



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
GESTÃO DE AGRONEGÓCIOS

NATÁLIA MORENO VIANA

**Análise produtiva e mercadológica de betacaroteno obtido da
microalga *Dunaliella* sp.: cenários e perspectivas futuras**

Brasília - DF
2023

NATÁLIA MORENO VIANA

Análise produtiva e mercadológica de betacaroteno obtido da microalga *Dunaliella* sp.: cenários e perspectivas futuras

Monografia apresentada ao curso de Gestão de Agronegócios, da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária (FAV) da Universidade de Brasília (UnB), como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Gestão de Agronegócios.

Professor Orientador: Prof. Dr. Thiago Dias Trombeta

Brasília – DF

2023

Ficha catalográfica

VIANA, Natália Moreno

Análise produtiva e mercadológica de betacaroteno obtido da microalga *Dunaliella* sp.: cenários e perspectivas futuras. / Natália Moreno Viana; orientação do Prof. Dr. Thiago Dias Trombeta. — Brasília, 2023.

43 p. : il.

Trabalho de conclusão de curso de graduação — Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2023.

CESSÃO DE DIREITOS

Nome do autor: / Natália Moreno Viana

Título do trabalho de conclusão de curso: Análise produtiva e mercadológica de betacaroteno obtido da microalga *Dunaliella* sp.: cenários e perspectivas futuras.

Ano: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Natália Moreno Viana

Folha de aprovação

Nome do autor: VIANA, Natália Moreno

Título: Análise produtiva e mercadológica de betacaroteno obtido da microalga *Dunaliella* sp.: cenários e perspectivas futuras

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Gestão de Agronegócios pela Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília.

Aprovado em 15/02/2023

Banca examinadora

Prof. Dr. Thiago Dias Trombeta
Instituição: FAV/UnB

Assinatura: _____

Prof. Dr. Jaim da Silva Junior

Instituição: FAV/UnB

Assinatura: _____

Profa. Dra. Maria Fernanda Ferreira Nince
Instituição: IB/UnB

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Universidade de Brasília e a Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária por terem sido essenciais no meu processo de formação pessoal e profissional.

Aos docentes que me acompanharam ao longo dessa trajetória, pelos ensinamentos e pela paciência que guiaram meu aprendizado.

Ao professor Thiago Trombeta por aceitar conduzir essa pesquisa, pela orientação, apoio e confiança que foram essenciais no desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Jaim Junior pelas contribuições nesse trabalho e todo o apoio durante minha formação acadêmica.

Aos meus pais, Renata e Ricardo, por todo o cuidado, incentivo e paciência ao longo da minha vida e por sempre terem acreditado em mim.

Aos meus amigos, em especial a Beatriz, a Heloísa e a Emily, e ao meu namorado, Isaac, por estarem ao meu lado e me apoiarem durante essa trajetória e também ao longo da minha vida, me ajudando a crescer e a ser melhor a cada dia.

À equipe do SPAT da Embrapa Agroenergia, em especial Ana Cristina, Sérgio e Melissa por me acolherem com tanto carinho durante esses anos, por todos os ensinamentos valiosos, por despertar meu interesse no tema que proporcionou o desenvolvimento desse trabalho e por sempre me incentivarem a crescer.

RESUMO

Microalgas têm se mostrado fontes promissoras na obtenção de produtos de valor agregado devido a sua alta capacidade produtiva e acumulação de compostos de interesse industrial em sua biomassa, o que torna possível sua aplicação nos mais diversos segmentos industriais, como as indústrias alimentícia, farmacêutica, cosméticos, alimentação animal e biocombustíveis. Dentre os compostos possíveis de se extrair de microalgas, encontram-se os carotenoides, pigmentos naturais que ocorrem em organismos fotossintéticos e promovem benefícios à saúde, como ação antioxidante e fornecimento de vitaminas e também podem ser produzidos de forma sintética em laboratório, com um custo produtivo menor do que o de fontes naturais. A microalga *Dunaliella* sp. é capaz de sintetizar betacaroteno, carotenoide de maior interesse industrial cujo demanda crescente se dá principalmente pelo fato de o pigmento produzir uma alta quantidade de vitamina A e atuar na prevenção de diversas doenças, e há cada vez mais um interesse por parte da população no consumo de produtos naturais e benéficos ao organismo. A *Dunaliella* sp. sintetiza maiores quantidades de betacaroteno em relação à outras fontes naturais, como cenoura, abóbora e pimenta, porém os custos de cultivo da microalga obtenção do composto são bastante superiores comparado às demais fontes, o que dificulta a competitividade do betacaroteno de *Dunaliella* sp. na indústria. Este trabalho buscou analisar o mercado nacional e internacional de carotenoides, com foco no betacaroteno e na participação da *Dunaliella* sp. nesse cenário. O mercado global de betacaroteno demonstra crescimento, saltando de US\$432,2 milhões em 2015 para US\$532 milhões em 2019. Em paralelo a isso, a busca por patentes mostra que há um interesse no desenvolvimento de meios de cultivo para microalgas e estudo de enzimas, porém o preço de cultivo em larga escala se mostra como um desafio para que a microalga se torne competitiva no mercado.

Palavras-chave: microalgas; *Dunaliella* sp.; Betacaroteno; carotenoides; mercado.

ABSTRACT

Microalgae have been shown to be promising sources for obtaining value-added products due to their high production capacity and accumulation of compounds of industrial interest in their biomass, which makes their application possible in the most diverse industrial segments, such as the food, pharmaceutical, cosmetics industries, animal feed and biofuels. Among the compounds that can be extracted from microalgae, there are carotenoids, natural pigments that occur in photosynthetic organisms and promote health benefits, such as antioxidant action and supply of vitamins and can also be produced synthetically in the laboratory, at a cost less productive than that from natural sources. The microalgae *Dunaliella* sp. is capable of synthesizing beta-carotene, a carotenoid of greatest industrial interest whose growing demand is mainly due to the fact that the pigment produces a high amount of vitamin A and acts in the prevention of various diseases, and there is an increasing interest on the part of the population in consumption of natural and beneficial products to the body. *Dunaliella* sp. synthesizes greater amounts of beta-carotene in relation to other natural sources, such as carrots, pumpkin and pepper, but the costs of cultivating the microalgae to obtain the compound are much higher compared to other sources, which makes it difficult for the competitiveness of beta-carotene from *Dunaliella* sp. in the industry. This work sought to analyze the national and international market of carotenoids, focusing on beta-carotene and the participation of *Dunaliella* sp. in this case. The global beta-carotene market shows a growth trend, jumping from US\$432.2 million in 2015 to US\$532 million in 2019. In parallel to this, the search for patents shows that there is an interest in the development of culture media for microalgae and study of enzymes, but the price of large-scale cultivation is a challenge for the microalgae to become competitive in the market.

Keywords: microalgae; *Dunaliella* sp.; Betacarotene; carotenoids; market.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - <i>Dunaliella</i> salina identificada no Lago Tyrell, Austrália.....	17
Figura 2 - Condições de cultivo de microalgas quanto ao metabolismo.....	20
Figura 3 - Forma molecular do todo-trans-betacaroteno e do cis-betacaroteno.....	24
Figura 4 - Caracterização das rotas comerciais para extração de betacaroteno.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores que influenciam no acúmulo de biomassa e carotenoides em microalgas do gênero <i>Dunaliella</i>	18
Tabela 2 - Aplicações industriais de espécies de <i>Dunaliella</i>	19
Tabela 3 - Comparação entre parâmetros de operação dos sistemas de cultivo.....	22
Tabela 4 - Produtos derivados de betacaroteno existentes no mercado e aplicações.....	28
Tabela 5 - Comparação de valores e participação de mercado de carotenoides naturais e sintéticos.....	29
Tabela 6 - Comparação entre a composição de diferentes fontes de betacaroteno.....	31
Tabela 7 - Custos finais de obtenção de betacaroteno de fontes vegetais.....	31
Tabela 8 - Principais players no mercado de betacaroteno.....	34
Tabela 9 - Principais players no mercado global de <i>Dunaliella</i> sp.....	36
Tabela 10 - Depositantes de patentes relacionadas à <i>Dunaliella</i> sp. e pigmentos.....	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Participação dos carotenoides na indústria.....	27
Gráfico 2 - Tamanho do mercado de carotenoides por região, em bilhões de USD.....	33
Gráfico 3 - Quantidade de carotenoides exportada pela América do Sul em USD.....	35
Gráfico 4 - Recorrência de citações de patentes registradas por área de conhecimento.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CARG	<i>Compound Annual Growth Rate</i> (Taxa de Crescimento Anual)
DII	<i>Derwent Innovation Index</i>
COMEXSTAT	Estatísticas de Comércio Exterior

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização	13
1.2	Objetivo Geral	14
1.3	Objetivos específicos	14
1.4	Justificativa	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	Caracterização e Importância da <i>Dunaliella</i>	16
2.2	Sistemas de produção de microalgas.....	19
2.3	Caracterização do betacaroteno.....	23
3	METODOLOGIA.....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1	Utilização de betacaroteno na indústria.....	27
4.1	Cenário Mercadológico.....	32
4.2	Análise patenteométrica.....	36
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O interesse no cultivo comercial de microalgas tem crescido ao longo dos anos devido ao potencial desses microrganismos na geração de produtos de valor agregado para as mais diversas áreas industriais, e também pelo aumento da demanda por produtos naturais e de menor impacto ambiental (SOARES, 2021).

