quantidade de número de documentos recuperados é diretamente proporcional ao tamanho do nó, que representa cada palavra-chave. Já as linhas representam similaridades entre cada nó e sua espessura representa a quantidade de documentos que apresentam as palavras-chaves conectadas (Thavorn, Gowanit, Muangsin & Muangsin, 2021). Assim, os maiores nós são das palavras-chaves “Food security”, “Sustainable development”, “Environmental economics” e “Agriculture and Livestock”, que têm ligações de maior peso entre si e com os termos “Climate change and GHG emissions”, “Energy production and consumption”, “Natural resources and biodiversity” e “Policies”.

A maior quantidade de documentos recuperados com o termo “Environmental economics” reflete na existência de conexões de diferentes intensidades. As conexões do termo “Environmental economics” com maior representatividade remetem a mudanças climáticas, produção de energia, segurança alimentar e desenvolvimento sustentável. Já “Agriculture and livestock” e “Policies” têm conexões fracas. Já “Waste management”, “Water management”, “Natural resources and biodiversity” e “Food

chain” não têm conexão com “Environmental economics”. Estão à margem do mapa de autocorrelação (Figura 3) os termos “Environmental accountability”, “Biotechnology”, “Livelihood of the Society”, “Soil and land use” e “ST&I (Science, Technology, and Innovation)”, sem conexões com outras palavras-chaves e que representam publicações isoladas para cada termo e sem autocorrelações.

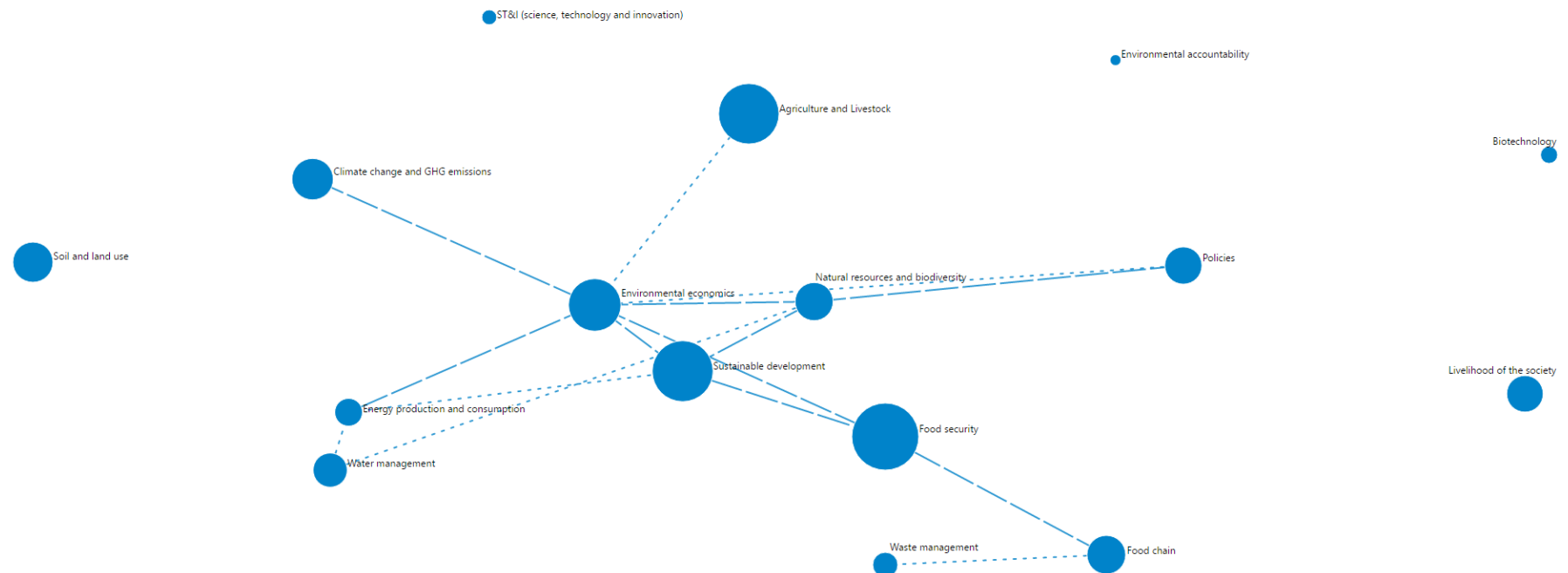


Gráfico 2: Autocorrelação entre as 16 palavras-chaves obtidas da mineração no software VantagePoint® de palavras-chaves em publicações científicas sobre segurança alimentar, economia ambiental e contabilidade ambiental entre 1986 e 2023. Fonte: elaborado pelos autores.

Skaf, Buonocore, Dumontet, Capone e Franzese (2019) e King et al. (2021) descrevem a Contabilidade Ambiental e a Economia Ambiental como ferramentas para avaliação de custos ambientais, produção de alimentos, ainda mais para um horizonte de crescimento populacional, atingindo mais de 9 bilhões de pessoas até 2050. Os resultados apresentam um crescimento na quantidade de publicações, associando segurança alimentar com economia e contabilidades ambientais, além de interdisciplinaridade da sustentabilidade ambiental e seu vínculo com a produção e disponibilidade de alimentos, condizentes com a evolução temporal do conceito de desenvolvimento sustentável.

Skaf et al. (2019) e King et al. (2021) apontam que abordagens da segurança alimentar devem ser feita sob uma perspectiva interdisciplinar (searas econômicas, sociais e ambientais) e multicritério (consumo de combustíveis fósseis, demanda por água, demanda de energia e controle das emissões de gases de efeito estufa). Também devem ser inseridos na discussão a agricultura (estendendo também à pecuária) e a biotecnologia / engenharia genética, por colaborarem diretamente na garantia da segurança alimentar ao gerar cultivares e raças animais adaptados a estresses bióticos e abióticos, permitir a expansão da fronteira agrícola e tornar biotecnologias acessíveis. Os resultados apresentados na Figura 2 indicam concretização parcial dos apontamentos de Skaf et al. (2019) e King et al. (2021), com maior foco em mudanças climáticas.

Apesar das conexões entre as ciências ambientais com as econômicas e contábeis datarem da década de 1970, aliado ao caráter interdisciplinar do desenvolvimento sustentável, os resultados deste estudo mostram baixas co-ocorrência de contabilidade ambiental comparada com economia ambiental (Gráfico 3).

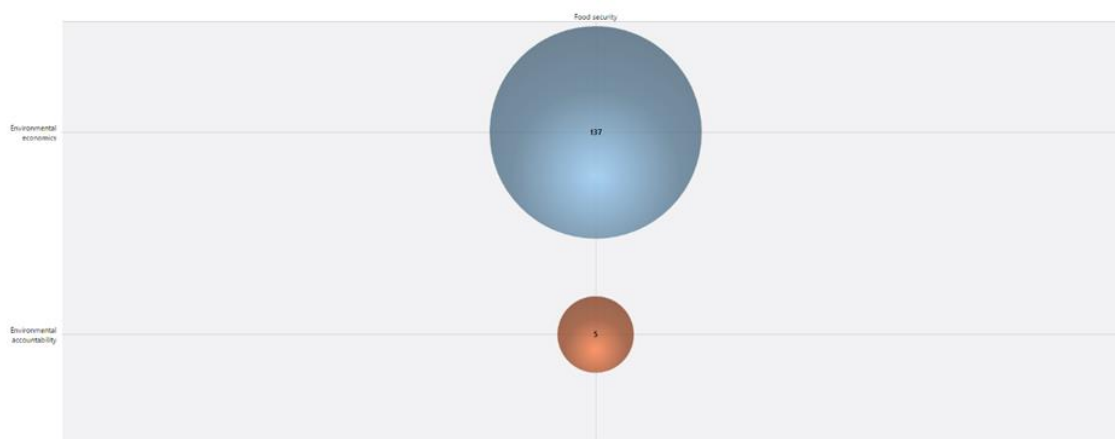


Gráfico 3: Mapa de co-ocorrência de “food security” com “Environmental economics” e “Environmental accountability”. Fonte: elaborado pelos autores.

Os resultados, ainda, reforçaram os apontamentos de Ehrlich e Harte (2015), Bishopp e Lynch (2015) e Goldstein et al. (2019) sobre a subestimação dos impactos contábeis e econômicos na exploração do capital natural. Esta dicotomia é nítida ao estratificar os países com publicações apenas sobre economia ambiental (Figura 2) e contabilidade ambiental (Figura 3) (ambos interligados com segurança alimentar).

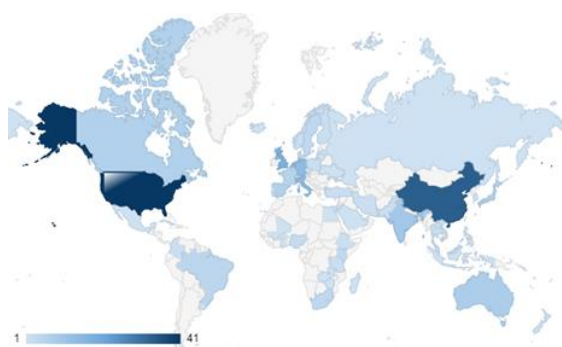


Figura 2: Países com publicações apenas sobre economia ambiental. Fonte: elaborado pelos autores.

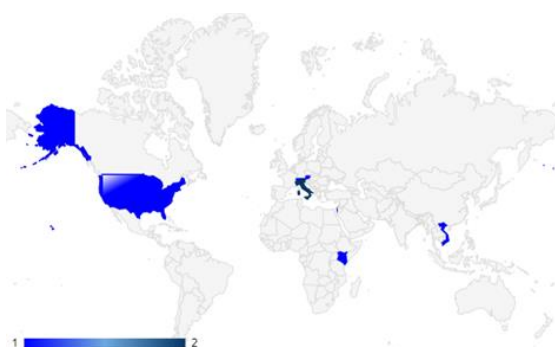


Figura 3: Países com publicações apenas sobre contabilidade ambiental. Fonte: elaborado pelos autores.

A evidenciação de informações econômicas, financeiras e socioambientais é o mecanismo para apresentar a stakeholders e à sociedade as ações para preservação do meio ambiente e colaborar para o cumprimento dos desafios apontados por Seddon et al. (2020) (mitigação de mudanças climáticas, proteção à biodiversidade e garantia do bem-estar da população humana, incluindo a das próximas gerações). A referida evidenciação, apesar de ser um dos pilares da Contabilidade e extensivo à

indicação de variáveis dependentes e independentes para análises econômicas, é voluntária e pode levar as empresas a declararem informações de maior peso em marketing do que dados reais (Golay, Biglino & Truscan, 2012; Freire & Gomes, 2022; Gois et al., 2022) e que pode ser uma causa da baixa quantidade de documentos que remetam à Contabilidade Ambiental e a falta de conexão com segurança alimentar.

Mesmo com o desenvolvimento e inclusão de indicadores ambientais na gestão empresarial e o aperfeiçoamento de conceituais e metodológicas na conexão entre as ciências contábeis e ambientais, principalmente no atual contexto das mudanças climáticas (Ribeiro, 2010; Bebbington & Rubin, 2022), ainda há gargalos acadêmicos como a limitação imposta por periódicos científicos que, na sua maioria, não contemplam investigações contábeis sob as perspectivas ambientais (Bebbington & Rubin, 2022).

Corroborando com essa perspectiva, Guggisberg (2019) atesta que fundos multilaterais criados para mitigação de mudanças climáticas não apresentam transparência suficiente nos projetos financiados, gerando dados com vieses que interferem negativamente na eficiência dos projetos e na alocação inadequada de recursos financeiros e econômicos, particularmente os governamentais. Associadas às evidenciações contábeis inadequadas, as distorções na quantificação e monetarização do capital natural e/ou da sua degradação levam a falhas no sistema de contas nacionais ao não incluir indicadores do meio ambiente no cálculo do Produto Interno Bruto (PIB) e de outros agregados macroeconômicos (Dasgupta, 2021; Gois & Nogueira, 2020).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da busca bibliométrica mostram que há estudos científicos que correlacionam o controle das mudanças climáticas e a agropecuária com economia do meio ambiente e segurança alimentar, o que favorece em longo prazo o Acordo de Paris e as metas estipuladas na COP 26 (26ª conferência das partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima) e COP 27 (27ª conferência das partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima). O mesmo não aconteceu com contabilidade ambiental, que não apresentou conexões entre outras palavras-chaves e ficou à margem dos clusters formados no mapa de autocorrelação. As lacunas na valoração de ativos ambientais, a ausência de indicadores validados para inclusão do capital natural em sistemas de contas

nacionais e o caráter voluntário do *disclosure* de dados contábeis e, financeiras e socioambientais podem ser as explicações para a baixa conexão entre segurança alimentar e contabilidade ambiental

O aperfeiçoamento do cálculo do Produto Interno Bruto Verde (PIV ou PIB Verde) pode ser um caminho para fortalecer as conexões da segurança alimentar com a Economia e a Contabilidade Ambiental e gerar resultados eficazes na disponibilidade de alimentos aliada à preservação do meio ambiente. Outro caminho plausível é o avanço nas pesquisas para adaptar a metodologia SEEA (*System of Environmental-Economic Accounts*), que propõe uma organização dos estoques de ativos ambientais, particularmente a diversidade γ , que possibilita a construção de fluxos em serviços ecossistêmicos e posterior enquadramento em períodos contábeis. Com isso, geram-se indicadores que consigam frear ações negativas como as mudanças climáticas, que impactam diretamente na qualidade e quantidade de alimentos à sociedade mundial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Babu, S.; Mohapatra, K. P.; Das, A.; Yadav, G. S.; Tahasildar, M.; Singh, R.; Panwar, A. S.; Yadav, V.; Chandra, P. (2020). Designing energy-efficient, economically sustainable and environmentally safe cropping system for the rainfed maize–fallow land of the Eastern Himalayas. *Science of the Total Environment*, 722, e137874. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.137874](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137874).

Bebbington, J.; Rubin, A. (2022). Accounting in the Anthropocene: A roadmap for stewardship. *Accounting and Business Research*, 52(5), 582-596. DOI: [10.1080/00014788.2022.2079780](https://doi.org/10.1080/00014788.2022.2079780)

Bennett, E. M.; Cramer, W.; Begossi, A.; Cundill, G.; Díaz, S.; Egoh, B. N.; Geijzendorffer, I. R.; Krug, C. B.; Lavorel, S.; Lazos, E.; Lebel, L.; Martín-López, B.; Meyfroidt, P.; Mooney, H. A.; Nel, J. L.; Pascual, U.; Payet, K.; Harguindeguy, N. P.; Peterson, G. D.; Prieur-Richard, A-H.; Reyers, B.; Roebeling, P.; Seppelt, R.; Solan, M.; Tschakert, P.; Tschardtke, T.; Turner II, B. L.; Verburg, E. F.; White, P. C. L.; Woodward, G. (2015). Linking biodiversity, ecosystem services, and human well-being: three challenges for designing research for sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 76-85. DOI: [10.1016/j.cosust.2015.03.007](https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.03.007).

Bishopp, A. & Lynch, J. P. (2015). The hidden half of crop yields. *Nature Plants*, 1, e15117. DOI: [10.1038/nplants.2015.117](https://doi.org/10.1038/nplants.2015.117).

Bocchi, C. P.; Del Porto, E. B.; Perini, J. H. de M.; Rahal, L. dos S.; Gonçalves, R. de S.; Moneta, S. T. G. (2020). *A Segurança Alimentar e Nutricional no Brasil diante da Pandemia do Novo Coronavírus*. Brasília: ANESP (Associação Nacional dos Especialistas em Políticas Públicas e Gestão Governamental). Disponível em:

<http://anesp.org.br/todas-as-noticias/2020/5/19/a-segurana-alimentar-e-nutricional-no-brasil-diante-da-pandemia-do-novo-coronavrus>.

Bruno, F. M. R.; Frozza, M. S.; Fraga, J. M. L. (2017). O Acordo de Paris sobre o combate ao aquecimento global após a ordem executiva de independência energética de Washington. In: *4º Congresso Internacional de Direito e Contemporaneidade*. Santa Maria, RS, Brasil. Disponível em: <https://www.ufsm.br/cursos/pos-graduacao/santa-maria/ppgd/wp-content/uploads/sites/563/2019/09/4-9-1.pdf>.

Carleton, T. A. & Hsiang, S. M. (2016). Social and economic impacts of climate. *Science*, 353, e6304. DOI: [10.1126/science.aad9837](https://doi.org/10.1126/science.aad9837).

Dasgupta, P. (2021). *The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review*. London: HM Treasury.

Devkota, K. P.; Yadav-S.; Khanda, C. M.; Beebout, S. J.; Mohapatra, B. K.; Singleton, G. R.; Puskur, R. (2020). Assessing alternative crop establishment methods with a sustainability lens in rice production systems of Eastern India. *Journal of Cleaner Production*, 244, e118835. DOI: [10.1016/j.jclepro.2019.118835](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118835).

Ehrlich, P. R. & Harte, J. (2015). Food security requires a new revolution. *International Journal of Environmental Studies*, 72, 908-920. DOI: [10.1080/00207233.2015.1067468](https://doi.org/10.1080/00207233.2015.1067468).

Erokhin, V. (2017). Factors Influencing Food Markets in Developing Countries: An Approach to Assess Sustainability of the Food Supply in Russia. *Sustainability*, 9(8), e1313. DOI: [10.3390/su9081313](https://doi.org/10.3390/su9081313).

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2018). *The state of world fisheries and aquaculture 2018: meeting the sustainable development goals*. Rome: FAO.

FAO (Food and Agriculture Organization); IFAD (International Fund for Agricultural Development); UNICEF (United Nations International Children's Emergency Fund); WFP (World Food Programme); WHO (World Health Organization). (2019). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2019. Safeguarding against economic slowdowns and downturns*. Rome: FAO.

Freire, F. de S. & Gomes, S. M. da S. Evidenciação ambiental, social e de governança. In Freire, F. de S.; Silva, C. A. T.; Gomes, S. M. da S.; Sardeiro, L. da S. M. (Org.). *Contabilidade Socioambiental*. (pp. 45-65). Curitiba: Juruá.

Gois, A. B.; Issifou, M.; Anjos, S. S. N. dos. (2022). Responsabilidade socioambiental e desenvolvimento sustentável. In Freire, F. de S.; Silva, C. A. T.; Gomes, S. M. da S.; Sardeiro, L. da S. M. (Org.). *Contabilidade Socioambiental*. (pp. 15-44). Curitiba: Juruá.

Gois, A. B. & Nogueira, J. M. (2020). A contribuição da valoração econômica ambiental para o cálculo do PIV brasileiro. In: *21º Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial E Meio Ambiente*. São Paulo, SP, Brasil. Disponível em: <http://engemausp.submissao.com.br/22/arquivos/619.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2023.

Golay, C.; Biglino, I.; Truscan, I. (2012). A contribuição dos procedimentos especiais da ONU para o diálogo entre os direitos humanos e o desenvolvimento. *SUR: Revista*

Internacional de Direitos Humanos, 9(17), 15-39.
<http://bdjur.stj.jus.br/dspace/handle/2011/63599>.

Goldstein, A.; Turner, W. R.; Gladstone, J.; Hole, D. G. (2019). The private sector's climate change risk and adaptation blind spots. *Nature Climate Change*, 9, 18-25. DOI: [10.1038/s41558-018-0340-5](https://doi.org/10.1038/s41558-018-0340-5).

Guggisberg, S. (2019). Funding coastal and marine fisheries projects under the climate change regime. *Marine Policy*, 107, e103352. DOI: [10.1016/j.marpol.2018.11.015](https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.11.015).

Joly, C. A.; Haddad, C. F. B.; Verdade, L. M.; Oliveira, M. C.; Bolzani, V. S.; Berlinck, R. G. S. (2011). Diagnóstico da pesquisa em biodiversidade no Brasil. *Revista USP*, 89, 114-133. DOI: [10.11606/issn.2316-9036.v0i89p114-133](https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i89p114-133).

King, S.; Vardon, M.; Grantham, H. S.; Eigenraam, M.; Ferrier, S.; Juhn, D.; Larsen, T.; Brown, C.; Turner, K. (2021). Linking biodiversity into national economic accounting. *Environmental Science and Policy*, 116, 20-29. DOI: [10.1016/j.envsci.2020.10.020](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.10.020).

Lang, S. (2020). COVID-19 and Community Supported Agriculture: The Uncertain Promise of Food Security. *Urbanities*, v. 10(suppl. 4), 91-95.
<https://www.anthrojournal-urbanities.com/wp-content/uploads/2020/10/20-Lang.pdf>.

Lipper, L.; Cavatassi, R.; Symons, R.; Gordes, A.; Page, O. (2021). Financing adaptation for resilient livelihoods under food system transformation: the role of Multilateral Development Banks. *Food Security*, 13, 1525-1540. DOI: [10.1007/s12571-021-01210-7](https://doi.org/10.1007/s12571-021-01210-7)

Maggio, A.; Van Criekinge, T.; Malingreau, J-P. (2015). *Global Food Security 2030: Assessing trends with a view to guiding future EU policies*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Miles, I.; Saritas, O.; Sokolov, A. (2016). *Foresight for Science, Technology and Innovation*. Cham: Springer International Publishing Switzerland.

Monzoni, M. & Vendramini, A. (2017). *Riscos e oportunidades associados ao capital natural para o setor financeiro*. São Paulo: Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas, Escola de Administração de Empresas de São Paulo (GVces / FGV-EAESP) e Federação Brasileira de Bancos (FEBRABAN).

Moura, A M. M. de. (2016). *Governança ambiental no Brasil: instituições, atores e políticas públicas*. Brasília: IPEA.

MEA (Millennium Ecosystem Assessment). (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute.

Newbold, T.; Adams, G. L.; Albaladejo Robles, G.; Boakes, E. H.; Ferreira, G. B.; Chapman, A. S. A.; Etard, A.; Gibb, R.; Millard, J.; Outhwaite, C. L.; Williams, J. J. (2019). Climate and land-use change homogenise terrestrial biodiversity, with consequences for ecosystem functioning and human well-being. *Emerging Topics in Life Sciences*, 3, 207-219. DOI: [10.1042/ETLS20180135](https://doi.org/10.1042/ETLS20180135).

Nogueira, J. M.; Medeiros, M. A. A. de; Arruda, F. S. T. de. (2000). Valoração econômica do meio ambiente: ciência ou empirismo? *Cadernos de Ciência &*

Tecnologia, 17(2), 81-115. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/8870/4995>.

Popper, R. Foresight Methodology. (2008). In Georghiou, L.; Cassingena, J.; Keenan, M.; Miles, I.; Popper, R. *The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice*. (pp. 44-88). Cheltenham: Edward Elgar.

Ribeiro, H. C. M. (2017). Bibliometria: quinze anos de análise da produção acadêmica em periódicos brasileiros. *Biblios*, 69, 1-20. DOI: [10.5195/biblios.2017.393](https://doi.org/10.5195/biblios.2017.393).

Ribeiro, M. de S. (2010). *Contabilidade Ambiental*. São Paulo: Editora Saraiva.

Santos, J. S. dos; Issifou, M.; Dias, A. A. (2022). Accountability e sustentável. In Freire, F. de S.; Silva, C. A. T.; Gomes, S. M. da S.; Sardeiro, L. da S. M. (Org.). *Contabilidade Socioambiental*. (pp. 155-172). Curitiba: Juruá.

Santos, L. C. X.; Andreato, N. da S. A.; Anjos, S. S. N. dos; Ferreira, E. A.; Gris, E. F.; Martin, A. R. (2018). Análise Prospectiva da Patente “Processo para a Aplicação da Biomineralização na Melhoria de Solos” – PI 1001279-6: estudo de viabilidade de patente brasileira por meio de informetria. *Cadernos de Prospecção*, 11(4), 1182-1198. DOI: [10.9771/cp.v11i4.27241](https://doi.org/10.9771/cp.v11i4.27241).

Seddon, N.; Chausson, A.; Berry, P.; Girardin, C. A. J.; Smith, A.; Turner, B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), e20190120. DOI: [10.1098/rstb.2019.0120](https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0120).

Skaf, L.; Buonocore, E.; Dumontet, S.; Capone, R.; Franzese, P. P. (2019). Food security and sustainable agriculture in Lebanon: An environmental accounting framework. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1025-1032. DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.10.301](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.301).

Syvitski, J.; Waters, C. N.; Day, J.; Milliman, J. D.; Summerhayes, C.; Steffen, W.; Zalasiewicz, J.; Cearrata, A.; Galuska, A.; Hajdas, I.; Head, M. J.; Leinfelder, R.; McNeill, J. R.; Poirier, C.; Rose, N. L.; Shotyk, W.; Wagemann, M.; Williams, M. (2020). Extraordinary human energy consumption and resultant geological impacts beginning around 1950 CE initiated the proposed Anthropocene Epoch. *Communications Earth & Environment*, 1, e32. DOI: [10.1038/s43247-020-00029-y](https://doi.org/10.1038/s43247-020-00029-y).

TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity). (2008). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: an interim report of the Convention on Biological Diversity*. Cambridge, UK: European Communities.

Thavorn, J.; Gowanit, C.; Muangsin, V.; Muangsin, N. (2021). Collaboration Network and Trends of Global Coronavirus Disease Research: A Scientometric Analysis. *IEEE Access*, 9, 45001-45016. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3066450](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3066450).

Van Dijk, M.; Morley, T.; Rau, M. L.; Saghai, Y. (2021). A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nature Food*, 2, 494-501. DOI: [10.1038/s43016-021-00322-9](https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9).

Vogl, A. L.; Bryant, B. P.; Hunink, J. E.; Wolny, S.; Apse, C.; Droogers, P. (2017) Valuing investments in sustainable land management in the Upper Tana River

basin, Kenya. *Journal of Environmental Management*, 195(1), 78-91. DOI: [10.1016/j.jenvman.2016.10.013](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.013).

CAPÍTULO 2: Microalgae and cyanobacteria biomass in aquaculture feed: analysis of 2001-2021 data using bibliometric and patentometric methods

Artigo submetido ao periódico **Aquaculture Nutrition** (ISSN 1365-2095) (<https://www.hindawi.com/journals/anu/>) e aprovado com ajustes em 19/08/2023, em andamento

Sérgio Saraiva Nazareno dos Anjos ^{1,3}, Janaína Mitsue Kimpara ², Alexandre Nascimento de Almeida ³ and Letícia Jungmann Cançado ¹

¹ Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa), Embrapa Agroenergy, Parque Estação Biológica (PqEB), Brasília, Distrito Federal, 70.770-901, Brazil

² Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa), Embrapa Digital Agriculture, André Tosello Avenue, 209, Unicamp Campus, Barão Geraldo, Campinas, São Paulo, 13.083-886, Brazil.

³ University of Brasília, Planaltina campus, Vila Nossa Senhora de Fátima, Brasília, Distrito Federal, 73.345-010, Brazil.

Correspondence should be addressed to Sérgio Saraiva Nazareno dos Anjos; sergio.saraiva@embrapa.br

Abstract

The main challenges for aquaculture feed include finding alternative protein for animal diets, alternative sources of PUFAs with marine-origin ingredients, and the possibility of replacing fish meal, fish oil, and soy meal. This study aims to present the current settings of the global use of microalgae and cyanobacteria in animal feed in aquaculture and to indicate scientific and technological future trends using bibliometric and patentometric data published between 2001 and 2021. The analysis presented in this paper shows a convergence of scientific and technological scenarios between 2001 and 2021 for biorefinery and circular bioeconomy sustainable development to attend the SDGs until 2030 and food security. China has dominance in scientific and technological efforts for using microalgae and cyanobacteria biomass for aquaculture feed, and *Chlorella* sp. is the most prevalent in both bibliometric and patentometric data. Future use of this study may be an RD&I action monitoring system for the use of microalgae and cyanobacteria biomass in aquaculture feed to present strategic data for further technology development.

Introduction

The primary goal of livestock chains is to supply high-quality proteins to an ever-increasing population, which is expected to reach 9.55 billion people by 2050 [1]. Increasing urbanisation and rising family incomes, coupled with changing dietary habits, encourage the development of innovative and environmentally friendly

systems. These demands further stimulate the animal protein market by emphasising the use of alternative protein sources and sustainable alternatives for animal feed [2].

Food provision, also called "food security" by the United Nations Food and Agriculture Organization (FAO), represents physical, social, and economic access to food that guarantees health and well-being to the population and the daily food supply for society [3]. Among the livestock chains, aquaculture is considered by FAO a key global food production system, and its sustainable management can guarantee food security associated with the conservation of natural resources [4]. It is one of the livestock sectors with the fastest growth in recent years, with a rapid expansion and a compound annual growth rate (CAGR) estimated in 4.8% a year between 2022 and 2027 and a production of 95.6 million tons of fisheries, with the Sars-COVID-19 pandemic used the estimation [5]. The aquaculture market is identified as the "next world frontier in food production" [6], and it is becoming a high-value-added protein source to strengthen food security [3]. The focus on environmental sustainability and the use of biodiversity assets as alternative sources for animal feed in aquaculture with algal biomass strengthen bioeconomy actions in support of the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs) 2 (food security), 14 (life on the water) and 15 (terrestrial life) [7].

The standard protein source in worldwide aquaculture is fish meal, obtained from pelagic fish (whole fish and their co-products after processing). It has good palatability and contains all amino acids, vitamins, minerals, and fatty acids, including polyunsaturated ones, necessary to develop aquaculture species. However, it has a negative fish-in-fish-out balance (poor conversion ratio of the live pelagic fish biomass to the live weight of the product) [8]. It is also a product with high supply, price volatility, limited availability, social license, and nitrogen pollution that negatively impact the economic and environmental sustainability of the aquaculture sector [9, 10, 11].

Microalgae and cyanobacteria are potential sources of animal feed due to their high nutritional content and their feed conversion efficiency combined with the efficient use of water and arable land, not competing with other crops such as commodities [12]. In addition, its presence in animal feed adds other substances of importance to animal metabolism, such as polyunsaturated fatty acids, carotenoids, phycobilins, folic acid, and minerals (calcium, magnesium, potassium) [13]. Previous nutritional and toxicological assessments demonstrate the suitability of microalgae and cyanobacterial biomass as animal feed components or substitutes for usual protein

sources on the market [14]. Alternative protein sources such as soybean meal circumvent the price and supply, with greater availability in the market at lower prices. However, it may require supplementation of animal feed due to its amino acid profile and has antinutritional factors such as saponins, enzyme inhibitors, tannins, lectins, hemagglutinins [15], low lipid content, low nutritional value, and low palatability, compared to fish meal [14].

Microalgae have an efficient photosynthetic rate, a high concentration of chlorophyll and a higher capacity to biofixate carbon dioxide (CO₂) for further conversion of inorganic carbon into organic carbon biomass [16, 17]. The carbon biofixation capacity is the most important nutritional requirement for microalgae growth and cultivation with the promotion of biomass production, environmental adaptability, and carbon sequestration as an effort to applicate Kyoto Protocol to control greenhouse gases [17, 18, 19]. Microalgae also have high efficiency in wastewater treatment, with assimilation of nutrients and promoting bioremediation and process [16, 19]. These properties frame microalgae also on SDG 6 (sustainable water management) and SDG 13 (climate change).

Biomass from microalgae and cyanobacteria can be competitive alternatives to fish and soybean meals. In line with the SDGs mentioned above, it is estimated that the use of microalgae and cyanobacterial biomass can increase productivity in aquaculture by three to four times and reduce the cost of production between US\$ 111.00 and US\$ 222.00 per ton of protein animal [9]. Nevertheless, technical, and economic challenges must be overcome for algal biomass to be high-quality and economically feasible [20].

The animal feed market has a growth trend of US\$ 197 billion this century [21], and the final product represents between 50% and 70% of the total cost of farming animals for slaughter. This information raises the need for scientific and applied research for production on an industrial scale with an efficient and palatable formulation for animals and with high energy conversion at a low cost [22, 23]. In addition, breeding strategies for salmon and trout related at the beginning of the 2010 decade stimulated the aquaculture feed market to improve and invest in higher quality ingredients that permitted the use of higher concentrations of other protein sources like plants, including microalgae and cyanobacteria [24].

Scientific publications and patents are both the results of Research, Development, and Innovation (RD&I) are the inputs for bibliometrics and

patentometrics methods, respectively, and have different and complementary goals, as presented by Anjos & Nascimento Neto (2021), Fütting et al. (2021) and Braga (2022) in three different themes [25, 26, 27]. Both are quantitative methods but, while scientific settings have investigative content and higher subjectivity due to higher variability of research and scientific results, patents represent the transformation of scientific knowledge in technological solutions [27]. Both are market-driven for future financial interests with the exclusivity of commercial exploitation and are indicators of RD&I for corporation performance [25, 26, 27, 28]. This study aims to present the current settings of the global use of microalgae and cyanobacteria in animal feed in aquaculture and to indicate scientific and technological future trends using data between 2001 and 2021.

Materials and Methods

The search was done on January 4th, 2022, using keywords that refer to microalgae, cyanobacteria, and aquaculture, combining Boolean operators and wildcard characters to increase the amount of recovered relevant documents published between January 1st, 2001, and December 31st, 2021, summing up 21 years of analysis. The bibliometric and patentometric analysis databases were Web of Science (WOS) and Derwent Innovation Index (DII) from Clarivate Analytics.

Data recovered were imported and treated in the VantagePoint® software (Search Technology, Inc.) for mining, matching, and cleaning information and data crossing [29]. The following pieces of information were extracted from the documents retrieved: publication year and basic patent year (year of the first deposit of the patent application at priority countries), countries, author affiliations, and patent assignees, microalgae and cyanobacteria species, aquaculture species, zooplankton species, and scientific/technological areas. In the patentometric analysis, the country indicators used were priority countries (countries where the patent is first filed worldwide before being extended to other countries) and patent family countries (countries where the patent is protected besides the country where was the first deposit) to point to markets of interest for the technologies disclosed by the patent document.

