



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PESCA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PESCA**

**ERIVAN SANTOS LIMA**

**FILMES À BASE DE POLISSACARÍDEOS SULFATADOS DA ALGA MARINHA  
VERMELHA (*Hypnea pseudomusciformis*) INCORPORADOS COM ÓLEO DE  
BABAÇU: ELABORAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO**

**FORTALEZA**

**2026**

ERIVAN SANTOS LIMA

FILMES À BASE DE POLISSACARÍDEOS SULFATADOS DA ALGA MARINHA  
VERMELHA (*Hypnea pseudomusciformis*) INCORPORADOS COM ÓLEO DE BABAÇU:  
ELABORAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Pesca da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Pesca. Área de concentração: Recursos pesqueiros e Engenharia de pesca.

Orientador: Profa. Dra. Ianna Wivianne Fernandes de Araujo.

Coorientadora: Profa. Dra. Sandra Helena de Mesquita Pinheiro.

FORTALEZA

2026

ERIVAN SANTOS LIMA

FILMES À BASE DE POLISSACARÍDEOS SULFATADOS DA ALGA MARINHA  
VERMELHA (*Hypnea pseudomusciformis*) INCORPORADOS COM ÓLEO DE BABAÇU:  
ELABORAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Pesca da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Pesca. Área de concentração: Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca.

Aprovada em: 30/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dra. Ianna Wivianne Fernandes de Araújo (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profª. Dra. Tatiana de Oliveira Lemos  
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

---

Dr. José Ariévilto Gurgel Rodrigues  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, a minha família e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela Sua presença constante, que me guiou e sustentou em todos os momentos da minha trajetória acadêmica.

Agradeço imensamente à minha família pelo apoio fundamental em todas as suas formas pelas palavras, pela confiança, pelo amor, pela compreensão e pelo suporte financeiro. Esta conquista não é apenas minha, mas de todos que caminharam ao meu lado. Um agradecimento especial aos meus pais, Ivanilde e Sebastião, pelo amor incondicional. Às minhas irmãs e meu irmão, aos meus sobrinhos, cunhados, tios e tias, minha avó e primos.

Encerrar um ciclo traz consigo a lembrança de momentos únicos, vividos ao longo desse período. Agradeço aqueles que cruzaram meu caminho e contribuíram de alguma forma para minha jornada. Destaco aqui meus amigos Anderson Kennaldy, Athos Campelo, José Diego, Angélica Oliveira, Maynara Almeida, Francisco Victor, Beatriz Silva, Leila Santos.

À Professora Dra. Ianna Wivianne Fernandes de Araujo, pela orientação, confiança, paciência, apoio, suporte quando solicitados e sem falar do conhecimento compartilhado. Seu apoio foi essencial para o meu crescimento profissional. Além do apoio nas atividades desenvolvidas em laboratório.

À professora Dra. Sandra Helena de Mesquita Pinheiro, pela coorientação, pela paciência, apoio, confiança, bem como, conhecimento compartilhado, desta forma seu suporte foi de suma importância.

Aos professores Dra. Alessandra e Dr. Rafael que foram responsáveis pela análise estatística, desde o início do projeto até avaliação dos dados. Dra. Suzete Roberta, ao Dr. José Ariévilo, a professora Dra. Kelma, que sempre que puderam não mediram esforços para ajudar.

Agradeço à Profa. Dra. Tatiana de Oliveira Lemos e ao Dr. José Ariévilo Gurgel Rodrigues por terem aceito o convite para compor a banca examinadora, pela leitura atenta e pelas valiosas contribuições que muito enriqueceram este trabalho.

A secretária do programa de Pós-graduação, Sulamita que desempenha seu trabalho com louvor.

Aos Laboratórios de Bioquímica Marinha- BIOMAR, da Universidade Federal do Ceará, de Tecnologia do Pescado- (LATEP), da Universidade Federal do Delta do Parnaíba - UFDPAr, de Polímero e inovação de Materiais do Departamento de Química (LabPol), UFC, Laboratório de Ligantes- UFC, Laboratório de Controle de Qualidade de Alimentos e Secagem (LACONSA) – UFC, por terem aberto as portas para que eu pudesse realizar este

trabalho.