As microalgas possuem alta capacidade de fixar CO₂, rápido crescimento e elevado rendimento em relação às plantas terrestres (WANG et al., 2022). A crescente exploração comercial de microalgas visa, sobretudo, a produção de biomassa com foco na aplicação industrial, principalmente nas áreas de biocombustíveis, farmácia, alimentação animal, nutracêuticos e pigmentos alimentícios (CARNEVALLI, 2021)

Os gêneros mais comumente produzidos de microalgas são a *Chlorella* sp., *Spirulina* e *Haematococcus pluvialis*, por outro lado, existem dezenas de espécies com características únicas e de alto potencial de utilização na indústria (WANG et al., 2022)

Dentre os produtos de valor agregado obtidos a partir de microalgas, encontram-se os carotenoides, sendo definidos como pigmentos naturais nas colorações amarelo, laranja ou vermelho, encontrados em organismos fotossintéticos, como plantas superiores, macroalgas e microalgas, e em alguns tipos de bactérias e fungos (MESQUITA, 2018). Já foram isolados mais de 750 carotenóides, dentre eles destaca-se o betacaroteno, com coloração alaranjada (VIANA et al., 2020). Os carotenoides podem se encaixar na categoria de nutracêuticos, apresentando diversos benefícios à saúde, como ação antioxidante e, em alguns casos, no fornecimento de vitamina A (SOARES, 2021). Em organismos fotossintéticos, os carotenoides atuam como captadores de energia e possuem ação protetora contra a foto-oxidação (MORAIS, 2006).

Além de microalgas, fontes vegetais como urucum, acerola, milho, abóbora, pimenta e cenoura são capazes de produzir pigmentos, no entanto, essas fontes vegetais possuem baixas quantidades de pigmentos (VIANA et al., 2020; MESQUITA et al., 2017).

Dentre as microalgas, o gênero *Dunaliella* sp., se destaca, sendo capaz de produzir de 10 a 100 vezes mais betacaroteno do que a cenoura (ANDRADE, COLOZZI FILHO, 2014). Esse gênero é importante na produção de betacaroteno devido a sua alta capacidade de acumular o pigmento na biomassa, com um rendimento de 13% a partir de sua biomassa seca (RAMMUNI et al., 2019). Além disso, possui a vantagem de poder ser cultivado em sistemas abertos por sua alta capacidade de combater organismos invasores contaminantes, proveniente de sua resistência a hipersalinidade da água (VIANA et al., 2020).

O betacaroteno é um pigmento bastante utilizado em alimentos e bebidas, proporcionando diversos benefícios à saúde, sendo percursos de vitamina A e capaz de reduzir riscos do desenvolvimento de câncer, devido a sua ação antioxidante que combate radicais livres (MORDOR INTELLIGENCE, 2021).

Além da *Dunaliella* sp., existem outros gêneros de microalgas que são fontes de carotenoides de importância industrial. Podemos destacar a microalga *Haematococcus pluvialis* produtora do carotenoide astaxantina, com propriedades antioxidantes e também a espécie *Chlorella protothecoides* que é fonte de luteína, um pigmento que traz benefícios à visão (WANG et al., 2022).

Em termos produtivos, as microalgas se mostram vantajosas em relação a alta concentração de pigmento em sua biomassa e a possibilidade de cultivo em qualquer época do ano (MESQUITA, 2018; BRASIL, GARCIA, 2016). Contudo, existem gargalos que limitam a expansão do cultivo comercial de microalgas para o aproveitamento industrial, como o alto custo de métodos de cultivo

1.2 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo apresentar o mercado de carotenoides e a participação de microalgas nesse cenário, com foco no betacaroteno extraído da *Dunaliella* sp.

1.3 Objetivos específicos

- Apresentar as técnicas de cultivo, custos e tecnologia de produção de microalgas para aproveitamento de biomassa;
- Analisar o cenário mercadológico de carotenoides global, com foco no betacaroteno;
- Apresentar as estratégias de obtenção de carotenoides e produtos existentes no mercado a base de betacaroteno;
- Analisar gargalos que limitam a produção de microalgas e betacaroteno natural.

1.4 Justificativa

A participação de betacaroteno no cenário mercadológico global se mostra crescente, principalmente em regiões como América do Norte, Europa e Ásia, onde existe um forte interesse no consumo de alimentos que proporcionem benefícios ao organismo e que sejam provenientes de fontes naturais (FUTURE MARKET INSIGHTS, 2022). Paralelo ao cenário global, o Brasil possui baixa participação na exportação de carotenoides, apesar da variedade de fontes vegetais de onde é possível se extrair betacaroteno (MESQUITA, 2018). Ainda segundo Mesquita (2018), a ingestão de carotenoides por parte da população brasileira mostra índices abaixo do recomendado.

O gênero de microalga *Dunaliella* sp., que tem se mostrado bastante promissor na obtenção de betacaroteno, é estudado e produzido principalmente em países de clima temperado, fator que dificulta a produção em larga escala por não ser o clima ideal para o crescimento da microalga, devido às baixas temperaturas e baixos níveis de incidência solar, além de gargalos como custo de produção e aplicação de tecnologias (MEIRA, 2015). Por outro lado, o Brasil se mostra como uma região propícia para o crescimento de microalgas, considerando seu clima tropical, onde há maior intensidade solar e ausência de temperaturas baixas como no clima temperado, permitindo a produção durante todo o ano e maior produtividade da biomassa (MEIRA, 2015). Além disso, o Brasil possui grande disponibilidade de resíduos agropecuários, que podem ser utilizados no cultivo de microalgas, diminuindo os custos de produção (ORTENZIO et al., 2015).

Deste modo, a motivação para a realização desta pesquisa foi analisar fatores que dificultam uma maior participação de betacaroteno obtido de *Dunaliella* sp. no mercado global, apesar de seu potencial, e apresentar a baixa participação brasileira nesse cenário, considerando as condições favoráveis de produção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DE LITERATURA

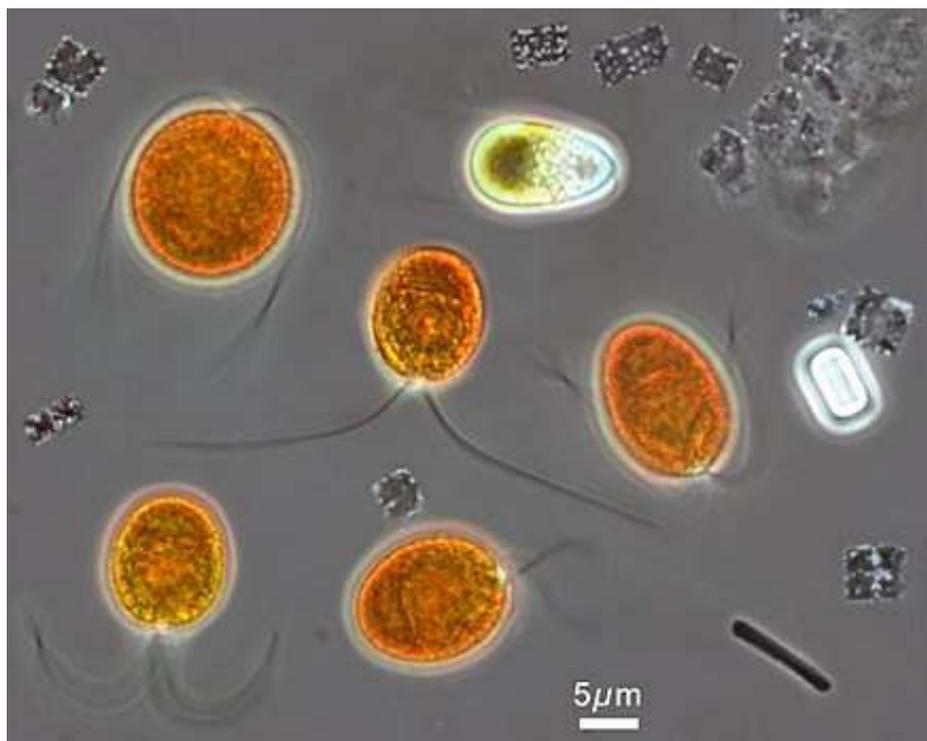
2.1 Caracterização e Importância da *Dunaliella*

As microalgas foram catalogadas em 72,500 espécies e 16 classes, sendo o maior grupo o de algas verdes (SILVA et al., 2020). São organismos unicelulares fotossintéticos presentes no ambiente aquático de todo o mundo, sendo encontradas tanto em água doce quanto em água salgada, além da possibilidade do cultivo em ambientes controlados e em resíduos agroindustriais (VIANA et al., 2020).