Microalgae and cyanobacteria, aquaculture, and zooplankton species were compared to identify bidimensional relationships between each other. VantagePoint® was used to cross information into bubble charts to show the co-occurrence of each type of species based on a pattern of terms that occur together in the retrieved

documents that presume a relationship. The bubble charts are one of the possible instruments offered by VantagePoint® software that enables quick research for details to clarify the relationship between information and patterns of knowledge [30, 31].

The inclusion criteria for bibliometric research were full articles displayed or with early access, and the exclusion criteria were review articles, proceedings of scientific events, and book chapters. For the patent documents search, the filters for the International Patent Classifications (IPCs) A01K (livestock) and A23K (aquaculture) were applied to tape the results to the target segment of this study. In both, words and names that did not permit species or genus identification were eliminated using the cleanup list of VantagePoint®. Table 1 shows the bibliometric and patentometric research strategies and the number of documents retrieved.

Table 1: Search strategies and number of documents retrieved between 2001 and 2021.

Analysis	Strategy	Documents
Bibliometric	("aqu?cultur*") (Topic) and ("microalga*" OR "c?anobacteri*") (Topic) Filter: full articles displayed or full articles with advance access	1,597
Patentometric	("aqu?cultur*") (Topic) and ("microalga*" OR "c?anobacteri*") (Topic). Filter: A01K* and A23K*	102

Results and Discussion

Microalgal-based products will grow US\$ 1,156.87 million between 2021 and 2028 with a CAGR of 7.9% [32]. However, microalgae and cyanobacteria still have a low market share in the aquaculture feed sector. This situation can stimulate an incumbency action in the aquafeed industry to overcome scientific and technological challenges for the industrial production of microalgae and cyanobacteria [33, 34]. The scientific, technological, and economical scenarios are compatible with the numbers in Table 1.

The scientific effort for later technology development is compatible with a possible trend of low technological maturity [35] of using microalgae and cyanobacteria biomass for animal feed in aquaculture. The scaling of efficient and economical cultivation systems and harvesting systems as technological, regulatory, and market barriers for the use of microalgae and cyanobacteria are important limiting issues [13, 36, 37, 38].

China and the United States of America (USA) dominate the scientific and patent settings for using microalgae and cyanobacteria biomass for animal feed in aquaculture. Among the scientific documents, Spain, Brazil, and Australia are the

countries with a hundred more documents, besides China and the USA, as shown in Figure 1.

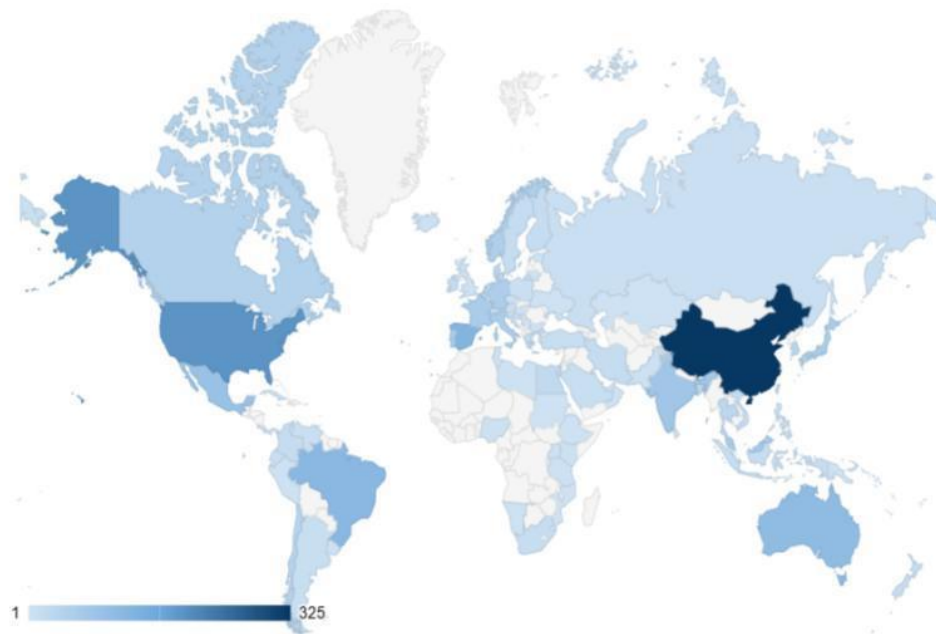


Figure 1: Geographic distribution of the countries of bibliometric data search of microalgae/cyanobacteria in aquaculture.

In the patent documents, South Korea and Japan are other countries with importance due to the expansion of nutraceutical industries in these countries besides being the top countries of microalgae and cyanobacteria harvest and biomass exportation [39, 40] (Figure 2 and Figure 3).

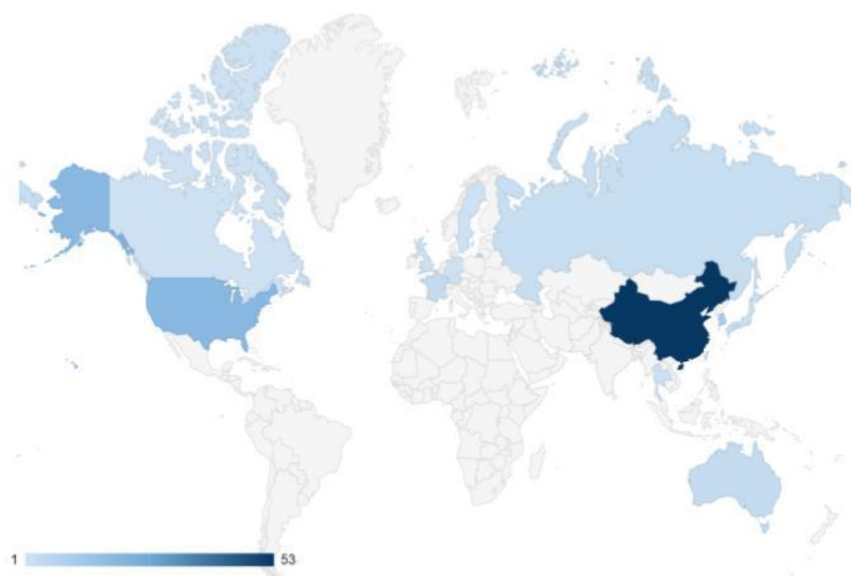


Figure 2: Geographic distribution of the countries of patentometric data search of microalgae / cyanobacteria for aquaculture..

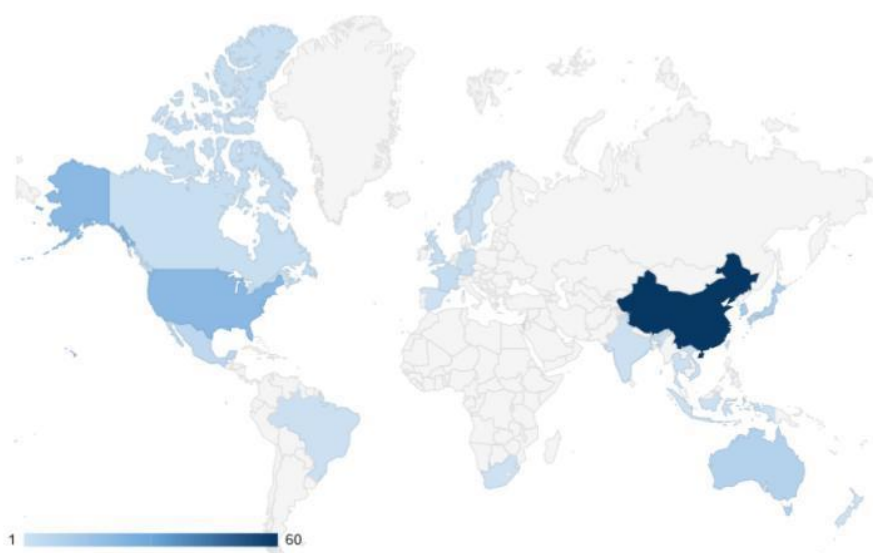


Figure 3: Geographic distribution of family member countries of patentometric data of microalgae / cyanobacteria for aquaculture feed..

The patentometric information shows that Brazil, Norway, Spain, Mexico, Indonesia, South Africa, Vietnam, and India are not priority countries but are patent

family countries. Nevertheless, they are relevant in world aquaculture scenarios and are potential markets for economic exploration, besides China, the USA, and South Korea [41]. The favorable climatic conditions for farming and harvesting microalgae and cyanobacteria in warmer countries like Brazil, Spain, Mexico, Indonesia, South Africa, Vietnam, and India, and the high RD&I investments in Norway might explain part of the interests of the patent assignees in these countries [38].

The countries with ten and more documents in bibliometric and patentometric were plotted to complement the geographical distribution of scientific and patent documents of microalgae/cyanobacteria for aquaculture feed in line graphs and compared with the time scope (2001-2021) (Figure 4, Figure 5, and Figure 6). This procedure showed China's importance in the microalgae/cyanobacteria for the aquaculture feed market as the country with the most scientific (Figure 4) and patent documents (Figure 5 and Figure 6). The heterogeneous effects of the lines in Figure 4, Figure 5, and Figure 6 are associated with the 18-month secrecy after its filling day at the patent office [42].

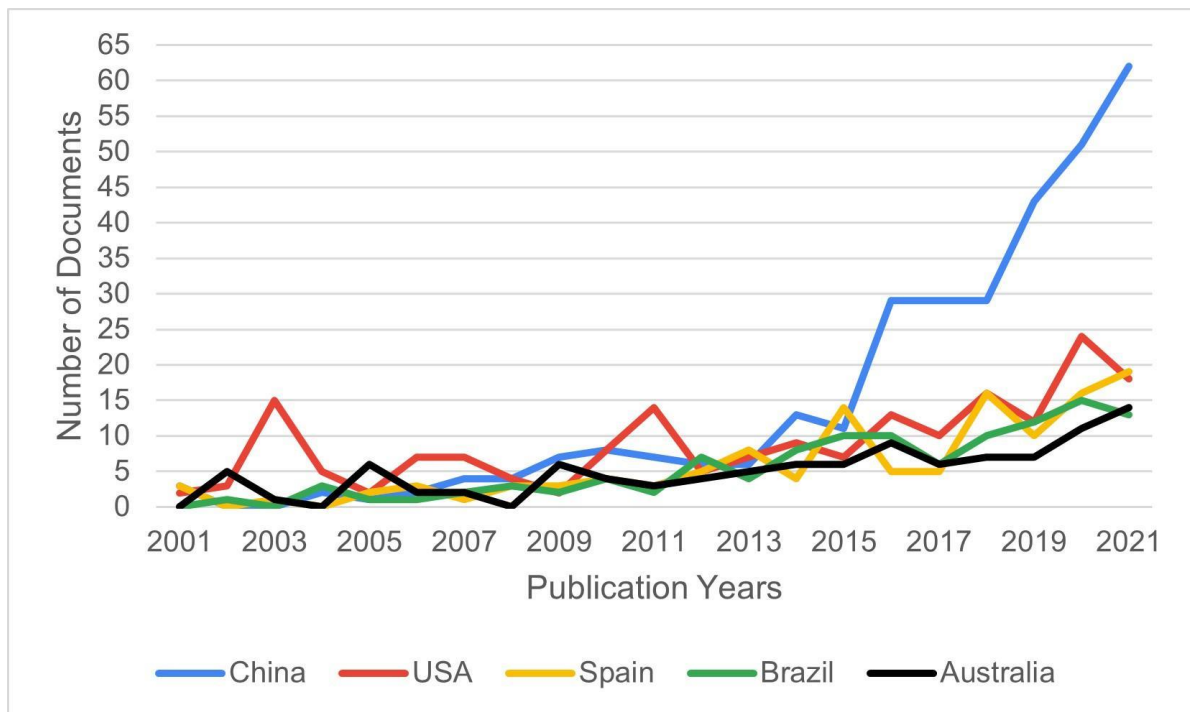


Figure 4: Line graph with the evolution of the records per year of the countries with ten and more scientific documents of microalgae/cyanobacteria for aquaculture feed.

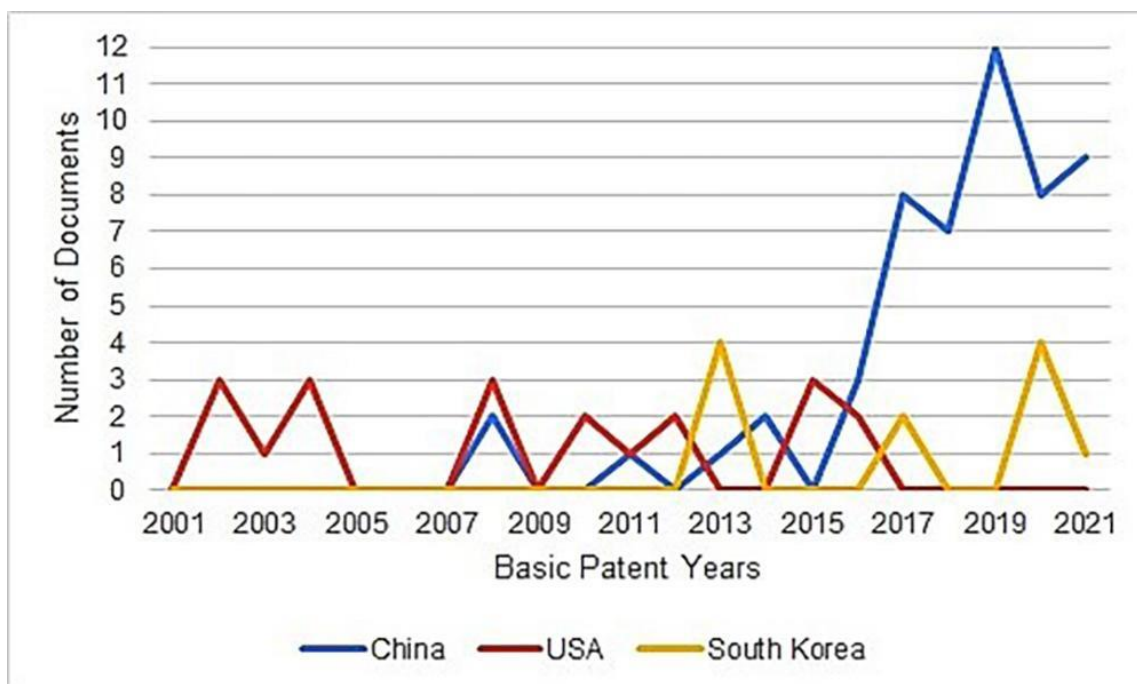


Figure 5: Line graph of the evolution of the yearly records of the priority countries with ten and more patent documents of microalgae/cyanobacteria for aquaculture feed.

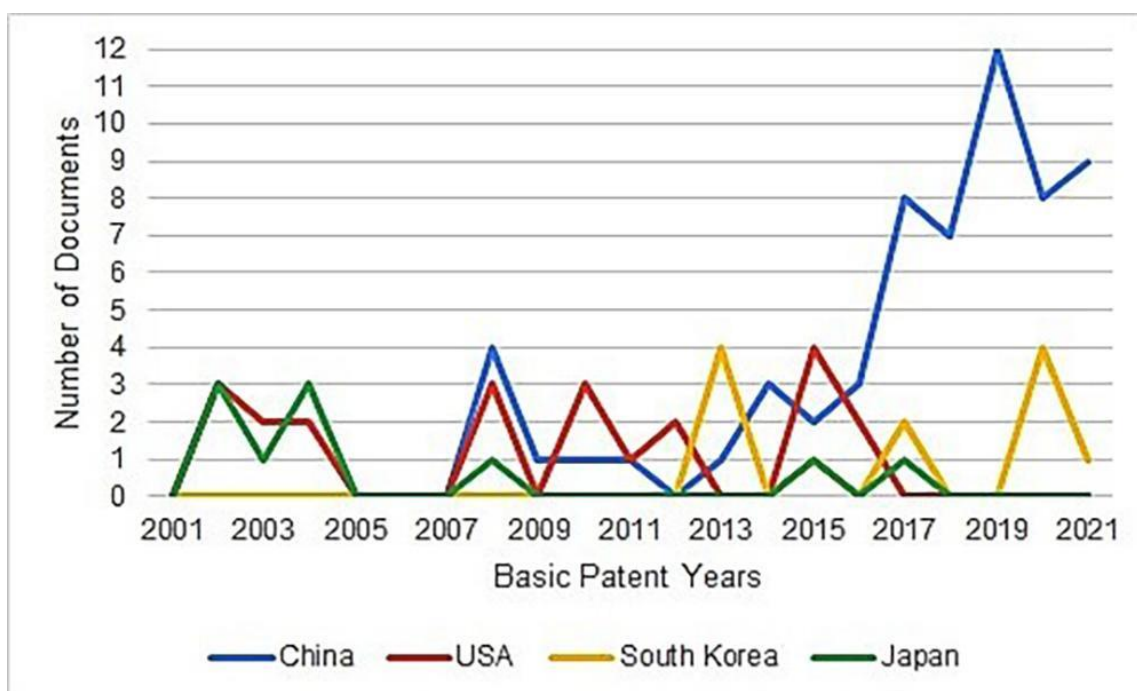


Figure 6: Line graph with the evolution of the yearly records of the family member countries with ten and more patent documents of microalgae/cyanobacteria for aquaculture feed

Figure 4 shows China's growth in 2015 and the countries in 2017 of bibliometric data. Figure 5 and Figure 6 also show China's growth starting in 2015. This fact can be associated with public policies aiming for environmental sustainability associated with economic development launched in 2007. Later, in 2015, the "Marine Ecological

Civilization Building Policy" was announced to emphasize the aquaculture sector and reinforce the environmental sustainability efforts that entered the Chinese constitution in 2018 [43].

Before the 1950s, China's principal aquaculture source was capturing fishing due to the high wild fish stocks in waters (rivers, lakes, and oceans). However, with further fishing resources depletion, culture-based fisheries were the new alternative to maintain the fishing supply for the Chinese population [44]. In the Deng Xiaoping government in the 1970s, there was encouragement for farmed fish to promote food security, economic growth, and social stability among the population, especially the rural and poor [43, 45]. This political decision has made China the most important country in the role in almost all areas of aquaculture since 1991 due to its high domestic income and seafood demand, and it has 56.7% of the world's aquatic animal farming [4,24].

The bibliometric documents retrieved were published by more than a thousand of different organizations from many countries on all continents. As aquaculture is considered a key global food production system [4], a higher number of scientific results for future development of new animal feed for aquaculture are due to global efforts for food security and alternative protein sources for a higher world population [1]. The main author affiliations to scientific documents are universities and governmental RD&I institutions, which turn public the results of their basic and exploratory scientific research [9] (Table 2).

Table 2: Ten first-author affiliations with more publications on the bibliometric search of microalgae/cyanobacteria for aquaculture

# Records	Author Affiliations	Countries
85	Chinese Academy of Sciences	China
41	Chinese Academy of Fishery Sciences	China
36	Ocean University of China	China
32	Ghent University	Belgium
32	University of Putra Malaysia	Malaysia
29	<i>Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR)</i>	Mexico
26	Federal University of Rio Grande	Brazil
26	Federal Rural University of Pernambuco	Brazil
23	Federal University of Santa Catarina	Brazil
22	<i>Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER)</i>	France

Asia, Europe, and South America concentrate most of the scientific documents retrieved, highlighting Chinese RD&I institutions (Chinese Academy of Sciences,

Chinese Academy of Fishery Sciences, and Ocean University of China). That confirms China's dominance in scientific efforts to develop technological solutions for using microalgae and cyanobacteria biomass for aquaculture feed and the relevant role of China in the world aquaculture market [24]. There are also three Brazilian universities among the ten first author affiliations with more publications, as shown in Table 2 (Federal University of Rio Grande, Federal Rural University of Pernambuco, and Federal University of Santa Catarina) that confirms Brazil's strategic position on the aquaculture market as being one of the patent family countries (Figure 3).

Scientific documents represent the first step for technology development and protection by patent or consequent patent deposit or industrial secret). In most cases, knowledge production is associated with lower technological maturity and associated with institutions that don't make part of the market share like universities and RD&I centers [25], which can explain the profile of the information on Table 2. Patent documents transform the experimental scientific results into technologies for further monetary reward and exclusivity in their markets, mostly executed by entrepreneurs and, in some cases, RD&I that deposit patents and further signed technological licensing contracts with entrepreneurs [25], similar to the profile on Table 3.

Table 3: Ten first patent applications on the patentometric search of microalgae/cyanobacteria for aquaculture

# Records	Patent Applicators	Countries
5	Advanced Bionutrition Corp	USA
4	Pukyong National University	South Korea
3	Royal DSM N.V.	The Netherlands
3	Ningbo University	China
2	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)	Australia
2	Hainan Tianjiao Technology Dev Co Ltd	China
2	Jiawei Biotechnology Co Ltd	China
2	Cornell University	USA
2	Guangdong Ocean University	China
2	Weihai Jinyi Environmental Protection Co Ltd.	China

The information analyzed in scientific and patent documents were microalgae/cyanobacteria, aquaculture, and zooplankton species. One hundred fourteen species or genera of microalgae and cyanobacteria for aquaculture feed were retrieved in scientific documents, and the first ten are listed in Table 4. Table 5 presents 26 species or genera of microalgae and cyanobacteria for aquaculture feed were retrieved in patent documents.

Table 4: The first ten species or genera of microalgae (identified as "M") and cyanobacteria (identified as C) in bibliometric data for aquaculture feed.

# Records	Microalgae or Cyanobacteria
67	<i>Chlorella vulgaris</i> (M) <i>Phaeodactylum tricornutum</i> (M)
53	<i>Isochrysis galbana</i> (M)
49	<i>Tetraselmis suecica</i> (M)
43	<i>Chlorella</i> sp. (M)
41	<i>Arthrospira platensis</i> (C)
36	<i>Nannochloropsis oculata</i> (M)
36	<i>Nannochloropsis</i> sp. (M)
36	<i>Arthrospira</i> sp. (C)
30	<i>Haematococcus pluvialis</i> (M)
25	

Table 5: Species or genera of microalgae (identified as "M") and cyanobacteria (identified as "C") in patentometric data for aquaculture feed

# Records	Microalgae or Cyanobacteria
4	<i>Chlorella</i> sp. (M)
3	<i>Nannochloropsis</i> sp. (M)
2	<i>Schizochytrium</i> sp. (M)
2	<i>Thalassiosira</i> sp. (M)
1	<i>Arthrospira platensis</i> (C)
1	<i>Asterionella</i> sp. (M)
1	<i>Chlamydomonas</i> sp. (M)
1	<i>Chlorella vulgaris</i> (M)
1	<i>Closterium</i> sp. (M)
1	<i>Coelastrum</i> sp. (M)
1	<i>Dictyosphaerium</i> sp. (M)
1	<i>Euglena</i> sp. (M)
1	<i>Exuviaella cordata</i> (M)
1	<i>Fragilariopsis</i> sp. (M)
1	<i>Haematococcus</i> sp. (M)
1	<i>Nannochlorum</i> sp. (M)
1	<i>Navicula</i> sp. (M)
1	<i>Parietochloris incisa</i> (M)
1	<i>Pediastrum</i> sp. (M)
1	<i>Platymonas subcordiformis</i> (M)
1	<i>Scenedesmus</i> sp. (M)
1	<i>Selenastrum</i> sp. (M)
1	<i>Staurastrum</i> sp. (M)
1	<i>Synechococcus</i> sp. (M)
1	<i>Tetraselmis</i> sp. (M)
1	<i>Tetraselmis subcordiformis</i> (M)

After mining and cleaning procedures of bibliometric data on VantagePoint® software, 85 aquaculture species and genera were detected on bibliometric data and the ten most prevalent were selected for analysis (Table 6). The species with two or more records retrieved in patent documents are listed in Table 7.

Table 6: The first ten aquaculture species in bibliometric data for using microalgae and cyanobacteria as feed sources.

# Records	Common name (Aquaculture Species)
97	Pacific white shrimp (<i>Litopenaeus vannamei</i>)
67	Pacific oyster (<i>Crassostrea gigas</i>)
64	Rainbow trout (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)
62	Atlantic salmon (<i>Salmo salar</i>)
45	Nile tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>)
37	Gilthead seabream (<i>Sparus aurata</i>)
36	Blue mussel (<i>Mytilus edulis</i>)
27	Giant tiger prawn (<i>Penaeus monodon</i>)
18	European mussel (<i>Mytilus galloprovincialis</i>)
18	Sea cucumber (<i>Holothuria scabra</i>)

Table 7: Aquaculture species with patentometric data for using microalgae and cyanobacteria as feed sources with two records.

# Records	Common name (Aquaculture Species)
2	Basa fish (<i>Pangasius bocourti</i>)
2	Common octopus (<i>Octopus vulgaris</i>)
2	Pacific white shrimp (<i>Litopenaeus vannamei</i>)
2	Pufferfish (<i>Takifugu obscurus</i>)
2	Red swamp crayfish (<i>Procambarus clarkii</i>)

In both bibliometric and patentometric analysis, rotifers, brine shrimp, and copepods were grouped using the term "zooplankton" and separated from the aquaculture animals. Table 8 presents ten zooplankton species associated with using microalgae and cyanobacteria as aquaculture feed sources in the bibliometric data with three or more records. Table 9 shows six zooplankton species associated with using microalgae and cyanobacteria as aquaculture feed sources in the patentometric data.

Table 8: Bibliometric data shows zooplankton species associated with using microalgae and cyanobacteria as aquaculture feed sources.

# Records	Common name (species or genera)
39	Brine shrimp (<i>Artemia</i> sp.)
27	Rotifers (<i>Brachionus plicatilis</i>)
18	Copepod (<i>Acartia tonsa</i>)
9	Brine shrimp (<i>Artemia franciscana</i>)
6	Daphnia (<i>Daphnia magna</i>)
4	Brine shrimp (<i>Artemia salina</i>)
3	Copepod (<i>Paracyclops nana</i>)
3	Copepod (<i>Temora longicornis</i>)

	Rotifer (<i>Brachionus</i>
3	<i>rotundiformis</i>)
3	Rotifer (<i>Brachionus</i> sp.)

Table 9: Zooplankton species associated with using microalgae and cyanobacteria as aquaculture feed sources in the patentometric data.

# Records	Common name (species or genera)
5	Brine shrimp (<i>Artemia</i> sp.)
5	Rotifer (<i>Brachionus plicatilis</i>)
	Brine shrimp (<i>Artemia</i>
1	<i>franciscana</i>)
1	Brine shrimp (<i>Artemia salina</i>)
	Black Sea calanus (<i>Calanus</i>
1	<i>euxinus</i>)
1	Calanus (<i>Calanus</i> sp.)

Brine shrimps and rotifers are some of the zooplankton used in aquaculture feed, with their biomass as part of the diet in a formulation or as live prey. However, these small animals are poor in PUFAs (polyunsaturated fatty acids) and the use of microalgae for their feed, such as *Nannochloropsis* sp., *Tetraselmis* sp., *Chlorella* sp., *Isochrysis* sp., and *Dunaliella* sp., is an alternative to include PUFAs in aquaculture feed [19]. In addition, zooplankton and phytoplankton are often complementary for aquaculture aquatic organisms, as animals may change their feeding habits during their ontogenetic development of the gastrointestinal tract, presenting different nutritional requirements and the feeding apparatus' size changes during hatching aquatic organisms [46, 47, 48]. An example was described by Cahu et al. (1998) whose research detected a higher production of pancreatic and intestinal enzymes on sea bass larvae (*Dicentrarchus labrax*) with *Isochrysis galbana* in rearing water [49].

The bibliometric data (Table 4, Table 6, Table 8) were crossed between each other and plotted on bubble charts to present the co-occurrence of the data and the higher prevalent relationship between microalgae and cyanobacteria, aquaculture, and zooplankton species in scientific documents (Figure 7, Figure 9 and Figure 11). The same was done with patentometric data in Table 5, Table 7, and Table 9, plotted on bubble charts with co-occurrence (Figure 8, Figure 10, Figure 12). The prevalent co-occurrences can show the scientific state of the art and the technological paths in RD&I strategies for using microalgae and cyanobacteria biomass as aquaculture feed [50].

The bubble chart of microalgae/cyanobacteria species (Table 4) and zooplankton species (Table 8) with the bibliometric studies point to the higher prevalence of documents that cross *C. vulgaris* and brine shrimp (*Artemia* sp.), *T.*

suecica and brine shrimp (*Artemia* sp.), and *T. suecica* and rotifers (*B. plicatilis*), and importance of the co-occurrence of *Arthrospira* sp. And brine shrimp (*Artemia* sp.) (Figure 7). The same was done with patent documents, whose bubble chart of Tables 5 and 9 showed just one co-occurrence has higher records: rotifer (*B. plicatilis*) and *Nannochloropsis* sp. (Figure 8).

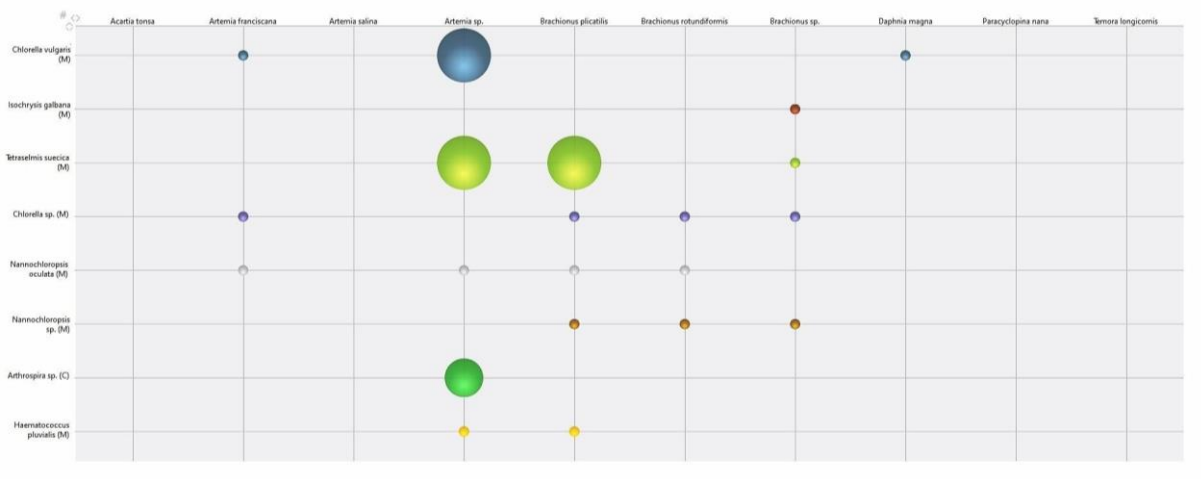


Figure 7: Bubble chart of co-occurrence of microalgae / cyanobacteria and zooplankton species with bibliometric data for aquaculture feed (According to Table 4 and Table 8)

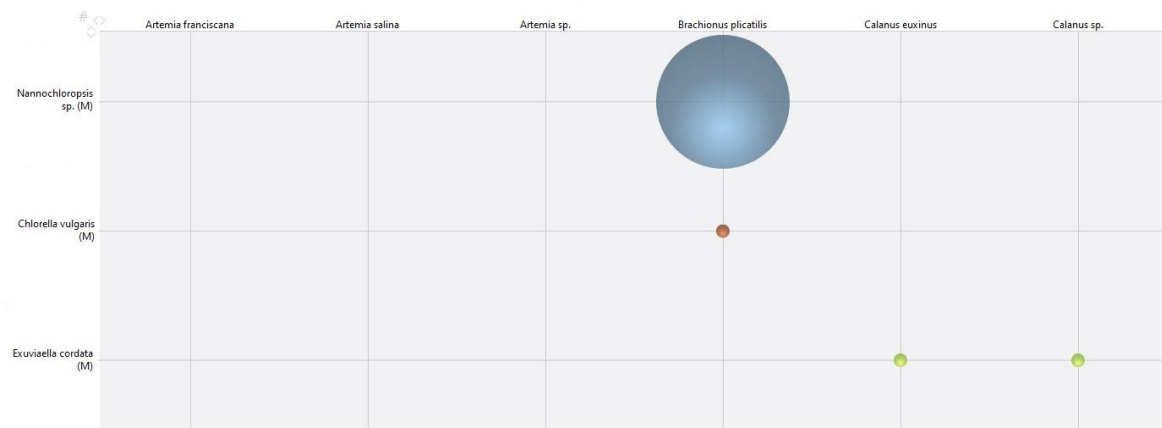


Figure 8: Bubble chart of co-occurrence of microalgae / cyanobacteria and zooplankton species with patentometric data for aquaculture feed (According to Table 5 and Table 9)

Besides using microalgae and cyanobacteria for feeding zooplankton, the species that appear are also related to the most used to feed the larvae/young forms of the main aquatic organisms cultivated today [13]. Besides *Tetraselmis* sp., *Chlorella* sp. and *Nannochloropsis* sp. (Figure 7 and Figure 8), *Isochrysis galbana* has been used to feed rotifers in semi-continuous and continuous cultures due high essential fatty acids (EFAs) concentration [10, 13, 51]. For brine shrimp, , the microalgae genera

Tetraselmis sp., *Dunaliella* sp., *Cryptomonas* sp., *Chaetoceros* sp., *Isochrysis* sp., and *Rhodomonas* sp. are already used as PUFAs, proteins, and vitamins sources to feed *Artemia* nauplii [51, 52]. Microalgae are also used as part of green water technique for better fish larvae quality in hatcheries to improve and stabilize microbiologic quality of the water to prevent contaminations and diseases [53].