A minha amiga Juliana Isis do LATEP, Wesley Rocha do Laboratório de Ligantes, que foram cruciais na realização de análises, José Evandro do LabPol, pela contribuição na liofilização das amostras, ao Gilson do Laboratório de LACONSA, ao Gleize Neves do LATEP.

Agradeço à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pela concessão da bolsa de mestrado, suporte financeiro fundamental para a realização desta pesquisa, conforme estabelecido no Edital nº 12/2024 – Programa de Bolsas de Formação Acadêmica, Modalidade Mestrado e Doutorado (item 10, subitem II).

“A adição de lipídios em filmes à base de hidrocoloides pode melhorar significativamente suas propriedades de barreira à umidade, embora possa afetar a resistência mecânica e a transparência do material.” (Falguera *et al.*, 2011).

## RESUMO

A produção de embalagens biodegradáveis tem aumentado, assim como o interesse de pesquisadores e indústrias, com o intuito de reduzir o impacto causado pelo uso e descarte de embalagens produzidas com materiais sintéticos derivados de hidrocarbonetos fósseis. O presente estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar filmes biodegradáveis à base de polissacarídeo sulfatado (PS) extraído da alga vermelha *Hypnea pseudomusciformis*, incorporados com óleo de babaçu em diferentes concentrações. A extração dos polissacarídeos foi realizada por dois métodos (extração aquosa - EA e extração aquosa refinada - EAR), com rendimentos de 31,50% e 10,35%, respectivamente. Foram elaborados seis tratamentos, variando a concentração de carragenana (5%, 10%, 15%) e de óleo de babaçu (1%, 3%, 6%), utilizando glicerol como plastificante. Os filmes foram avaliados quanto a propriedades físicas (espessura, umidade), ópticas (cor, transparência), de barreira (solubilidade em água), térmicas (DSC, TGA), químicas (FTIR) e biodegradabilidade em solo. A análise estatística incluiu estatísticas descritivas, multivariada e utilização do software R. Os resultados mostraram que a incorporação de óleo melhorou o manuseio e a homogeneidade visual, especialmente nos tratamentos com 5% de polissacarídeo + 1% de óleo (T4) e 15% de polissacarídeo + 6% de óleo (T6). A análise de FTIR confirmou a estrutura da carragenana nos filmes e a presença do óleo de babaçu pela banda em  $\sim 1740\text{ cm}^{-1}$ . A biodegradabilidade foi elevada (>70% após 10 dias), adição de óleo aumentou a estabilidade térmica dos filmes, com T6 apresentando a maior resistência (menor perda de massa). Conclui-se que a combinação PS e óleo de babaçu é viável para a produção de filmes biodegradáveis, sendo possível ajustar suas propriedades (como transparência, resistência à umidade e taxa de degradação) por meio da formulação, o que demonstra seu potencial para aplicações específicas em embalagens sustentáveis.