As microalgas do gênero *Dunaliella* pertencem ao filo *Chlorophyta* e são organismos eucarióticos, unicelulares e biflagelados, tendo alta capacidade de crescer em ambientes com grande concentração salina, habitando os oceanos e lagos de água salgada (TINOCO et al, 2015). Até 2014, foram identificadas 28 espécies do gênero *Dunaliella*, sendo as espécies com maior capacidade de acumular betacaroteno a *D. bardawil* e *D. salina* (TINOCO et al, 2015).

As algas pertencentes ao gênero *Dunaliella* não possuem parede celular rígida, o que favorece o acúmulo de metabólicos e faz com que o seu formato varie de acordo com a salinidade do ambiente (TINOCO et al, 2015), podendo apresentar formato oval, esférico, cilíndrico, assimétrico, entre outros (BOROWITZKA, [s.d.]). As espécies desse gênero normalmente possuem coloração verde em condições favoráveis de cultivo, enquanto as espécies *D. bardawil* e *D. salina* possuem coloração predominantemente alaranjada quando expostas a condições de estresse que induzem a produção de betacaroteno (TINOCO et al, 2015). A Figura 1 mostra exemplares de *Dunaliella salina* retirados de um lago em Victoria, na Austrália.

Figura 1: *Dunaliella salina* identificada no Lago Tyrell, Austrália



Fonte: Wikiwand - *Dunaliella salina*, [s.d.]

Diferentes fatores durante o cultivo induzem microalgas do gênero a acumular maior quantidade de biomassa ou maior quantidade de carotenoides. A Tabela 1, adaptada de Borowitzka [s.d.], demonstra a influência dos fatores do ambiente na produção da microalga.

Tabela 1: Fatores que influenciam no acúmulo de biomassa e carotenoides em microalgas do gênero *Dunaliella*

FATOR	ACÚMULO DE BIOMASSA	ACÚMULO DE CAROTENÓIDES
AUMENTO DE SALINIDADE	--	++++
DIMINUIÇÃO DE SALINIDADE	+	-
DEFICIÊNCIA DE N	--	+++
DEFICIÊNCIA DE P	--	+
AUMENTO NO CARBONO INORGÂNICO	+++	0
AUMENTO DE LUZ	+	+++
DIMINUIÇÃO DE LUZ	-	---
AUMENTO DE TEMPERATURA	+	++
DIMINUIÇÃO DE TEMPERATURA	-	-
AUMENTO DE O ₂	-	-

Fonte: BOROWITZKA, [s.d] (adaptado).

“+” representa efeito estimulante “-” representa efeito inibitório

A exposição de microalgas ao estresse oxidativo é fundamental para determinar o acúmulo de carotenoides na biomassa, já que são organismos que reagem ao oxigênio. Fatores como o aumento da intensidade da luz e diminuição no fornecimento de nutrientes como nitrogênio, fósforo e enxofre inibem a síntese protéica e prejudicam a produção de clorofila, consequentemente aumentando a produção de carotenoides para a proteção da clorofila contra possíveis danos causados pela luz (SOARES, 2021).

Conforme estudos que vêm sendo realizados, a exploração do cultivo de *Dunaliella* passou a ter diversos interesses, além de obter os carotenoides, sua principal aplicação. A biomassa de *Dunaliella* tem sido aplicada em diversas outras áreas da indústria, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2: Aplicações industriais de espécies de *Dunaliella*.

ESPÉCIE	APLICAÇÃO	REFERÊNCIA
<i>D. SALINA</i>	PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL	TINOCO ET AL., 2015.
	TERAPIA ANTICÂNCER	TINOCO ET AL., 2015.
	TERAPIA ANTIOXIDANTE	TINOCO ET AL., 2015.
	PRODUÇÃO DE ÁCIDOS GRAXOS	TINOCO ET AL., 2015.
	TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS	TINOCO ET AL., 2015.
	ALIMENTAÇÃO E SUPLEMENTO	TAFRESHI, SHARIATI, 2009.
	ENZIMAS	TAFRESHI, SHARIATI, 2009.
<i>D. SALINA E D. BARDAWIL</i>	REMOÇÃO DE METAIS PESADOS	TINOCO ET AL., 2015.
<i>D. TERTIOLECTA, D. VIRIDIS E D. PARVA</i>	PRODUÇÃO DE GLICEROL	TINOCO ET AL., 2015.
<i>D. TERTIOLECTA</i>	INDICADOR ECOLÓGICO	TINOCO ET AL., 2015.
	FONTE DE VITAMINAS	TINOCO ET AL., 2015.
	FONTE DE MINERAIS	TAFRESHI, SHARIATI, 2009.

Fonte: TINOCO et al., 2015; TAFRESH, SHARIATI, 2009.

2.2 Sistemas de produção de microalgas

Os estudos para produção em larga escala de microalgas se iniciaram na Europa por volta de 1940, com foco em algas com metabolismo fotoautotrófico (capaz de realizar fotossíntese), sendo descoberto, ao longo do tempo, que existem microalgas com sistema metabólico variado, como espécies heterotróficas, ou seja, incapazes de realizar fotossíntese (ANDRADE, COLOZZI FILHO, 2014).

O cultivo desses microrganismos é dependente de fatores químicos e físicos, como luz, temperatura, salinidade, nutrientes e concentração de CO₂, e de fatores biológicos, que estão relacionados às taxas metabólicas (ANDRADE, COLOZZI FILHO, 2014). Levando isso em consideração, as tecnologias empregadas para o crescimento e a obtenção de biomassa durante o cultivo podem ser aplicadas de acordo com a variabilidade metabólica de cada espécie de microalga, que pode ser classificada em quatro tipos: fotoautotrófico, heterotrófico, mixotrófico e fotoheterotrófico (ANDRADE, COLOZZI FILHO, 2014). No caso da *Dunaliella*, o metabolismo é fotoautotrófico, sendo possível utilizar somente dióxido de carbono e bicarbonato como fontes inorgânicas de carbono, e a fonte de energia utilizada é a luz, seja natural ou artificial (TAFRESHI, SHARIATI, 2009). A Figura 2 retrata as diferentes condições de cultivo que podem ser utilizadas a depender da espécie cultivada.

Figura 2: Condições de cultivo de microalgas quanto ao metabolismo



Fontes: ANDRADE, FILHO, 2014; LUCHE, GONÇALVES, SILVA, 2019.

Para a produção em massa de microalgas, foram desenvolvidos diversos sistemas de cultivo, sendo as propriedades da alga fatores importantes na hora da escolha do sistema ideal (TAFRESH, SHARIATI, 2009). Os sistemas mais utilizados no cultivo comercial são as lagoas abertas e os fotobiorreatores fechados. Lagoas abertas possuem menor custo de instalação e operação e consistem em tanques circulares ou em forma de “pista” (*raceway ponds*), com cerca de 0.5 m de profundidade e capacidade de produzir 60–100 mg/L⁻¹ de biomassa por dia, sendo ideais para condições autotróficas de cultivo (JEEVANANDAM et al., 2020). Por se tratarem de lagoas rasas, é possível a utilização de luz natural apropriada para o crescimento da microalga, e seu tamanho é apropriado para a produção em larga escala demandada pela indústria. Contudo, o cultivo em lagoas abertas possui algumas desvantagens, como evaporação em excesso de água e alto risco de contaminação por outros microrganismos, tornando esse sistema recomendado apenas para algumas espécies que conseguem ser cultivadas com sucesso nessas condições, como a *Dunaliella* e a cianobactéria *Spirulina* (LUCHE, GONÇALVES, SILVA, 2019). Outra desvantagem é a dificuldade no controle de parâmetros essenciais como pH, temperatura e concentração de oxigênio, o que limita a concentração de biomassa nas microalgas (JEEVANANDAM et al., 2020).