The co-occurrence matrix of scientific documents between microalgae/cyanobacteria species (Table 4) and aquaculture species (Table 6) points to the highest prevalence of documents that cross *P. tricornutum* and Atlantic salmon (*S. salar*) (Figure 9). Other correlations with high prevalence are: *P. tricornutum* and rainbow trout (*O. mykiss*); *T. suecica*, and Pacific oyster (*C. gigas*); *T. suecica* and Atlantic salmon (*S. salar*); *Arthrospira* sp. And Nile tilapia (*O. niloticus*); *Schizochytrium* sp. and Rainbow trout (*O. mykiss*) (Figure 9).



Figure 9: Bubble chart of co-occurrence of microalgae / cyanobacteria, and aquaculture species with bibliometric data for aquaculture feed (According to Table 4 and Table 6)

The co-occurrence matrix in patent documents between microalgae/cyanobacteria species (Table 5) and aquaculture species (Table 7) has two low prevalences: Common octopus (*O. vulgaris*) and *Nannochloropsis* sp. and Common octopus (*O. vulgaris*) and *Chlorella vulgaris* (Figure 10). These lower co-occurrences are probably due to a lack of technologies that cross microalgae / cyanobacteria and aquaculture species and associated with the low number of patents recovered in this research.



Figure 10: Bubble chart of co-occurrence of microalgae / cyanobacteria, and aquaculture species with patentometric data for aquaculture feed (According to Table 5 and Table 7)

Considering the patent results in Figure 10, it can be mentioned that the results in Figure 9 may turn into patents in the future years for future profitability [25]. The innovation funnel of RD&I activity separates each milestone of RD&I activity [54], starting with idea generation (hypothesis), which evolves to scoping and conceptual proof (bibliometric data), the building of the business case, and further pilot and industrial scale-up (includes validation) (patentometric data) and commercialization [55, 56].

The co-occurrence matrix of scientific documents between aquaculture species (Table 6) and zooplankton species (Table 8) points to the highest prevalence of documents that cross gilthead seabream (*S. aurata*) and rotifers (*B. plicatilis*) (Figure 11). Other correlations with high prevalence are Pacific white shrimp (*L. vannamei*) and brine shrimp (*Artemia* sp.), and giant tiger prawn (*P. monodon*) and brine shrimp (*Artemia* sp.) (Figure 11). The co-occurrence matrix on patent documents between aquaculture species (Table 7) and zooplankton species (Table 9) has only one cross: Common octopus (*O. vulgaris*) and rotifers (*B. plicatilis*) (Figure 12).

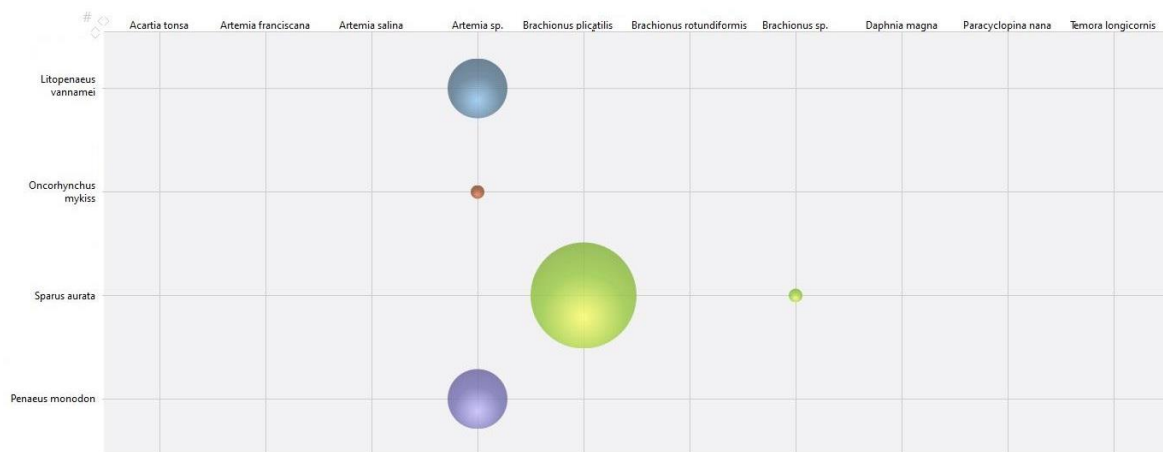


Figure 11: Bubble chart of co-occurrence of aquaculture and zooplankton species with bibliometric data for aquaculture feed (According to Table 6 and Table 8)

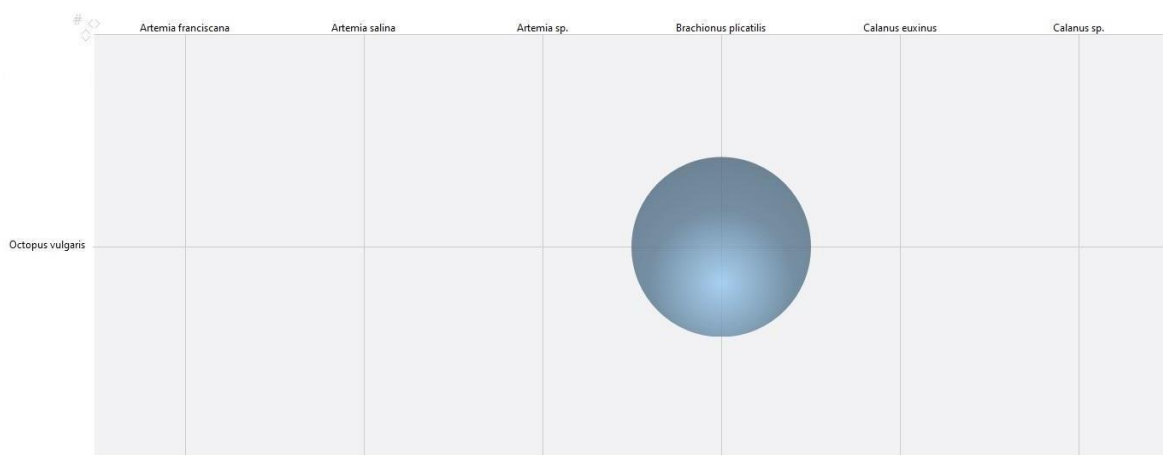


Figure 12: Bubble chart of co-occurrence of aquaculture and zooplankton species with patentometric data for aquaculture feed (According to Table 7 and Table 9)

Patent documents present other species with regional efforts and expanding world market share. Gilthead seabream (*S. aurata*) has regional importance in the Mediterranean Sea. Pacific oysters (*C. gigas*) and pufferfish (*T. obscurus*) have high consumption in East Asia. These three species will not be described in this paper.

Arthrospira sp., *Chlorella* sp., *Isochrysis* sp., *Phaeodactylum* sp., *Nannochloropsis* sp., and *Tetraselmis* sp. are the genera with the highest protein content that can be a competitive protein alternative source as it has a fast-growing process [50, 57] and that are also in Figures 7 and 9. Atlantic salmon and Rainbow trout are established aquaculture markets with the leadership of Norway and Chile (Scotland and Türkiye also are important markets of Atlantic salmon and Rainbow trout) , and the use of algal biomass as an alternative feed source is competitive, and these scientific results can be scaled up to future products for the aquaculture market

[24]. Furthermore, breeding strategies for salmon and trout related at the start of the 2010 decade stimulated the aquaculture feed market to improve and invest in higher quality ingredients that permitted the use of higher concentrations of other protein sources like plants [58] , that includes microalgae and cyanobacteria.

The Pacific white shrimp (*L. vannamei*) is on most of the retrieved documents in scientific and patent analysis. *L. vannamei* can be considered the most important crustacean in the composition and growth of global live-weight aquaculture production from 1997 to 2015, and that was not in the statistics of 1997 [24]. In scientific documents, Figure 9 presents a high co-occurrence of *Arthrospira* sp. and *A. platensis* with Pacific white shrimp. The feed of *L. vannamei* is the most significant global consumer of fish meal in aquaculture [59], which has a global market with a CaGR of 6,81% and a growth of US\$ 19,82 billion in the period 2021-2028 [60]. As *Arthrospira* sp. biomass has a higher global production [36], the co-occurrence points to the scientific development of shrimp feed with these cyanobacteria biomass as a protein alternative for future formulations.

However, the patentometric documents analyzed did not show the relevance that *L. vannamei* had on bibliometric documents. As this shrimp species has an essential role in the aquaculture market, formulations with microalgae or cyanobacteria biomass were probably protected by trade secrets by their inventors as possible patent applicants. A trade secret is a form to guarantee market share and competitiveness without being public after patent expiration but turns the market scenario uncertain [26].

Common octopuses (*O. vulgaris*) are not on the bibliometric data analyzed but are the only aquaculture species in Figures 10 and 12. Cephalopods' worldwide exportation grew 6,8% in 2020, and its exportation value in 2020 was US\$ 10,2 billion, but the poor management of farming led to high prices in the last few years [4]. *O. vulgaris* is one of the cephalopods with higher potential for the world aquaculture market due to its high commercial value, attractive biological traits, and proper zootechnical performance for farming, such as short life cycle, high growth rate, high food conversion index, and acceptance of food of low commercial value [61, 62]. Common octopus farming is also an alternative to predatory fishing because the lack of official fishing statistics can lead to future scarcity [54].

Zooplanktons such as brine shrimps and rotifers are the primary aquaculture feed source and can be used for small animals as live prey and as an ingredient for bigger animal feed. [19]. A possible competition of zooplankton and

microalgae/cyanobacteria for aquaculture was raised during the analysis of the documents, but this was not proved. Some studies suggest that microalgae/cyanobacteria and zooplankton can be used as feed sources in different stage developments, like the third larval stage [13]. However, zooplanktons are poor in PUFAs, polyphenols, and carotenoids, whose feed with biomass of microalgae such as *Nannochloropsis* sp., *Tetraselmis* sp., *Chlorella* sp., *Isochrysis* sp., and *Dunaliella* sp. is an alternative to include these nutrients in aquaculture feed [13, 63].

The market importance of PUFAs is increasing with the search for non-marine-based omega-3 and omega-6 oils and alternative feed ingredients. Microalgae and cyanobacteria are an example of long-chain PUFAs sources, especially EPA, DHA, and arachidonic acid (AA), that have pharmacological importance as precursors of inflammation-resolving mediators like resolverins, maresins, and protectins that reduce production of inflammatory cytokines and promote a return to homeostasis [64, 65].

Schizochytrium sp. is known as a good source of DHA (55–75% of lipid level in dry matter and 49% of DHA) and a potential source of EPA to supplement fishery diets [66, 67, 68]. Kouzoulaki et al. (2016) [66] results indicated that spray-dried *Schizochytrium* sp. biomass included more than 5% of extruded feed for *S. salar* replaced with successful fish oil as a source of PUFAs and improved the retention of EPA + DHA.

The last indicators analyzed are the scientific and technological areas for bibliometric and patentometric studies, respectively, coming from different data. Scientific areas are listed as the WOS categories [69] and patent documents the IPCs numbers (Figure 11 and Figure 12). There were used IPCs subdivisions with the four first alphanumeric identification to analyze the technological areas and market application of microalgae and cyanobacteria for aquaculture feeds. Table 10 shows the ten first categories of bibliometric data of microalgae and cyanobacteria for aquaculture feed with forty or more records, and Table 11 shows the first ten IPCs.

Table 10: The ten first WOS categories of bibliometric data of microalgae and cyanobacteria for aquaculture feed with forty or more records

# Records	WOS Categories [69]
522	Fisheries
516	Marine & Freshwater Biology
	Biotechnology & Applied
324	Microbiology
243	Environmental Sciences

69	Engineering, Environmental
68	Microbiology
65	Agricultural Engineering
57	Oceanography
55	Energy & Fuels
55	Multidisciplinary Sciences

Table 11: The ten first IPCs of the patentometric data of microalgae and cyanobacteria for aquaculture feed with ten or more records

# Records	IPCs numbers	Descriptions
67	A01K	Animal husbandry, rearing or breeding animals
56	A23K	Feeding-stuffs adapted for animals
32	C12N	Microorganisms or enzymes
24	C02F	Treatment of water, wastewater, sewage, or sludge
17	C12R	Indexing scheme of microorganisms (associated with subclasses C12C to C12Q)
16	A01G	Horticulture, cultivation of vegetables
14	A23L	Foods, foodstuffs, and their preservation
12	A61K	Preparations for medical, dental, or toiletry purposes (medical or veterinary sciences)
10	C12P	Fermentation or enzyme-using processes to synthesize a desired chemical compound or composition
8	A61P	Specific therapeutical activity of chemical compounds or medicinal preparations for humans and animals

The data in Tables 10 and 11 were crossed to the 21 years of analysis and plotted on bubble charts to show the co-occurrences of WOS categories and IPCs per year, presented in Figure 13 and Figure 14.

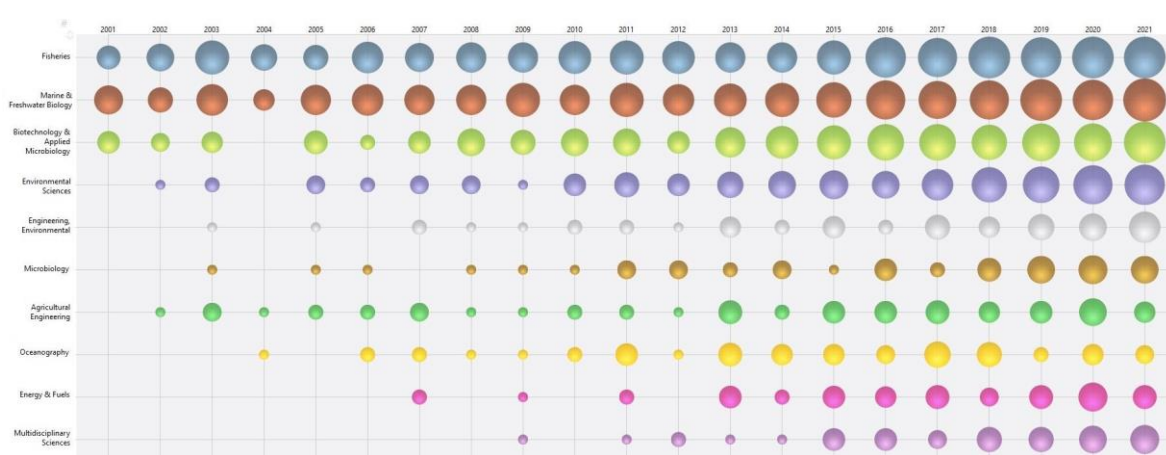


Figure 13: Bubble chart with year evolution of the WOS categories (bibliometric data) of the use of microalgae / cyanobacteria for aquaculture feed

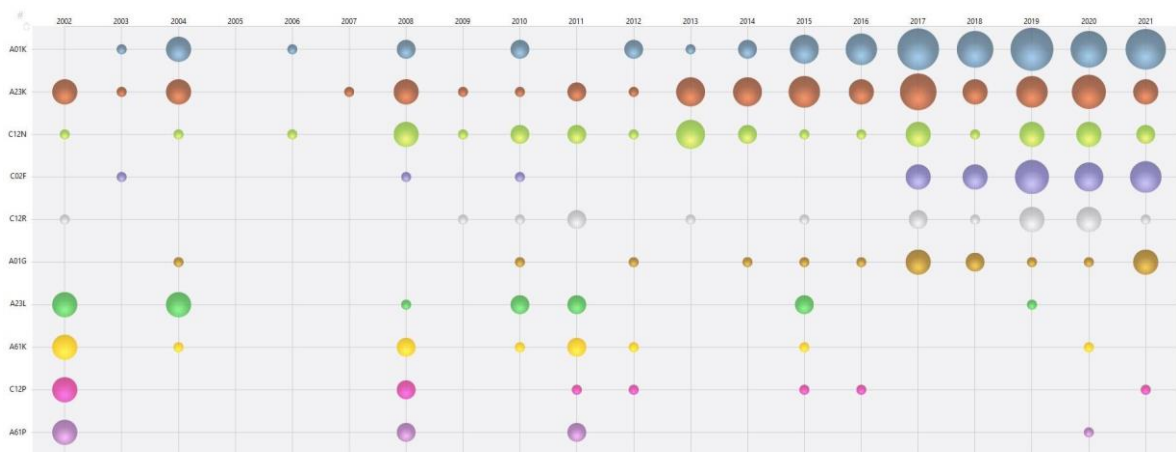


Figure 14: Bubble chart with year evolution of the IPCs subdivisions (patentometric data) of use of microalgae/cyanobacteria for aquaculture feed

The information in Figure 13 and Figure 14 show the convergence and evolution of scientific areas of Fisheries, Marine & Freshwater Biology, Biotechnology & Applied Microbiology, and Agricultural Engineering to patents for applications of feeding adapted to aquatic animals (fish, crustaceans, or molluscs, IPCs A23K-050/80 and A23K-001/18) and livestock of crustaceans like lobsters or shrimps (A01K-061/59), microalgae (IPCs C12N-001/12 and C12R-001/89) and the association of microalgae and aquaculture feed (IPC A23K-010/30, Animal feeding-stuffs from material of plant origin).

The IPC C02F has a growth of patent documents starting in 2017 and refers to the biological treatment of water, wastewater, or sewage using algae or microorganisms and can be associated with WOS categories Environmental Sciences, Engineering/Environmental, Water Resources, and Toxicology. Furthermore, the IPCs C02F-003/32 and C02F-003/34 can be related to a market path for reducing the costs of microalgae production and harvest by adopting a biorefinery system and circular bioeconomy approach to the treatment of contaminated and discarded water and offering another choice to obtain alternative biomass to substitute a fish meal and fish oil in aquaculture feed [70].

Conclusions

This bibliometric and patentometric study presented the evolution of scientific results for microalgae and cyanobacteria biomass use in aquaculture feed to technologies for market application. Scientific publications in all continents reinforce

the exploratory profile of scientific documents. China has dominance in scientific and technological efforts for using microalgae and cyanobacteria biomass for aquaculture feed, and other countries (Brazil, Norway, Spain, Mexico, Indonesia, South Africa, Vietnam, and India) make part of patent family and are potential markets for the protected technologies to guarantee market reserve and future economic exploration.

Genera *Chlorella* sp. is a highlight in bibliometric and patentometric data. , and the results of this study show applications scientifically evaluated, and some described in patent documents according to their metabolites. Besides *Chlorella* sp., *Nannochloropsis* sp., *Tetraselmis* sp., *Isochrysis* sp., and *Dunaliella* sp. are competitive alternatives to include PUFAs in aquaculture feed

Moreover, microalgae and cyanobacteria metabolism is versatile, depending on technological development, and cultivation and harvest technologies.

This paper also shows a convergence of scientific and technological scenarios between 2001 and 2021 in biorefinery, circular bioeconomy, sustainable development, and food security for new technologies in the following decades for future scale-up of microalgae and cyanobacteria cultivation. The future use of this study is an RD&I action monitoring system of the use of microalgae and cyanobacteria biomass in aquaculture feed to present strategic data for further technology development and the choice of scientific, technological, and commercial markets and partners for technology transfer and market adoption.

References

- [1] Tedeschi, L.O., Fonseca, M.A., Muir, J.P., Poppi, D.P., Carstens, G.E., Angerer, J.P., Fox, D.G. **A glimpse of the future in animal nutrition science. 2. Current and future solutions.** *R. Bras. Zootec.* **2017**, 46, 452-469. <https://doi.org/10.1590/S1806-92902017000500012>.
- [2] Mota, C.S.C. **Avaliação do potencial de utilização de microalgas como alimento alternativo na alimentação de animais de produção.** Dissertation, Master in Agronomic Engineering, University of Porto, Porto, 2018
- [3] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). ***The state of world fisheries and aquaculture 2018: meeting the sustainable development goals***; FAO: Rome, Italy, 2018.
- [4] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). ***The State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA) 2022***; FAO: Rome, Italy, 2022.
- [5] **Imarc Group.** Available online: <https://www.imarcgroup.com/aquaculture-market> (accessed on 3 November 2022).

- [6] Schultze, E.P., Vieira Filho, J.E.R. **Evolução da piscicultura no Brasil: diagnóstico e desenvolvimento da cadeia produtiva de tilápia**. IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada): Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- [7] **Stockholm Resilience Center**. Available online: <https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2016-06-14-how-food-connects-all-the-sdgs.html> (accessed on 3 November 2022).
- [8] Hall, G.M. **Fishmeal Production and Sustainability**. In *Fish Processing – Sustainability and New Opportunities*; Hall, G.M., Ed.; Wiley-Blackwell: Malden, United States of America, 2011; p. 207-235. <https://doi.org/10.1002/9781444328585>.
- [9] 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 Res.*, **2015**, 9, 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.03.006>.
- [10] Chen, F., Leng, Y., Lu, Q., Zhou, W. **The application of microalgae biomass and bio-products as aquafeed for aquaculture**. *Algal Res.*, **2021**, 60, e102541. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102541>.
- [11] Rombenso, A., Araújo, B., Li, E. **Recent Advances in Fish Nutrition: Insights on the Nutritional Implications of Modern Formulations**. *Animals*, **2022**, 12, e1705. <https://doi.org/10.3390/ani12131705>.
- [12] Holman, B.W.B., Malau-Aduli, A.E.O. **Spirulina as a livestock supplement and animal feed**. *J Anim Physiol Anim Nutr*, **2013**, 97, 615-623. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2012.01328.x>.
- [13] Dineshbabu, G., Goswami, G., Kumar, R., Sinha, A., Das, D. **Microalgae–nutritious, sustainable aqua- and animal feed source**. *J. Funct. Foods*, **2019**, 62, e103545. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103545>.
- [14] Ricigliano, V.A., Simone-Finstrom, M. **Nutritional and prebiotic efficacy of the microalga *Arthrospira platensis* (spirulina) in honeybees**. *Apidologie*, **2020**, 51, 898–910. <https://doi.org/10.1007/s13592-020-00770-5>.
- [15] Samtiya, M., Aluko, R.E., Dhewa, T. **Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: an overview**. *Food Prod Process and Nutr*, **2020**, 2, 6. <https://doi.org/10.1186/s43014-020-0020-5>.
- [16] Mendonça, H.V.; Assemany, P.; Abreu, M.; Couto, E.; Maciel, A.M.; Duarte, R.L.; Santos, M.G.B.; Reis, A. **Microalgae in a global world: New solutions for old problems?** *Renewable Energy*, **2021**, 165, 842-862. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.014>.
- [17] Morais, M.G.; Morais, E.G.; Duarte, J.H.; Deamici, K.M.; Mitchell, B.G.; Costa, J.A.V. **Biological CO₂ mitigation by microalgae: technological trends, future prospects and challenges**. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **2019**, 35, 78. <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2650-9>.
- [18] Jaiswal, K.K.; Dutta, S.; Banerjee, I.; Pohrmen, C.B.; Kumar, V. **Photosynthetic microalgae–based carbon sequestration and generation of biomass in biorefinery approach for renewable biofuels for a cleaner environment**. *Biomass*

Conversion and Biorefinery, **2023**, 13, 7403–7421. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01504-y>.

[19] Singh, U.B.; Ahluwalia, A.S. Microalgae: a promising tool for carbon sequestration. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **2013**, 18, 73-95. <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9393-3>.

[20] D'Agaro, E., Gibertoni, P., Esposito, S. **Recent Trends and Economic Aspects in the Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Sector**. *Appl. Sci.*, **2022**, 12, e8773. <https://doi.org/10.3390/app12178773>.

[21] Bishop, W.M., Zubeck, H.M. **Evaluation of Microalgae for use as Nutraceuticals and Nutritional Supplements**. *Food Sci Nutr.*, **2012**, 2, p. 1–6. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000147>.

[22] Flachowsky, G., Meyer, U. **Challenges for Plant Breeders from the View of Animal Nutrition**. *Agriculture*, **2015**, 5, 1252–1276. <https://doi.org/10.3390/agriculture5041252>.

[23] Freitas, L.E.L., Rodrigues, A.P.O., Moro, G.V., Lundstedt, L.M. **Práticas para avaliação da qualidade física em rações para peixes**. Embrapa Fisheries and Aquaculture: Palmas, Brazil, 2016.

[24] Naylor, R.L., Hardy, R.W., Buschmann, A.H., Bush, S.R., Cao, L., Klinger, D.H., Little, D.C., Lubchenco, J., Shumway, S.E., Troell, M. **A 20-year retrospective review of global aquaculture**. *Nature*, **2021**, 591, 551-573. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03308-6>.

[25] Braga, M. **Análise de futuro dos ácidos carboxílicos de base biológica: uma abordagem semiquantitativa para o mapeamento tecnológico**. Thesis. Doctorate in Chemical and Biological Technologies, University of Brasília, Brasília, 2022.

[26] Anjos, S.S.N.D.; Nascimento Neto, J.O. **Avaliação do impacto de política de subvenção econômica na cadeia produtiva de biodiesel de babaçu**. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, **2021**, 14, Supl.1, e8348. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14Supl.1.e8348>.

[27] Fütting, P.; Barthel, L.; Cairns, T.C.; Briesen, H.; Schmideder, S. Filamentous fungal applications in biotechnology: a combined bibliometric and patentometric assessment. *Fungal Biology and Biotechnology*, **2021**, 8, 23. <https://doi.org/10.1186/s40694-021-00131-6>.

[28] Chang, K-C.; Chen, D-Z.; Huang, M-H. **The relationships between the patent performance and corporation performance**. *J. Informetr.*, **2012**, 6, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2011.09.001>.

[29] Miles, I., Saritas, O., Sokolov, A. **Foresight for Science, Technology and Innovation**. Springer International Publishing AG Switzerland, Cham, Switzerland, 2016.

[30] Zhu, D., Porter, A. L. **Automated extraction and visualization of information for technological intelligence and forecasting**. *Technol Forecast Soc Change*, **2002**, 69, 495-506. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(01\)00157-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(01)00157-3).

- [31] Chaudhuri, R., Chavan, G., Vadalkar, S., Vrontis, D., Pereira, V. **Two-decade bibliometric overview of publications in the Journal of Knowledge Management.** *J. Knowl. Manag.*, **2021**, 25, 1550-1574. <http://dx.doi.org/10.1108/JKM-07-2020-0571>.
- [32] **Globenewswire.** Available online: <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2021/09/01/2290179/0/en/Microalgae-Based-Products-Market-2-81Bn-by-2028-Growth-Forecast-at-7-9-CAGR-During-2021-to-2028-COVID-Impact-and-Global-Analysis-by-TheInsightPartners-com.html> (accessed on 15 May 2022).
- [33] **Fortune Business Insights.** Available online: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/aquafeed-market-100698> (accessed on 17 May 2022).
- [34] Greene, C. H.; Scott-Buechler, C. M. **Algal solutions: Transforming marine aquaculture from the bottom up for a sustainable future.** *PloS Biol.*, **2022**, 20, e3001824. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001824>.
- [35] Quintella, C.M., Cerqueira, G.S., Miyazaki, S.F., Hatimondi, S.A., Musse, A.P.S. **Captura de CO₂: mapeamento tecnológico da captura de CO₂ baseada em patentes e artigos.** EDUFBA: Salvador, Brazil, 2011.
- [36] Rumin, J.; Nicolau, E.; Oliveira Junior, R. G. de; Fuentes-Grünwald, C.; Picot, L. **Analysis of Scientific Research Driving Microalgae Market Opportunities in Europe.** *Mar. Drugs*, 2020, 18, e264. <https://doi.org/10.3390/md18050264>.
- [37] Viana, N.M., Santos, A.C., Anjos, S.S.N., Miranda, C.H.B. **Caracterização do mercado de betacaroteno a partir da microalga *Dunaliella* sp.** In: Encontro de Pesquisa e Inovação da Embrapa Agroenergia, Brasília, Brazil, 25 November 2020.
- [38] Enzing, C.; Ploeg, M.; Barbosa, M.; Sijtsma, L. **Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe.** Publications Office of the European Union: Luxembourg, Luxembourg, 2014. <http://dx.doi.org/10.2791/3339>.
- [39] Vigani, M. **The bioeconomy of microalgae-based processes and products.** In *Handbook of Microalgae-Based Processes and Products*; Jacob-Lopes, E., Maroneze, M.M., Queiroz, M.I., Zepka, L.Q, Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; 799-821. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04111-0>.
- [40] Hachicha, R., Elleuch, F., Hlima, H.B., Dubessay, P., De Baynast, H., Delattre, C., Pierre, G., Hachicha, R., Abdelkafi, S., Michaud, P., Fendri, I. **Biomolecules from Microalgae and Cyanobacteria: Applications and Market Survey.** *Appl. Sci.*, **2022**, 12, e1924. <https://doi.org/10.3390/app12041924>.
- [41] Cai, J.N., Yan, X., Leung, P.S. **Benchmarking species diversification in global aquaculture.** FAO: Rome, Italy, 2022. <https://doi.org/10.4060/cb8335en>.
- [42] Hedge, D., Luo, H. **Patent Publication and the Market for Ideas.** *Manage Sci*, **2018**, 64, 1-21. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2016.2622>.
- [43] Crona, B., Wassénus, E., Troell, M., Barclay, K., Fabinyi, M., Zhang, W., Lam, V.W.Y., Cao, L., Henriksson, P.J.G., Eriksson, H. **China at a Crossroads: An Analysis of Ch'na's Changing Seafood Production and Consumption.** *One Earth*, **2020**, 3, 32-44. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2016.2622>.

- [44] Zou, L., Huang, S. **Chinese aquaculture in light of green growth.** *Aquac. Rep.*, **2015**, 2, 46-49. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2015.07.001>.
- [45] Newton, R., Zhang, W., Xian, Z., McAdam, B., Little, D.C. **Intensification, regulation and diversification: The changing face of inland aquaculture in China.** *Ambio*, **2021**, 50, 1739-1756. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01503-3>.
- [46] Zambonino Infante J.L.; Cahu, C.L. Ontogeny of the gastrointestinal tract of marine fish larvae. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C*, **2001**, 130, 477-487. [https://doi.org/10.1016/S1532-0456\(01\)00274-5](https://doi.org/10.1016/S1532-0456(01)00274-5).
- [47] Ibrahim, A.N.A.F.; Noll, M.S.M.C.; Valenti, W.C. Zooplankton capturing by Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus* (Teleostei: Cichlidae) throughout post-larval development. *Zoologia*, **2015**, 6, 469-475. <http://dx.doi.org/10.1590/S1984-46702015000600006>.
- [48] Nevejan, N.; De Schryver, P.; Wille, M.; Dierckens, K.; Baruah, K.; Van Stappen, G. Bacteria as food in aquaculture: do they make a difference? *Reviews in Aquaculture*, **2018**, 10(1), 180-212. <https://doi.org/10.1111/raq.12155>.
- [49] Cahu, C.L.; Zambonino Infante, J.L.; Péres, A.; Quazuguel, P.; Le Gal, M.M. Algal addition in sea bass (*Dicentrarchus labrax*) larvae rearing: effect on digestive enzymes. *Aquaculture*, **1998**, 161, 479-489. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00295-0](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00295-0).
- [50] Rodríguez-Salvador, M., Rio-Belver, R.M., Garechana-Anacabe, G. **Scientometric and patentometric analyses to determine the knowledge landscape in innovative technologies: The case of 3D bioprinting.** *PloS One*, **2017**, 12, e0180375. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180375>.
- [51] Ma, M.; Hu, Q. Microalgae as feed sources and feed additives for sustainable aquaculture: Prospects and challenges. *Reviews in Aquaculture*. **2023**. Early view. <https://doi.org/10.1111/raq.12869>.
- [52] Borowitzka, M.A. **Microalgae for aquaculture: Opportunities and constraints.** *J. Appl. Phycol.*, **1997**, 9, 393–401. <https://doi.org/10.1023/A:1007921728300>.
- [53] Padrós, F.; Caggiano, M.; Toffan, A.; Contenla, M.; Zarza, C. Ciulli, S. Integrated Management Strategies for Viral Nervous Necrosis (VNN) Disease Control in Marine Fish Farming in the Mediterranean. *Pathogens*, **2022**, 11(3), 330. <https://doi.org/10.3390/pathogens11030330>.
- [54] Cooper, R.G. **Stage-gate systems: A new tool for managing new products.** *Bus Horiz*, **1990**, 33, 44-54. [https://doi.org/10.1016/0007-6813\(90\)90040-I](https://doi.org/10.1016/0007-6813(90)90040-I).
- [55] Salerno, M.S.; Gomes, L.A.V., Silva, D.O., Bagno, R.B., Freitas, S.L.T.U. **Innovation processes: Which process for which project?** *Technovation*, **2015**, 35, 59-70. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2014.07.012>.
- [56] Franken, R., Heringa, M.B., Oosterwijk, T., Dal Maso, M., Fransman, W., Kanerva, T., Liguori, B., Poikkimäki, M., Rodriguez-Llopi, I., Säämänen, A., Stockmann-Juvala, H., Suarez-Merino, B., Jensen, K.A., Stierum, R. **Ranking of human risk assessment models for manufactured nanomaterials along the Cooper stage-gate innovation funnel using stakeholder criteria.** *NanoImpact*, **2020**, 17, e100191. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2019.100191>.