**Palavras-chave:** hidrocoloides; propriedades de barreira; sustentabilidade; filmes biodegradáveis.

## ABSTRACT

The production of biodegradable packaging has increased, along with the interest of researchers and industries, aiming to reduce the impact caused by the use and disposal of packaging made from synthetic materials derived from fossil hydrocarbons. This study aimed to develop and characterize biodegradable films based on sulfated polysaccharide (SP) extracted from the red alga *Hypnea pseudomusciformis*, incorporated with babassu oil at different concentrations. Polysaccharide extraction was carried out using two methods (aqueous extraction - AE and refined aqueous extraction - RAE), with yields of 31.50% and 10.35%, respectively. Six treatments were prepared, varying the concentration of carrageenan (5%, 10%, 15%) and babassu oil (1%, 3%, 6%), using glycerol as a plasticizer. The films were evaluated for physical (thickness, moisture), optical (color, transparency), barrier (water solubility), thermal (DSC, TGA), chemical (FTIR) properties, and soil biodegradability. Statistical analysis included descriptive statistics, multivariate analysis, and the use of R software. The results showed that oil incorporation improved handling and visual homogeneity, especially in treatments with 5% polysaccharide + 1% oil (T4) and 15% polysaccharide + 6% oil (T6). FTIR analysis confirmed the carrageenan structure in the films and the presence of babassu oil through the band at  $\sim 1740\text{ cm}^{-1}$ . Biodegradability was high (>70% after 10 days), and the addition of oil increased the thermal stability of the films, with T6 showing the highest resistance (lowest mass loss). It is concluded that the combination of SP and babassu oil is viable for the production of biodegradable films, allowing their properties (such as transparency, moisture resistance, and degradation rate) to be adjusted through formulation, demonstrating their potential for specific applications in sustainable packaging.

**Keywords:** hydrocolloids; barrier properties; sustainability; biodegradable films.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Exemplar de <i>H. pseudomusciformis</i> com destaque para a estrutura das gavinhas .....	20
Figura 2	– Exemplar de <i>H. pseudomusciformis</i> , (A) Indivíduo de <i>H. pseudomusciformis</i> com detalhe morfológico em escala (18 cm); (B) Espécime fixada em substrato .....	21
Figura 3	– Representação esquemática dos principais tipos de carragenanas (kappa, iota, lambda, mu) e sua relação com espécies de algas vermelhas produtoras, incluindo <i>H. pseudomusciformis</i> .....	22
Figura 4	– Esquema ilustrativo do conceito de economia circular na produção de filmes biodegradáveis à base de polissacarídeos sulfatados de algas vermelhas e o óleo de babaçu .....	24
Figura 5	– Fluxograma de extração aquosa refinada .....	31
Figura 6	– Fluxograma de extração aquosa .....	32
Figura 7	– Aspecto do PS liofilizado proveniente da alga <i>H. pseudomusciformis</i> : comparação visual entre os métodos EAR e EA .....	32
Figura 8	– Óleo de babaçu em recipiente plástico .....	33
Figura 9	– Fluxograma de obtenção dos filmes de PS e PS + óleo de babaçu .....	35
Figura 10	– Fluxograma da análise de solubilidade dos filmes em água .....	37
Figura 11	– Avaliação da biodegradabilidade com umidade e temperatura controlada..	38
Figura 12	– Aspecto visual dos filmes biodegradáveis à base de PS da alga <i>H. pseudomusciformis</i> e incorporado com óleo de babaçu em diferentes concentrações .....	43
Figura 13	– Espessura média (mm) dos filmes biodegradáveis à base de polissacarídeo sulfatado (PS) da alga <i>H. pseudomusciformis</i> e incorporado com óleo de babaçu .....	44
Figura 14	– Transparência (absorbância a 600 nm) dos filmes biodegradáveis à base de polissacarídeo sulfatado (PS) da alga <i>H. pseudomusciformis</i> e incorporado com óleo de babaçu .....	45
Figura 15	– Solubilidade em água (g/s) dos filmes biodegradáveis à base de polissacarídeo sulfatado (PS) da alga <i>H. pseudomusciformis</i> e incorporado com óleo de babaçu .....	48