Fotobiorreatores fechados são comumente utilizados para o cultivo com foco na obtenção de produtos de valor agregado extraídos de microalgas, como proteínas, ácidos graxos, pigmentos e antioxidantes, sendo ideias para um melhor controle de pH, intensidade da luz e concentração de nutrientes, condições importantes para o acúmulo de biomassa (JEEVANANDAM et al., 2020). Os fotobiorreatores podem ser alocados em ambientes interiores com a utilização de luz artificial, ou ambientes exteriores que utilizam a luz do sol para operação, sendo suas principais desvantagens o alto custo de instalação, operação e manutenção e a limitação na escala de produção (ANDRADE, COLOZZI FILHO, 2014). As microalgas normalmente testadas nesse tipo de sistema são das espécies *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sarokiniana*, *Arthrospira platensis*, *Nannochloropsis sp.*, *Phorphyridium cruentum*, *Selenastrum capricornutum*, *Haematococcus pluvialis*, e *Phaeodactylum tricornutum* (JEEVANANDAM et al., 2020). A Tabela 3 mostra um comparativo entre vantagens e desvantagens de ambos os sistemas e custos iniciais e anuais aplicados.

Tabela 3: Comparação entre parâmetros de operação dos sistemas de cultivo

Parâmetro	Lagoas abertas	Fotobiorreatores fechados	Referência
Espaço demandado	Alto	Moderado	JEEVANANDAM et al., 2020
Custo de instalação	Baixo	Alto	JEEVANANDAM et al., 2020
Risco de contaminação	Alto	Baixo	JEEVANANDAM et al., 2020
Perda de água para a atmosfera	Alta	Baixa	JEEVANANDAM et al., 2020
Qualidade da cultura	Baixa	Alta	JEEVANANDAM et al., 2020
Perda de CO ₂	Alta	Baixa	JEEVANANDAM et al., 2020
Manutenção	Fácil	Difícil	JEEVANANDAM et al., 2020
Energia necessária para operação	Baixa	Alta	JEEVANANDAM et al., 2020
Dependência do clima	Absoluta	Insignificante	JEEVANANDAM et al., 2020
Custo inicial total (R\$)	192.990,00	220.825,00 (fotobiorreator horizontal) 301.122,00 (fotobiorreator vertical)	LIMA, MATTOS, 2017

Existe também um sistema híbrido de cultivo, que consiste em dois estágios de crescimento, utilizando fotobiorreatores fechados e lagoas abertas. A primeira etapa ocorre dentro do fotobiorreator, onde o controle dos parâmetros estimula a divisão contínua das células e previne a contaminação por microrganismos. Na segunda etapa, as microalgas são transferidas para lagoas abertas, onde ocorre exposição a determinados estresses ambientais, com o objetivo de aumentar o acúmulo de lipídeos dentro das células para a posterior utilização na biorrefinaria (NARALA et al., 2016). Esse sistema foi proposto para contornar as desvantagens dos sistemas abertos e fechados e reduzir os custos de operação (JEEVANANDAM et al., 2020).

Em relação à nutrição durante o cultivo de microalgas, alguns resíduos agroindustriais ricos em matéria orgânica possuem potencial de serem utilizados como fonte de nutrientes, o que é uma possível solução para a geração e descarte de resíduos na agroindústria brasileira e diminuição no custo de cultivo das microalgas, onde são gastos cerca de R\$ 28,02 para cada 1000 litros (ORTENZIO et al., 2015). Porém, apesar da diminuição com os gastos na formulação nutricional, os custos com logística poderiam ser maiores, considerando a necessidade de transportar os resíduos até o local de cultivo. Dentre os resíduos possíveis de se utilizar como nutrientes para microalgas encontram-se efluentes da criação de suínos, bovinos, aves e efluentes domésticos, e também a vinhaça, resíduo gerado da produção de cana-de-açúcar. Além do fornecimento de nutrientes por parte da vinhaça, a presença de microalgas se apresenta como uma alternativa para o tratamento do resíduo, já que o mesmo pode acarretar em problemas no solo e contaminação de lençóis freáticos (ORTENZIO et al., 2015).

Um fator a ser levado em consideração no cultivo de *Dunaliella* em lagoas abertas é o controle de predadores. Apenas alguns outros microrganismos são capazes de crescer em ambientes com alta concentração salina e temperaturas acima de 38°C, como é o caso de algumas amebas e zooplânctons que podem representar um risco às microalgas (TAFRESHI, SHARIATI, 2009). Sendo assim, é importante realizar um tratamento com compostos químicos com baixa toxicidade para as algas, mas que sejam

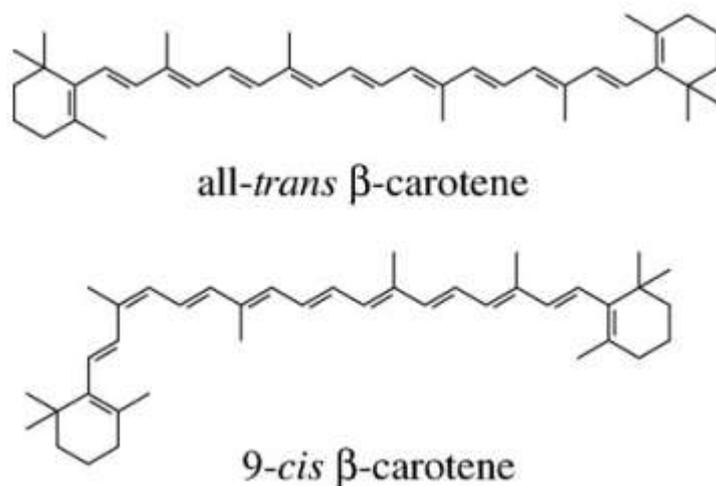
capazes de eliminar organismos invasores no cultivo (TAFRESHI, SHARIATI, 2009).

2.3 Caracterização do betacaroteno

O betacaroteno é um carotenoide lipossolúvel que ocorre em organismos fotossintéticos e em algumas espécies de fungos e bactérias não-fotossintéticas. Está presente em plantas e animais, sendo que estes não são capazes de sintetizar o pigmento. Sua eficiência em conversão na vitamina A é superior a de outros carotenoides (OLIVEIRA, 2014).

Suas aplicações industriais ocorrem nas áreas de suplementos, farmacêuticos dietéticos, alimentação animal, indústria de cosméticos e indústria de alimentos e bebidas (FUTURE MARKET INSIGHTS, 2022). Na indústria alimentícia, devido a sua coloração laranja-amarelada, o corante é frequentemente utilizado em margarinas e manteigas, queijo, sorvete, massas, sopas, entre outros alimentos (BELL CHEM, [s.d.]). Quimicamente, os carotenoides possuem sistemas de duplas ligações entre os átomos de carbono, denominadas ligações conjugadas, que são responsáveis por sua coloração e por sua ação antioxidante. Quanto maior o número de ligações conjugadas, mais vermelha se torna a cor do carotenoide. Essas duplas ligações podem aparecer nas formas isométricas toda-trans ou cis, sendo a forma toda-trans comumente encontrada na natureza (MORAIS, 2006). Isômeros podem ser definidos como moléculas de um mesmo composto que se diferem no arranjo de seus átomos no espaço. Os isômeros cis ocorrem quando o composto possui dois grupos idênticos do mesmo lado da ligação dupla, enquanto isômeros trans são aqueles que possuem dois grupos idênticos de lados opostos da ligação (REZENDE et al., 2016). A Figura 4 mostra a estrutura molecular do betacaroteno em suas formas trans e cis, respectivamente.

Figura 3: Forma molecular do todo-trans-betacaroteno e do cis-betacaroteno.



Fonte: Z.-W. Ye et al, 2008.

A forma 9-cis β-caroteno é a forma precursora da vitamina A e responsável pela ação antioxidante que auxilia na prevenção de doenças, porém, há uma dificuldade em se produzir 9-cis β-caroteno por síntese química devido ao alto custo de produção, ao contrário da forma trans que se mostra economicamente mais viável, porém a forma não possui os mesmos benefícios à saúde que o 9-cis β-caroteno promove (HARVEY, BEN-AMOTZ, 2020). Segundo Harvey e Ben-Amotz (2020), a forma todo-trans do betacaroteno pode ser obtida por €6/g, enquanto a forma 9-cis β-caroteno, por €500,000/g. Em 2004, 84,8% do consumo global total de betacaroteno foi proveniente da síntese química, enquanto apenas 8,4% veio a partir da síntese por algas (Z.-W. Ye et al, 2008).

2 METODOLOGIA

O presente estudo possui abordagem quali-quantitativa a partir da análise de dados secundários. De acordo com Fachin (2006), uma variável qualitativa consiste de atributos cujas análises podem ser feitas não somente através da mensuração de aspectos, mas a partir de análises descritivas das informações sem trabalhar com medidas ou contadas. Ainda de acordo com o autor, uma variável quantitativa trabalha com dados e/ou proporções numéricas com o objetivo de atribuir números a propriedades, objetos, acontecimentos, materiais de forma a trazer informações úteis para análise.