- [57] Loganathan, B.G., Orsat, V., Lefsrud, M. **Valuable bioproducts obtained from microalgal biomass and their commercial applications: A review.** *Environ. Eng. Res.*, **2018**, 23, 229-241. <https://doi.org/10.4491/eer.2017.220>.
- [58] Cottrell, R.S.; Blanchard, J.L.; Halpern, B.S.; Metian, M.; Froehlich, H.E. Global adoption of novel aquaculture feeds could substantially reduce forage fish demand by 2030. *Nature Food*, **2020**, 1, 301-308. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0078-x>.
- [59] Nunes, A.J.P., Masagounder, K. **Optimal Levels of Fish Meal and Methionine in Diets for Juvenile *Litopenaeus vannamei* to Support Maximum Growth Performance with Economic Efficiency.** *Animals*, **2023**, 13, e20. <https://doi.org/10.3390/ani13010020>.
- [60] **Fortune Business Insights.** Available online: <https://www.fortunebusinessinsights.com/shrimp-market-106303> (accessed on 21 January 2023).
- [61] Teixeira, P.B. **Fisiologia digestiva e dieta peletizada para engorda do polvo *Octopus vulgaris* tipo II.** Thesis. Doctorate in Aquaculture, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- [62] Casalini, A., Roncarati, A., Emmanuele, P., Guercilena, N., Bonaldo, A., Parma, L., Mordenti, O. **Evaluation of reproductive performances of the common octopus (*Octopus vulgaris*) reared in water recirculation systems and fed different diets.** *Sci. Rep.*, **2020**, 10, e15261. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72151-y>.
- [63] Paulo, M.C., Cardoso, C., Coutinho, J., Castanho, S., Bandarra, N.M. **Microalgal solutions in the cultivation of rotifers and artemia: scope for the modulation of the fatty acid profile.** *Heliyon*, **2020**, 6, e05415. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05415>.
- [64] Yaakob, Z., Ali, E., Zainal, A., Mohamad, M., Takriff, M.S. **An overview: biomolecules from microalgae for animal feed and aquaculture.** *J Biol Res (Thessalon)*, **2014**, 21, e6. <https://doi.org/10.1186/2241-5793-21-6>.
- [65] Kus-Yamashita, M. M. M.; Mancini Filho, J. M. **Considerations on the role of omega-3 polyunsaturated fatty acids in the COVID 19 epidemic.** *Braz. J. Hea. Rev.*, **2022**, 5, 8655-8673. <https://doi.org/10.34119/bjhrv5n3-053>.
- [66] Kousoulaki, K., Mørkøre, T., Nengas, I., Berge, R.K., Sweetman, J. **Microalgae and organic minerals enhance lipid retention efficiency and fillet quality in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.).** *Aquaculture*, **2016**, 451, 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.08.027>.
- [67] Samuelsen, T. A.; Oterhals, Å; Kousoulaki, A. **High lipid microalgae (*Schizochytrium* sp.) inclusion as a sustainable source of n-3 long-chain PUFA in fish feed — Effects on the extrusion process and physical pellet quality.** *Anim. Feed Sci. Technol.*, **2018**, 236, 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.11.020>.
- [68] Ma, W., Liu, M., Xu, Y., Huang, P., Guo, D., Sun, X., Huang, X. **Efficient co-production of EPA and DHA by *Schizochytrium* sp. via regulation of the**

polyketide synthase pathway. *Commun. Biol.*, **2022**, *5*, e1356. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-04334-4>.

[69] **Clarivate Analytics.** Available online: https://images.webofknowledge.com/images/help/WOS/hp_research_areas_easca.html (accessed on 1 January 2023).

[70] Bongiorno, T.; Foglio, L.; Proietti, L.; Vasconi, M.; Lopez, A.; Pizzera, A.; Carminati, D.; Tava, A.; Vizcaíno, A. J.; Alarcón, F. J.; Ficara, E.; Parati, K. **Microalgae from Biorefinery as Potential Protein Source for Siberian Sturgeon (*A. baeri*) Aquafeed.** *Sustainability*, **2020**, *12*, e8779. <http://dx.doi.org/10.3390/su12218779>.

CAPÍTULO 3: Estudo prospectivo sobre biomassa algal: identificação de oportunidades para fortalecimento da bioeconomia brasileira.

Artigo publicado: ANJOS, S. S. N. dos; VIANA, N. M.; MENDONÇA, S.; JUNGSMANN, L.; 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, n. 4, p. 10–28, 2024. DOI: 10.21664/2238-8869.2024v13i4.p10-28.

RESUMO

As microalgas e as cianobactérias são versáteis para diversos segmentos industriais, sendo insumos importantes para o fortalecimento da bioeconomia e para garantir a sustentabilidade de processos agroindustriais ao promover o uso racional do capital natural. A grande diversidade de mercados que podem ser contemplados pela exploração de microalgas e cianobactérias sinaliza a necessidade de investigar aspectos positivos e negativos do mercado brasileiro para impulsionar o mercado. O objetivo deste trabalho foi, pela aplicação do método Delphi de consulta a especialistas, identificar oportunidades científicas e tecnológicas para exploração de microalgas e cianobactérias no Brasil nos próximos dez anos. Segundo os especialistas consultados, os gêneros de maior destaque são *Arthrospira* sp., *Chlorella* sp., e *Dunaliella* sp. para os mercados farmacêutico/cosmético e de alimentação e suplementação animal. O Brasil tem grande potencial para se destacar no mercado de microalgas e cianobactérias, conforme já existe para outros microrganismos. No entanto, há empecilhos para explorar o potencial industrial das microalgas e cianobactérias para incluir o Brasil no mercado internacional a preços competitivos, dentre eles a baixa disponibilidade de recursos financeiros para investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação e a escassez de profissionais para escalonamento de cultivo para oferta de biomassa.

Termos para indexação: prospecção tecnológica; microalgas; cianobactérias

Prospective study on algal biomass: identification of opportunities to strengthen the Brazilian bioeconomy.

ABSTRACT

Microalgae and cyanobacteria are versatile for various industrial segments and are important inputs for strengthening the bioeconomy and ensuring the sustainability of agroindustrial processes by promoting the rational use of natural capital. The wide range of markets that can be covered by the exploration of microalgae and cyanobacteria indicates the need to investigate positive and negative aspects of the Brazilian market in order to boost the market. The objective of this study was to identify scientific and technological opportunities for the exploration of microalgae and cyanobacteria in Brazil over the next ten years by applying the Delphi method of

consulting experts. According to the experts consulted, the most prominent genera are *Arthrospira* sp., *Chlorella* sp., and *Dunaliella* sp. for the pharmaceutical/cosmetic and animal feed and supplement markets. Brazil has great potential to stand out in the microalgae and cyanobacteria market, as it already does for other microorganisms. However, there are obstacles to exploring the industrial potential of microalgae and cyanobacteria to include Brazil in the international market at competitive prices, including the low availability of financial resources for investments in research, development and innovation and the shortage of professionals to scale up cultivation to supply biomass. Index terms: technological prospection; microalgae; cyanobacteria.

INTRODUÇÃO

A biodiversidade e os serviços ecossistêmicos, considerados ativos estratégicos, estão diretamente relacionados a ações para coibir a degradação ambiental e, ao mesmo tempo, promover o crescimento econômico e atender demandas da sociedade como segurança alimentar e lazer. Segundo Gois et al. (2022), a associação entre a biodiversidade e a economia, também chamado de bioeconomia, não é um conceito recente, mas ganhou novos contornos a partir do entendimento de que os sistemas econômicos são dependentes do capital natural, de forma direta ou indireta.

A utilização racional da biodiversidade tem promovido o Brasil como um país estratégico para o desenvolvimento e o fortalecimento da sua bioeconomia, por meio de estratégias *Environmental, Social, Governance* (ESG) e em apoio ao cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Pärli & Fischer 2020; Gois et al. 2022). Bueno e Torres (2022) complementam a questão ao conectar a bioeconomia como novo paradigma para apoiar crises econômicas alinhada a questões ambientais como a mitigação do aquecimento global e a garantia à segurança alimentar e energética, não só no Brasil como em todos os outros países.

O conceito atual de bioeconomia está intimamente relacionado ao de biotecnologia, que se resume ao uso de organismos biológicos para desenvolvimento de produtos, processos e serviços em benefício da sociedade e que tem caráter multidisciplinar com grande leque de oportunidades (Andrade 2017; Anjos 2020). Com isso, abrem-se novas frentes de estudos científicos, desenvolvimento tecnológico e mercados pela materialização do novo paradigma de uso de recursos biológicos renováveis (Silva et al. 2018).

Microalgas e cianobactérias são microrganismos presentes em quase todos os ecossistemas, são versáteis e cultiváveis em diferentes meios e condições experimentais ou ambientais. Têm grande importância ecológica ao converterem CO₂ e água em O₂, posteriormente liberado na atmosfera, e uma eficiência expressiva de fotoconversão, incluindo em terras não aráveis e que sejam competitivos em processos de biorrefinarias (Hariskos & Posten 2014; Show 2022). As microalgas e cianobactérias produzem metabólitos de importância econômica como carotenóides,

vitaminas, polissacarídeos e ácidos graxos poliinsaturados. Também têm teores diversificados de carboidratos, lipídeos e proteínas que são alternativas a diversos segmentos industriais como alimentação animal, alimentação humana, biopolímeros, biofertilizantes, cosméticos, medicamentos, biogás e hidrogênio renovável, e serviços como remediação de águas residuais e monitoramento ambiental (Rumin et al. 2020; Silva et al. 2020; Show 2022).

Visando aproveitar o potencial da biodiversidade brasileira para reduzir a dependência dos produtores rurais em relação a insumos importados e ampliar oferta de matéria-prima para setor, o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) lançou, por meio do Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020, o Programa Nacional de Bioinsumos. Este programa estimula a execução de ações que promovam o desenvolvimento tecnológico de insumos agropecuários ambientalmente sustentáveis e a partir de matérias-primas renováveis, levando em conta as dimensões econômicas, sociais e produtivas (MAPA, 2020), com a possibilidade de diversificar as matérias-primas, atender as demandas do mercado e fortalecer a competitividade no setor (Scur & Queiroz 2017).

A versatilidade das microalgas e das cianobactérias as tornam insumos importantes para o fortalecimento da bioeconomia para garantir a sustentabilidade de processos industriais e promover o uso racional do capital natural (Acién et al. 2018; Show 2022), fortalecendo o mercado de bioinsumos, em expansão no Brasil. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi identificar oportunidades científicas e tecnológicas para microalgas e cianobactérias no Brasil nos próximos dez anos a partir da consulta a especialistas usando o método Delphi.

MATERIAIS E MÉTODOS

Executou-se um semiquantitativo e exploratório usando o método Delphi para consultar especialistas sobre tendências de futuro para Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) para microalgas e cianobactérias num horizonte temporal de dez anos. Esse método permite explorar oportunidades futuras para busca de consenso a partir do julgamento de especialistas geograficamente dispersos a partir de um questionário, cujo risco de eventual descontinuidade de informações não impede a avaliação qualiquantitativa dos dados, com a vantagem de incluir dados históricos e contemplar a expertise dos especialistas selecionados (Popper 2008; Borschiver & Silva 2016; Miles et al. 2016).

O público-alvo deste estudo foram pesquisadores de qualquer nacionalidade que atuam em instituições brasileiras, públicas ou privadas, e pesquisadores brasileiros lotados em instituições internacionais,. Partindo dessa premissa, a seleção dos participantes iniciou-se em 24 de março de 2021 e ocorreu concomitantemente de três formas para levantamento da maior quantidade possível de especialistas sem a exigência metodológica de amostra mínima, conforme instrui Miles et al. (2016): busca de currículos na plataforma Lattes/CNPq, levantamento de publicações

brasileiras na plataforma *Web of Science* (WoS) e busca de empresas e profissionais atuantes na área privada.

A busca na plataforma Lattes CNPq usou a estratégia de busca “*TOPIC: "microalga*" OR "cianobacteri*" OR "cyanobacteri*" NOT TOPIC: "macroalga*"*”. A busca de especialistas na base WoS usou como estratégia de busca “*TS=(microalga* OR c?anobacteri*)*”, refinado para o Brasil e no escopo temporal de 2011 a 2021. Os autores foram ranqueados em ordem decrescente de quantidade de publicações, sem mineração dos dados e análise individual de cada pesquisador pelos seus currículos na plataforma Lattes/CNPq. A busca de especialistas no setor privado foi feita por consultas *online* na plataforma *LinkedIn*.

A consolidação dos selecionados resultou em uma lista dividida em duas áreas: “Público e Academia” (universidades e institutos de pesquisa e desenvolvimento, públicos e privados); e “Privado” (empresas privadas). Chegou-se a 218 especialistas, sendo 189 do “Público e Academia” e 29 do “Privado”, com concentração nas regiões Sul (39,0%) e Sudeste (36,2%), além de pesquisadores brasileiros na Arábia Saudita, na Bélgica e na Costa Rica.

O questionário foi construído com nove questões para julgamento dos especialistas sobre mercados e produtos, processos de colheita e de cultivo e desafios, oportunidades e cenários, além de questões abertas. Ao final de cada questão objetiva, foi incluído um campo aberto de preenchimento opcional para que os participantes incluíssem comentários adicionais. O questionário foi enviado por meio eletrônico aos especialistas em 29/08/2022, reiterado duas vezes (15/09/2022 e 21/10/2022) e finalizado em 03/11/2022.

Na seção “Mercados e Produtos”, os especialistas responderam duas questões de múltipla escolha para apontar os mercados que julgam potenciais e os gêneros mais promissores para os mercados apontados. Assim, os mercados listados na pesquisa foram: alimentação e suplementação humana; alimentação e suplementação animal; farmacêutico e cosmético; bioinsumos para agricultura; bioinsumos para outras indústrias; biocombustíveis; química verde; e serviços ambientais. Assim, o uso industrial de microalgas e cianobactérias avaliado neste estudo se enquadra no ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 3 (Saúde e Bem-estar), ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 14 (Vida na Água) e ODS 15 (Vida Terrestre).

Ainda na seção “Mercados e Produtos”, os gêneros avaliados foram os mais citados em estudos como Rumin et al. (2020) e Schultz et al. (2021): *Anabaena* sp., *Arthrospira* sp., *Botryococcus* sp., *Chaetoceros* sp., *Chlamydomonas* sp., *Chlorella* sp., *Calothrix* sp., *Chlorococcum* sp., *Desmodesmus* sp., *Dunaliella* sp., *Euglena* sp., *Haematococcus* sp., *Isochrysis* sp., *Microcystis* sp., *Nannochloropsis* sp., *Nostoc* sp.,

Pavlova sp., *Phaeodactylum* sp., *Scenedesmus* sp., *Schizochytrium* sp., *Skeletonema* sp., *Synechocystis* sp., *Tetraselmis* sp. e *Thalassiosira* sp..

Na seção “Processos de Colheita e de Cultivo”, os especialistas responderam duas questões de múltipla escolha para apontar, no escopo dos mercados apontados na seção anterior, quais os processos de cultivo e de colheita de microalgas e cianobactérias mais promissores, considerando o cenário brasileiro no horizonte temporal de 10 anos. As questões foram respondidas usando uma escala Likert de 5 pontos, sendo nota 1 (não é promissor), 2 (pouco promissor), 3 (parcialmente promissor), 4 (promissor) e 5 (altamente promissor).

As questões da seção “Desafios, Oportunidades e Cenários” foram respondidas usando uma escala Likert de 5 pontos, sendo notas 1 (não importante ou não estratégico), 2 (pouco importante ou pouco estratégico), 3 (importante ou estratégico), 4 (mais importante ou mais estratégico) e 5 (extremamente importante ou extremamente estratégico). A escala foi aplicada para avaliar o macroambiente do tema em estudo usando a ferramenta PESTEL e desafios e oportunidades científicos e tecnológicos delineados a partir de brainstorming dos autores deste estudo. Nas duas seções foram incluídos campos abertos para inclusão opcional de observações e apontamentos dos especialistas.

A ferramenta PESTEL combina questões políticas, ambientais, sociais, tecnológicas, econômicas e legais para, a partir de uma abordagem multifacetada, promover a análise do ambiente externo da empresa, ou do tema de pesquisa, no caso deste estudo. Seus resultados são importantes na geração de *inputs* para orientação estratégica, alinhamento de objetivo e metas, além de se tornarem um apoio à tomada de decisões (Song et al. 2017).

As notas dadas às questões das seções “Processos de Colheita e de Cultivo” e “Desafios, Oportunidades e Cenários” foram tabuladas em planilha eletrônica. Inicialmente, as respostas “Não sei opinar” foram excluídas da análise. Posteriormente, a partir da 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.

A praxe do método Delphi é a realização de mais de um ciclo de avaliação, mas Gordon e Pease (2006) destacam que o método não se limita a mais de uma rodada, a depender dos objetivos do estudo e do público-alvo dos resultados. Marques e Freitas (2018) assinalam que não há na literatura científica padrões de corte para atestar a convergência de informações, já que cada pesquisa tem suas especificidades e o maior valor gerado pela aplicação do método Delphi é o conjunto de ideias e *insights* para as próximas etapas de um projeto (Gordon & Pease 2006). Assim, optou-se por realizar apenas uma rodada e sem a adoção de corte de convergência das respostas. Tal decisão se deu pelo caráter exploratório deste estudo e para melhor interpretação dos dados diante do potencial econômico das microalgas

e cianobactérias destacadas por outras publicações da Embrapa como Schultz et al. (2021) e Viana et al. (2020).

Por fim, a seção “Finalização” consistiu em duas perguntas abertas para que os especialistas apontassem, segundo sua expertise, oportunidades e gargalos para o protagonismo do Brasil na produção e aplicação industrial de microalgas e cianobactérias. As respostas foram compiladas em uma matriz SWOT, sigla em inglês para *strengths*, *weaknesses*, *opportunities* e *threats*, ou forças, fraquezas, oportunidades e ameaças). Essa matriz apresenta as análises dos ambientes externo (oportunidades e ameaças) e interno (forças e fraquezas) de um tema a partir de dados primários ou secundários. O resultado é uma estratificação do cenário atual do tema em estudo e apresenta elementos que comporão o planejamento estratégico de uma linha de pesquisa ou de uma organização, como é o caso deste estudo, para aprovação e execução de projetos para obter produtos ou serviços competitivos para mercados-alvo (Santos et al. 2018).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dos 218 especialistas convidados, 31 aceitaram participar da pesquisa (28 do segmento público/academia e três do setor privado), correspondendo a 14,2% do total. Miles et al. (2016) assinala que não há uma porcentagem mínima de respostas a um Delphi, que depende de fatores como a quantidade de especialistas levantados, perfil do tema de estudo, países/regiões ou mecanismo de coleta de respostas (presenciais ou eletrônicas). Um exemplo similar a este artigo é apresentado no estudo de Haven et al. (2020), que obteve 16% de retorno de um total de 295 especialistas contatados. O perfil acadêmico dos respondentes é composto por profissionais de áreas complementares e transversais entre si: Biotecnologia, Ciências Farmacêuticas, Química, Oceanologia, Engenharias (Agrônoma, de Alimentos, de Pesca, Química), Medicina Veterinária e tecnólogos em Alimentos e em Saneamento Ambiental).

Rumin et al. (2020) e Vieira et al. (2022) apontaram que as microalgas e cianobactérias têm um amplo espectro de aplicações industriais em potencial, como farmacêutico, cosmético, nutracêutico, alimentação animal e humana, bioinsumos, biocombustíveis, biopolímeros, tratamento de águas residuais ou poluídas e mitigação de gases de efeito estufa, com destaque para CO₂. Os respondentes iniciaram o Delphi informando na seção “Mercados e Produtos” os mercados e gêneros taxonômicos que julgaram promissores. Os mercados foram: alimentação humana e animal; farmacêutico e cosmético; e bioinsumos para agricultura. Os gêneros taxonômicos de microalgas e cianobactérias mais promissores segundo os especialistas são: microalgas *Chlorella* sp. e *Dunaliella* sp. e cianobactéria *Arthrospira* sp. As respostas compiladas de cada questão da seção “Mercados e Produtos” foram consolidadas em uma matriz de co-ocorrência e, posteriormente, plotados em um gráfico de barras empilhadas (Gráfico 1).

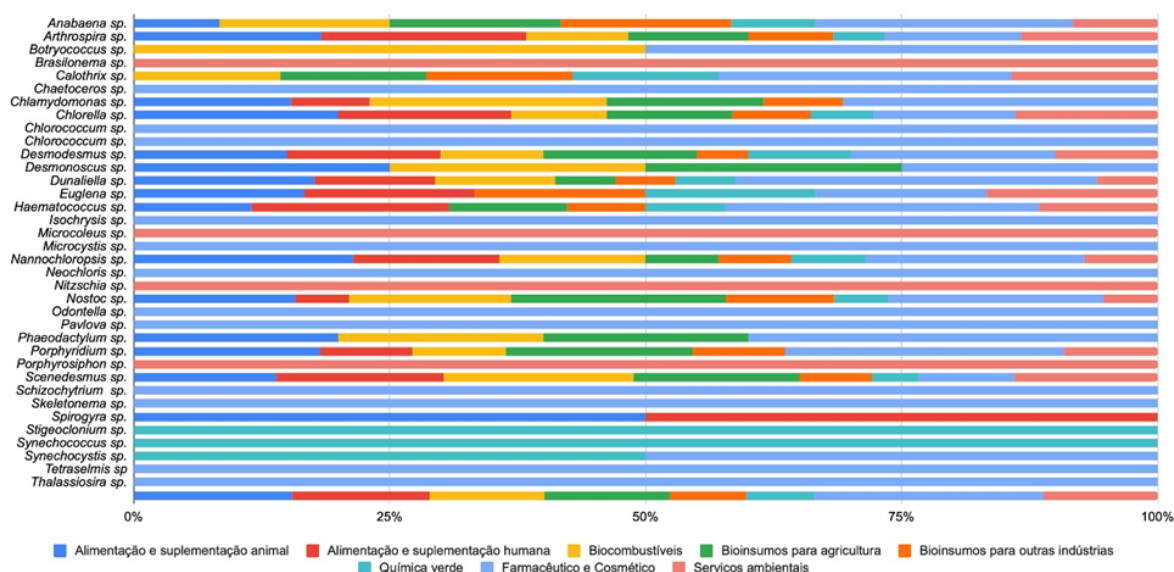


Gráfico 1: Gráfico de barras empilhadas de co-ocorrência dos gêneros taxonômicos de microalgas e cianobactérias com os mercados analisados, segundo os especialistas

Os gêneros de maior destaque e indicações dos especialistas em todos os oito mercados avaliados são: *Arthrospira* sp., *Chlorella* sp., *Desmodesmus* sp., *Dunaliella* sp., *Haematococcus* sp., *Nostoc* sp. e *Scenedesmus* sp.. Destas, *Chlorella* sp., *Dunaliella* sp., *Arthrospira* sp., *Haematococcus* sp. e *Nannochloropsis* sp. são as principais microalgas produzidas no mundo, com produtividade de 50 mil toneladas por ano (Vieira et al. 2022). Foram discutidos abaixo os gêneros apontados no Gráfico 1 e conectados com os mercados considerados promissores pelos especialistas (alimentação humana e animal; e farmacêutico e cosmético).

Chlorella sp. e *Arthrospira* sp. destacam-se pelo seu alto teor de proteínas, aminoácidos essenciais e ácidos graxos poliinsaturados e por já serem aprovados para consumo nos EUA e na União Europeia pelas respectivas agências reguladoras (FDA – *Food and Drug Administration* e EFSA – *European Food Safety Authority*). *Dunaliella* sp. tem grande peso pelo seu alto teor de carotenóides, principalmente betacaroteno pelas suas propriedades antioxidantes, corantes, cosméticas e nutracêuticas (Molino et al. 2018).

Os especialistas consultados indicaram outros gêneros promissores: *Desmodesmus* sp., *Nostoc* sp. e *Scenedesmus* sp. Rumin et al. (2020) indicam a relevância científica recente de *Nostoc* sp. para produção de poli-hidroxicanoatos e de substâncias antioxidantes e de proteção contra raios UV em cosméticos. Já o estudo de Molino et al. (2018) indicou que a biomassa seca de *Scenedesmus almeriensis* contém alta quantidade de ácido palmítico, ácido oleico e ácido gama-linoleico, todos com propriedades nutracêuticas. *Desmodesmus* sp. é uma fonte importante de proteínas e de indicadores de biodisponibilidade proteica (alto valor

biológico, coeficiente de digestibilidade, aproveitamento líquido de proteína e razão de eficiência proteica), além de ser resistente a condições desfavoráveis de cultivo. Com isso, *Desmodesmus* sp. se torna apta para cultivo em larga escala e em tanques abertos e de grande potencial para uso em sistemas de biorrefinarias (Radkova et al. 2019; Ferreira et al. 2021).

O potencial de microalgas e cianobactérias para o segmento farmacêutico é estudado desde os anos 1950 com a extração e purificação de moléculas e posterior avaliação *in vitro*. As microalgas e as cianobactérias são ativos biotecnológicos de elevado grau inovador para produção de moléculas de alto valor agregado para os segmentos farmacêutico e cosmético, como proteínas recombinantes, polissacarídeos, lipídeos e corantes, mas ainda em escala de bancada (*in vitro*) (Rumin et al. 2020). Já foram avaliados moléculas provenientes de biomassa algal com ação antimicrobiana como bromofenóis, terpenóides e cianotoxinas (nodularina, saxitoxina, ácido ocadaico); ação antineoplásica, como as cianotoxinas citoficina e acutificina para tratamento de carcinoma nasofaríngeo e acutificina para tratamento de carcinoma de Lewis (pulmonar) (Borowitzka, 1995). Assim, Estes dados ratificam o apontamento dos respondentes sobre os mercados farmacêutico e cosmético, com maior incidência na co-ocorrência e indicação de gêneros apenas para esses segmentos: *Chaetoceros* sp., *Chlorococcum* sp., *Isochrysis* sp., *Microcystis* sp., *Neochloris* sp., *Odontella* sp., *Pavlova* sp., *Schizochytrium* sp., *Skeletonema* sp., *Tetraselmis* sp. e *Thalassiosira* sp..

O segundo mercado com maior incidência na co-ocorrência é o de alimentação e suplementação animal, com destaque para *Chlorella* sp., já apontado por Schultz et al. (2021), com destaque também para *Arthrospira* sp., *Scenedesmus* sp. segundo os respondentes. Avaliações nutricionais e toxicológicas demonstraram a adequação da biomassa de microalgas e cianobactérias como componente de ração animal ou substituto de fontes proteicas usuais do mercado, como biomassa de *Arthrospira platensis* para substituir pólen para abelhas melíferas (Ricigliano & Simone-Finstrom 2020). O segmento pecuário de destaque é a aquicultura (Molino et al. 2018; Rumin et al. 2020), já indicado pelos especialistas na primeira seção do Delphi.

Na seção de processos de colheita e de cultivo, os respondentes avaliaram as opções listadas de processos de colheita e de cultivo de microalgas e cianobactérias no cenário brasileiro no horizonte temporal de 10 anos para atender os mercados apontados na primeira questão da primeira seção. Usou-se a escala Likert de 5 pontos para classificar cada opção entre as notas 1 (não é promissor), 2 (pouco promissor), 3 (parcialmente promissor), 4 (promissor) a 5 (altamente promissor). Os dados obtidos foram tratados conforme descrito em “Materiais e Métodos”. Os dados estão apresentados a seguir em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas “5”.

Para os mercados selecionados pelos respondentes, há convergência de processos de cultivo tanque *raceway*, fotobiorreator tubular, fotobiorreator *airlift*, sistemas híbridos, fermentadores e fotobiorreator de placas planas como altamente

promissores, a depender da espécie-alvo, do bioproduto de interesse e respectivo mercado e do custo-benefício (Tabela 1). Um dos especialistas apontou que os fotobiorreatores *airlift* são muito propensos a causar cisalhamento e rompimento celular.

Em sentido contrário, o processo de cultivo de lagoas abertas teve convergência para a nota 2 na escala Likert (pouco promissor) e alta dispersão nas outras opções de resposta (Tabela 1). Lagoas abertas, apesar de terem menor custo de construção, não utilizam terras agricultáveis, são de fácil manutenção e têm baixo gasto energético, são facilmente contamináveis, têm baixa produtividade de biomassa e se aplicam a poucas espécies (Sarma et al. 2021). Assim, suscita-se que lagoas abertas produzam biomassa inadequada para atender os mercados avaliados neste estudo, que exigem maior pureza e pouca contaminação para o posterior processamento industrial a custos competitivos.

Tabela 1: Processos de cultivo em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas “5”

Processo de cultivo	5 (altamente promissor)	4 (promissor)	3 (parcialmente promissor)	2 (pouco promissor)	1 (não é promissor)
Tanque <i>raceway</i>	74,1%	11,1%	0,0%	7,4%	7,4%
Fotobiorreator tubular	56,7%	20,0%	13,3%	3,3%	6,7%
Fotobiorreator <i>airlift</i>	51,9%	18,5%	18,5%	3,7%	7,4%
Sistemas híbridos	42,9%	28,6%	14,3%	10,7%	3,6%
Fermentadores	34,5%	20,7%	17,2%	10,3%	17,2%
Fotobiorreator de placas planas	33,3%	25,9%	22,2%	7,4%	11,1%
Lagoas abertas	20,0%	20,0%	20,0%	26,7%	13,3%

Os sistemas de colheita de centrifugação, floculação e floculação-flotação têm maiores porcentagem de convergência para “altamente promissor”, segundo os respondentes para os mercados em análise. Numa perspectiva contrária, o sistema de colheita por filtração natural apresentou maior convergência para “não é promissor” (Tabela 2).

Tabela 2: Processos de colheita em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas “5”

Processos de colheita	5 (altamente promissor)	4 (promissor)	3 (parcialmente promissor)	2 (pouco promissor)	1 (não é promissor)
Centrifugação	50,0%	20,0%	10,0%	10,0%	10,0%

Floculação	40,7%	14,8%	29,6%	7,4%	11,1%
Floculação-Flotação	40,7%	22,2%	29,6%	3,7%	3,7%
Flotação com coagulantes	37,0%	14,8%	37,0%	11,1%	0,0%
Eletrofloculação	26,1%	30,4%	8,7%	30,4%	4,3%
Sedimentação Gravitacional	22,2%	11,1%	25,9%	18,5%	22,2%
Filtração natural	17,9%	21,4%	17,9%	17,9%	25,0%
Filtração sob pressão	15,4%	23,1%	26,9%	15,4%	19,2%
Eletrocoagulação	9,1%	27,3%	27,3%	31,8%	4,5%

Centrifugação é um método rápido, com alta eficiência na colheita e adequada a todas as espécies de microalgas e cianobactérias e é mais vantajoso para obtenção de produtos de maior valor agregado, mas tem alto custo de operação, até US\$ 13,20 por litro e pode gerar a lise celular a velocidades altas de rotação (Shen et al. 2009; Barros et al. 2015; Sarma et al. 2021). Já a floculação tem baixo custo de operação, US\$ 2,64 por litro e, pela alta disponibilidade de diversos tipos de floculantes no mercado, pode diminuir ainda mais seus custos. No entanto, uma especialista consultada nesta pesquisa ressaltou que a floculação envolve a inclusão de um produto extra no processo de colheita que pode conter metais que exigem a posterior remoção e ainda correr o risco de a microalga absorver tais metais (Lu et al. 2023)

A tecnologia de filtração tem alta eficiência na colheita (até 90%) e na separação de biomassa de mais de uma espécie de microalga ou cianobactéria, tem baixo custo de operação (até US\$ 5,28 por litro), mas é mais adequada a espécimes com tamanho celular maior, como os dos gêneros *Chroococcidiopsis* sp. e *Cyanothece* sp. (Shen et al. 2009; Barros et al. 2015; Graham et al. 2016). Métodos em que processos elétricos como eletrofloculação e eletrocoagulação, indicados pelos especialistas como pouco promissores, podem ser usados para diversas espécies, mas são métodos de alto custo e pouco disseminados no mercado (Barros et al. 2015). Os mesmos autores apontam que a sedimentação gravitacional tem baixo custo, mas exige tempo alto para seu uso e, com isso, ter o risco de deterioração da biomassa.

Outro especialista frisou que a escolha do sistema de colheita depende da espécie, do recurso disponível e dos produtos-alvo do produtor. Tal afirmação é corroborada por Barros et al. (2015), que frisam que os sistemas de colheita representam até 30% do custo de cultivo de microalgas e cianobactérias e que ainda não há soluções tecnológicas robustas e ambientalmente sustentáveis que sejam economicamente viáveis. Assim, suscita-se que a grande variação nas respostas

sobre processos de cultivo e de colheita permite inferir que o mercado de microalgas e cianobactérias ainda tem campo para execução de atividades científicas com foco em desenvolvimento tecnológico.

Na seção de desafios e oportunidades, os respondentes avaliaram as opções listadas de desafios e oportunidades científicos e tecnológicos para aproveitamento de microalgas e cianobactérias no cenário brasileiro no horizonte temporal de dez anos para atender os mercados apontados na primeira questão da seção anterior. A Tabela 3 apresenta cada opção de desafios e oportunidades em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas “5”, a partir da escala Likert de 5 pontos para classificar cada opção entre as notas 1 (não importante), 2 (pouco importante), 3 (importante), 4 (mais importante) e 5 (extremamente importante). Em seguida, os dados foram tratados conforme descrito em “Materiais e Métodos”.