Figura 16 – Umidade (%) dos filmes biodegradáveis à base de polissacarídeo sulfatado (PS) da alga <i>H. pseudomusciformis</i> e incorporado com óleo de babaçu .....	49
Figura 17 – Espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) dos filmes de polissacarídeo sulfatado (PS) nas concentrações de 5% (T1), 10% (T2) e 15% (T3) .....	50
Figura 18 – Representação dos espectros FTIR dos filmes elaborados com PS e óleo de babaçu (T4: 5% PS +1% Óleo, T5: 10% PS +3% Óleo, T6: 15% PS +6% Óleo) .....	51
Figura 19 – Parâmetros colorimétricos (L, a, b e $\Delta E$ ) dos filmes biodegradáveis à base de polissacarídeo sulfatado (PS) da alga <i>H. pseudomusciformis</i> e incorporado com óleo de babaçu .....	52
Figura 20 – Imagens da análise de biodegradabilidade em solo dos filmes elaborados com polissacarídeo sulfatado (PS) da alga <i>H. pseudomusciformis</i> adicionado de óleo de babaçu .....	54
Figura 21 – Biplot dos componentes principais (ACP) .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1–Classificação taxonômica de <i>H. pseudomusciformis</i> .....	20
Tabela 2 – Matriz de planejamento para os tratamentos dos filmes à base de PS e óleo de babaçu.....	34
Tabela 3– Rendimento do polissacarídeo sulfatado (PS) pelas metodologias EAR e EA. ....	41
Tabela 4– Avaliação visual dos filmes segundo metodologia de Gontard (1991).....	42
Tabela 5– Comparativo da biodegradabilidade de filmes nos trabalhos reportados na literatura e o presente estudo.....	53
Tabela 6 – Propriedades térmicas dos filmes obtidas por calorimetria diferencial de varredura (DSC) e análise termogravimétrica (TGA). ....	54
Tabela 7– Estatísticas descritivas (n, mínimo, máximo, média, desvio padrão e coeficiente de variação) das propriedades avaliadas para cada tratamento dos filmes à base de polissacarídeo sulfatado (PS) da alga <i>H. pseudomusciformis</i> e incorporado com óleo de babaçu.....	58
Tabela 8– Cargas das variáveis nos dois primeiros componentes principais. ....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abs	Absorbância
ACP	Análise de Componentes Principais
BIOMAR	Laboratório de Bioquímica Marinha
CAR	Carragenana
CV	Coeficiente de variação
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
EA	Extração Aquosa
EAR	Extração Aquosa Refinada
FTIR	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier
FUNCAP	Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico
LACONSA	Laboratório de Controle de Qualidade de Alimentos e Secagem
LabPol	Laboratório de Polímero e inovação de Materiais
LATEP	Laboratório de Tecnologia do Pescado
MIQCB	Movimento Interestadual das Quebradeiras de Coco Babaçu
PNAE	Programa Nacional de Alimentação Escolar
PC	Componente principal
PS	Polissacarídeo Sulfatado
T1	Tratamento 1
T2	Tratamento 2
T3	Tratamento 3
T4	Tratamento 4
T5	Tratamento 5
T6	Tratamento 6
TGA	Análise Termogravimétrica

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
2	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
2.1	<b>Embalagens tradicionais e seus impactos</b> .....	17
2.2	<b>Algas marinhas</b> .....	18
2.3	<b>Gênero <i>Hypnea</i></b> .....	19
2.4	<b>Polissacarídeos sulfatados (Carragenanas)</b> .....	22
2.5	<b>Filmes Biodegradáveis e Sustentabilidade</b> .....	25
2.6	<b>Óleo de babaçu</b> .....	27
3	<b>OBJETIVOS</b> .....	29
3.1	<b>Geral</b> .....	29
3.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	29
4	<b>METODOLOGIA</b> .....	30
4.1	<b>Obtenção das algas marinhas</b> .....	30
4.1.1	<i>Processamento das algas marinhas</i> .....	30
4.1.2	<i>Extração</i> .....	30
4.1.2.1	<i>Extração aquosa refinada (EAR)</i> .....	30
4.1.2.2	<i>Extração aquosa (EA)</i> .....	31
4.2	<b>Obtenção do óleo de babaçu</b> .....	32
4.3	<b>Delineamento experimental</b> .....	33
4.3.1	<i>Estrutura do experimento</i> .....	33
4.3.2	<i>Elaboração dos filmes</i> .....	34
4.4	<b>Caracterização dos filmes à base de PS e óleo de babaçu</b> .....	35
4.4.1	<i>Aspecto visual</i> .....	35
4.4.2	<i>Espessura</i> .....	35
4.4.3	<i>Transparência</i> .....	36
4.4.4	<i>Solubilidade</i> .....	36
4.4.5	<i>Umidade</i> .....	37
4.4.6	<i>Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)</i> .....	37
4.4.7	<i>Cor</i> .....	38
4.4.8	<i>Biodegradabilidade</i> .....	38
4.4.9	<i>Análise de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)</i> .....	39