Os dados foram recuperados a partir de literatura científica, relatórios de mercado nacional e internacional e bases de dados como COMEXSTAT (Estatísticas de Comércio Exterior), gerida pelo Ministério da Economia, para análise de dados de exportação (VIANA et al., 2020). Para a busca de informações na base COMEXSTAT, utilizou-se o número completo, 3204.19.11, referente à carotenoides dentro da Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM).

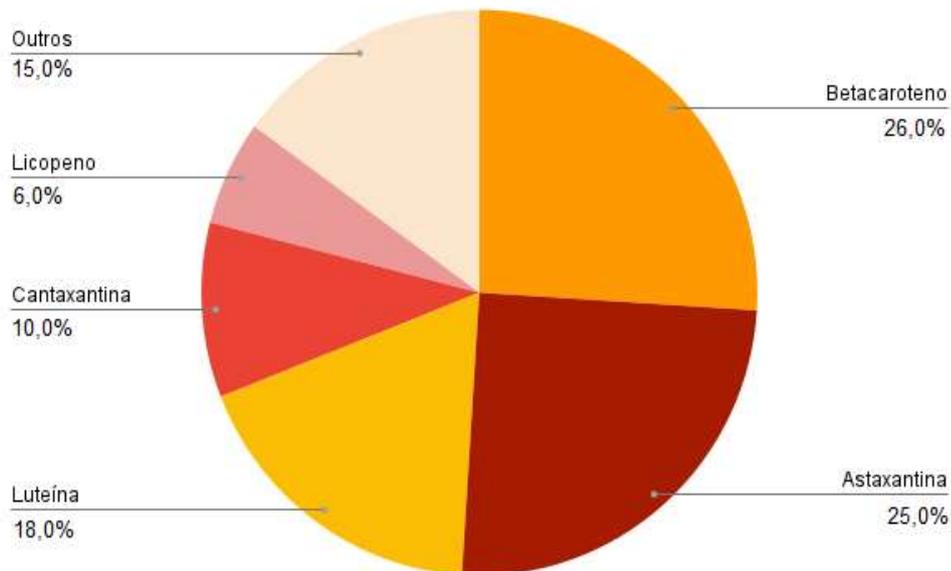
Em complemento aos dados de mercado, realizou-se uma busca patentométrica na base de dados *Derwent Innovation Index* (DII) com as “palavras-chave” “*Dunaliella* AND *pigment*”, afim de se obter informações sobre países e instituições depositantes de patentes dentro de um período de dez anos, entre 2012 e 2022.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Utilização de betacaroteno na indústria

Betacaroteno é o pigmento mais utilizado pela indústria, e além da *Dunaliella*, pode ser obtido de fontes como cenoura, milho, pimenta e abóbora (VIANA et al., 2020), e em relação as fontes naturais de betacaroteno, no ano de 2015 as algas foram as fontes que tiveram maior participação no mercado, sendo responsáveis por cerca de 35% da receita total no mercado global (GRAND VIEW RESEARCH, 2015). O Gráfico 1 mostra a participação do betacaroteno na indústria em relação a outros carotenoides, e a Tabela 4 mostra exemplos de produtos derivados de betacaroteno existentes no mercado, aplicações e empresas produtoras com atuação no Brasil.

Gráfico 1: Participação dos carotenoides na indústria



Fonte: Adaptado de RAMMUNI et al., 2019.

Tabela 4: Produtos derivados de betacaroteno existentes no mercado e aplicações.

PRODUTO	FABRICANTE	APLICAÇÃO
BETACAROTENO	SUNDOW NATURALS	SUPLEMENTAÇÃO ALIMENTAR EM CÁPSULAS
CAROCARE	DSM	SUPLEMENTAÇÃO ALIMENTAR EM CÁPSULAS
RIVIMIX	DSM	SUPLEMENTAÇÃO PARA RUMINANTES
DOCE MARROM GLACÊ	PREDILECTA	CORANTE
SUCO DE MARACUJÁ COM SOJA	SHEFA	CORANTE
INNEOV SOLAR	NESTLÉ E L'OREAL	SUPLEMENTAÇÃO ALIMENTAR EM CÁPSULAS

Fonte: SOARES, 2021 (adaptado).

Os carotenoides produzidos em escala comercial podem ser sintéticos ou de origem natural, sendo os sintéticos economicamente mais viáveis devido ao menor custo de produção (MESQUITA, 2018). No ano de 2014, os carotenoides sintéticos representaram 76% da produção mundial, enquanto os naturais, 24%. Em 2019, o mercado global alcançou US\$ 1,2 bilhões, e em 2020, o mercado movimentou cerca de US\$ 1,4 bilhões, com CAGR (Taxa de crescimento anual) de 3,5% (VIANA et al., 2020).

A produção do betacaroteno sintético começou em 1954, com síntese industrial produzindo as moléculas em estruturas cristalinas (OLIVEIRA, 2014), porém os isômeros produzidos no betacaroteno natural são difíceis de reproduzir sinteticamente. O betacaroteno natural possui ação anticâncer, antioxidante e ajuda no controle do colesterol, diminuindo de forma significativa o risco de se desenvolver doenças cardiovasculares, além de ser mais bem absorvido pelo corpo humano do que o betacaroteno sintético (SILVA et al., 2020). Contudo, apesar do aumento da demanda por produtos naturais, a produção de betacaroteno natural não é tão ampla no mercado e possui um alto custo, o que torna o betacaroteno sintético uma alternativa economicamente mais viável e que atende as demandas (VIANA et al., 2020), conforme demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5: Comparação de valores e participação de mercado de carotenoides naturais e sintéticos

	BETACAROTENO NATURAL	BETACAROTENO SINTÉTICO
PARTICIPAÇÃO NO MERCADO (2018)	53,2%	46,8%
VALOR DE MERCADO/KG	R\$7.500,00	R\$3,75

Fonte: VIANA et al., 2020

Com os crescentes estudos sobre variadas fontes de obtenção de betacaroteno, foram desenvolvidas rotas tecnológicas para a produção e extração do pigmento, a depender da fonte que está sendo utilizada, sendo estas rotas: a rota por síntese química, que utiliza como precursor o composto β -ionone para sintetizar o betacaroteno; a rota por fontes naturais, utilizada para extrair carotenoides de plantas, sementes, flores e raízes a partir de processos químicos e solventes; e a rota por síntese microbiana, que é adequada para extrair o composto a partir de microrganismos e ideal para atender a demanda por betacaroteno natural, considerando a alta capacidade desses microrganismos de sintetizar o pigmento (SINGH, SAMBYAL, 2022). Na Figura 3 constam os métodos de extração aplicados na indústria para obtenção de betacaroteno e suas respectivas vantagens e desvantagens.

Figura 4: Caracterização dos métodos para extração de betacaroteno.



Fonte: SINGH, SAMBYAL, 2022.

O betacaroteno encontrado na microalga *Dunaliella* possui em sua biossíntese 40% de 9-cis β -caroteno e 50% de todo-trans-betacaroteno, sendo a concentração de cis-betacaroteno presente na microalga maior do que em outras fontes naturais (Z.-W. Ye et al, 2008), o que poderia tornar torna-la uma solução para o gargalo na obtenção de 9-cis β -caroteno (HARVEY, BEN-AMOTZ, 2020). A Tabela 6 mostra uma comparação entre a composição de betacaroteno na forma sintética e o betacaroteno encontrado na cenoura, óleo de palma e *Dunaliella* sp.

Tabela 6: Comparação entre a composição de diferentes fontes de betacaroteno.

FONTE	CONCENTRAÇÃO DE BETACAROTENO (%)	COMPOSIÇÃO DE BETACAROTENO (%)	
		TODO-TRANS - BETACAROTENO	9-CIS B-CAROTENO
SINTÉTICO	100	> 98	< 2
CENOURA	0.01–0.06	50	2
ÓLEO DE PALMA	0.06–0.07	36	24
DUNALIELLA	6–14	50	> 40

Fonte: HARVEY, BEN-ARMOTZ, 2020.

Contudo, o custo de obtenção de betacaroteno extraído de *Dunaliella* sp. é bastante superior ao de outras fontes vegetais, podendo chegar a US\$ 3.000,00 por quilograma (VIANA et al., 2020). A diferença nos custos de obtenção pode ser observada na Tabela 7.

Tabela 7: Custos finais de obtenção de betacaroteno de fontes vegetais.