Tabela 3: Desafios e oportunidades em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas “5”

Critério	5 (extremamente importante)	4 (mais importante)	3 (importante)	2 (pouco importante)	1 (não importante)
Estabilidade no suprimento de biomassa de microalgas e cianobactérias para aplicação industrial	71,0%	22,6%	0,0%	3,2%	3,2%
Capacitação de mão de obra em tecnologias de cultivo e processamento da biomassa de microalgas e cianobactérias	71,0%	19,4%	3,2%	6,5%	0,0%
Incentivos legais e/ou fiscais à adoção de tecnologias baseadas em microalgas e cianobactérias pela iniciativa privada e pelo terceiro setor	70,4%	25,9%	3,7%	0,0%	0,0%
Desenvolvimento de programas para indução científica e tecnológica para viabilização das tecnologias baseadas em microalgas e cianobactérias	69,0%	17,2%	6,9%	3,4%	3,4%
Uso de microalgas e cianobactérias como fontes de produtos de alto valor agregado (carotenóides, PUFA's, polímeros etc.)	67,9%	21,4%	7,1%	3,6%	0,0%
Desenvolvimento tecnológico e expansão de cadeias produtivas e de suprimentos	67,7%	22,6%	6,5%	3,2%	0,0%
Escalonamento de processos de cultivo	66,7%	16,7%	16,7%	0,0%	0,0%

Viabilização de sistemas de produção para fornecimento de biomassa algal no mercado nacional	64,5%	32,3%	3,2%	0,0%	0,0%
Aproveitamento de coprodutos e resíduos algais para integração de processos produtivos em conceito de biorrefinarias	64,3%	28,6%	3,6%	3,6%	0,0%
Reuso de águas poluídas, contaminadas ou residuais de outros processos agroindustriais (vinhaça, manipueira, POME, chula etc.) no cultivo de microalgas e cianobactérias	62,1%	20,7%	10,3%	3,4%	3,4%
Desenvolvimento de pesquisas para substituição de matérias-primas não renováveis (petroquímicos) por biomassa de microalgas e cianobactérias	60,0%	20,0%	13,3%	3,3%	3,3%
Construção de Análises de Ciclo de Vida de processos utilizando microalgas e cianobactérias, para subsidiar entrada no mercado de carbono	57,7%	15,4%	19,2%	3,8%	3,8%
Uso de microalgas e cianobactérias na biofixação e mitigação de CO ₂ visando a redução da concentração na atmosfera	57,1%	25,0%	10,7%	3,6%	3,6%
Uso de ferramentas “ômicas” (genômica, transcriptômica, proteômica, metabolômica e lipidômica) no melhoramento genético e no desenvolvimento de cepas promissoras para os diferentes mercados	53,6%	21,4%	17,9%	0,0%	7,1%
Uso de ferramentas de edição gênica no melhoramento genético e no desenvolvimento de cepas promissoras para aproveitamento industrial	53,6%	17,9%	25,0%	0,0%	3,6%
Uso de microalgas e cianobactérias geneticamente modificadas como biofábricas para produção heteróloga de enzimas e outras proteínas	37,0%	25,9%	29,6%	3,7%	3,7%

Em seguida, os respondentes avaliaram indicadores macroambientais (tópicos políticos, ambientais, sociais, tecnológicos, econômicos e legais) que impactam nas tendências de futuro para PD&I de microalgas e cianobactérias num horizonte temporal de 10 anos no Brasil. A Tabela 4 apresenta cada tópico avaliado e listado em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas “5” numa escala Likert de 5 pontos, com notas 1 (não estratégico), 2 (pouco estratégico), 3 (estratégico), 4 (mais estratégico) ou 5 (extremamente estratégico).

Tabela 4: Respostas à ferramenta PESTEL ordem decrescente de porcentagem de respostas notas “5”

Indicadores macroambientais	5 (extremamente estratégico)	4 (mais estratégico)	3 (estratégico)	2 (pouco estratégico)	1 (não estratégico)
Aumento das viabilidades técnica e econômica que garantam a sustentabilidade dos processos produtivos baseados em microalgas e cianobactérias	77,8%	18,5%	3,7%	0,0%	0,0%
Uso de águas não potáveis e reuso de águas residuais (água salobra, efluentes domésticos, efluentes industriais etc.) no cultivo	74,2%	16,1%	3,2%	3,2%	3,2%
Aumento da disponibilidade de recursos para investimentos em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação	73,3%	23,3%	3,3%	0,0%	0,0%
Menor ocupação de espaço para cultivo, incluindo cultivo vertical e áreas não agricultáveis	73,3%	13,3%	3,7%	6,7%	0,0%
Diversificação de biomassa para atender demandas industriais	71,0%	16,1%	12,9%	0,0%	0,0%
Alto custo de produção e processamento de biomassa de microalgas e cianobactérias no Brasil para obtenção de produtos	70,0%	16,7%	13,3%	0,0%	0,0%
Disponibilização de produtos de microalgas no mercado brasileiro com preços acessíveis ao consumidor	70,0%	20,0%	6,7%	3,3%	0,0%
Inclusão e fortalecimento de microempresas, pequenas empresas e de startups no mercado produtoras de bioprodutos à base de biomassa algal	65,5%	27,6%	3,4%	0,0%	3,4%

Aumento da demanda consumidora crescente por produtos de origem natural	64,5%	22,6%	12,9%	0,0%	0,0%
Automatização e impacto da Indústria 4.0 no cultivo, colheita e processamento de biomassa de microalgas e cianobactérias	63,3%	13,3%	10,0%	6,7%	6,7%
Aumento da pressão mundial por processos agropecuários mais sustentáveis	60,0%	20,0%	13,3%	0,0%	6,7%
Criação de políticas públicas para mitigação de emissões de gases de efeito estufa	58,1%	32,3%	3,2%	6,5%	0,0%
Fortalecimento do mercado de créditos de carbono	56,7%	33,3%	10,0%	0,0%	0,0%
Aumento do consumo de bioprodutos de microalgas ou desenvolvimento de novos hábitos do consumidor resultando no aumento do consumo de de bioprodutos de microalgas e cianobactérias	55,2%	31,0%	10,3%	0,0%	3,4%
Aumento da demanda consumidora crescente por produtos e processos produtivos com certificação ambiental	54,8%	22,6%	16,1%	6,5%	0,0%
Aumento do impacto do programa RenovaBio para a segurança energética, metas e créditos de descarbonização	51,9%	37,0%	11,1%	0,0%	0,0%
Dependência de importação de biomassa e de produtos derivados de microalgas e cianobactérias	44,8%	24,1%	13,8%	13,8%	3,4%
Dificuldade para desregulamentação de organismos geneticamente modificados (OGM) para comercialização	28,6%	35,7%	17,9%	14,3%	3,6%
Oscilação no preço do petróleo	20,7%	48,3%	6,9%	10,3%	13,8%
Alta resistência pelo mercado consumidor ao consumo de organismos geneticamente modificados (OGM)	17,2%	34,5%	20,7%	17,2%	10,3%

A última seção, de Finalização, consistiu em duas perguntas abertas para que os especialistas apontassem, segundo sua expertise, oportunidades e gargalos para o protagonismo do Brasil na produção e aplicação industrial de microalgas e cianobactérias. As respostas às duas perguntas foram tratadas e consolidadas em uma matriz SWOT (Tabela 5), ferramenta importante para dar subsídios para analisar o posicionamento de uma organização, de uma solução tecnológica ou de um país em um mercado-alvo (Miles et al. 2016).

Tabela 5: Matriz SWOT

AMBIENTE EXTERNO	OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
	• Desenvolvimento de sistemas automatizados e monitoramento remoto para cultivo; • Estabelecimento de biorrefinarias que processam matérias-primas da biodiversidade brasileira e que também processem as microalgas; • Uso na agricultura devido ao aumento dos custos dos insumos tradicionais e como biomassa para biocombustíveis; • Desenvolvimento de fármacos (suplementos, óleos, antioxidantes) e uso em proteção e recuperação ambiental; • Substituição de componentes de produtos farmacêuticos, cosméticos, e de suplementos alimentares importados com base em algas, por produtos nacionais; • Mercado interessado em novas fontes de bioprodutos; • Uso industrial da biomassa após biorremediação de efluentes industriais e de esgotos domésticos; • Mitigação das emissões de CO₂ e bioeconomia, com destaque para o uso agrícola de produtos à base de microalgas eficientes na mitigação dos estresses ambientais nos cultivos agrícolas.	• Barreiras regulatórias no processo produtivo e no aproveitamento industrial; • Ainda faltam estudos mais aprofundados de viabilidade técnica para cultivos em grande escala e de biorrefinarias; • Não há tecnologias nacionais desenvolvidas para aplicação em grande escala das microalgas, seja para o cultivo, para a colheita e para a extração de biocompostos; • Poucas empresas produtoras de biomassa de microalgas no Brasil; • Falta de políticas públicas de incentivo à adoção do uso da biomassa de microalgas; • Dificuldade de competir em custos com China e Índia.
	FORÇAS	FRAQUEZAS

AMBIENTE INTERNO	• Disponibilidade de profissionais com alta qualificação acadêmica; • O Brasil tem uma biodiversidade imensa de microalgas e cianobactérias ainda desconhecida para aplicações na indústria; • Clima favorável e luz disponível a maior parte do dia e durante o ano todo e a temperatura elevada, principalmente no Nordeste; • Disponibilidade de terra e de áreas pouco agricultáveis para expansão do cultivo de microalgas e cianobactérias.	• Falta de comunicação com o setor acadêmico e produtivo para estimular o uso de microalgas e cianobactérias; • Falta de investimento, pesquisa e treinamento de profissionais especializados no escalonamento e na implementação dos processos produtivos em escala industrial; • Desconhecimento dos potenciais das microalgas e cianobactérias pelo próprio setor industrial brasileiro; • Não há no mercado nacional equipamentos específicos para microalgas e cianobactérias; • Disponibilidade de muitas soluções tecnológicas em escala laboratorial e poucos em escala piloto ou industrial aptos para transferência da tecnologia.
-------------------------	--	--

O incentivo às ações de PD&I com maior alocação de recursos e valorização da ciência, juntamente com a conexão das microalgas e cianobactérias com bioeconomia e com desenvolvimento sustentável, dominaram as respostas obtidas na Tabela 4. Notou-se predominância de respostas do setor público e/ou da academia (universidades e institutos de pesquisa) e apenas 10% de respostas do setor privado, ratificado pelo indicador macroambiental “Aumento da disponibilidade de recursos para investimentos em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação” (Tabela 4) e pela fraqueza “Falta de comunicação com o setor acadêmico e produtivo para estimular o uso de microalgas e cianobactérias” na matriz SWOT (Tabela 5).

No modelo da hélice tríplice, um ecossistema de inovação é composto pelo relacionamento mútuo entre governo, empresas e instituições de ciência e tecnologia (ICT), em quase sua totalidade composto por universidades públicas e instituições como Embrapa e Fiocruz. As atividades de ciência e tecnologia são executadas pelas ICT, cujos resultados obtidos, prototipados e validados passam pelo processo de transferência formal por licenciamento ou fornecimento da invenção para escalonamento e finalização nas empresas, responsáveis por lançar no mercado. Tal fluxo é mediado pelo governo, que tem o papel de catalisar a relação empresa-ICT por meio de legislações e mecanismos de controle de mercado e defesa da concorrência (Closs & Ferreira, 2012; Dias & Porto, 2013; Fanhaimpork & Melo, 2023).

No ecossistema de inovação, empresas e ICT têm relação de dependência mútua, com aportes financeiros e econômicos em contrapartida entre si para codesenvolvimento e cocriação de soluções tecnológicas. No entanto, o cenário de falta de articulação entre políticas industriais e governamentais apontado Closs e Ferreira (2012) continua vigente, reforçado pela falta de articulação entre pesquisadores do ICT e demandas do mercado (Dias & Porto, 2013), que suscitam a maciça participação de especialistas de ICT em detrimento de instituições privadas e prejudica uma cultura de empreendedorismo científico para que inovações cheguem à sociedade (Amorim et al. 2019).

O desenvolvimento de microalgas e cianobactérias geneticamente modificadas (OGM), incluindo o melhoramento genético por ferramentas de edição gênica como CRISPR/Cas9, foi um destaque no estudo de Rumin et al. (2020). No entanto, esses autores suscitaram que ainda não há, na Europa, a exploração comercial de microalgas e cianobactérias OGM e muito menos alguma atividade científica e tecnológica em escala piloto ou industrial, que provavelmente é extensiva a outros continentes.

Os respondentes deste estudo atribuem a esse cenário negativo a baixa quantidade de profissionais para o *scale up* dos processos de cultivo, baixa conexão entre academia e indústria e falta de estudos aprofundados de viabilidade técnica para cultivos em escala industrial. Esses apontamentos podem justificar a baixa convergência de critérios que envolvem OGM e edição gênica tanto na Tabela 3 (desafios e oportunidades) quanto na Tabela 4 (indicadores macroambientais). As

observações dos especialistas, em uma análise ampla, ratificam o que já está disponível na literatura científica. Enzing et al. (2016) apontam que um clima favorável (tropical e de temperaturas altas) e com alta insolação são os ideais para cultivo de microalgas e cianobactérias e posterior disponibilidade de biomassa para aproveitamento industrial, condição contrária da Europa.

A quantidade de processos industriais de beneficiamento de algas em escala comercial é incipiente se comparar com outras fontes biotecnológicas como plantas superiores, bactérias, fungos filamentosos e leveduras (Vieira et al. 2022). Os respondentes também indicaram gargalos que complementam Vieira et al. (2022) e Lu et al. (2023): alta disponibilidade de cientistas e baixa de profissionais para o *scale up* dos processos de cultivo, que está intimamente ligada à gestão do conhecimento; baixa conexão entre academia e indústria, que gera falhas na comunicação; e falta de estudos aprofundados de viabilidade técnica para cultivos em escala industrial.

De forma complementar, Lu et al. (2023) afirmam que a dissonância entre academia e indústria limita o avanço do desenvolvimento de tecnologias da escala de bancada para as escalas piloto e industrial, que, por conseguinte, diminuirá os custos finais da biomassa para aplicação em qualquer segmento industrial e aumentará as viabilidades técnica e econômica, que também é corroborado pelos respondentes como ameaças. Vieira et al. (2022) inclui como outra fraqueza a falta de gestores com capacitação técnica adequada para garantir o gerenciamento e funcionamento das plantas industriais.

O desafio “Capacitação de mão de obra em tecnologias de cultivo e processamento da biomassa de microalgas e cianobactérias” foi reforçado tanto pelos especialistas quanto por Vieira et al. (2022) como força e como fraqueza. Representa uma força pela disponibilidade de profissionais qualificados por universidades e instituições de ciência e tecnologia no Brasil, mas também é uma fraqueza pela falta de profissionais especialistas para estruturação das escalas industriais de cultivo e de beneficiamento da biomassa algal. Essa fraqueza, inclusive, pode ser uma das justificativas para a quantidade menor de respondentes que se classificaram como “especialistas”. Vieira et al. (2022) inclui como outra fraqueza a falta de gestores com capacitação técnica adequada para garantir o funcionamento das plantas industriais.

O estudo de Viana et al. (2020) já assinalou a necessidade de aumento de escala de cultivo para favorecimento de um produto de alto valor agregado (betacaroteno de *Dunaliella* sp.) e que ratifica outros indicadores macroambientais como “Diversificação de biomassa para atender demandas industriais”, “Alto custo de produção e processamento de biomassa de microalgas e cianobactérias no Brasil para obtenção de produtos” e “Disponibilização de produtos de microalgas no mercado brasileiro com preços acessíveis ao consumidor”. Rashid et al. (2013) assinalaram como outra ameaça a inexistência de rotas tecnológicas consolidadas para o aproveitamento de biomassa de microalgas e cianobactérias.

O indicador macroambiental “Aumento das viabilidades técnica e econômica que garantam a sustentabilidade dos processos produtivos baseados em microalgas e cianobactérias” está na matriz SWOT como ameaça ao ambiente externo que, quando atendido, gerará competitividade ao Brasil no mercado mundial de microalgas e cianobactérias a custos competitivos e economicamente viável. A versatilidade metabólica das microalgas e cianobactérias, juntamente com o potencial agropecuário do Brasil, políticas públicas associadas e a possibilidade de diversificar matérias-primas geram oportunidades para o uso da biomassa algal e estimular investimentos no desenvolvimento de tecnologias para fortalecer as forças e as oportunidades e mitigar as ameaças e fraquezas listados na matriz SWOT (Scur & Queiroz 2017; Bueno & Torres, 2022).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O incentivo às ações de PD&I com maior alocação de recursos e valorização da ciência, juntamente com a conexão entre microalgas e cianobactérias com bioeconomia e com desenvolvimento sustentável, dominaram as respostas aos indicadores macroambientais indicados pelos especialistas.

Denota-se que as microalgas e cianobactérias têm potencial de expansão em diversos mercados nos próximos 10 anos, tanto pela expansão do mercado de algas no mundo quanto pelas condições climáticas e disponibilidade de terras para o cultivo. Com isso, as algas seriam biomassas competitivas com outros microrganismos consolidados (bactérias e fungos) para fortalecer o mercado nacional e diminuir a dependência de importação em diversos mercados, com destaque para os segmentos de alimentação humana, alimentação animal, farmacêutico e cosmético. Com isso, a Plataforma Industrial de Algas tem um grande leque de oportunidades para desenvolvimento de soluções tecnológicas e que se encontra ainda em etapas de pesquisa e desenvolvimento para avançar de um funil de inovação.

No entanto, a baixa conexão entre academia e mercado, refletido na quantidade de especialistas prospectados para este estudo, foi considerado um empecilho importante para o mercado brasileiro ao não ter canais para avanço na escala de maturidade de soluções tecnológicas, da bancada do laboratório ao mercado. O aumento do investimento em PD&I e de fomento a pequenas empresas foram considerados os caminhos para tornar o uso de microalgas e cianobactérias economicamente viáveis.

Por fim, os especialistas consideraram que o Brasil tem grande potencial para se destacar no mercado de microalgas e cianobactérias, como já tem para outros microrganismos, mas faltam incentivos monetários, formação de profissionais para escalonamento de cultivo para oferta de biomassa para incluir o país no mercado internacional a preços competitivos nos próximos dez anos. O destrinchamento dos mercados avaliados é a próxima etapa da evolução deste estudo, para afunilar

informações e apresentar informações de cunho estratégico às instituições brasileiras de ciência e tecnologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acién FG, Fernández JM, Molina E. 2018. Contribución de las microalgas al desarrollo de la bioeconomía. In Aguilar A, Ramón D, Egea FJ (Coord.). *Bioeconomía y desarrollo sostenible*. Almería, Cajamar Caja Rural, p. 309-331.

Amorim GM, Pires EA, Santos FL 2019. Desafios na Transferência de Tecnologia Universidade-Empresa: um relato de experiência do Núcleo de Transferência de Tecnologia da UFRB. *Cadernos de Prospecção* 12(1): 59-78. Available from: <http://dx.doi.org/10.9771/cp.v12i1.27265>.

Anjos SSN 2020. Análise prospectiva da produção científica de valoração econômica de biotecnologia entre os anos de 1945 e 2019. *Revista de Economia da UEG* (16)2: 71-86. Available from: <https://www.revista.ueg.br/index.php/economia/article/view/10411>.

Andrade KMP 2017. *Bioeconomia: um estudo das vocações, fragilidades e possibilidades para o desenvolvimento no estado do Amazonas*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 185 pp.

Barros AI, Gonçalves AL, Simões M, Pires JCM 2015. Harvesting techniques applied to microalgae: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41: 1489–1500. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.037>.

Borowitzka MA 1995. Microalgae as sources of pharmaceuticals and other biologically active compounds. *Journal of Applied Phycology* 7(1): 3-15. Available from: <https://doi.org/10.1007/BF00003544>.

Borschiver S, Silva ALR 2016. *Technology roadmapping: planejamento estratégico para alinhar mercado-produto-tecnologia*. Interciência, Rio de Janeiro, 120 pp.

Brasil. Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Ementa: Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos. Available at: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Decreto/D10375.htm.

Bueno AMC, Torres, DAP 2022. Experiências recentes da União Europeia e dos Estados Unidos em bioeconomia e oportunidades para o Brasil. *Revista Tempo do Mundo* 28: 177-208. Available from: <https://doi.org/10.38116/rtm28art7>.

Closs LQ, Ferreira GC 2012. A transferência de tecnologia universidade-empresa no contexto brasileiro: uma revisão de estudos científicos publicados entre os anos 2005

e 2009. *Gestão & Produção* 19(2): 419-432. Available from: <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2012000200014>.

Dias AA, Porto GS 2013. Gestão de Transferência de Tecnologia na Inova Unicamp. *Revista de Administração Contemporânea* 17(1): 263-284. Available from: <https://doi.org/10.1590/S1415-65552013000300002>.

Enzing C, Ploeg M, Barbosa M, Sijtsma L 2014. *Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe*. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 78 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.2791/3339>.

Fanhaimpork D, Melo DRA 2023. Mapeamento do Ambiente da Transferência de Tecnologia nas Universidades Brasileiras. *Cadernos de Prospecção* 16(4): 1256-1273. Available from: <https://doi.org/10.9771/cp.v16i4.50520>.

Ferreira GF, Ríos Pinto LF, Carvalho PO, Coelho MB, Eberlin MN, Maciel Filho R, Fregolente LV 2021. Biomass and lipid characterization of microalgae genera *Botryococcus*, *Chlorella*, and *Desmodesmus* aiming high-value fatty acid production. *Biomass Conversion and Biorefinery* (11): 1675–1689. Available from: <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00566-3>.

Gois AB, Issifou M, Anjos SSN 2022. Responsabilidade socioambiental e desenvolvimento sustentável. In: Freire FS, Silva CAT, Gomes SMS, Sardeiro LSM (Org.). *Contabilidade Socioambiental*. Curitiba, Juruá, p. 15-44.

Gordon T., Pease A 2006. RT Delphi: An efficient, “round-less” almost real time Delphi method. *Technological Forecasting and Social Change* v. 73, (4), 321-333. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2005.09.005>.

Graham LE, Graham JM, Wilcox LW, Cook ME 2016. *Algae*. LJLM Press, Madison, 689 p.

Hariskos I, Posten C 2014. Biorefinery of microalgae – opportunities and constraints for different production scenarios. *Biotechnology Journal* 9: 739–752. Available from: <https://doi.org/10.1002/biot.201300142>.

Haven TL, Errington TM, Gleditsch KS, Van Grootel L, Jacobs AM, Kern FG, Piñeiro R, Rosenblatt F, Mokkink LB 2020. Preregistering Qualitative Research: A Delphi Study. *International Journal of Qualitative Methods* 19. Available from: <https://doi.org/10.1177/1609406920976417>.

Lu Q, Lu Y, Yang L 2023. Challenging problems of applying microalgae for aquaculture environment protection and nutrition supplementation: A long road traveled and still a far way to go. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 11: e1151440. Available from: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1151440>.

Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). O Programa Nacional de Bioinsumos. [2024]. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos/o-programa>

Marques JBV, Freitas D 2018. Método DELPHI: caracterização e potencialidades na pesquisa em Educação. *Pro-Posições* 29(2): 389-415. Available from: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-6248-2015-0140>.

Miles I, Saritas O, Sokolov A 2016. *Foresight for Science, Technology and Innovation*. Springer Nature, Cham, 279 p.

Molino A, Iovine A, Casella P, Mehariya S, Chianese S, Cerbone A, Rimauro J, Musmarra D 2018. Microalgae Characterization for Consolidated and New Application in Human Food, Animal Feed and Nutraceuticals. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15: e2436. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijerph15112436>.

Pärli R, Fischer M 2020. Implementing the Agenda 2030 – what is the role of forums? *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 27(5): 443-457. Available from: <https://doi.org/10.1080/13504509.2020.1719546>.

Popper R 2008. Foresight Methodology. In Georghiou L, Cassingena J, Keenan M, Miles I, Popper R (Org). *The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice*. Edward Elgar, Cheltenham, p. 44-88.

Raheem A, Prinsen P, Vuppaladadiyam AK, Zhao M, Luque R 2018. A review on sustainable microalgae based biofuel and bioenergy production: Recent developments. *Journal of Cleaner Production* 181: 42-59. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.125>.

Rashid N, Rehman MSU, Han J-I 2013. Recycling and reuse of spent microalgal biomass for sustainable biofuels. *Biochemical Engineering Journal* 75: 101-107. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2013.04.001>.

Radkova M, Stoyneva-Gärtner M, Dincheva I, Stoykova P, Uzunov B, Dimitrova C, Gärtner G 2019. *Chlorella vulgaris* H1993 and *Desmodesmus communis* H522 for low-cost production of high-value microalgal products. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 33(1): 243-249. Available from: <https://doi.org/10.1080/13102818.2018.1562381>.

Ricigliano VA, Simone-Finstrom M 2020. Nutritional and prebiotic efficacy of the microalga *Arthrospira platensis* (spirulina) in honey bees. *Apidologie* 51: 898–910. Available from: <https://doi.org/10.1007/s13592-020-00770-5>.

Rumin J, Nicolau E, Oliveira Junior RG, Fuentes-Grünwald C, Picot L 2020. Analysis of Scientific Research Driving Microalgae Market Opportunities in Europe. *Marine Drugs* 18(5): e264. Available from: <https://doi.org/10.3390/md18050264>.

Santos LCX, Andreato NSA, Anjos SSN, Ferreira EA, Gris EF, Martin AR 2018. Análise prospectiva da patente “Processo para a Aplicação da Biomineralização na Melhoria de Solos” – PI 1001279-6: estudo de viabilidade de patente brasileira por meio de informetria. *Cadernos de Prospecção* 11(4): 1182-1198. Available from: <https://doi.org/10.9771/cp.v11i4.27241>.

Sarma S, Sharma S, Rudakiya D, Upadhyay J, Rathod V, Patel A, Narra M 2021. Valorization of microalgae biomass into bioproducts promoting circular bioeconomy: a holistic approach of bioremediation and biorefinery. *3 Biotech* 11: e378. Available from: <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02911-8>.

Scur G, Queiroz RP de 2017. O impacto da diversificação na estratégia de operações de empresas de bens de capital. *Gestão & Produção* 24(2): 206-220. Available from: <https://doi.org/10.1590/0104-530X1048-13>.

Shen Y, Yuan W, Pei ZJ, Wu Q, Mao E 2009. Microalgae Mass Production Methods. *Transactions of the ASABE* 52(4): 1275-1287. Available from: <https://doi.org/10.13031/2013.27771>.

Show PL 2022. Global market and economic analysis of microalgae technology: Status and perspectives. *Bioresource Technology* 357: e127329. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127329>.

Schultz EL, Quintino RP, Anjos SSN 2021. *Estudo prospectivo de tecnologias baseadas na biomassa de microalgas e cianobactérias: abordagens bibliométrica e patentométrica*. Embrapa Agroenergia, Brasília, 59 p.

Silva SC, Ferreira ICFR, Dias MM, Barreiro MF 2020. Microalgae-Derived Pigments: A 10-Year Bibliometric Review and Industry and Market Trend Analysis. *Molecules*, 25: e3406. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules25153406>.

Song J, Sun Y, Jun L 2017. PESTEL analysis of the development of the waste-to-energy incineration industry in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80: 276-289. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.066>.

Viana NM, Santos AC, Anjos SSN, Miranda CHB 2020. Caracterização do mercado de betacaroteno a partir da microalga *Dunaliella* sp. In: Mendonça S, Salum, THC. *Anais do VI Encontro de Pesquisa e Inovação da Embrapa Agroenergia*. Embrapa Agroenergia, Brasília, p. 22-28.

Vieira VV, Cadoret J-P, Acien FG, Benemann J 2022. Clarification of Most Relevant Concepts Related to the Microalgae Production Sector. *Processes*, 10(1): e175. Available from: <https://doi.org/10.3390/pr10010175>.

CAPÍTULO 4: Uso e competitividade de biomassa algal em alimentação em aquicultura: análise estratégica e do macroambiente nos próximos 10 anos no Brasil

Submetido e em análise: ANJOS, S. S. N. dos; ALMEIDA, A. N. de; JUNGSMANN, L. Uso e competitividade de biomassa algal em alimentação em aquicultura: análise estratégica e do macroambiente nos próximos 10 anos no Brasil. Submetido ao periódico **Cadernos de Ciência & Tecnologia** (<https://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct>).

Sérgio Saraiva Nazareno dos Anjos, Alexandre Nascimento de Almeida, Letícia Jungmann Cançado

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 algal 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 o objetivo deste artigo é avaliar o uso e a competitividade do uso de biomassa algal para o mercado de alimentação na aquicultura brasileira nos próximos 10 anos a partir de 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 algal, relacionados diretamente com o aumento de escala de cultivo das microalgas e cianobactérias. Suscita-se neste estudo que a biomassa de microalgas e cianobactérias é um bioinsumo estratégico e tem potencial de expansão no mercado brasileiro e com competitividade frente à farinha de peixe e ao farelo de soja associada à sustentabilidade ambiental e 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 algal na alimentação em aquicultura.

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

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 algal 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 the use of algal biomass for the feed market in Brazilian aquaculture over the next 10 years based on experts consultation. 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, directly related to the increase in scale of cultivation of microalgae and cyanobacteria. This study suggests that microalgae and cyanobacteria biomass is a strategic bioinput and has potential for expansion in the Brazilian market and competitiveness against fishmeal and soybean meal, associated with environmental sustainability and increased nutritional quality of feed with lower demand for supplementation. However, the technical and economic bottlenecks in cultivation and processing described in the weaknesses and threats undermine the competitiveness of algal biomass in aquaculture feed.

Index terms: microalgae, cyanobacteria, bioinput, food security, competitiveness.

INTRODUÇÃO

A garantia da disponibilidade de alimentos à sociedade mundial, tanto em quantidade quanto em qualidade, é um tópico cada vez mais importante com as 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; FAO, 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 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 do 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; ROSA et al., 2020; SOARES, 2015).

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 fitorremediação¹ 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 poliinsaturados e minerais (BARBOSA et al., 2023; FERNANDES, 2021), 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 algal para o mercado de alimentação na aquicultura brasileira nos próximos 10 anos a partir 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 10 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 e em microalgas e cianobactérias para aproveitamento alimentar, nos focos em alimentação e nutrição, comportamento alimentar, economia circular, assuntos regulatórios, manejo e socioeconomia.

O método Delphi tem caráter semiquantitativo, desempenhando a função de avaliar e desenhar cenários futuros e é uma ferramenta usada para execução de estudos prospectivos a partir de consulta a especialistas a partir do uso de escala Likert (FREITAS & FERRARINI, 2021). O Delphi é regido por quatro princípios: anonimato entre os especialistas selecionados, o que diminui vieses e torna a

¹ Fitorremediação consiste no uso de algas no tratamento de efluentes de processos produtivos agropecuários e/ou industriais (MATTHIENSEN & MICHELON, 2022).

aplicação de questionários eletrônicos a ferramenta mais adequada; iteração, que se refere à realização de rodadas até o consenso em uma porcentagem pré-determinadas 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 executado pela Embrapa (EMBRAPA AGROENERGIA, 2022). Para execução do estudo da Embrapa Agroenergia (2022), usou-se 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 a partir das respostas às questões abertas.

Na primeira questão da seção de “Desafios e oportunidades”, foram solicitados que gêneros taxonômicos de microalgas e cianobactérias fossem indicados como mais promissores para cultivo e aplicação na alimentação em aquicultura no Brasil nos próximos 10 anos. A lista de gêneros apresentada, replicada de Embrapa Agroenergia (2022), 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), os desafios científicos e tecnológicos para atender ao mercado brasileiro para aproveitamento de microalgas e cianobactérias para alimentação em aquicultura no Brasil nos próximos 10 anos. De forma similar, os itens na seção “Análise Macroambiental” foram classificados de 1 (fator de menor impacto) a 5 (fator de maior impacto), os fatores macroambientais (política, econômica, social, tecnológica, ambiental e legal). Em ambos, também tinham 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 ao que a Embrapa Agroenergia (2022), mas com adaptações para que fossem pertinentes para 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 vez defina seus critérios a partir de quaisquer premissas. Dado o grau exploratório, no estudo da Embrapa Agroenergia (2022) não foi aplicada uma porcentagem de corte para determinar consensos. 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. A partir disso, 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 influenciem 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 (ABOU-JAOUDE et al., 2022; MELANDER et al., 2019; MENET, 2016; 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 a partir de diversas fontes, seja a aplicação da ferramenta PESTEL (GHEIBI et al., 2023; MENET, 2016; 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 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 replicadas do estudo da Embrapa Agroenergia (2022), com foco no mercado de alimentação e suplementação animal, e depois afunilado para o segmento de aquicultura.

Para execução do estudo, foram prospectados 137 especialistas a partir 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%) de 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%) de outros tipos de instituições (organização internacional e um serviço social autônomo).

A primeira rodada começou em 13/02/2023, com posterior reenvio em quatro momentos (27/02/2023, 12/03/2023, 26/03/2023 e 12/04/2023) e finalizado em 17/04/2023. Ao todo, 18 especialistas responderam ao questionário, e deste, apenas dois 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

Dentre os gêneros taxonômicos indicados pelos especialistas como os mais promissores para uso da biomassa na alimentação em aquicultura no Brasil nos próximos 10 anos, houve destaque para *Chlorella* sp. (Figura 1), que é um dos gêneros de microalgas mais explorados comercialmente. Os principais players deste 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).