4.4.10	<i>Análise de Termogravimétrica (TGA)</i> .....	39
5	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA</b> .....	40
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	41
6.1	<b>Rendimento de PS da macroalga <i>H. pseudomusciformis</i></b> .....	41
6.2	<b>Análise dos filmes</b> .....	42
6.2.1	<i>Análise visual</i> .....	42
6.2.2	<i>Espessura</i> .....	44
6.2.3	<i>Transparência</i> .....	45
6.2.4	<i>Solubilidade</i> .....	46
6.2.5	<i>Umidade</i> .....	47
6.2.6	<i>FTIR</i> .....	48
6.2.7	<i>Cor</i> .....	50
6.2.8	<i>Biodegradabilidade</i> .....	51
6.2.9	<i>Calorimetria diferencial de varredura (DSC) e análise termogravimétrica (TGA)</i> .....	54
6.2.10	<i>Síntese dos resultados da Análise de Componentes Principais (ACP)</i> .....	55
6.2.10.1	<i>Interpretação dos eixos a partir das cargas fatoriais</i> .....	59
7	<b>CONCLUSÕES</b> .....	62
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	63

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria alimentícia mantém alta dependência de embalagens plásticas de origem fóssil que, conforme Kumar *et al.* (2010), representam mais de 90% dos materiais utilizados atualmente. Esses plásticos contribuem significativamente para a poluição do solo, da água e do ar, além de representarem uma ameaça à vida marinha e à saúde humana (Kumar *et al.*, 2010).

Dentre as vantagens dos biopolímeros produzidos a partir de fontes renováveis, destacam-se a redução da dependência de recursos não renováveis, a diminuição da poluição ambiental e a mitigação dos impactos negativos associados ao descarte inadequado de plásticos convencionais. Além disso, filmes e revestimentos biodegradáveis são considerados sustentáveis por apresentarem tempos de degradação mais curtos, contribuindo para a redução do acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente (Zhang; Show; Ho, 2019).

Dessa forma, o interesse em elaborar, manter ou melhorar a qualidade dos produtos embalados por meio de embalagens sustentáveis vem aumentando. Esse interesse tem incentivado pesquisas em todo o mundo para aprimorar e desenvolver embalagens biodegradáveis provenientes de fontes renováveis (Yousuf; Qadri; Srivastava, 2018; Yousuf; Wu; Gao, 2021).

A produção de polissacarídeos sulfatados (PS) a partir de fontes naturais renováveis é considerada promissora. Esses materiais oferecem vantagens como biodegradabilidade, biocompatibilidade, baixa toxicidade, abundância de matéria-prima renovável e baixo custo. Polímeros derivados de fontes naturais, como amidos, celulose, proteínas e ácidos graxos, têm sido cada vez mais explorados para a fabricação de embalagens sustentáveis (Talan *et al.*, 2022).

Ao utilizar esses polímeros renováveis, é possível desenvolver embalagens que atendam aos padrões de qualidade necessários para proteger os produtos embalados, ao mesmo tempo em que são ambientalmente amigáveis e facilmente degradáveis após o uso. Isso ajuda a reduzir a poluição por plásticos e o acúmulo de resíduos não biodegradáveis em aterros sanitários e no meio ambiente (Devadas *et al.*, 2021).

Portanto, a combinação de biopolímeros com agentes naturais bioativos representa uma abordagem promissora para o desenvolvimento de embalagens funcionais e sustentáveis, capazes de oferecer proteção adicional aos alimentos e contribuir para a redução do desperdício alimentar (Asgher *et al.*, 2020). Destacam-se, ainda, funcionalidades adicionais, como ação antimicrobiana e antioxidante, entre outras. Por exemplo, a adição de óleos

essenciais com propriedades antimicrobianas pode inibir o crescimento de bactérias, fungos e leveduras, prolongando, assim, a vida útil dos alimentos embalados (Hopkins *et al.*, 2015; Basiak; Debeaufort; Lenart, 2016; Yousuf; Wu; Gao, 2021).