FONTE	CUSTO FINAL (EM US\$/KG)(¹)
MILHO (CULTIVAR SAHIWAL 2002)	14,95
PIMENTA (CULTIVAR BELL BOY)	15,55
CENOURA (CULTIVAR AUTUMN KING)	19,74
<i>DUNALIELLA SP.</i>	3.000,00

Fonte: VIANA, et al., 2020.

O betacaroteno puro, assim como muitos carotenoides, é insolúvel em água, fator que pode dificultar a absorção do pigmento e de suas propriedades pelo organismo. A restrição na solubilidade e alta sensibilidade a oxidação são obstáculos na obtenção do pigmento por síntese química. Considerando esses fatores, para tornar o betacaroteno comercialmente viável, foram desenvolvidas diferentes formulações que podem ser utilizadas a depender da aplicação do produto, garantindo a estabilidade e solubilidade do produto. Cada aplicação industrial demanda uma estabilidade e propriedades diferentes, sendo as mais utilizadas comercialmente as fórmulas em óleo, pó, emulsões e grânulos (JEYAKODI et al., 2018).

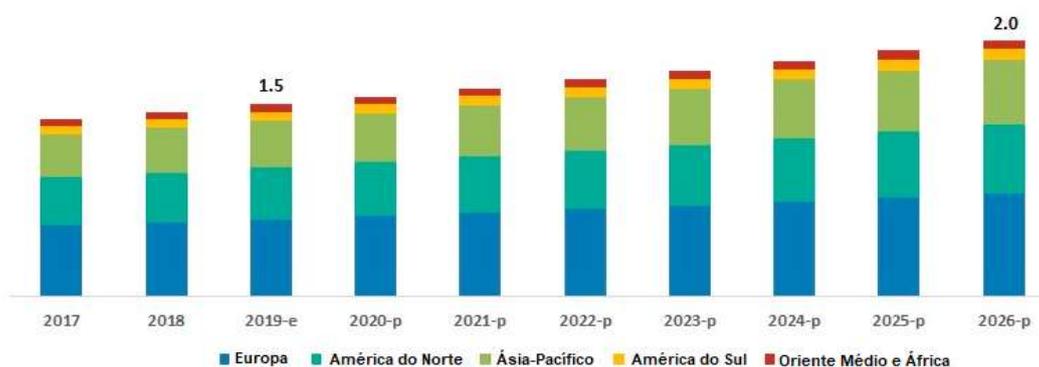
4.2 Cenário Mercadológico

No ano de 2015, a receita do mercado global de betacaroteno alcançou o valor de US\$432,2 milhões, com algas representando 35% e participação como fonte do pigmento. Em 2018, a receita global somente de betacaroteno sintético alcançou US\$223,9 milhões, já para o ano de 2019, o valor de mercado global de betacaroteno natural e sintético estava estimado em US\$532 milhões (VIANA et al., 2020). Até o mês de agosto de 2022, o valor de

mercado global já estava em US\$ 337.3 milhões, com o CAGR de 6.7% entre 2022 e 2032 e receita de US\$ 644 milhões até o final de 2032, demonstrando crescimento em relação à expectativa de CAGR registrada entre os anos de 2015 e 2026, que foi de 5.6% (FUTURE MARKET INSIGHTS, 2022).

A Europa está prevista para alcançar a maior receita global do mercado de betacaroteno, devido ao aumento da demanda e do consumo de produtos que trazem benefícios à saúde. A previsão da participação europeia no mercado de betacaroteno é de 40.4%, enquanto a da América do Norte é de 33% (FUTURE MARKET INSIGHTS, 2022). O Gráfico 2 mostra o tamanho global do mercado geral de carotenoides em 2019, onde é possível ver a grande participação da Europa e da América do Norte.

Gráfico 2: Tamanho do mercado de carotenoides por região, em bilhões de USD



Fonte: MARKETS AND MARKETS, 2019 (adaptado).

O segmento alimentício domina a indústria de betacaroteno, porém devido às propriedades antioxidantes do pigmento, as indústrias de cosmético e farmácia também apresentam projeção de crescimento para os próximos anos. As empresas produtoras de betacaroteno têm buscado pelo desenvolvimento de novos produtos e expansão geográfica para firmar um mercado consumidor (FUTURE MARKET INSIGHTS, 2022). Os principais

players no mercado global de betacaroteno atualmente estão listados na Tabela 8.

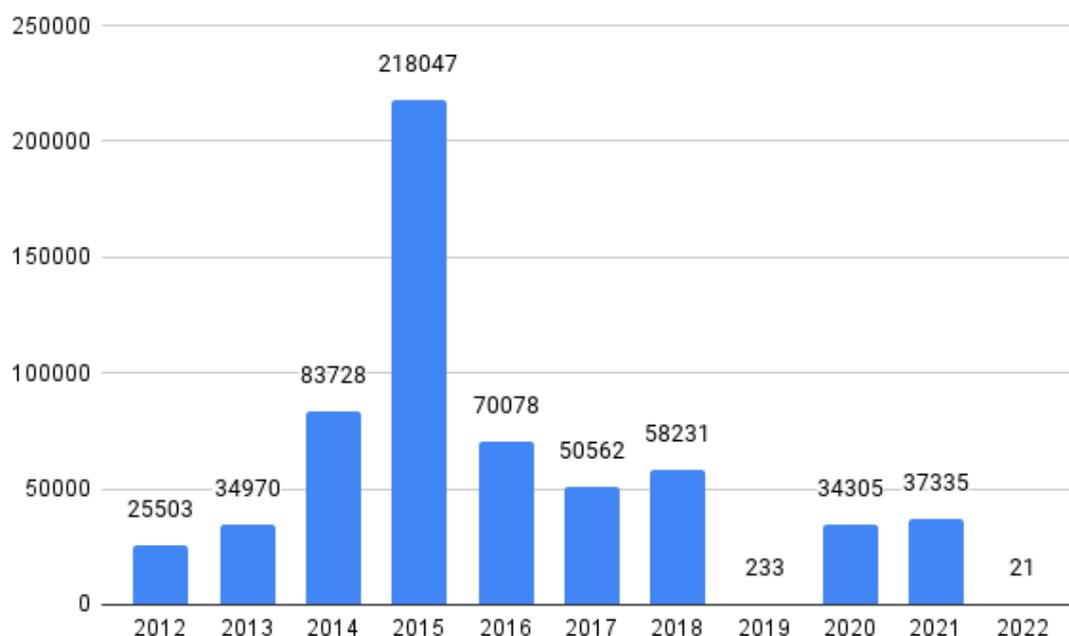
Tabela 8: Principais players no mercado de betacaroteno

EMPRESA	LOCALIZAÇÃO
BASF SE	ALEMANHA
KEMIN INDUSTRIES INC.	ESTADOS UNIDOS
ALGATECHNOLOGIES LTD.	ISRAEL/ESTADOS UNIDOS
CHR. HANSEN A/S	DINAMARCA
PHYTONE LIMITED	REINO UNIDO
CYANOTECH CORPORATION	ESTADOS UNIDOS
ROYAL DSM N.V., LYCORED LTD.	HOLANDA
OVERSEAL NATURAL INGREDIENTS LTD.	REINO UNIDO
PHARMLINE INC.	ESTADOS UNIDOS
SENSIENT TECHNOLOGIES CORPORATION	ESTADOS UNIDOS
MERA PHARMACEUTICALS INC.	ESTADOS UNIDOS
VALENSA INTERNATIONAL LLC	ESTADOS UNIDOS

Fonte: FUTURE MARKET INSIGHTS, 2022.

Dentre os países que mais exportaram carotenoides em 2018, encontram-se a Alemanha, com participação de 14,8%, a China com 14,40% e a França, com 11,50%. Nesse cenário, a participação do Brasil ficou em 0,39% (VIANA et al., 2020). O mercado de carotenoides na América Latina alcançou o valor de USD 0.16 bilhões em 2021, com expectativa de alcançar USD 0.19 bilhões até 2026 (MARKET DATA FORECAST, 2022). Em 2019, o Brasil importou cerca de US\$ 3,5 milhões em carotenoides e exportou apenas US\$ 409,00, o que demonstra uma dependência de carotenoides importados (VIANA et al., 2020). O Gráfico 3 mostra a quantidade de carotenoides exportados pelo bloco econômico da América do Sul entre os anos de 2012 e 2022, onde é possível perceber a baixa participação na exportação proveniente do bloco econômico dentro do cenário global e a inconstância da quantidade exportada dentro do escopo temporal. Não foram recuperados dados específicos sobre o Brasil durante esse período, além do ano de 2019.

Gráfico 3: Quantidade de carotenoides exportada pela América do Sul em USD.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da base COMEXSTAT.