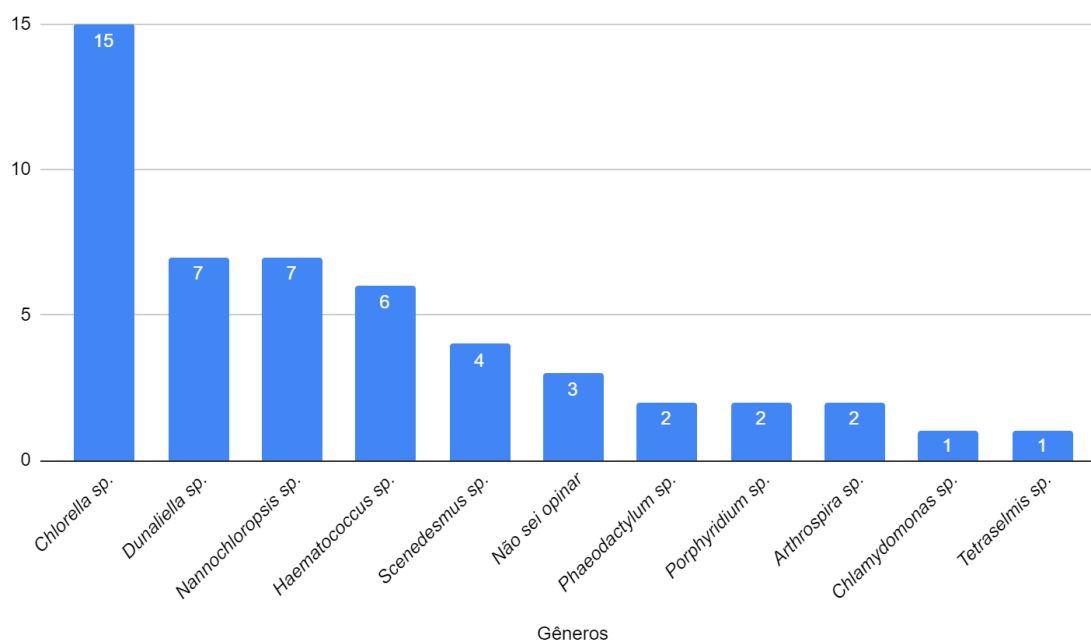


Figura 1: Gráfico de histograma com as respostas dadas à questão sobre gêneros taxonômicos (Elaboração própria)

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% a 28%, carotenoides, ácidos graxos e vitaminas (ESTEVAM et al. 2023; PANTAMI et al., 2020). O estudo de Pantami (2020) detectou na biomassa de *C. vulgaris* vinte ácidos graxos diferentes, com predomínio de ácido palmítico, ácido linoleico e ácido 7,10-hexadecadienóico, além de carotenóides como luteína, astaxantina e betacaroteno, e vitaminas B-3 (ácido nicotínico) e B-5 (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 (AHMAD & ASHRAF, 2023; BESSADA et al., 2019), com destaque para a aquicultura para fortalecimento de ações visando a segurança alimentar (ANJOS et al., 2023). Outros fatores que conferem competitividade à *Chlorella* sp. comparado com outros gêneros é possuir alta eficiência fotossintética, rápido crescimento e 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 quinze desafios e oportunidades científicos e tecnológicos e dezenove 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 casos, havia a opção de “Não sei opinar” para cada item. Essas respostas foram excluídas da análise e, posteriormente, a partir da 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) (Quadro 1).

Quadro 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%	0,00%
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%	0,00%
Desenvolvimento de programas para indução científica e tecnológica para viabilização das tecnologias baseadas em microalgas e cianobactérias	50,00%	31,25%	18,75%	0,00%	0,00%
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%	0,00%

Viabilização de sistemas de produção para fornecimento de biomassa no mercado nacional	43,75%	50,00%	6,25%	0,00%	0,00%
Reuso 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%	0,00%
Uso de microalgas e cianobactérias como fontes de produtos de alto valor agregado (carotenoides e PUFA's, por exemplo)	37,50%	50,00%	6,25%	6,25%	0,00%
Uso de microalgas e cianobactérias na biofixação e mitigação de dióxido de carbono visando a redução da concentração na atmosfera	37,50%	50,00%	6,25%	6,25%	0,00%
Aproveitamento de coprodutos e resíduos algais para integração de processos produtivos em conceito de biorrefinarias	33,33%	33,33%	20,00%	13,33%	0,00%
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%	0,00%
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%	0,00%	0,00%
Escalonamento de processos de cultivo	20,00%	60,00%	20,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaboração própria

Com exceção de “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. Dentre os itens que se enquadram na porcentagem de corte (50%) para a segunda rodada, se destacaram:

- 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%); e
- 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) (Quadro 2).

Quadro 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%	0,00%	6,25%	0,00%

Disponibilidade de recursos para investimentos em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação	61,11%	22,22%	11,11%	5,56%	0,00%
Custo de produção e processamento de biomassa de microalgas e cianobactérias no Brasil	52,94%	29,41%	17,65%	0,00%	0,00%
Menor ocupação de espaço para cultivo, incluindo cultivo vertical e áreas não agricultáveis	47,06%	35,29%	11,76%	5,88%	0,00%
Diversificação de biomassa para maior competitividade do mercado de alimentação para aquicultura	43,75%	31,25%	25,00%	0,00%	0,00%
Produtos de microalgas e cianobactérias disponíveis no mercado brasileiro com preços acessíveis ao consumidor	43,75%	43,75%	0,00%	12,50%	0,00%
Dificuldade para desregulamentação de microalgas e cianobactérias geneticamente modificadas para comercialização	43,75%	31,25%	12,50%	12,50%	0,00%
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 reuso de águas residuais (água salobra, efluentes domésticos, efluentes industriais etc.) no cultivo de microalgas e cianobactérias	35,29%	23,53%	29,41%	11,76%	0,00%
Mercado de créditos de carbono	35,29%	41,18%	23,53%	0,00%	0,00%
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%	0,00%
Demanda consumidora crescente por produtos de origem natural	23,53%	52,94%	11,76%	5,88%	5,88%
Inclusão de microempresas, pequenas empresas e de startups no mercado	18,75%	62,50%	18,75%	0,00%	0,00%
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 e contextualizado em biorrefinarias	14,29%	35,71%	28,57%	14,29%	7,14%
Novos hábitos do consumidor influenciando no 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%

Fonte: Elaboração própria

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

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

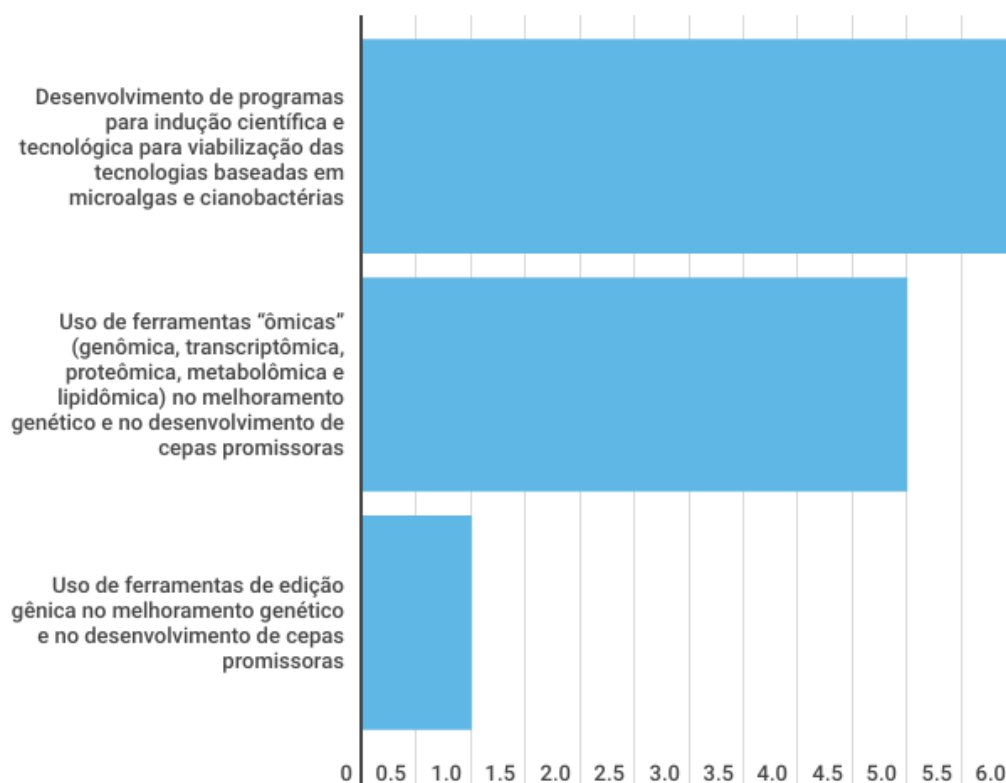
Na segunda rodada, os desafios e oportunidades indicados na primeira etapa com convergência maior ou igual a 50% para a resposta “maior desafio” (nota 5) e critérios macroambientais (PESTEL) indicados na primeira etapa com convergência maior ou igual a 50% para a resposta “maior impacto” foram selecionados para reavaliação pelos 16 especialistas que aceitaram participar da nova rodada. O questionário foi submetido em quatro momentos (29/05/2023, 12/06/2023, 26/06/2023 e 17/07/2023) e finalizado em 13/08/2023. Dos 16 especialistas consultados, sete responderam ao questionário (43,75%). O Quadro 3 sintetiza os itens selecionados para a segunda rodada:

Quadro 3: Desafios e oportunidades e critérios macroambientais selecionados na primeira etapa do Delphi

Desafios e oportunidades	Análise Macroambiental
• Uso de ferramentas de edição gênica no melhoramento genético e no desenvolvimento de cepas promissoras; • Uso de ferramentas “ômicas” (genômica, transcriptômica, proteômica, metabolômica e lipidômica) no melhoramento genético e no desenvolvimento de cepas promissoras; e • Desenvolvimento de programas para indução científica e tecnológica para viabilização das tecnologias baseadas em microalgas e cianobactérias.	• Viabilidades técnica e econômica que garantam a sustentabilidade dos processos produtivos baseados em microalgas e cianobactérias; • Disponibilidade de recursos para investimentos em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação; e • Custo de produção e processamento de biomassa de microalgas e cianobactérias no Brasil.

Dentre 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).

Desafios e oportunidades científicos e tecnológicos



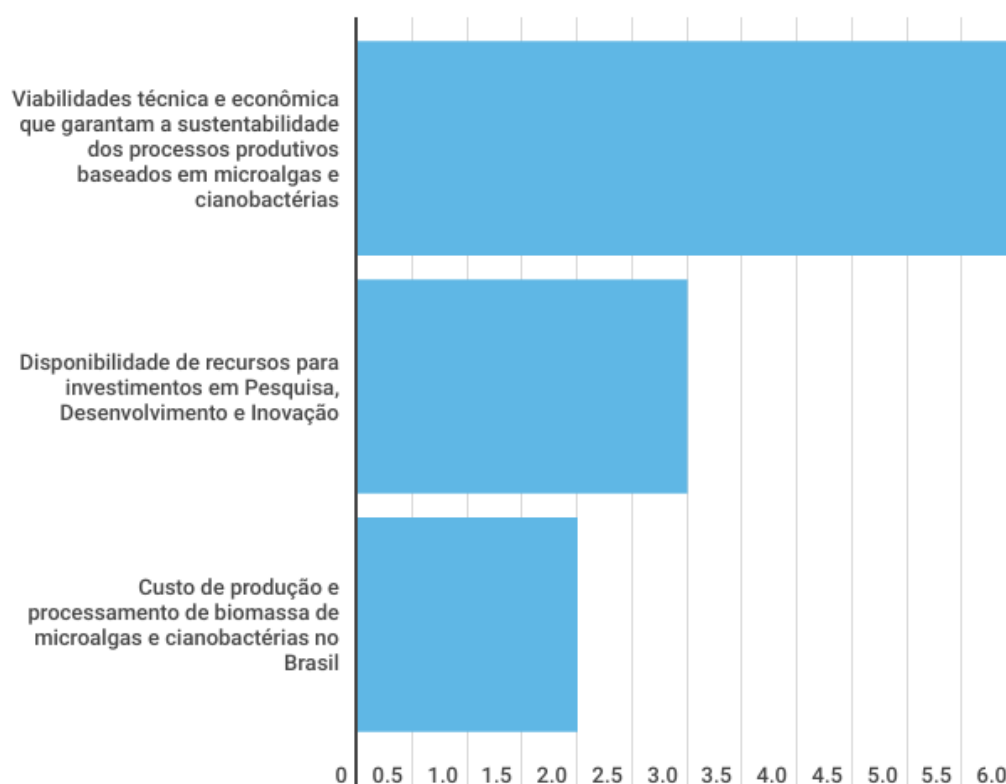
Made with infogram

Figura 2: Gráfico de histograma com quantidade de respostas para cada item apresentado aos especialistas na segunda rodada na opção “Desafios e oportunidades” (Fonte: Elaboração própria)

Dentre 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).

Análise Macroambiental



Made with 

Figura 3: Gráfico de histograma com quantidade de respostas para cada item apresentado aos especialistas na segunda rodada na opção "Análise Macroambiental" (Fonte: Elaboração própria)

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 10 anos. Ambos podem ser associados ao desenvolvimento de tecnologias eficientes de escalonamento do cultivo, ainda de alto custo, o que impacta diretamente no uso industrial de microalgas, transformadas geneticamente ou não (ESTEVAM et al., 2023; MORDOR INTELLIGENCE, 2023).

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 são os procedimentos para ações de melhoramento genético e desenvolvimento de cepas promissoras e adaptadas às necessidades do mercado-alvo (SANTANA, 2020). Associado 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, a partir dos dados tratados dos apontamentos nas questões abertas dos especialistas consultados, foi construída uma matriz SWOT (Quadro 3).

Quadro 3: Matriz SWOT

AMBIENTE EXTERNO	OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
	• Adoção de novas tecnologias/ferramentas sustentáveis 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 poliinsaturados que sejam substitutos de óleo e/ou farinha de peixe; • Melhoramento genético para desenvolvimento de linhagens promissoras.	• 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.
AMBIENTE INTERNO	FORÇAS	FRAQUEZAS
	• Crescimento da aquicultura nacional e necessidade de novos ingredientes para alimentação animal; • Demanda reprimida de novos ingredientes para produção de ração no Brasil.	• Baixa divulgação das propriedades nutricionais das microalgas; • 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; • A falta de viabilidade técnica e econômica que garantam a sustentabilidade dos processos produtivos baseados em microalgas e cianobactérias.

Fonte: Elaboração própria

Na matriz SWOT, os principais pontos fortes são a diversificação de fonte alimentícia para ração, aumento da qualidade nutricional e o fortalecimento do mercado aquícola brasileiro, além da possibilidade de melhoramento genético para atender demandas específicas como a maior concentração de determinado nutriente. No entanto, os aspectos positivos têm forte impacto dos 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 resultado similar ao avaliar outros mercados além da alimentação animal, como farmacêutico e cosmético, bioinsumos para agricultura, ; biocombustíveis e química verde, com o apontamento de fraqueza de disponibilidade de tecnologias em baixa escala de maturidade e baixo investimento em formação de profissionais e 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). FAO (2022) também aponta que houve um crescimento de mais de 570% no consumo global de alimentos produzidos a partir de 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 e 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 tecnicamente 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 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 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 seleção de matérias-primas a requisitos socioambientais é 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 crescer em diversos meios e a possibilidade de produzir diversos metabólitos de alto valor agregado, o cultivo não compete por terras aráveis e promove o cultivo em qualquer região e qualquer bioma que permita a diminuição de custos de logística. Com isso, é possível dirimir parte da falta de viabilidade que garanta a sustentabilidade econômica e ambiental dos processos de cultivo e processamento da biomassa.

Por fim, suscita-se neste estudo que a biomassa de microalgas e cianobactérias é um bioinsumo estratégico e tem potencial de expansão no mercado brasileiro e com competitividade frente à farinha de peixe e ao farelo de soja associada à sustentabilidade ambiental e 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 algal na alimentação em aquicultura nos 10 anos avaliados neste estudo. Com isso, não há escala de produção para fornecimento de biomassa em quantidade e custo acessível para avaliação da eficácia da biomassa na alimentação em aquicultura. Maior aporte de recursos para pesquisa científica, desenvolvimento tecnológico e inovação é apontado pelos especialistas consultados neste estudo como uma ameaça que deve ser dirimida para que a biomassa algal tenha viabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

ABOU-JAOUDE, G.; MUMM, O.; CARLOW, V. M. An Overview of Scenario Approaches: A Guide for Urban Design and Planning. **Journal of Planning**

Literature, v. 37, n. 3, p. 467-487, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1177/08854122221083546>.

AHMAD, A.; ASFRAF, S. S. Sustainable food and feed sources from microalgae: Food security and the circular bioeconomy. **Algal Research**, v. 74, e103185, 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, n. 3, e04190, 2024. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n3-010>.

ANJOS, S. S. N. dos; KIMPARA, J. M.; ALMEIDA, A. N. de; JUNGSMANN, L. Cálculo do *Emergence score* de microalgas e cianobactérias para alimentação em aquicultura: futuros destaques tecnológicos. In: FEIRA NACIONAL DO CAMARÃO, 19., 2023, Natal. **Anais...** 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-Nazareno-dos-Anjos.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2024.

ANJOS, S. S. N. dos; VIANA, N. M.; MENDONÇA, S.; JUNGSMANN, L.; 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, n. 4, p. 10–28, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2024v13i4.p10-28>. Acesso em: 12 dez. 2024.

BARBOSA, B. P.; LEITE, L. O.; MESQUITA, A. de F. N.; BANDEIRA, L. L.; MARTINS, S. C. S.; MARTINS, C. M. (2023). Produtos biotecnológicos de microalgas: uma análise de tendências. **Scientific Electronic Archives**, v. 16, n. 11, 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. **Technology Roadmap: planejamento estratégico para alinhar mercado-produtor-tecnologia**. 1.ed. Rio de Janeiro: Inteciência, 2016. 120p.

EMBRAPA AGROENERGIA. **Estudo prospectivo na plataforma industrial Algas: aplicação de survey a especialistas usando método Delphi**. 26/12/2022. Documento interno.

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**, n. 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: FAO, 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: FAO, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc0461en>. Acesso em: 7 abr. 2024.

FERNANDES, A. S. **Carotenóides e clorofilas microalgais: ênfase na caracterização e bioacessibilidade.** 2021. 180 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

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, n. 49, p. 46-62, 2021. DOI: <https://revista.unitins.br/index.php/humanidadeseinovacao/article/view/4772>.

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, n. 3, 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, n. 1, p. 1–9, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15157/eil.2023.1.1.1-9>.

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, n. 3, e888, 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, n. 2, p. 389-415, 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/1980-6248-2015-0140>.

MATTHIENSEN, A.; MICHELON, W. **Produção de microalgas em sistema semiaberto: estrutura e funcionamento de tanques semicirculares (raceway tanks).** Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2022 (Comunicado Técnico nº 601). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1151835/1/final10047.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2024.

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. <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**, n. 18, e367, 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**. March, 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. Acesso em: 6 abr. 2024.

ROSA, A. P. C.; CARVALHO, L. F. de; GOLDBECK, L.; ENKE, D. B. S.; ROCHA, C. B.; SOUZA-SOARES, L. A.; POUEY, 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, n. 3, 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. 151 p. Tese (Doutorado em Tecnologias Química e Biológica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

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, n. 2, p. 32025-32042, 2021. DOI: <http://dx.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. 47 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Escola de Veterinária, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SONG, J; SUN, Y; JUN, L. PESTEL analysis of the development of the waste-to-energy incineration industry in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 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, n. 2, e-20230107, 2024. DOI: <http://dx.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, n. 1, p. 85-88, 2023. DOI: <https://doi.org/10.54097/ajmss.v2i1.6376>.

CAPÍTULO 5: Análise econômica, financeira e de mercado de biomassa de *Chlorella sorokiniana* em formulação hipotética de dieta para camarão-branco-do-Pacífico (*Penaeus vannamei*)

ANJOS, S. S. N. dos; KIMPARGA, J. M.; TUKOFF-GUIMARÃES, Y. B.; JUNGSMANN, L.; ALMEIDA, A. N. de. Análise econômica, financeira e de mercado de biomassa de *Chlorella sorokiniana* em formulação hipotética de dieta para camarão-branco-do-Pacífico (*Penaeus vannamei*). **Artigo a ser finalizado e submetido.**

Sérgio Saraiva Nazareno dos Anjos², Janaína Mitsue Kimpara³, Yuri Basile Tukoff-Guimarães⁴, Letícia Jungmann Cançado⁵ e Alexandre Nascimento de Almeida⁶

RESUMO

A farinha de peixe é o ingrediente padrão para alimentação em carcinicultura, pela sua palatabilidade, riqueza nutricional e presença de aminoácidos essenciais (lisina e metionina). No entanto, a sazonalidade na sua disponibilidade no mercado, associada à pesca predatória, exige que o produtor busque outros ingredientes alternativos proteicos. Atualmente, usa-se o farelo de soja pelo seu preço mais estável e fornecimento constante, mas tem problemas como baixa palatabilidade e presença de fatores antinutricionais. A biomassa de *Chlorella sorokiniana* tem potencial para compor formulações para agregar nutrientes e substituir, ao menos parcialmente, farinha de peixe e/ou farelo de soja. Para subsidiar futuras ações de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) de formulação de dieta para carcinicultura com biomassa algal, o objetivo deste trabalho é realizar análise econômica, financeira e de mercado da inclusão de biomassa de *C. sorokiniana* na dieta de camarão-branco-do-Pacífico (*Penaeus vannamei*) em substituição a ingredientes protéicos convencionais (farinha de peixe e farelo de soja). A microalga avaliada não tem viabilidade no momento presente, mas tem potencial de mercado pelo teor nutricional da sua biomassa, tolerância a altas temperaturas para extrusão da dieta e papel ambiental estratégico. Mesmo com alto teor nutricional, suscita-se que a biomassa algal em questão não tem potencial para substituição completa de farinha de peixe, dada a indisponibilidade em biomassa para uso em escala industrial de fabricação de ração e que torna seu preço final inviável. No entanto, pode se tornar substituto do farelo de soja e compor formulações de rações substituindo até 40% da farinha de peixe, além de compor ações de mitigação das mudanças climáticas e de garantia da segurança alimentar.

Palavras-chaves: microalga; segurança alimentar; alimentação animal; aquicultura; valoração

² Universidade de Brasília e Embrapa Agroenergia

³ Embrapa Agricultura Digital

⁴ Instituto de Pesquisas Tecnológicas

⁵ Embrapa Agroenergia

⁶ Universidade de Brasília

ABSTRACT

Fishmeal is the standard ingredient for shrimp farming feed, due to its palatability, nutritional richness and presence of essential amino acids (lysine and methionine). However, the seasonality in its availability in the market, associated with predatory fishing, requires that the producer seek other alternative protein ingredients. Currently, soybean meal is used due to its more stable price and constant supply, but it has problems such as low palatability and the presence of antinutritional factors. *Chlorella sorokiniana* biomass has the potential to compose formulations to add nutrients and replace, at least partially, fishmeal and/or soybean meal. To support future Research, Development and Innovation (RD&I) actions for formulating diets for shrimp farming with algal biomass, the objective of this study is to perform an economic, financial, and market analysis of the inclusion of *C. sorokiniana* biomass in the diet of Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*) as a replacement for conventional protein ingredients (fishmeal and soybean meal). The microalgae evaluated does not have viability at the present time, but it has market potential due to the nutritional content of its biomass, tolerance to high temperatures for diet extrusion and strategic environmental role. Even with high nutritional content, it is suggested that the algal biomass in question does not have the potential to completely replace fishmeal, given the unavailability of biomass for use on an industrial scale in feed manufacturing and that makes its final price unviable. However, it can become a substitute for soybean meal and be used in feed formulations, replacing up to 40% of fishmeal, in addition to being part of actions to mitigate climate change and guarantee food security.

Keywords: microalga; food security; animal feed; aquaculture; valuation.

INTRODUÇÃO

A aquicultura é um segmento pecuário de rápido crescimento e de relevância global cada vez maior, tanto por fornecer proteínas alternativas quanto pelo seu potencial ambiental. O segmento aquícola é considerado o de produção de alimentos com crescimento mais rápido em escala global e crescimento de 350% no comércio dos produtos, superior ao comércio de outros tipos de proteína animal (bovinos, aves, suínos e ovinos) (ANDERSON *et al.*, 2018). Peixes, crustáceos e moluscos representam apenas 17% do total do consumo global de proteínas animais, e o mercado mundial de aquicultura em 2022 foi de US\$313 bilhões com uma produtividade de 130,9 milhões de toneladas, com potencial de expansão (LUBCHENCO *et al.*, 2020; FAO, 2024).

A aquicultura tem outra vantagem competitiva, associada à sustentabilidade ambiental e ao estímulo a ações de PD&I para desenvolvimento de tecnologias que permitam o sequestro de carbono e mitigação das mudanças climáticas alinhada à importância e enriquecimento nutricional de proteínas aquícolas (LUBCHENCO *et al.*,

2020; VON BRAUN *et al.*, 2021; FAO, 2024). As microalgas são alternativas estratégicas para esse enriquecimento por serem organismos unicelulares fotossintéticos com a habilidade de rápido crescimento e elevada eficiência de conversão de luz, alta adaptabilidade ambiental, alta composição proteica e versatilidade metabólica que permite agregar à ração substâncias de alto valor agregado como carotenoides, aminoácidos essenciais e ácidos graxos poliinsaturados (PUFAs) eliminando ou reduzindo, teoricamente, a necessidade de suplementação (DINESHBABU *et al.*, 2019; NAGARAJAN *et al.*, 2021; CHEN *et al.*, 2024).

No mercado nacional de aquicultura, a carcinicultura produziu 113.301 toneladas em 2022 (15,32% da produção aquícola total), sendo que 69.540 toneladas foram de *P. vannamei* (61,4%) (XIMENES; VIDAL, 2023; CNPASA, 2024; FAO, 2024). Por ser a espécie de maior representatividade na carcinicultura brasileira e um de maior importância no mercado internacional, foi a opção para execução deste estudo.

Entre os focos científicos e tecnológicos em aquicultura, está a prospecção de novas matérias-primas de fontes sustentáveis, que diminuam a pressão sobre a biodiversidade enquanto reduz o custo da alimentação no cultivo (já que este item representa 70% do custo total dos pescados alimentados), que tenham teor nutricional adequado à espécie-alvo e conversão alimentar eficiente (NAGARAJAN *et al.*, 2021; FAO, 2024). A farinha e o óleo de peixe são os ingredientes ideais para alimentação aquícola pelo seu alto teor nutricional e alta palatabilidade, gerando dependência do mercado de rações por esses insumos (YADAV *et al.*, 2020).

Uma das alternativas à farinha e ao óleo de peixe é a biomassa de microalgas, que tem alta digestibilidade e palatabilidade, maior conversão alimentar, ação de biorremediação e ações farmacológicas que favorecem a saúde animal, como antioxidante, antimicrobiana e imunoestimulante (NAGARAJAN *et al.*, 2021; CHATTARAJ *et al.*, 2024). Entre os vários gêneros de microalgas, se destaca *Chlorella* sp. que, juntamente com *Arthrospira* sp., domina o mercado mundial de microalgas e tem produção de biomassa em escala industrial, com destaque para a *Chlorella sorokiniana*.

O alto risco de mudanças bruscas no mercado diante de demandas que surgem constantemente (VILLIGER; BOGDAN, 2005), como intempéries naturais que impactam no cultivo de *commodities* agrícolas ou na sazonalidade no fornecimento

de peixes para a produção da farinha e do óleo, associada à pesca predatória, aumentam a necessidade de diversificação de matérias-primas para a formulação de rações. Para subsidiar futuras ações de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) de formulação de ração para carcinicultura com biomassa algal, o objetivo deste trabalho é apresentar análise econômica, financeira e de mercado da inclusão de biomassa de *C. sorokiniana* na dieta de camarão-branco-do-Pacífico (*Penaeus vannamei*) em substituição a ingredientes protéicos convencionais (farinha de peixe e farelo de soja)

REVISÃO DE LITERATURA

Carcinicultura no Brasil

A aquicultura representa a criação de espécies aquáticas de água doce ou salgada que despertem interesse econômico, sendo a carcinicultura a subdivisão representada pelos camarões criados em cativeiro (SCHULTER; VIEIRA FILHO, 2017; PEREIRA *et al.*, 2022), que teve início no Brasil na década de 1970 com algumas espécies de camarão, com destaque para *P. vannamei*. Essa espécie tem alto desempenho zootécnico, ciclo curto, cadeia produtiva organizada e alto valor de mercado (ROUTLEDGE *et al.*, 2022; YUAN *et al.*, 2023). Atualmente, a região Nordeste responde por 99,4% da produção nacional, com destaque para os Estados do Rio Grande do Norte, Ceará, Sergipe, Paraíba e Piauí, e com expansão da fronteira de produção com o cultivo em municípios distantes do litoral (EVANGELISTA *et al.*, 2021; PEREIRA *et al.*, 2022). O Brasil é o oitavo maior produtor mundial de camarão marinho, que teve crescimento de 40% na produção entre 2016 e 2023 (XIMENES; VIDAL, 2023).

A carcinicultura brasileira teve seu auge no início da década de 2000, com produção de mais 90 mil toneladas e 80% destinado ao mercado internacional. Em 2004 houve queda de 16% na produção em razão de lei anti-dumping contra o Brasil, impetrada pelos EUA e da disseminação de doenças como o *Penaeus stylirostris* densovirus (PstDNV), vírus da mionecrose infecciosa (IMNV - *infectious myonecrosis virus*) e vírus da doença da mancha branca (WSSV - *white spot syndrome virus*) (ABCC, 2022). A primeira detecção de WSSV no Brasil ocorreu em 2005 no Estado de Santa Catarina, que culminou na perda de 90% da produção estadual e surtos no Rio Grande do Norte, Ceará e Bahia (COSTA *et al.*, 2012; DANTAS, 2019).

Para retomar a produção anteriormente alcançada, a carcinicultura tem buscado alternativas para aumento da produtividade e lucratividade enquanto garante a resiliência do sistema produtivo. Nesse sentido, a interiorização da produção é uma alternativa, os sistemas integrados multitróficos (IMTA - *Integrated MultiTrophic Aquaculture*), sistemas em bioflocos, como exemplos. Outra alternativa possível para este fim é relacionada à eficiência nutricional e alimentar na produção.

O custo com a alimentação na criação de camarões representa até 60% do custo total (ALBAQAMI, 2025). Com isso, um dos focos de ações de PD&I na carcinicultura é o desenvolvimento de soluções tecnológicas que promovam economicidade e formulações de rações com alta qualidade e que proporcionem uma nutrição funcional, a diminuição de gasto energético fisiológico e o fortalecimento do sistema imunológico para resistência a doenças de forma preventiva (EVANGELISTA *et al.*, 2021). É importante destacar que nutrientes como os ácidos graxos do tipo PUFAs, que têm papel no fortalecimento do sistema imune e da resistência ao estresse, cuja síntese pelo metabolismo dos camarões é limitada, torna obrigatória sua inclusão na dieta para um desempenho zootécnico adequado (MERCIER *et al.*, 2009; MARQUEZI *et al.*, 2023), além dos teores de proteína, minerais, vitaminas e perfil de aminoácidos balanceados.

Alimentação para carcinicultura

A fonte proteica padrão na carcinicultura é a farinha de peixe, uma *commodity* obtida a partir de peixes pelágicos⁷ (inteiros e seus coprodutos oriundos do processamento inicial). Eles contêm todos os aminoácidos (incluindo os essenciais, lisina e metionina), vitaminas, sais minerais e ácidos graxos, incluindo os poliinsaturados como ácido docosahexaenoico (DHA), ácido eicosapentaenoico (EPA) e ácido araquidônico (ARA), necessários para o desenvolvimento dos animais, além de possuir boa palatabilidade a eles (MERCIER *et al.*, 2009; NAYLOR *et al.*, 2000; GADELHA, 2013; MAISASHVILI *et al.*, 2015; MOTA, 2018; SOARES, 2015).

O comércio global de farinha de peixe atingiu 3,67 milhões de toneladas em 2021, um aumento de 12% em relação a 2020. A crescente indústria de aquicultura

⁷ Peixes da família *Engraulidae*, como *Engraulis japonicus* (anchova japonesa) e *Engraulis encrasicolus* (anchova europeia), *Clupea harengus* (arenque do Atlântico), *Scomber japonicus* (cavala), *Trachurus murphyi* (cavala chilena), *Scomber scombrus* (cavala do Atlântico) e *Sardinella aurita* (sardinela) (NAYLOR *et al.*, 2000).

na China está impulsionando um grande crescimento nas importações de matéria-prima para ração, com as importações chinesas alcançando 1,84 milhão de toneladas em 2021, um aumento de 29% em relação a 2020 (FAO, 2022). Peru, Chile, Noruega e Dinamarca são os maiores produtores de farinha e óleo de peixe e todos apresentaram aumentos e quedas de produção entre 2021 e 2022, com sazonalidade na produção e exportação. De forma geral, os preços da farinha e do óleo de peixe estão subindo de forma constante devido à alta demanda e ao aumento do custo de alternativas (FAO, 2022; FAO, 2023).

Atualmente, os preços da farinha de peixe são os mais altos desde o início de 2018, alcançando US\$1.800,00 por tonelada, um aumento de US\$200,00 por tonelada em comparação com o ano anterior (FAO, 2022). Naylor *et al.* (2000) e Soares (2015) suscitam que as perspectivas limitadas de expansão da produção de farinha de peixe e a consequente instabilidade no fornecimento do produto e flutuações no preço final decorrem das mudanças climáticas, que aumentam as temperaturas do oceano e diminuem o volume de pesca. Em 2023, países asiáticos dominaram o mercado de farinha de peixe com uma participação de 41,8%, particularmente com a inclusão desse ingrediente na ração para suínos, bovinos e de aves, o que aumenta ainda mais a competitividade pela farinha (GRAND VIEW RESEARCH, 2024).