Diante do contexto, o presente trabalho visou a formulação de filmes à base de polissacarídeos sulfatados (carragenanas), extraídos da macroalga vermelha *Hypnea pseudomusciformis*, combinados ao óleo do coco babaçu, com o intuito de avaliar suas propriedades físicas, ópticas, de barreira e biodegradação em solo, como possível potencial de embalagem ambientalmente sustentável.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Embalagens tradicionais e seus impactos

As embalagens têm o papel de prolongar a vida útil dos alimentos, bem como reduzir as perdas decorrentes da deterioração (Rawat, 2015). Dentre as embalagens assépticas mais utilizadas nos processos tradicionais, destacam-se o papel e o plástico. Nesse contexto, o alimento é esterilizado e acondicionado em embalagem estéril e hermeticamente selada. Segundo Amit *et al.* (2017), o calor e tratamentos químicos podem ser utilizados para esterilizar materiais e alimentos.

De acordo com Li e Farid (2016), existem técnicas alternativas de conservação, as quais podem ser divididas em duas classes: métodos combinados, como a irradiação UV, a luz pulsada e a alta pressão hidrostática, entre outros; e métodos não térmicos, como o plasma frio e a radiação ionizante, que preservam as propriedades dos alimentos por não envolverem a aplicação de calor.

As embalagens desempenham um papel significativo em aspectos como marketing, design gráfico e material utilizado, bem como na comunicação de informações sobre reciclabilidade (Lindh *et al.*, 2015), características comerciais, tipo de produto, marca e informações nutricionais, entre outros (Schifferstein *et al.*, 2021). De modo geral, as embalagens podem ser classificadas em três níveis: primária, que entra em contato direto com o produto e é destinada ao usuário final; secundária, que agrupa unidades primárias para facilitar o manuseio e o transporte; e terciária, que reúne múltiplas unidades secundárias com o objetivo de otimizar a logística (Ncube *et al.*, 2021).

O papel, o vidro, o metal e os polímeros à base de petróleo são principais materiais utilizados para a conservação de alimentos, destacando-se devido a facilidade de produção, o armazenamento e o transporte. Como ponto negativo esses materiais causam impactos ao meio ambiente e a humanidade, visto que, essas embalagens são utilizadas uma vez e posteriormente descartadas (Sangroniz *et al.*, 2019; Sid *et al.*, 2021).

De acordo com Ciel (2017), os materiais poliméricos de origem não renovável tornaram-se indispensáveis na sociedade moderna, representando aproximadamente 99% dos plásticos utilizados. Entretanto, sua extração e processamento acarretam graves problemas ambientais. O uso de plásticos sintéticos na indústria de embalagens alimentícias expandiu-se nas últimas décadas, gerando impactos ambientais preocupantes devido à sua elevada resistência à degradação natural (Muscat *et al.*, 2012).

O descarte inadequado desses materiais gera consequências alarmantes, como a emissão descontrolada de gases de efeito estufa (Paula *et al.*, 2018), a contaminação de ecossistemas por microplásticos e seus efeitos ecotoxicológicos (Prata *et al.*, 2019).

A partir dessa perspectiva, observa-se uma preocupação crescente por parte dos consumidores, que têm valorizado opções ecológicas e biodegradáveis em substituição aos materiais convencionais. Nesse contexto, os biopolímeros vêm sendo estudados como uma solução promissora para aplicações em embalagens alimentícias e conservação de produtos (Persin *et al.*, 2011). Os filmes biodegradáveis destacam-se como alternativas viáveis aos plásticos sintéticos, oferecendo propriedades funcionais importantes, como controle de umidade, proteção contra a volatilização de compostos aromáticos, regulação da migração de solutos e barreira à penetração de oxigênio, características essenciais para a preservação da qualidade dos alimentos (Aider, 2010; Dutta *et al.*, 2009, Han *et al.*, 2018).