Em relação ao mercado de *Dunaliella* sp., a estimativa é que o mesmo alcance \$122.9 milhões até o ano de 2028, com CAGR de 4.0% durante o período entre 2021 e 2028, com a produção em toneladas estimada em 1,691.62 toneladas e CAGR de 3.7% durante o período (METICULOUS RESEARCH, 2021). A crescente demanda por betacaroteno consequentemente aumenta a demanda global por *Dunaliella* sp., sendo as empresas de extração o setor que mais demanda a microalga. Em 2021, a expectativa de maior participação no mercado se concentrava na região Ásia-Pacífico, seguido de América do Norte e Europa. A Tabela 9 mostra os principais players no mercado global de produção de *Dunaliella* sp., onde é possível perceber uma forte participação de indústrias chinesas.

Tabela 9: Principais players no mercado global de *Dunaliella* sp.

EMPRESA	LOCALIZAÇÃO
ALGALIMENTO SL	ESPAÑA
SEAGRASS TECH PRIVATE LIMITED	ÍNDIA
PLANKTON AUSTRALIA PTY LTD	AUSTRÁLIA
HANGZHOU OUQI FOOD CO., LTD.	CHINA
SHAANXI REBECCA BIO-TECH CO., LTD	CHINA
NUTRAGREENLIFE BIOTECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA
IBR LTD	ISRAEL
XI'AN FENGZU BIOLOGICAL TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA
MONZÓN BIOTECH S.L	ESPAÑA
A4F - ALGAE FOR FUTURE	PORTUGAL
FUQING KING DNARMSA SPIRULINA CO., LTD.	CHINA

Fonte: METICULOUS RESEARCH, 2021.

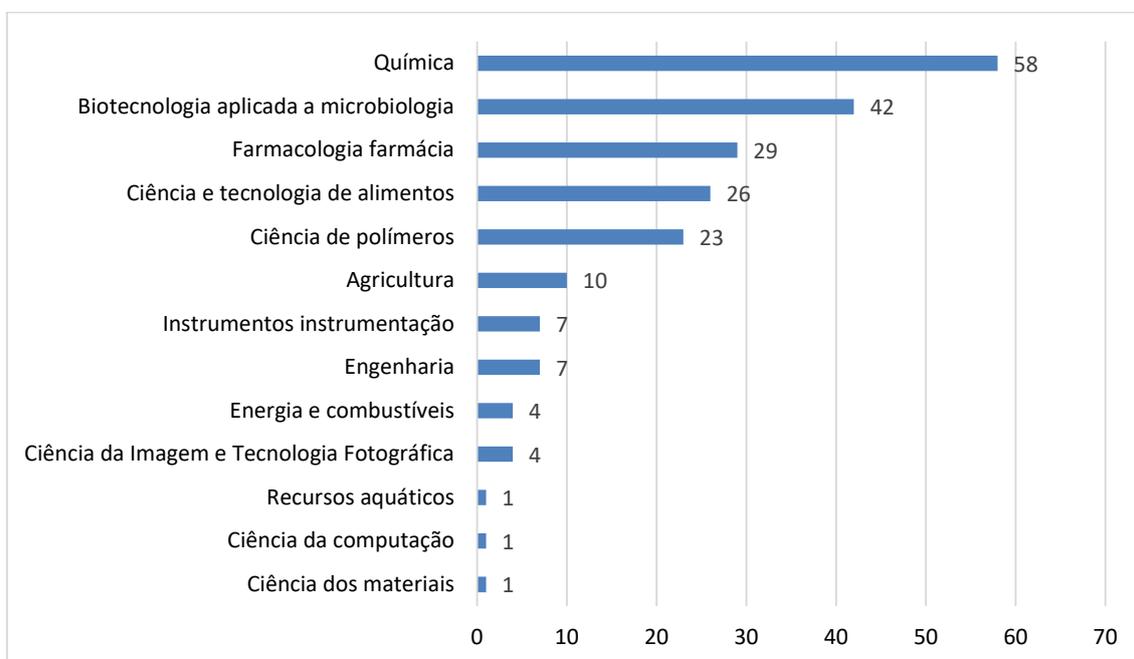
Apesar da baixa participação do Brasil no cenário global de carotenoides e microalgas, o país conta com uma área costeira abrangente, 12% do abastecimento de água doce mundial e altos níveis de incidência solar ao longo do ano (SOARES, 2021), fatores que tornam o Brasil um cenário propício para o cultivo de microalgas. Além disso, o país possui mais de 3,5 mil espécies de algas catalogadas e aproximadamente 40 instituições de pesquisa que detêm coleções de microalgas e cianobactérias (SOARES, 2021), o que demonstra um potencial produtivo.

4.3 Análise patenteométrica

Para complementar a análise de mercado, foi realizada uma busca por patentes na base *Derwent Innovation Index (DII)* com o intuito de analisar quais países demonstraram maior interesse na tecnologia e aplicações de pigmentos extraídos *Dunaliella* sp. e as principais áreas de conhecimento em que a tecnologia é aplicada. Conforme descrito em Materiais e Métodos, o escopo temporal utilizado foi entre 2012 e 2022. Durante esse período, foram

registradas 213 citações de patentes por área de conhecimento, sendo a área de Química a mais recorrente, com 58 registros.

Gráfico 4: Recorrência de citações de patentes registradas por área de conhecimento



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do DII.

Foram identificadas 98 instituições/depositantes que realizaram depósitos de patentes entre os anos de 2012 e 2022. A Tabela 10 mostra as 10 instituições que mais depositaram, onde percebe-se uma forte participação de depositantes asiáticos, coincidindo com os registros dos principais *players* no mercado global de *Dunaliella* sp. onde empresas chinesas aparecem com maior recorrência.

Tabela 10: Depositantes de patentes relacionadas à *Dunaliella* sp. e pigmentos.

Depositante	País	Número de documentos depositados
Univ South China Technology	China	4
Sawant A V	-	3
Synthetic Genomics Inc	Estados Unidos	3
Univ Fuzhou	China	3
Prodyut Biotech India Private Ltd	Índia	2
Sawant A	-	2
Univ Hanyang lucf Hyu	Coréia do Sul	2
Ajjawi I	-	1
Algama	França	1
Chuang Song Zong Pharm Co Ltd	China	1

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do *DII*.

Foi realizada também uma análise de Classificações Internacionais de Patentes (CIP) recuperadas na busca, as definições das CIP's foram obtidas a partir de um estudo realizado por Dos Santos et al. (2018). A CIP mais recorrente na busca foi a C12n-001/12 referente ao meio de cultura de algas unicelulares, contanto com 22 depósitos. As CIP's mais recorrentes em seguida foram a C12r-001/89, referente a algas; C12p-007/64, referente a óleos graxos; C12m-001/00, referente a aparelhos para enzimiologia ou microbiologia; e C12n-001/13, referente à modificação genética. Sendo assim, infere-se que há um forte interesse por parte dos depositantes no desenvolvimento de tecnologias de meios de cultivo, estudo de enzimas e melhoramento genético que permita maior acumulação de compostos de interesse industrial na *Dunaliella*.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A demanda por microalgas está crescendo mundialmente dado a versatilidade de aplicações industriais, e a busca por parte da população por alimentos saudáveis, levando a um maior interesse da indústria em produzir betacaroteno a partir da microalga *Dunaliella* sp., que se mostra uma fonte promissora devido a sua alta capacidade de acumular betacaroteno em comparação com fontes vegetais.

As análises de mercado demonstram que a Europa e a América do Norte são as regiões com maior presença no mercado global de carotenoides, enquanto a América Latina possui uma participação muito baixa nesse cenário, e o Brasil em específico é bastante dependente da importação de carotenoides.

Apesar do potencial, o custo de produção de betacaroteno a partir de *Dunaliella* sp. é alto e não é competitivo em relação às demais fontes naturais, e nem ao betacaroteno obtido por síntese química. Entretanto, as expectativas futuras a respeito do mercado global do pigmento obtido de fontes naturais são positivas, apresentando aumento no tamanho de mercado nos últimos anos e tendência de crescimento.

Sendo assim, têm-se buscado formas de otimizar os meios de cultivo e de melhorar geneticamente as cepas de microalgas, conforme visto na análise de patentes. Uma forma de tornar a produção de betacaroteno de *Dunaliella* sp. mais competitiva é o desenvolvimento de métodos de cultivo em larga escala que possibilitem o acúmulo de biomassa a um menor custo.

O investimento em otimizar os meios de produção ocorre principalmente em regiões que possuem maior presença global no mercado de *Dunaliella*, porém infere-se que o Brasil também é um país com alto potencial produtivo, devido ao clima favorável, grande biodiversidade de algas e alta disponibilidade de resíduos agrícolas que podem ser utilizados como nutrientes, e a produção nacional de betacaroteno poderia tornar o Brasil competitivo no cenário global e estimular o comércio nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, D. S.; COLOZZI FILHO, A. **Microalgas de águas continentais**. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná. 2014.