A busca de alternativas à farinha de peixe é o mecanismo adotado para driblar a sazonalidade na disponibilidade e no custo desse ingrediente, bem como fornecer uma alternativa de ingrediente sustentável. No Brasil, a fonte proteica alternativa de maior adoção é o farelo de soja, que tem maior disponibilidade para aquisição devido ao volume produzido no país, que confere preços competitivos. No entanto, tem baixas digestibilidade e palatabilidade comparadas à farinha de peixe, possui fatores antinutricionais (lectina e polissacarídeos não amiláceos) e deficiência em PUFA's e aminoácidos essenciais (lisina e metionina) que exigem suplementação da dieta com quimioatrativos alimentares que aumentam o custo final da ração para *P. vannamei*, como taurina, arginina, ácido glutâmico e alanina (NAGAPPAN *et al.*, 2021; VARILLAS, 2021). Mesmo assim, os preços apresentados pelo Banco Mundial entre 1979 e 2023 mostram maior estabilidade dos preços de farelo de soja e instabilidade e maior tendência de crescimento dos preços da farinha de peixe (Figura 1) (WORLD BANK GROUP, 2024).

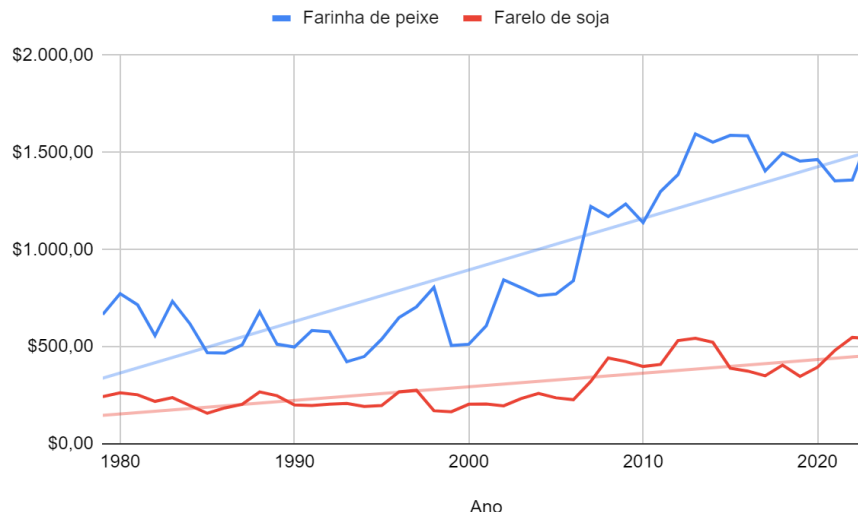


Figura 1: Gráfico de linhas de preços por ano de farinha de peixe e de farelo de soja entre 1979 e 2023 (fonte: WORLD BANK GROUP, 2024)

Nesse contexto, a biomassa de microalgas é uma alternativa competitiva para farinha de peixe e farelo de soja como ingrediente em dieta para camarão marinho. Esses microrganismos têm bom potencial de crescimento em resposta a meios de cultivo diversos, como variações de temperatura, pH, salinidade, o que geram metabólitos que promovem sua sobrevivência em meios adversos e com aplicabilidade industrial competitiva (TINOCO; TEIXEIRA; REZENDE, 2015; DE LA JARA et al., 2016).

A biomassa em questão também tem importante teor nutricional para o ser humano que consumirá a carne do camarão marinho. Além do teor proteico, que favorece o crescimento do animal, a biomassa algal agrega substâncias como PUFAs, que são *commodities* de alta relevância para a saúde humana, polifenóis, vitaminas, carboidratos, fibras, aminoácidos e carotenóides que agregam valor comercial e nutricional à ração (AZAMAN et al., 2017; YUN et al., 2020; MAGONI et al., 2022).

Chlorella sorokiniana

Microalgas do gênero *Chlorella* sp. são exploradas comercialmente desde a década de 1950 pelo seu alto teor proteico (entre 50 e 65%) e potencial para ser uma alternativa de fonte deste nutriente visando a segurança alimentar (NICCOLAI et al., 2019; YADAV et al., 2020; JONES, 2023). A biomassa de microalgas é fonte de

metabólitos bioativos como polifenóis, vitaminas, carboidratos, PUFA (teor entre 10% e 20% em biomassa seca), fibras, aminoácidos e carotenóides que agregam competitividade em termos nutricionais à ração (AZAMAN *et al.*, 2017; YUN *et al.*, 2020).

C. sorokiniana Shihira & R.W.Krauss 1965 é uma das espécies do gênero *Chlorella* considerada a de maior potencial biotecnológico e com boa produtividade de biomassa, proteínas, carboidratos e lipídeos e robustez para crescimento. Além disso, favorece ações de economia circular pelas suas propriedades de biorremediação de águas residuais e impróprias para consumo, como corpos d'água eutrofizados, efluentes industriais e esgoto doméstico. É importante frisar que a biomassa de microalgas coletadas após a biorremediação deve ser esterilizada e descontaminada antes do beneficiamento na fabricação de ração (RIBEIRO, 2020; RIBEIRO *et al.*, 2020; YUAN *et al.*, 2023).

No contexto de alimentação em aquicultura, *C. sorokiniana* é termotolerante, o que preserva as propriedades nutricionais após processo de extrusão (RODRIGUES, 2020), tem alto teor de luteína, proteínas e lipídeos (DIPRAT *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2022), maior taxa de crescimento em meios de cultivo mixotróficos dada sua maior capacidade de reutilização de CO₂ proveniente dos seus processos de metabolismo de substratos orgânicos (LI *et al.*, 2022) e produção de metabólitos com ação antimicrobiana (SHAIMA *et al.*, 2022).

O uso da biomassa de *C. sorokiniana* estabelece conexões com três Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) sob pilares sociais e econômicos (GOIS *et al.*, 2022) e que incluem mais um fator competitivo:

- Pilar social: ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), meta 2.4 (“Até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo”);
- Pilar Econômico: ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), meta 9.5 (“Fortalecer a pesquisa científica, melhorar as capacidades tecnológicas de setores industriais em todos os países, particularmente os países em desenvolvimento, inclusive, até 2030, incentivando a inovação e aumentando

substancialmente o número de trabalhadores de pesquisa e desenvolvimento por milhão de pessoas e os gastos público e privado em pesquisa e desenvolvimento”); e

- Pilar Econômico: ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), meta 12.2 (“Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais”)

MATERIAIS E MÉTODOS

A cepa de *C. sorokiniana* avaliada neste estudo foi coletada no bioma Cerrados e depositada na Coleção de Microrganismos e Microalgas Aplicados à Agroenergia e Biorrefinarias (CMMAABio), da Embrapa Agroenergia, sob o número BRM 051899 e cultivada em meio líquido BG11 e numa câmara de crescimento a temperatura constante de 25°C e em fotoperíodo de 12/12 horas (RIBEIRO et al., 2020). A partir da caracterização bioquímica da cepa selecionada, executada e coordenada pela Embrapa e apresentada por Ribeiro et al. (2020), elaborou-se uma formulação hipotética para *P. vannamei* em estágios juvenis até adulto em viveiros em sistemas semi-intensivo e intensivo.

Em seguida, executou-se a valoração econômica da *C. sorokiniana* e sua aplicação no mercado de ração animal. Valorar permite balancear as questões macroeconômicas de ativos ambientais e posterior inclusão em sistemas contábeis nacionais ao inserir critérios sem indicadores definidos para inserir o meio ambiente e seus componentes, como a biodiversidade e as mudanças climáticas, em sistemas econômicos (KING et al., 2021). Com isso, cria-se uma visão transdisciplinar para permitir análises transversais que transponham essas falhas (AZQUETA; SOTELSEK, 2007; VÁSQUEZ et al., 2014; BARDELLA-CASTRO, 2015; KING et al., 2021).

Para os cálculos, considerou-se que o desenvolvimento de biomassa da cepa em análise está em TRL 3, sigla em inglês para *Technology Readiness Levels*. Divididos em nove estágios, a abordagem por escala de maturidade tecnológica representa *milestones* para cada etapa de desenvolvimento tecnológico, desde a concepção da ideia (TRL 1) até a escala industrial para exploração da tecnologia (TRL 9) (CAPDEVILLE et al., 2017). Conforme a evolução do desenvolvimento tecnológico na escala TRL, menores são os riscos e a taxa de desconto (ANJOS et al., 2021). A Figura 2 apresenta cada estágio de maturidade tecnológica, sendo que o TRL 3

representa a confirmação de uma hipótese e a posterior prova de conceito para evolução para prototipagem, com taxa de desconto entre 50% e 80% e com proteção intelectual questionável (ANJOS *et al.*, 2021):



Figura 2: Níveis de maturidade tecnológica (fonte: Capdeville *et al.*, 2017, p. 17)

O método adotado para o estudo econômico e financeiro foi de Fluxo de Caixa Descontado (FCD) com associação à curva de Gompertz, desenvolvido por Azevedo e Tukoff-Guimarães (2013; 2014a; 2014b; 2015) e adaptado por Siqueira *et al.* (2024) para a Embrapa. Optou-se pelo FCD por ser o método mais adequado para estimar benefícios econômicos e financeiros futuros de tecnologias e posterior contabilização da incorporação da solução tecnológica e seu *disclosure* para os stakeholders (FERREIRA *et al.*, 2020). A adaptação também conta com a inclusão de ajustes de curvas em séries temporais num cenário em determinado período de tempo, que gera valores que permitem a contabilização da incorporação da solução tecnológica e seu *disclosure* para os stakeholders (ANJOS *et al.*, 2021).

A partir de Azevedo e Tukoff-Guimarães (2013; 2014a; 2014b; 2015), os ajustes de curvas em séries temporais incluem na aplicação do método a construção de cenários de valores da solução tecnológica, função da curva de Gompertz, a partir de premissas econômico-financeiras, legais e de mercado (SIQUEIRA *et al.*, 2024). FCD se fundamenta na abordagem de renda, a partir da estimativa de fluxo de caixa e da projeção de geração de benefícios futuros descontados a valor presente, associado à vida econômica do ativo tecnológico. Os fluxos de caixa gerados pela aplicação do método são previsíveis e têm incertezas baixas, mas dependem de fatores subjetivos (QUINTELLA *et al.*, 2019; ANJOS *et al.*, 2021; CARÍSSIMO, 2024). A modelagem da adaptação do FCD apresentada por Siqueira *et al.* (2024) se baseia nas premissas apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Premissas para modelagem e aplicação do método de FCD

Classificação	Item	Explicação
Econômico-financeiro	Custos de desenvolvimento futuros	Representa o montante do dispêndio para codesenvolvimento, licenciamento ou fornecimento até TRL 9
Econômico-financeiro	Agregação de valor	Associado ao incremento de produtividade do ativo tecnológico
Econômico-financeiro	Ciclo de vida do produto	Refere-se ao ciclo de vida do produto em função da sua capacidade de geração de receita ao longo de um tempo determinado
Econômico-financeiro	Redução de custos	Valor que tem impacto direto no lucro pretendido
Legal	Propriedade intelectual e Barreiras à entrada	A proteção intelectual agrega valor ao ativo ao permitir o monopólio na exploração durante a vigência da proteção
Mercado	Market share empresa/ tecnologia (se estimativa direta de receita, market share = 100%)	Refere-se ao percentual de participação da futura tecnologia no mercado-alvo
Mercado	CAGR	Sigla em inglês para <i>Compound Annual Growth Rate</i> , ou Taxas de Crescimento Anual Composta. É usada para aplicação na obtenção da curva de participação da tecnologia em função do tempo.
Mercado	Potencial de mercado	Refere-se à receita bruta de vendas da empresa parceira
Mercado	Valor agregado	Valor associado ao incremento de produtividade que o ativo apresenta em comparação a um coeficiente técnico de referência, sendo também fator de ágio e deságio

Fonte: adaptado de Siqueira *et al.* (2024)

O método foi executado a partir de parâmetros de potencial de mercado, que se adequa a produto que ainda não foi lançado. Nisso, a valoração remete a uma avaliação *ex ante* e gera subsídios para negociação de parcerias para projetos em codesenvolvimento (SIQUEIRA *et al.*, 2024). Agregou-se também à ferramenta as seguintes variáveis:

- Probabilidade de cenários: valor arbitrário para cenários pessimista, esperado e otimista a partir da percepção da empresa potencialmente parceira;
- Impostos: porcentagem sobre a receita bruta de vendas estimada. Para este caso, aplicou-se 30%; e
- Base de royalties: usou-se a base de royalties apresentado por Kapitsa e Aralova (2007) *apud* Anjos *et al.* (2021).

Em seguida, calculou-se a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que representa o retorno mínimo necessário sobre o investimento no desenvolvimento da solução tecnológica a partir de fatores de incerteza e é composto pelo custo de oportunidade (remuneração), o risco inerente à tecnologia e à liquidez (RABUSKE *et al.*, 2018; BOTELHO *et al.*, 2024). TMA representa a taxa de desconto aplicada no cálculo do fluxo de caixa, é usada como técnica para a análise de investimentos e é o retorno mínimo que o investidor espera com a aplicação dos recursos (TRUJILLO, 2021; RIBEIRO *et al.*, 2022). A TMA foi executada considerando os seguintes fatores de incerteza, adaptado de Lisboa (2023) por Botelho *et al.* (2024) e específica para o desenvolvimento tecnológico de bioinsumos e posterior transferência de tecnologia para o setor produtivo (Quadro 2)

Quadro 2: Fatores de incerteza aplicados para cálculo da Taxa Mínima de Atratividade

Classificação	Fatores de Incerteza	Opções
Tecnologia	Taxa básica de juros (SELIC)	Preenchimento manual
Mercado	Maturidade da tecnologia	TRL 1 a TRL 9
Organização	Solidez da empresa parceira/ modelo de negócios	Experiência da empresa parceira no mercado

Tecnologia	Grau de inovação do produto	Aquitetural, disruptiva, radical ou incremental
Propriedade intelectual	Propriedade intelectual	Potencial de proteção intelectual do ativo tecnológico, incluindo o status de proteção (depositado ou concedido)
Ambiental	Impacto ambiental	Comparação qualitativa com outros produtos no mercado
Tecnologia	Concorrência tecnológica	Comparação de competitividade com outros produtos no mercado
Legal	Aspectos regulatórios	Impacto da regulação na comercialização do produto
Tecnologia	Riscos técnicos	Riscos técnicos no avanço na escala de maturidade

Fontes: adaptado de Botelho *et al.* (2024) e Siqueira *et al.* (2024)

Com os resultados da modelagem e do cálculo da Taxa Mínima de Atratividade, construiu-se a curva de Gompertz. Nesta etapa, foram calculados valores para licenciamento e para cessão, balizados por uma margem de venda a ser determinada no ato do cálculo (SIQUEIRA *et al.*, 2024). A curva também apresenta valores de dois indicadores financeiros que, juntos, permitem traçar cenários para análise de viabilidade financeira e econômica (ANJOS *et al.*, 2021):

- Valor Presente Líquido (VPL): valor obtido da comparação de receitas e despesas na data inicial do investimento a uma taxa de juros preestabelecida (TMA) (BATISTELA *et al.*, 2016);
- Taxa Interna de Retorno (TIR): representa o valor no qual a taxa de juros anula o VPL, e é apresentada como uma porcentagem do retorno do capital investido (ANJOS *et al.*, 2021).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A cepa selecionada para estudo e que foi caracterizada por Ribeiro *et al.* (2020) tem teor protéico similar ao do farelo de soja, de 45,4% (LOPES, 2022), mas não apresenta os aminoácidos essenciais lisina e metionina, o que faz ser necessário a suplementação para dietas de camarões. É importante destacar o elevado teor de ácidos graxos, particularmente ômega 3 e ômega 6 (Quadro 3).

Quadro 3: Caracterização bioquímica da cepa de *C. sorokiniana* BRM 051899 cultivada em meio de cultivo comercial BG11.

Teor de macronutrientes e micronutrientes	Quantidade (%)
Proteína bruta	41,67
Carboidratos	22,41
Ácidos graxos	6,50, com destaque para ácido alfa-linolênico (tipo de ômega 3) e, em menor quantidade, ácido palmítico e ácido linoléico (tipo de ômega 6)

Fonte: Adaptado de Ribeiro *et al.* (2020)

A partir dos dados do Quadro 3 e das diretrizes de Chen *et al.* (2021), Zhang *et al.* (2022) e Chattaraj *et al.* (2024), construiu-se a composição base da formulação hipotética com 35% de proteína bruta substituindo parcial ou integralmente a farinha de peixe e o farelo de soja pela biomassa de *C. sorokiniana* (Quadro 4).

Quadro 4: Composição base da formulação hipotética

Macronutrientes e micronutrientes	Quantidade (%)
Proteína Bruta	35
Fibra Bruta	4-5
Extrato Etéreo	8-10
Matéria Mineral	15
Cálcio	2-4
Fósforo	0,9-1
Vitaminas e Minerais	De acordo com as necessidades específicas do camarão-branco-do-Pacífico

Fontes: Chen *et al.* (2021), Zhang *et al.* (2022) e Chattaraj *et al.* (2024)

A partir da composição base, chegou-se à seguinte formulação e respectivo custo de um quilograma da ração hipotética. A partir de valores fornecidos por Kang *et al.* (2015), World Bank Group (2024), CONAB (2024) e TRIDGE (2024), chegou-se ao custo de R\$ 8,31 por quilograma da ração hipotética, com margem de venda (*markup*) de 1% (Quadro 5).

Quadro 5: Formulação hipotética de ração para *P. vannamei* com biomassa de *C. sorokiniana*, a partir da composição base

Ingrediente	%	R\$/kg	Custo (1 kg)	Fonte
Biomassa de <i>C. sorokiniana</i>	25%	R\$ 15,35 ⁸	R\$ 3,84	Kang <i>et al.</i> (2015)
Farinha de Peixe	20%	R\$ 8,65	R\$ 1,73	World Bank Group (2024)
Farelo de Soja	15%	R\$ 2,40	R\$ 0,36	CONAB (2024)
Óleo de Peixe	5%	R\$ 31,19	R\$ 1,56	TRIDGE (2024)
Fubá de Milho	15%	R\$ 2,99	R\$ 0,45	CONAB (2024)
Farelo de trigo	10%	R\$ 1,47	R\$ 0,15	CONAB (2024)
Premix (q.s.p. ⁹)	1%	R\$ 23,20	R\$ 0,23	Preço praticado no mercado
			R\$ 8,31	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para as etapas seguintes da valoração, considerou-se que a fórmula hipotética no Quadro 5 é a mesma adotada em escala industrial (TRL 9). A produção anual de *Chlorella* sp. é de aproximadamente 5.000 toneladas, sendo que 30% é destinada à alimentação animal (1.500 toneladas) (LEVASSEUR *et al.*, 2020). Deste valor, extraiu-se 25% como demanda de biomassa por ano para a produção do produto hipotético, ou seja, 375.000 kg. Assim, partiu-se para a aplicação do método adaptado de Fluxo de Caixa Descontado proposto por Siqueira *et al.* (2024), cujas variáveis estão presentes no Quadro 6.

Quadro 6: Modelagem da valoração a partir da fórmula do Quadro 4 e dados de mercado para o modelo de base de potencial de mercado

Premissas	Valores	Observações
Demanda/ano	375.000 kg	-
Market share	• Cenário pessimista: 0,1%; • Cenário esperado: 0,2%; • Cenário otimista: 0,3%.	-
Impostos	30%	Incide sobre receita bruta de vendas

⁸ Valor convertido de US\$ 2,71 por quilograma de biomassa (KANG *et al.*, 2015). Cotação do dólar americano no dia 18/10/2024: US\$1,00 = R\$ 5,667

⁹ Sigla para “quantidade suficiente para”, que representa a quantidade de excipientes incluídos na formulação para completar a quantidade total do produto.

CAGR	• Cenário pessimista: 3,50% (FUTURE MARKET INSIGHTS, 2021); • Cenário esperado: 4,10% (PERSISTENCE MARKET RESEARCH, 2024); • Cenário otimista: 7,20% (DATA INTELO, 2023);	-
Preço / custo unitário	• Cenário pessimista: US\$ 17,00/kg (R\$ 96,34/kg) (ALIBABA, 2024a); • Cenário esperado: US\$ 20,00/kg (R\$ 113,34/kg) (ALIBABA, 2024b); • Cenário otimista: US\$ 50,00/kg (R\$ 283,36/kg) (ALIBABA, 2024c)..	Valores convertidos para real (R\$) pela cotação do dólar americano (US\$) do dia 18/10/2024 (1 Dólar dos Estados Unidos/USD = 5,6671994 Real/BRL)
Valor de dispêndio para atividades de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) até TRL 3	R\$ 731.831,18	Contempla as contrapartidas financeira e econômica (mão de obra) da Embrapa
Custo de desenvolvimento futuro, até TRL 9	R\$ 1.440.000,00	-
Incremento de produtividade no TRL atual	100%	-
Potencial de Propriedade Intelectual	Sim	-
Base de royalties	2,50%	Mercado de alimentos para pecuária

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de Siqueira *et al.* (2024)

Em seguida, calculou-se a TMA a partir dos fatores de incerteza presentes no Quadro 2.

Quadro 7: Fatores de incerteza aplicados para cálculo da Taxa Mínima de Atratividade

Fatores de Incerteza	Opções
Taxa básica de juros (SELIC)	10,50%
Maturidade da tecnologia	TRL 3

Solidez da empresa parceira/ modelo de negócios	Empresa apresenta alta experiência no mercado de bioinsumos
Grau de inovação do produto	Arquitetural
Propriedade intelectual	Passível de proteção, mas não protegida
Impacto ambiental	Igual aos produtos concorrentes
Concorrência tecnológica	Existem outras soluções, mas são superiores à desenvolvida
Aspectos regulatórios	Existe regulamentação, que pode limitar a comercialização da tecnologia
Riscos técnicos	Existem riscos técnicos e ainda não foram identificadas formas de superá-las

Fonte: Adaptado de Siqueira *et al.* (2024)

A partir da modelagem e do cálculo da TMA, obteve-se a avaliação de cenários, modelos de negócios e indicadores financeiros com resultado da modelagem de valoração da formulação hipotética de ração para *P. vannamei* com biomassa de *C. sorokiniana* (Figura 3).

Empresa:	Empresa X		
Tecnologia:	Biomassa de <i>Chlorella sorokiniana</i> para ração		
Estimativa de ganho da Empresa X com o Biomassa de <i>Chlorella sorokiniana</i> para ração (em caso de comercialização)	Cenários		
Condições	pessimista	esperado	otimista
Potencial de mercado Empresa X com o(a) Biomassa de <i>Chlorella sorokiniana</i> para ração	R\$ 36.128	R\$ 85.008	R\$ 318.780
impostos e devoluções	30,00%	30,00%	30,00%
Taxa de desconto (TMA)	59,22%	59,22%	59,22%
periodo de crescimento na participação	20	20	20
CAGR	3,50%	4,10%	7,20%
Probabilidade cenários	25,00%	50,00%	25,00%

Modelo de negócios	Dado
Valor para licenciamento (sunk - até TRL 5)	R\$ 770.349
Padrão de royalties	Alimentos para pecuária
Valor para licenciamento (FCD; TRL >= 6)	-R\$ 23.325
Margem de venda (markup)	1%
Valor para cessão (sunk - até TRL 5)	R\$ 778.544
Valor de cessão (FCD; TRL >=6)	-R\$ 233.245

Indicadores empresa	valor
VPL	-R\$ 932.981
TIR	-4%

Figura 3: Cenários, modelos de negócios e indicadores financeiros com resultado da modelagem de valoração da formulação hipotética de ração para *P. vannamei* com biomassa de *C. sorokiniana*. Fonte: Adaptado de Siqueira *et al.* (2024).

A aplicação da ferramenta apresentada por Siqueira et al. (2024) chegou a TMA = 59,22%, TIR = -4% e VPL = - R\$ 932.981,00. Valores negativos de VPL e valor de TIR menor do que a TMA representam a inviabilidade do investimento no momento presente da avaliação da solução tecnológica (TRL 3). Com isso, tem-se um cenário desfavorável para eventual ação de transferência de tecnologia no estágio de maturidade tecnológica atual. Quintella *et al.* (2019) e Anjos *et al.* (2021) reforçam que soluções tecnológicas em TRL 3 ou menor têm alto risco de falha, proteção intelectual questionável e taxa de risco entre 50% e 80%, dado comprovado com o valor obtido de TMA.

Resultados desfavoráveis no momento presente da tecnologia não representam seu abandono ou paralisação do desenvolvimento tecnológico, juntamente com parâmetros e vantagens técnicas do ativo tecnológico. A Figura 4 apresenta o gráfico com *payback* a partir do 10º a partir das premissas avaliadas, além de taxa mínima de royalties de 193,28% estimados para a Embrapa balizado com um valor de VPL = R\$ 1,00.

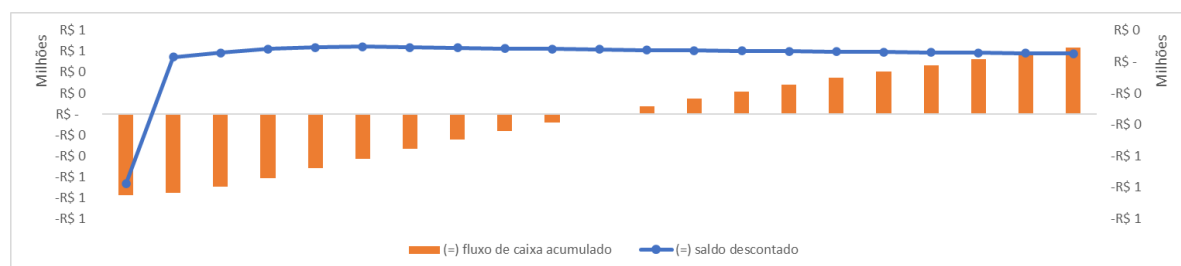


Figura 4: Gráfico do fluxo de caixa descontado. Fonte: elaborado pelos autores, a partir de Siqueira et al. (2024)

Poucas biomassas vegetais têm composição proteica e lipídica que atendam as necessidades nutricionais de animais aquícolas, e a biomassa de microalgas e o farelo de soja são dois exemplos (BATURRE *et al.*, 2022). Em comparação com a soja, a biomassa de microalgas tem alto grau de competitividade pela alta quantidade de mercados que podem aproveitar sua biomassa, coprodutos e resíduos (UMASHREE *et al.*, 2023), alto teor nutricional e baixa toxicidade para consumo humano e animal (TAHREEN *et al.*, 2023) e pelo seu cultivo ser viável e escalável em meios e sistemas diversos, diferente da soja que exige solo fértil, controle de pragas e condições climáticas favoráveis. Com isso, é possível incluir no rol de vantagens competitivas

das microalgas ser uma solução ambiental para a biorremediação de águas impróprias para consumo e resíduos agroindustriais.

A biomassa de *C. sorokiniana* não compete com a farinha de peixe e nem farelo de soja para substituição total em formulações pelo preço, mas suas propriedades nutricionais e palatabilidade tornam a microalga um suplemento para a dieta em curto prazo. No entanto, tem potencial para competir e, em longo prazo, substituir o farelo de soja e permitir menor quantidade de farinha de peixe, promovendo economicidade no manejo. Li, M. *et al.* (2022), Li, T. *et al.* (2022), Xu *et al.* (2023) e Yuan *et al.* (2024) indicam que a substituição parcial da farinha de peixe (20% a 40%) por *C. sorokiniana* não impacta negativamente no crescimento do camarão marinho. Substituições maiores ou iguais a 60% reduzem a performance e a imunidade ao afetar a via de sinalização lisossomal (XU *et al.*, 2023) em camarões. O Quadro 8 apresenta vantagens e desvantagens dos usos de farelo de soja, farinha de peixe e biomassa de microalgas como ingredientes protéicos para dieta de camarão marinho:

Quadro 8: Quadro comparativo de vantagens e desvantagens de farelo de soja, farinha de peixe e biomassa de *C. sorokiniana*

Ingrediente	Vantagens	Desvantagens
Farelo de soja	• Proteína de baixo custo; • Alto teor proteico (44 a 48%); • Alta disponibilidade no mercado brasileiro.	• Pobre em aminoácidos essenciais (lisina e metionina); • Pobre em PUFA's; • Presença de fatores antinutricionais; • Baixa palatabilidade; • Baixo teor de fósforo.
Farinha de peixe	• Alta digestibilidade; • Alta palatabilidade; • Insumo padrão no mercado, com alta digestibilidade e rico em aminoácidos essenciais (lisina e metionina) e PUFA's.	• Potencial fonte de contaminantes e microrganismos patogênicos; • Alto custo e sazonalidade no fornecimento de farinha de peixe.
Biomassa de <i>C. sorokiniana</i>	• Alta digestibilidade; • Balanço favorável de aminoácidos essenciais e PUFA's; • Presença de metabólitos com ação antioxidante e efeito probiótico; • Microalga termotolerante, o que preserva as propriedades nutricionais após processo de extrusão; • Alto teor de luteína (ação antioxidante); • Atende a critérios de preservação ambiental e mitigação de gases de efeito estufa.	• Parede celular espessa e com recalcitrância dificulta a digestão; • Alto custo de cultivo e de processamento; • Menor disponibilidade de biomassa atualmente pela baixa quantidade de plantas industriais para cultivo e processamento da biomassa.

Fontes: Rodrigues (2020), Ansari *et al.* (2021), Nagappan *et al.* (2021) e Anjos *et al.* (2024)

A vantagem competitiva da biomassa de *C. sorokiniana* é composta pelo seu teor nutricional e importância ecológica. O teor de proteína, composição de ômega 3 e ômega 6 e a termotolerância da biomassa são competitivos para a colheita e processamento para produção da ração. Já a possibilidade de cultivo em águas impróprias para consumo gera vantagem ao incluir as microalgas em regime de biorrefinarias ao aproveitar resíduos industriais líquidos. Além disso, têm importância ecológica na mitigação de dióxido de carbono e prescinde de terras cultiváveis para seu cultivo, o que agrega mais uma característica competitiva às microalgas (ANJOS *et al.*, 2024).

Outro ponto importante é a viabilidade financeira de uso da biomassa de *C. sorokiniana* BRM 051899, que ainda se encontra em baixa escala de maturidade

tecnológica e, portanto, em escala de produção inferior à aparente demanda anual de 1500 toneladas para alimentação animal (LEVASSEUR et al., 2020) a um custo maior de R\$ 1 milhão nas condições atuais do cultivo e aproveitamento de *C. sorokiniana* BRM 051899 no mercado em análise. Tal fato se comprova com VPL e TIR negativos e reforça o apontamento do indicador “Aumento das viabilidades técnica e financeira que garantam a sustentabilidade dos processos produtivos baseados em microalgas e cianobactérias” como o de maior relevância estratégica segundo os especialistas consultados no estudo Delphi de Anjos et al. (2024).

Resultados financeiros desfavoráveis no momento presente da tecnologia não representam seu abandono ou paralisação do desenvolvimento tecnológico. Juntamente com uma taxa mínima de royalties de 193,28% a partir de VPL = R\$ 1,00, parâmetros e vantagens técnicas do ativo tecnológico como o teor nutricional da biomassa de *C. sorokiniana* e fatores de competitividade como vínculo com os ODS e vantagens ambientais, estimulam a prospecção de parcerias estratégicas e captação de recursos para continuação do desenvolvimento tecnológico e avanço na escala TRL até o lançamento da tecnologia no mercado-alvo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou evidências da atual baixa viabilidade do cultivo e aproveitamento da biomassa de *C. sorokiniana* BRM 051899 para produção de ração para camarão-branco-do-Pacífico, com VPL e TIR negativos e para atender uma aparente demanda anual alta de biomassa.

No entanto, a biomassa em questão tem características nutricionais que geram vantagem competitiva à biomassa de *C. sorokiniana*, como alto teor proteico, ômega 3, ômega 6 e antioxidantes e tolerância a altas temperaturas para extrusão da ração, o que garante estabilidade, atividade biológica dos compostos bioativos preservada e menor perda de ração no meio de produção dos animais. Além disso, o potencial das microalgas de mitigação de mudanças climáticas por meio da absorção de carbono, a possibilidade de cultivo sem usar terras agricultáveis e de cultivo em regime de biorrefinarias fortalecem a competitividade da biomassa de *C. sorokiniana* e conectam o cultivo e aproveitamento da biomassa aos ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), 9 (Indústria, inovação e infraestrutura) e 12 (Consumo e produção responsáveis).

Mesmo com alto teor nutricional, suscita-se que a biomassa algal em questão não tem potencial para substituição completa de farinha de peixe e nem farelo de soja, dada a indisponibilidade em biomassa para uso em escala industrial de fabricação de ração que torna seu preço final inviável. No entanto, pode, em longo prazo, se tornar substituto do farelo de soja e compor formulações de rações substituindo até 40% da farinha de peixe, além de compor ações de mitigação das mudanças climáticas e de garantia da segurança alimentar.

AGRADECIMENTOS

Douglas Rodrigues Mendes (bolsista do Observatório de Tendências em Biocombustíveis e Bioprodutos da Embrapa Agroenergia), pelo apoio na busca de dados de mercado.

REFERÊNCIAS

ALBAQAMI, N. M. *Chlorella vulgaris* as unconventional protein source in fish feed: A review. **Aquaculture**, n. 584, e741404, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741404>. Acesso em: 18 out. 2024.

ALIBABA. **Atacado Chlorella 50% Proteína Chlorella Em Pó/Chlorella Comprimidos**. 2024a. Disponível em: https://www.alibaba.com/product-detail/Chlorella-Wholesale-Chlorella-50-Protein-Chlorella_1600867194564.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_image.5349c139a372Gu&s=p. Acesso em: 19 out. 2024.

ALIBABA. **Melhorador de nutrição Chlorella Sorokiniana Chlorella Verde**. 2024b. Disponível em: https://www.alibaba.com/product-detail/Nutrition-Enhancer-Chlorella-Sorokiniana-Green-Chlorella_1601022622748.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.713c13a0cQgjU8. Acesso em: 19 out. 2024.