Diante deste cenário crítico, a pesquisa e o desenvolvimento de polímeros sustentáveis, provenientes de fontes renováveis e com propriedades biodegradáveis, emerge como uma necessidade urgente para conciliar o progresso tecnológico com a preservação ambiental e o desenvolvimento social sustentável (Zhang; Show; Ho, 2019).

## **2.2 Algas marinhas**

Com base no relatório *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024* (FAO, 2024), a produção mundial de algas marinhas alcançou 37,8 milhões de toneladas em 2022, das quais 36,5 milhões de toneladas foram provenientes da aquicultura e 1,3 milhão de toneladas da pesca de captura. A parcela destinada ao consumo humano mantém-se entre 30% e 38% do total (FAO, 2024).

Nesse contexto, a algicultura desempenha um papel importante nas comunidades, contribuindo para a oferta de alimentos saudáveis e para a segurança alimentar, além de atuar na geração de emprego e renda, especialmente para jovens e mulheres. Paralelamente, a indústria alimentícia tem utilizado algas marinhas na produção de diversos produtos, por meio da extração de agentes espessantes, como ágar-ágar, alginato e carragenanas (CAR). Esses compostos são amplamente empregados no desenvolvimento de produtos à base de hidrocoloides, com aplicações em setores como o de nutracêuticos, farmacêuticos, cosméticos, fertilizantes, biocombustíveis e bioplásticos (FAO, 2024).

Além de sua relevância econômica e industrial, as algas marinhas apresentam elevado valor nutricional. Por possuírem alto teor de fibras e baixo valor calórico,

configuram-se como uma opção alimentar saudável. Espécies como nori, *Laminaria japonica* e *Eucheuma* são amplamente utilizadas nas cozinhas locais, especialmente na Ásia, devido ao seu elevado conteúdo de micronutrientes, assumindo, assim, significativa importância nutricional e cultural (FAO, 2024).

No que se refere às aplicações industriais, as algas vermelhas têm despertado crescente interesse, principalmente devido à extração de substâncias gelatinosas de grande importância econômica, como o ágar e as carragenanas. Esses polissacarídeos são amplamente utilizados como aditivos em alimentos e em diversas aplicações industriais. Destacam-se, nesse contexto, espécies dos gêneros *Eucheuma*, *Gracilaria*, *Hypnea* e *Kappaphycus* (Pereira *et al.*, 2013).

Entre essas espécies, *H. pseudomusciformis* apresenta elevado potencial de aplicação. Segundo Rodrigues *et al.* (2011), essa espécie apresenta alto rendimento de carragenana do tipo kappa, alcançando valores entre 18% e 22% do peso seco, quando comparada a outras espécies costeiras brasileiras. Essa característica a torna particularmente promissora para a produção de filmes biodegradáveis.

### **2.3 Gênero *Hypnea***

O gênero *Hypnea* pertence à divisão *Rhodophyta*, tendo sido inicialmente descrito por Lamouroux em 1813. De acordo com registros recentes, existem 121 espécies reconhecidas dentro desse grupo. Essas algas apresentam ampla distribuição geográfica, sendo encontradas principalmente em regiões tropicais e subtropicais dos oceanos ao redor do mundo. O Oceano Índico concentra a maior diversidade de espécies de *Hypnea*, seguido pelo Oceano Pacífico e, posteriormente, pelo Atlântico (Mshigeni; Chapman, 1994).

Do ponto de vista morfológico, o gênero *Hypnea* é caracterizado por apresentar um talo ereto (Figura 1), com ramificações abundantes e ramos curtos, frequentemente dotados de estruturas espinescentes. O crescimento ocorre a partir de uma célula apical, embora a forma das extremidades dos ramos varie consideravelmente, podendo assumir formatos como ganchos ou gavinhas. Essas estruturas favorecem a fixação e o crescimento epifítico sobre outras algas, permitindo que essas espécies utilizem tais mecanismos como suporte para seu desenvolvimento (Nauer; Cassano; Oliveira, 2015).