BELL CHEM. **Beta Carotene in the Food Industry**. [s.d.]. Disponível em: <<https://www.bellchem.com/news/beta-carotene-in-the-food-industry>>. Acesso em 07 set 2022.

BOROWITZKA, M. A. **THE MASS CULTURE OF DUNALIELLA SALINA**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Austrália. [s.d.]. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/ab728e/AB728E06.htm>>. Acesso em 20 ago 2022.

BRASIL, B. S. A. F; GARCIA, L. C. **MICROALGAS: ALTERNATIVAS PROMISSORAS PARA A INDÚSTRIA. AGROENERGIA em REVISTA**. Embrapa Agroenergia. Ano IV, nº 10, dezembro de 2016 Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/153095/1/Agroenergia-Revista-microalgas-ed10-red.pdf>>. Acesso em 26 dez 2022.

BRASIL, Ministério da Economia. **COMEXSTAT** (Estatísticas de Comércio Exterior), 2022. Disponível em <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>. Acesso em 26 out 2022.

CARNEVALLI, F.R. **Uso de Biomassa de Microalgas e seus Derivados em Alimentos**. 2021. no. 41. Trabalho de Conclusão de Curso de Farmácia-Bioquímica – Faculdade de Ciências Farmacêuticas – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

Derwent Innovation Index (DII). Disponível em: <<https://www-webofscience.ez54.periodicos.capes.gov.br/wos/diidw/basic-search>>. Acesso em: 13 dez. 2022.

DOS SANTOS, K. C.; LOPES, J. G.; COSTA, A. A. **MAPEAMENTO TECNOLÓGICO DE PEDIDOS DE PATENTES RELACIONADOS À UTILIZAÇÃO DAS MICROALGAS**. Cadernos de Prospecção, v. 11, p. 236, 30 jun. 2018.

FACHIN, O. **Fundamentos de metodologia**. 5. ed. [rev.]. São Paulo, SP: Saraiva, 2006.

FUTURE MARKET INSIGHTS. **Beta Carotene Market. 2022**. Disponível em: <<https://www.futuremarketinsights.com/reports/beta-carotene-market>>. Acesso em 08 set 2022.

GRAND VIEW RESEARCH. **Beta-Carotene Market Size, Share | Global Industry Growth Report, 2024**. 2015. Disponível em:

<<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/beta-carotene-market>>. Acesso em: 8 set. 2022.

HARVEY, P. J; BEN-ARMOTZ, A. **Towards a sustainable Dunaliella salina microalgal biorefinery for 9-cis β carotene production.** Algal Research. 2020.

JEEVANANDAM, J. et al. **Microalgal Biomass Generation via Electroflotation: A Cost-Effective Dewatering Technology.** Applied Sciences, v. 10, n. 24, p. 9053, 18 dez. 2020.

JEYAKODI, S; KRISHNAKUMAR, A; CHELLAPPAN, D. K. **Beta Carotene - Therapeutic Potential and Strategies to Enhance Its Bioavailability.** Nutri Food Sci Int J. Volume 7 Issue 4 – Setembro, 2018.

LIMA, P. V; MATTOS, C. A. **Modelo de análise Life Cycle Costing (LCC) e Simulação Monte Carlo em Projetos no contexto da Sustentabilidade.** VII Simpósio de Iniciação Científica, Didática e de Ações Sociais da FEI. São Bernardo do Campo. 2017.

LUCHE, D. E. D; GONÇALVES, B. C. M; SILVA, M. B. **Revisão de Sistemas para cultivo de microalgas: uma alternativa sustentável para tratar efluentes e reduzir a poluição atmosférica.** Revista Biociências. Taubaté, v. 25, n. 1, p. 31-41, 2019

Wikiwand - **Dunaliella salina.** Disponível em: <https://www.wikiwand.com/en/Dunaliella_salina>. Acesso em: 29 out. 2022.

MARKET DATA FORECAST. **Latin America Carotenoids Market | 2022 to 2027 | Mexico, Brazil, Argentina, Chile.** Disponível em: <<https://www.marketdataforecast.com/market-reports/la-carotenoids-market>>. Acesso em: 1 nov. 2022.

MARKETS AND MARKETS. **Carotenoids Market by Type, Application, Region - Global Forecast 2026| COVID-19 Impact on Carotenoids Market.** Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/carotenoid-market-158421566.html>>. Acesso em 25 out de 2022.

MEIRA, F. S. **ESTUDO SOBRE O USO DE MICROALGAS NA COBERTURA DE EDIFICAÇÕES E SUA INFLUÊNCIA NA TEMPERATURA DOS ESPAÇOS ARQUITETÔNICOS INTERNOS.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia da UFMG, 2015.

MESQUITA, S. da S. **Seleção de cepa de microalga brasileira para a produção de carotenoides de interesse industrial.** Tese de Doutorado – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2018.

MESQUITA, S. da S.; TEIXEIRA, C. M. L. L.; SERVULO, E. F. C. **Carotenoides: Propriedades, Aplicações e Mercado.** Revista Virtual de

Química, Niterói, v. 9, n. 2, p. 672 -688, 2017. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20170040>>. Acesso em 27 dez 2022.

MORAIS, F. L. de. **Carotenóides: Características Biológicas e Químicas**. Monografia – Curso de Qualidade em Alimentos IV Brasília – DF, março de 2006.

MORDOR INTELLIGENCE. **Mercado de betacaroteno | 2022 - 27 | Participação da indústria, tamanho, crescimento - Mordor Intelligence**. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/beta-carotene-market>>. Acesso em: 29 out. 2022.

NARALA, R. R. et al. **Comparison of Microalgae Cultivation in Photobioreactor, Open Raceway Pond, and a Two-Stage Hybrid System**. *Frontiers in Energy Research*, v. 4, 2 ago. 2016.

OLIVEIRA, R. C. **Suplementação de vacas leiteiras em final de gestação com betacaroteno**. Lavras: UFLA, 2014. 134 p.: il. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

ORTENZIO, Y. T; AMARAL, G. G. D; ALMEIDA, S. D. S; OLIVEIRA, E. C. A. M. D. **Cultivo de microalgas utilizando resíduos agroindustriais para a produção de biocombustíveis: perspectivas e desafios**. *Bioenergia em revista: diálogos*, ano 5, n. 1, p. 58-65, jan./jun. 2015.

Meticulous Research®. **Dunaliella Salina Market by Size, Share, Forecasts, & Trends Analysis** |. Disponível em: <<https://www.meticulousresearch.com/product/dunaliella-salina-market-5168>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

RAMMUNI, M. N. et al. **Comparative assessment on the extraction of carotenoids from microalgal sources: Astaxanthin from *H. pluvialis* and β -carotene from *D. salina***. *Food Chemistry*, v. 277, p. 128–134, mar. 2019. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814618318417>>. Acesso em 20 dez 2022.

REZENDE, G. A. A; AMAURO, N. Q; FILHO, G. R. **Desenhando Isômeros Ópticos**. *Quím. nova esc.* – São Paulo-SP, BR. Vol. 38, N° 2, p. 133-140, MAIO 2016.

SILVA, S. C. et al. **Microalgae-Derived Pigments: A 10-Year Bibliometric Review and Industry and Market Trend Analysis**. *Molecules*, v. 25, n. 15, p. 3406, 28 jul. 2020.

SINGH, R. V.; SAMBYAL, K. **An overview of β -carotene production: Current status and future prospects**. *Food Bioscience*, p. 101717, abr. 2022.

SOARES, L. S. REVISÃO TEÓRICA: **CULTIVO DE MICROALGAS PARA A PRODUÇÃO DE CAROTENOIDES**. Trabalho de Conclusão de Curso—Unesp: 2021.

TINOCO, N. A. B.; TEIXEIRA, C. M. L. L.; REZENDE, C. M. **O Gênero *Dunaliella*: Biotecnologia e Aplicações**. Revista Virtual de Química. 2015.

VIANA, N. M. et al. **Caracterização do mercado de betacaroteno a partir da microalga *Dunaliella* sp.** VI Encontro de Pesquisa e Inovação da Embrapa Agroenergia: Anais. 2020.

WANG, J. et al. **The Extraction of β -Carotene from Microalgae for Testing Their Health Benefits**. Foods, v. 11, n. 4, p. 502, 10 fev. 2022.

Z.-W. Ye et al. **Biosynthesis and regulation of carotenoids in *Dunaliella*: Progresses and prospects**. 2008.