ALIBABA. **Material de saúde Chlorella Sorokiniana**. 2024c. Disponível em: https://www.alibaba.com/product-detail/Healthcare-Material-Chlorella-Sorokiniana_1601022694474.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_price.e97f13a0gBIES4. Acesso em: 19 out. 2024.

ANDERSON, J. L.; ASCHE, F.; GARLOCK, T. Globalization and commoditization: The transformation of the seafood market. **Journal of Commodity Markets**, v. 12, p. 2-8, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcomm.2017.12.004>. Acesso em: 13 out. 2024.

ANJOS, S. S. N. dos; BRAGA, M.; SOUZA, C. R. P. de; GHESTI, G. F.; MARTIN, A. R. **Avaliação e valoração de ativos tecnológicos em instituições científicas, tecnológicas e de inovação (ICTs): o caso das tecnologias em estágio inicial**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2021. 75 p. (Embrapa Agroenergia. Documentos, 33). Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/222430/1/Avaliac807a7710-e-valorac807a7710-de-ativos-tecnolo769gicos.pdf>. Acesso em: 8 out. 2024.

ANJOS, S. S. N. dos; VIANA, N. M.; MENDONÇA, S.; JUNGSMANN, L.; 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, n. 4, p. 10–28, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2024v13i4.p10-28>. Acesso em: 11 dez. 2024.

ANSARI, F. A.; GULDHE, A.; GUPTA, S. K.; RAWAT, I.; BUX, F. Improving the feasibility of aquaculture feed by using microalgae. **Environmental Science and Pollution Research**, n. 28, p. 43234–43257, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14989-x>. Acesso em: 18 set. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CRIADORES DE CAMARÃO (ABCC). **Censo da carcinicultura dos estados do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte - 2021**. Natal: Deza's, 2022. Disponível em: https://abccam.com.br/wp-content/uploads/2023/02/Completo_Censo-2022_23_D.pdf. Acesso em: 1º out. 2024.

AZAMAN S. N. A.; NAGAO. N.; YUSOFF, F. M.; TAN, S. W.; YEAP, S. K. A comparison of the morphological and biochemical characteristics of *Chlorella sorokiniana* and *Chlorella zofingiensis* cultured under photoautotrophic and mixotrophic conditions. **PeerJ**, v. 5, e3473, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.7717/peerj.3473>. Acesso em: 8 out. 2024.

AZEVEDO, P. B. M.; GUIMARÃES, Y. B. T. Adaptação da curva de Gompertz para novo método de valoração de tecnologias. In: XV CONGRESSO LATINO-IBEROAMERICANO DE GESTIÓN TECNOLÓGICA - ALTEC 2013, 15., 2013, Porto. **Proceedings...** Porto: Altec, 2013. p. 1-15. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.2588.8006>. Acesso em: 13 out. 2024.

AZEVEDO, P. B. M.; GUIMARÃES, Y. B. T. IPT's "Quick&Dirty" technology valuation model: an empirical analysis on the metallurgical industry. In: SCIENCE-TO-BUSINESS MARKETING CONFERENCE, 13., 2014, Zürich. **Proceedings...** Zürich: S2B, 2014a. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/266145428>. Acesso em: 13 out. 2024.

AZEVEDO, P. B. M.; GUIMARÃES, Y. B. T. IPT's "Quick & dirty" technology valuation model. In: UIIN GOOD PRACTICE SERIES 2014 – FOSTERING UNIVERSITY-INDUSTRY RELATIONSHIPS, ENTREPRENEURIAL, 2014, Madrid. **Proceedings...** Madrid: UIIN, 2014b. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/266145306>. Acesso em: 13 out. 2024.

AZEVEDO, P. B. M.; GUIMARÃES, Y. B. T. IPT's Quick & Dirty Economic Valuation Method: An Empirical Test on Three Cases. *Chinese Business Review*, Wilmington, v. 14, n. 1, p. 1-7, January 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/280938671>. Acesso em: 13 out. 2024.

AZQUETA, D.; SOTELSEK, D. Valuing nature: From environmental impacts to natural capital. **Ecological Economics**, v. 63, n. 1, p. 22–30, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.029>. Acesso em: 1 mai. 2020.

BARDELLA-CASTRO, J. D. **Usos e abusos da valoração econômica do meio ambiente: ensaios sobre aplicações de métodos de função demanda no Brasil**. 2015. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/19318>. Acesso em: 1 mai. 2020.

BATISTELA, G. C.; PINTO, C. L. ; SILVA, M. A. ; SIMOES, D. Valor Presente Líquido Fuzzy aplicado a um projeto de investimento industrial.. In: IV Congresso Brasileiro de Sistemas Fuzzy, 2016, Campinas. **Anais...** Campinas: IMECC - UNICAMP, 2016. Disponível em: https://www.ime.unicamp.br/~cbsf4/Papers_IVCBSF/CBSF_2016_paper_65.pdf. Acesso em: 6 out. 2024.

BATURE, A.; MELVILLE, L.; RAHMAN, K. M.; AULAK, P. Microalgae as feed ingredients and a potential source of competitive advantage in livestock production: A review. **Livestock Science**, v. 259, e104907, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104907>. Acesso em 8 out. 2024.

BOTELHO, F. J. E.; TANURE, J. P. M.; GOMES, J. F. B.; SANTOS, L. C. X.; NEVES, S. E. das. **Valoração de ativos tecnológicos, do tipo bioinsumos, de acordo com práticas de mercado e abordagens inovadoras relacionadas ao tema**. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA Executivo em Gestão da Inovação e Capacidade Tecnológica). Fundação Getúlio Vargas e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília, 2024. Documento interno.

CAPDEVILLE, G. de; ALVES, A. A.; BRASIL, B. dos S. A. F. **Modelo de inovação e negócios da Embrapa Agroenergia: gestão estratégica integrada de P&D e TT**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2017. 73 p. (Embrapa Agroenergia. Documentos, 24). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/173992/1/DOC-24-CNPAAE.pdf>. Acesso em: 18 out. 2024.

CARÍSSIMO, C. R. Considerações sobre o método do fluxo de caixa descontado na apuração de haveres: um ensaio teórico. **Revista Catarinense da Ciência Contábil**, v. 23, 1-15, e3433, 2024. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9319260>. Acesso em: 18 out. 2024.

CARVALHO JÚNIOR, L. C. de; MARQUES, M. de M.; FREIRE, F. de S. Mensuração de ativos culturais: aplicação do método do custo de viagem e método de valoração contingente no Memorial Darcy Ribeiro. **Revista Brasileira de Pesquisa em Turismo**, v. 10, n. 2, p. 394-413, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.7784/rbtur.v10i2.1081>. Acesso em: 15 ago. 2021.

CHATTARAJ, S.; BEHERA, B. K.; MOHAPATRA, P. K. D. Effective valorization of *Chlorella* biomass and Brewers spent grain substituting fish meal and soybean meal in the diet of herbivorous fish *Cirrhinus reba* for higher growth, digestibility and sustainable cultivation. **Journal of Applied Phycology**, v. 36, p. 217–232, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10811-023-03106-9>. Acesso em: 15 jul. 2024.

CHEN, W.; LUO, L.; HAN, D.; LING, F.; CHI, Q.; HU, Q. Effect of dietary supplementation with *Chlorella sorokiniana* meal on the growth performance, antioxidant status, and immune response of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*).

Journal of Applied Phycology, v. 33, p. 3113–3122, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02541-w>. Acesso em: 15 jul. 2024.

CNPASA (EMBRAPA PESCA E AQUICULTURA). [Base de dados – Internet]. **Centro de Inteligência e Mercado em Aquicultura**. 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/cim-centro-de-inteligencia-e-mercado-em-aquicultura>. Acesso em: 8 ago. 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Base de Dados - Preços de Mercado**. 2024. Disponível em: <https://sisdep.conab.gov.br/precosiagroweb/>. Acesso em: 30 set. 2024.

COSTA, S. W.; FRAGA, A. P. M.; ZAMPARETTI, A. S.; MARQUES, M. R. F.; ANDREATTA, E. R. Presença do vírus da síndrome da mancha branca em crustáceos decápodes silvestres em lagoas costeiras no Sul do Brasil. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 64, n. 1, p. 209-216, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-09352012000100030>. Acesso em: 30 set. 2024.

DANTAS, M. D. de A. **Estudo dos genomas dos principais vírus que acometem a carcinicultura no Brasil**. 2019. 132f. Tese (Doutorado em Bioquímica) - Centro de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/27379>. Acesso em: 30 set. 2024.

DATA INTELO. **Microalgal Based Feed Market Research Report 2032**. 2023. Disponível em: <https://dataintelo.com/report/microalgal-based-feed-market>. Acesso em 5 out. 2024.

DE LA JARA, A.; ASSUNÇÃO, P.; PORTILLO, E.; FREIJANES, K.; MENDOZA, H. Evolution of microalgal biotechnology: a survey of the European Patent Office database. **Journal of Applied Phycology**, v. 28, n. 5, p. 2727–2740, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0805-8>. Acesso em: 14 out. 2020.

DINESHBABU, G.; GOSWAMI, G.; KUMAR, R.; SINHA, A.; DAS, D. Microalgae–nutritious, sustainable aqua- and animal feed source. **Journal of Functional Foods**, v. 62, e103545, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103545>. Acesso em: 8 out. 2024.

DIPRAT, A. B.; THYS, R. C. S.; RODRIGUES, E.; RECH, R. *Chlorella sorokiniana*: A new alternative source of carotenoids and proteins for gluten-free bread. **LWT**, v. 134, e109974, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109974>. Acesso em: 30 set. 2024.

EVANGELISTA, D. K. R.; SOARES, M.; SOUSA, D. N. de; BELCHIOR, E. B.; NASCIMENTO, M. dos S. Prospecção de ofertas tecnológicas e principais demandas da carcinicultura marinha brasileira. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 38, n. 1, e26763, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.35977/0104-1096.cct2021.v38.26763>. Acesso em: 7 out. 2024.

FERREIRA, A. R. F.; ; SOUZA, A. L. R.; SILVÃO, C. F.; MARQUES, E. F.; FARIA, J. A.; RIBEIRO, N. M. Valoração de Propriedade Intelectual para a Negociação e Transferência da Tecnologia: O caso NIT/IFBA. **NAVUS Revista de Gestão e Tecnologia**, v. 10, p. 01-23, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22279/navus.2020.v10.p01-23.1046>. Acesso em: 15 dez. 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **GLOBEFISH Highlights – International markets for fisheries and aquaculture products**. Rome: FAO, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc1350en>. Acesso em: 17 set. 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **GLOBEFISH highlights - International markets for fisheries and aquaculture products**. Rome: FAO, 2023. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cc7575en> Acesso em: 11 set. 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in action**. Rome: FAO, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cd0683en>. Acesso em: 28 ago. 2024.

FUTURE MARKET INSIGHTS. **Animal feed microalgae market**. 2021. Disponível em: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/demand-for-microalgae-in-animal-feeds-sector>. Acesso em: 5 out. 2024.

GADELHA, R. G. de F. **Eficiência da microalga *Spirulina platensis* na alimentação do camarão *Litopenaeus vannamei***. 2013. Tese (Doutorado em Química e Bioquímica de Alimentos) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/4058>. Acesso em: 14 out. 2020.

GOIS, A. B. ; ISSIFOU, M. ; ANJOS, S. S. N. dos . Responsabilidade Socioambiental e Desenvolvimento Sustentável. In: FREIRE, F. de S.; SILVA, C. A. T.; GOMES, S. M. da S.; SARDEIRO, L. da S. M. (Org.). **Contabilidade Socioambiental**. 1ed. Curitiba: Juruá, 2022, v. 1, p. 15-44.

GRAND VIEW RESEARCH. **Fishmeal Market Size, Share & Trends Analysis Report By Source (Salmon & Trout, Marine Fish, Tilapia), By Livestock (Poultry, Swine), By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2024 - 2030**. 2024. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/fishmeal-market-report>. Acesso em: 11 set. 2024.

HOLMAN, B. W. B.; MALAU-ADULI, A. E. O. Spirulina as a livestock supplement and animal feed. **Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition**, v. 97, n. 4, p. 615–623, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2012.01328.x>. Acesso em: 14 out. 2020.

JONES, N. Fungi bacon and insect burgers: a guide to the proteins of the future. **Nature**, v. 619, p. 26-28, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/d41586-023-02096-5>. Acesso em: 13 out. 2024.

KANG, Z.; KIM, B-H.; RAMANAN, R.; CHOI, J-E.; YANG, J-W.; OH, H-M.; KIM, H-S. A Cost Analysis of Microalgal Biomass and Biodiesel Production in Open Raceways Treating Municipal Wastewater and under Optimum Light Wavelength. **Environmental Microbiology and Engineering**, v. 25, n. 1, p. 109-118, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4014/jmb.1409.09019>. Acesso em: 23 set. 2024.

KING, S.; VARDON, M.; GRANTHAM, H. S.; EIGENRAAM, M.; FERRIER, S.; JUHN, D.; LARSEN, T.; BROWN, C.; TURNER, K. Linking biodiversity into national economic

accounting. **Environmental Science and Policy**, n. 116, p. 20-29, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.10.020>. Acesso em 8 mar. 2021.

LEVASSEUR, W.; PERRÉ, P.; POZZOBON, V. A review of high value-added molecules production by microalgae in light of the classification. **Biotechnology Advances**, v. 41, e107545, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107545>. Acesso em: 20 out. 2024.

LI, M.; LI, X.; YAO, W.; WNAG, Y.; ZHANG, X.; LENG, X. An Evaluation of Replacing Fishmeal with *Chlorella sorokiniana* in the Diet of Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*): Growth, Body Color, and Flesh Quality. **Aquaculture Nutrition**, v. 2022, e8617265, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/8617265>. Acesso em: 8 out. 2024.

LI, T.; PANG, N.; HE, L.; XU, Y.; FU, X.; TANG, Y.; SHACHAR-HILL, Y.; CHEN, S. Re-Programing Glucose Catabolism in the Microalga *Chlorella sorokiniana* under Light Condition. **Biomolecules**, v. 12, e939, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/biom12070939>. Acesso em: 30 set. 2024.

LISBOA, R. **Valoração econômica e taxa mínima de atratividade**. 2023. Link indisponível.

LOPES, I. M. **Comparação de métodos de análise de proteína em ingredientes para alimentação animal**. 48 p. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Zootecnia). Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/261950>. Acesso em: 2 out. 2024.

LUBCHENCO, J.; HAUGAN, P. M.; PANGESTU, M. E. Five priorities for a sustainable ocean economy. **Nature**, n. 588, p. 30–32, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d41586-020-03303-3>. Acesso em: 13 out. 2024.

MAGONI, C.; BERTACCHI, S.; GIUSTRA, C. M.; GUZZETTI, L.; COZZA, R.; FERRARI, M.; TORELLI, A.; MARIESCHI, M.; PORRO, D.; BRANDUARDI, P.; LABRA, M. Could microalgae be a strategic choice for responding to the demand for omega-3 fatty acids? A European perspective. **Trends in Food Science & Technology**, v. 121, p. 142-155, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.030>. Acesso em: 7 out. 2024.

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.03.006>. Acesso em: 14 out. 2020.

MARQUEZI, A. S.; HÖFFLING, F. B.; DOLZAN, S.; COSTA, M. E. da; HENRIQUES, M. E. de S.; MICHELS, B. R.; WEBER, R. A.; PRETO, A. de L.; ROMBENSO, A.; VIEIRA, F. do N.; SCHLEDER, D. D. Efeito da suplementação dietética de microalga sobre a resistência de camarões-brancos-do-pacífico ao estresse térmico e ao desafio com vírus-da-mancha-branca. **Aquaculture Brasil**, ed. 27, ano 8, 2023. Disponível em: <https://www.aquaculturebrasil.com/artigo/186/efeito-da-suplementacao-dietetica-de-microalga-sobre-a-resistencia-de-camaroes-brancos-do-pacifico-ao-estresse-termico-e-ao-desafio-com-virus-da-macha-branca>. Acesso em: 30 set. 2024.

MERCIER, L.; RACOTTA, I. S.; YEPIZ-PLASCENCIA, G.; MUHLIA-ALMAZAN, A.; CIVERA, R.; QUINONES-ARREOLA, M. F.; WILLE, M.; SORGELOOS, P.; PALACIOS, E. Effect of diets containing different levels of highly unsaturated fatty acids on physiological and immune responses in Pacific whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone) exposed to handling stress. **Aquaculture Research**, v. 40, p. 1849-1863, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02291.x>. Acesso em: 30 set. 2024.

MOTA, C. S. C. **Avaliação do potencial de utilização de microalgas como alimento alternativo na alimentação de animais de produção**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrônoma) – Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, 2018. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/118838/2/312054.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2020.

NAGAPPAN, S.; DAS, P.; ABDULQUADIR, M.; THAHER, M.; KHAN, S.; MAHATA, C.; AL-JABRI, H.; VATLAND, A. K.; KUMAR, G. Potential of microalgae as a sustainable feed ingredient for aquaculture. **Journal of Biotechnology**, v. 341, p. 1-20, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.09.003>. Acesso em: 8 out. 2024.

NAGARAJAN, D.; VARJANI, S.; LEE, D-J.; CHANG, J-S. Sustainable aquaculture and animal feed from microalgae – Nutritive value and techno-functional components. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, e111549, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111549>. Acesso em: 8 out. 2024.

NAYLOR, R. L.; GOLDBURG, R. J.; PRIMAVERA, J. H.; KAUTSKY, N.; BEVERIDGE, M. C. M.; CLAY, J.; FOLKE, C.; LUBCHENCO, J.; MOONEY, H.; TROELL, M. Effect of aquaculture on world fish supplies. **Nature**, v. 405, p. 1017–1024, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/35016500>. Acesso em: 7 out. 2024.

NICCOLAI, A.; ZITTELLI, G. C.; RODOLFI, L.; BIONDI, N.; TREDICI, M. R. Microalgae of interest as food source: Biochemical composition and digestibility. **Algal Research**, v. 42, e101617, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101617>. Acesso em: 8 out. 2024.

NOGUEIRA, J. M.; MEDEIROS, M. A. A. de; ARRUDA, F. S. T. de. Valoração econômica do meio ambiente: ciência ou empirismo? **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 17, n. 2, p. 81-115, 2000. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/8870>. Acesso em: 8 ago. 2021.

PEREIRA, A. M. L.; SILVA, A. E. M. da; OLIVEIRA, C. R. do R.; SILVA, D. A. da; OLIVEIRA, D. W. S.; SANTOS, E. P. dos; GONÇALVES JUNIOR, G. F.; KATO, H. C. de A.; ABREU, J. L. de; SILVA, L. O. B. da; PIMENTEL, O. A. L. F.; LIMA, P. C. M. de; OLIVEIRA, V. Q. de; GÁLVEZ, A. O. **Manejo de compostos nitrogenados na carcinicultura**. Brasília, DF: Embrapa; Palmas: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2022. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/242208/1/manejo-carcinicultura-2022.pdf>. Acesso em: 13 out. 2024.

PERSISTENCE MARKET RESEARCH. **Algae-based animal feed market**. 2024. Disponível em: <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/algae-based-animal-feed-market.asp>. Acesso em: 5 out. 2024.

QUINTELLA, C. M.; TEODORO, A. F. de O.; FREY, I. A.; GHESTI, G. F.; BRAGA, M.; ANJOS, S. S. N. dos. Valoração de ativos de propriedade intelectual. In: FREY, I. A.; TONHOLO, J.; QUINTELLA, C. M. (org.). **Transferência de tecnologia**. Salvador: IFBA, 2019. p. 139-178. (PROFNIT). Conceitos e aplicações de transferência de tecnologia, v. I). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/214522/1/Valorac807a771o-de-ativos-de-propriedade-intelectual-2019.pdf>. Acesso em 6 out. 2024.

RABUSKE, R.; FRIEDRICH, L. R.; FONTOURA, F. B. B. da. Análise da viabilidade para implantação de energia fotovoltaica com utilização para sombreamento de estacionamento. **Revista do CEPE**, n. 47, p. 36-48, 2018. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/228506322.pdf>. Acesso em: 6 out. 2024.

RIBEIRO, D. M. **Biotecnologia e biomassa para o século XXI: estudo de meios de cultivo para a produção de biomassa de microalgas**. 2020. 99 f., Tese (Doutorado em Biotecnologia e Biodiversidade) – Universidade de Brasília, Brasília.

RIBEIRO, D. M.; RONCARATTI, L. F.; POSSA, G. C.; GARCIA, L. C.; CANÇADO, L. J.; WILLIAMS, T. C. R.; BRASIL, B. dos S. A. F. A low-cost approach for *Chlorella sorokiniana* production through combined use of urea, ammonia and nitrate based fertilizers. **Bioresource Technology Reports**, v. 9, e100354, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100354>. Acesso em: 10 jun. 2024.

RIBEIRO, I. Y. L.; OLIVEIRA, C. M. de; FERREIRA, L. M.; MORAIS, L. C. Viabilidade econômica da produção de chia (*Salvia hispanica* L.) em Naviraí-MS. **Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN)**, v. 6, n. 1, 12 nov. 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/EIGEDIN/article/view/16463>. Acesso em: 15 dez. 2024.

RODRIGUES, L. A. **Nota Técnica, “Protocolo de cultivo para um sistema de produção completo da microalga *Chlorella sorokiniana*, destinado a geração de insumos para a alimentação animal”**. 01/12/2020. Parnaíba: Embrapa Meio-Norte, 2020. Documento interno.

ROUTLEDGE, E. A. B.; VIEIRA, F. do N.; CAVALLI, R. O.; VALENTI, W. C.; POLEJACK, A. A Plataforma de Tecnologia e Inovação em Aquicultura: uma contribuição para a Década da Ciência Oceânica no Brasil. **Parcerias Estratégicas**, v. 27, n. 52, p. 61-76, 2022. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1145321/1/A-Plataforma-de-Tecnologia-e-Inovacao-em-aquicultura.pdf>. Acesso em: 13 out. 2024.

SCHULTER, E. P.; VIEIRA FILHO, J. E. R.. **Evolução da piscicultura no Brasil: diagnóstico e desenvolvimento da cadeia produtiva de tilápia**. Rio de Janeiro: IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), 2017. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/8043/1/td_2328.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.

SHAIMA, A. F.; YASIN, N. H. M.; IBRAHIM, N.; TAKRIFF, M. S.; GUNASEKARAN, D.; ISMAEEL, M. Y. Y. Unveiling antimicrobial activity of microalgae *Chlorella sorokiniana* (UKM2), *Chlorella* sp. (UKM8) and *Scenedesmus* sp. (UKM9). **Saudi Journal of**

Biological Sciences, v. 29, n. 2, p. 1043-1052, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.09.069>. Acesso em: 30 set. 2024.

SHARMA, S.D., BHAGAT, A.R., PARISI, S. (2019). Seasonal Variation and Biochemical Composition of Fishmeal. In: Raw Material Scarcity and Overproduction in the Food Industry. SpringerBriefs in Molecular Science(). Cham: Springer, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14651-1_1

SIQUEIRA, F.; MALAVAZI, F. W.; SILVA, P. C.; LIMA, R. A. de; ANJOS, S. S. N. dos. **Definição de premissas para valoração financeira de ativos tecnológicos da Embrapa usando fluxo de caixa descontado e ajustes de curvas em séries temporais**. 2024. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA Executivo em Gestão da Inovação e Capacidade Tecnológica). Fundação Getúlio Vargas e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília, 2024. Documento interno.

SOARES, D. R. P. **Substituição de farinha de peixe por farelo de soja para juvenis de pacamã (*Lophosilurus alexandri*)**. 2015. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Escola de Veterinária, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. https://vet.ufmg.br/DOWNLOAD.php?o=8&i=20170706154821&a=substituicao_de_farinha_de_peixe_por_farelo_de_soja_para_juvenis_de_p. Acesso em: 13 out. 2024.

SOARES, M.; EVANGELISTA, D. K. R.; PEREIRA, A. M. L. **Boas práticas de manejo e de biossegurança na carcinicultura para convivência com enfermidades**. Palmas: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2021. 48 p. (Embrapa Pesca e Aquicultura. Documentos, 44). <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/224146/1/doc44-2021.pdf>. Acesso em: 13 out. 2024.

TAHREEN, A.; ADLI, S. A.; ANUAR, H.; JAMALUDDIN, J.; MOHAN, R.; ALI, F. Algae materials for food and food packaging. In: ARUNKUMAR, K.; ARUN, A.; RAJA, R.; PALANIAPPAN, R. **Algae Materials: Applications Benefitting Health**. Amsterdam: Academic Press, 2023. p. 85-91. E-book.

TINOCO, N. A. B.; TEIXEIRA, C. M. L. L.; REZENDE, C. M. O Gênero *Dunaliella*: biotecnologia e aplicações. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 4, p. 1421– 1440, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150078>. Acesso em: 31 mai. 2020.

TRIDGE. Fish Oil. **HS Code: 150420 - Fats and oils and their fractions; of fish, (excluding liver-oils)**. 2024. Disponível em: <https://www.tridge.com/intelligences/fish-oil/price>. Acesso em: 3 out. 2024.

TRUJILLO, F. D. **Usina de biomadeira para tratamento de resíduos sólidos urbanos em município de pequeno porte: uma análise da viabilidade financeira utilizando a simulação de Monte Carlo**. 2021. 177f. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Governança Pública) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Governança Pública, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26659/1/usinabiomadeiraresiduossolidos.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2024.

UMASHREE, V. R.; ANJANA, K.; VIDYA, D.; VINOD, B.; NAYANA, K.; SREELAKSHMI, M.; RAJA, R.; ARUNKUMAR, K. An introduction to algae materials.

In: ARUNKUMAR, K.; ARUN, A.; RAJA, R.; PALANIAPPAN, R. **Algae Materials: Applications Benefitting Health**. Amsterdam: Academic Press, 2023. p. 1-28. E-book.

VARILLAS, N. I. P. **Eficácia da suplementação de atrativos alimentares em dieta prática do camarão *Litopenaeus vannamei***. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/65171>. Acesso em: 17 set. 2024.

VÁSQUEZ, J. A.; ZUÑIGA, S.; TALA, F.; PIAGET, N.; RODRÍGUEZ, D. C.; ALONSO VEGA, J. M. Economic valuation of kelp forests in northern Chile: values of goods and services of the ecosystem. **Journal of Applied Phycology**, v. 26, n. 2, p. 1081–1088, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0173-6>. Acesso em 6 abr. 2020.

VILLIGER, R.; BOGDAN, B. Getting real about valuations in biotech. **Nature Biotechnology**, v. 23, n. 4, p. 423–428, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nbt0405-423>. Acesso em: 6 set. 2021.

VON BRAUN, J., AFSANA, K., FRESCO, LOUISE O. & HASSAN, M. Food systems: seven priorities to end hunger and protect the planet. **Nature**, v. 597, p. 28–30, 2021. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02331-x>. Acesso em: 13 out. 2024.

WORLD BANK GROUP. **Commodity Markets**. 2024. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets>. Acesso em: 17 set. 2024.

XIMENES, L. J.; VIDAL, M. de F. Carcinicultura. **Caderno Setorial ETENE (Banco do Nordeste)**, ano 8, n. 274, 2023. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1736/4/2023_CDS_274.pdf. Acesso em: 20 out. 2024.

XU, Z.; LI, M.; WANG, Y.; FENG, M.; GAN, Z.; LENG, X.; LI, X. Affecting mechanism of *Chlorella sorokiniana* meal replacing fish meal on growth and immunity of *Litopenaeus vannamei* based on transcriptome analysis. **Aquaculture Reports**, v. 31, e101645, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101645>. Acesso em: 8 out. 2024.

YADAV, G.; MEENA, D. K.; SAHOO, A .K.; DAS, B. K.; SEN, R. Effective valorization of microalgal biomass for the production of nutritional fish-feed supplements. **Journal of Cleaner Production**, v. 243, e118697, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118697>. Acesso em: 8 out. 2024.

YUAN, H.; SONG, W.; TAN, J.; ZHENG, Y.; WANG, H.; SHI, L.; ZHANG, S. The Effects of Dietary Protein Level on the Growth Performance, Body Composition, Intestinal Digestion and Microbiota of *Litopenaeus vannamei* Fed *Chlorella sorokiniana* as the Main Protein Source. **Animals**, v. 13, e2881, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ani13182881>. Acesso em: 8 out. 2024.

YUAN, H.; XIE, M.; CHEN, J.; HU, N.; WANG, H.; TAN, B.; SHI, L.; ZHANG, S. Combined intestinal microbiota and transcriptomic analysis to investigate the effect of different stocking densities on the ability of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) to utilize *Chlorella sorokiniana*. **Animal Nutrition**, v. 18, p. 203-219, 2024). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2024.04.008>. Acesso em: 8 out. 2024.

YUN, H.S.; KIM, Y-S.; YOON, H-S. Characterization of *Chlorella sorokiniana* and *Chlorella vulgaris* fatty acid components under a wide range of light intensity and growth temperature for their use as biological resources. **Heliyon**, v. 6, n. 7, e04447, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04447>. Acesso em: 8 out. 2024.

ZHANG, Z.; XI, L.; LIU, H.; JIN, J.; YANG, Y.; ZHU, X.; HAN, D.; XIE, S. High replacement of fishmeal by Chlorella meal affects intestinal microbiota and the potential metabolic function in largemouth bass (*Micropterus salmoides*). **Frontiers in Microbiology**, v. 13, e1016662, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1016662>. Acesso em: 15 jul. 2024.

CONSIDERAÇÕES FINAIS DA TESE

A busca de biomassas alternativas para qualquer segmento ligado à bioeconomia é o mecanismo para baratear custos de cultivo, colheita e processamento e diminuir a dependência de algum insumo, conforme apontado nos Capítulos 3 e 4 por especialistas. Na aquicultura, a adoção do farelo de soja foi a alternativa para driblar a sazonalidade e o alto custo da farinha de peixe. No entanto, a baixa palatabilidade e digestibilidade e a presença de substâncias que diminuem o valor nutricional na soja são os motes para seguir com a busca de outras biomassas.

As microalgas representam uma alternativa importante ao farelo de soja e, de forma secundária, à farinha de peixe por dois motivos. Sua biomassa é rica em macronutrientes e micronutrientes advindos do seu processo metabólico e que têm alto valor agregado (proteínas, lipídeos, carboidratos, carotenóides, PUFA's, entre outros), com teores diferentes entre espécies e de acordo com o meio de cultivo. Outra vantagem é o cultivo em vários meios líquidos, em águas próprias ou impróprias para consumo, que exige apenas luz solar e dióxido de carbono.

A tese apresenta uma convergência dos cenários científicos e tecnológicos de microalgas para o mercado de alimentação e suplementação animal em aquicultura, estratégica para o Brasil em temas como biorrefinarias, bioeconomia circular, desenvolvimento sustentável e segurança alimentar. Além disso, juntamente com a vantagem das microalgas serem úteis para a mitigação de gases de efeito estufa, as microalgas são competitivas para alimentação em aquicultura pelo teor de PUFA's na biomassa de *C. sorokiniana* avaliada neste estudo, particularmente um tipo de ômega 3 (ácido alfa-linolênico) e de ômega 6 (ácido linoleico).

A falta de viabilidade no estágio atual de desenvolvimento da cepa de *C. sorokiniana* avaliada pode ser driblada com o investimento em aumento de escala de cultivo e na formação de profissionais especializados para atuação em escala industrial de cultivo e processamento da biomassa e que garantam a sustentabilidade dos processos produtivos. A biomassa algal em questão não tem potencial para substituição completa de farinha de peixe, mas pode, em longo prazo, se tornar uma alternativa ao farelo de soja e compor formulações de rações substituindo até 40% da farinha de peixe para alimentação de camarão-branco-do-Pacífico.

IMPACTOS E PRÓXIMAS ETAPAS

Estima-se que os impactos políticos, científicos, tecnológicos e negociais desta tese são:

- Insumo estratégico e mercado de aquicultura aquecido;
- Estímulo para prospecção de parcerias estratégicas, como indústrias de ração;
- Fortalecimento da bioeconomia brasileira e do Programa Nacional de Bioinsumos;
- Geração de dados e ferramentas para posteriores estudos de viabilidade econômica a partir do escalonamento de cultivo;
- Geração de subsídios econômicos e de mercado para fomento à cadeia nacional de microalgas e cianobactérias;
- Estímulo aos processos de biorrefinarias e de mitigação de CO₂;
- Promoção do fortalecimento da indústria brasileira de alimentação animal, com a possibilidade de diversificar matérias-primas (teor nutricional, custo, competitividade);
- Geração de dados para construção de mapas de rotas tecnológicas e de cenários (continuação de estudos de futuro); e
- Subsídio para cumprimento de alguns ODS:
 - ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável);
 - ODS 3 (Saúde e Bem-estar);
 - ODS 6 (Água Potável e Saneamento);
 - ODS 7 (Energia Limpa e Acessível)
 - ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura);
 - ODS 12 (Consumo e produção sustentáveis)
 - ODS 14 (Vida na Água); e
 - ODS 15 (Vida Terrestre).

A continuidade da pesquisa descrita nesta tese é composta por temas cujos resultados comporão ações de aperfeiçoamento de metodologias de valoração de ativos ambientais, tecnológicos e pré-tecnológicos e compor o processo de desenvolvimento de indicadores para inclusão do capital natural em sistemas de contas nacionais: avaliação das premissas e dos fatores de incerteza descritos no Capítulo 5; avaliação técnica, econômica e financeira de outras espécies de microalgas e cianobactérias para alimentação animal; e continuar a avaliação prospectiva das lacunas entre Economia Ambiental, Contabilidade Ambiental e Segurança Alimentar.