Figura 1 – Exemplar de *H. pseudomusciformis* com destaque para a estrutura das gavinhas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 1–Classificação taxonômica de *H. pseudomusciformis*.

Nível Taxonômico	Classificação
<b>Domínio</b>	Eukaryota
<b>Reino</b>	Plantae
<b>Filo</b>	Rhodophyta
<b>Classe</b>	Florideophyceae
<b>Ordem</b>	Gigartinales
<b>Família</b>	Cystocloniaceae
<b>Gênero</b>	<i>Hypnea</i> J.V.Lamouroux, 1813
<b>Espécie</b>	<i>H. pseudomusciformis</i> Nauer, Cassano & M.C.Oliveira, 2015

Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar da relevância do gênero *Hypnea*, sua taxonomia apresenta desafios significativos, sendo considerada complexa e confusa (Prince *et al.*, 1992). As dificuldades em distinguir as espécies desse gênero estão relacionadas à sua morfologia relativamente simples, frequentemente influenciada por fatores ambientais, o que resulta em variações que dificultam a identificação e a classificação precisa.

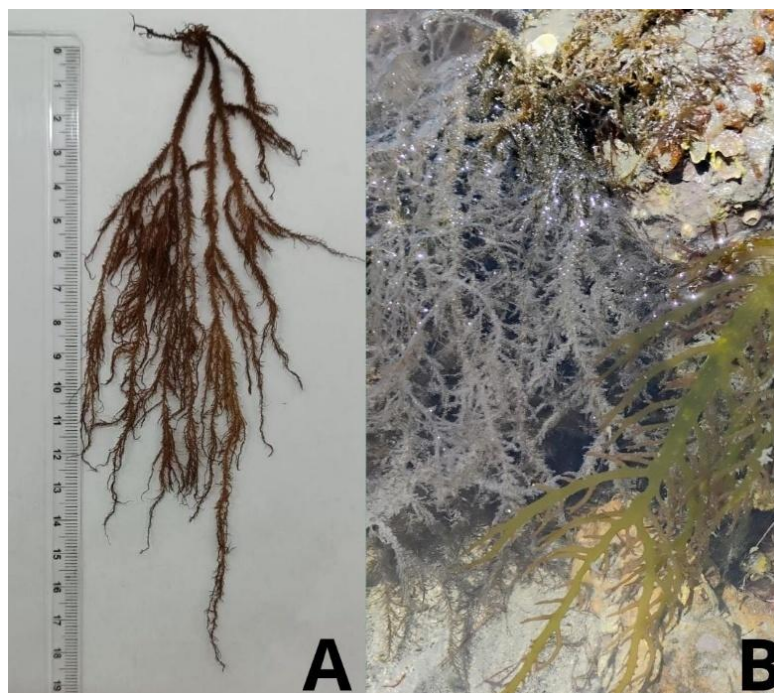
Nesse contexto, abordagens moleculares têm contribuído significativamente para o avanço do conhecimento taxonômico do grupo. Análises realizadas com três marcadores

moleculares (COI, UPA e *rbcL*) revelaram que exemplares brasileiros anteriormente identificados como *H. musciformis* apresentam divergência genética em relação aos espécimes da localidade-tipo. Essa constatação levou à descrição de uma nova espécie, denominada *H. pseudomusciformis* (Nauer; Cassano; Oliveira, 2015).

No Brasil, os exemplares de *Hypnea* encontrados na região Nordeste destacam-se por atingir dimensões consideravelmente superiores às observadas em outras regiões do país, podendo alcançar até 16 cm de altura. Esses indivíduos apresentam talos com maior número de ramificações, além de numerosos e longos râmulos espinescentes, que podem medir até 1,5 cm de comprimento (Jesus, 2012). Essa diferença morfológica evidencia a existência de variação intraespecífica, possivelmente influenciada por condições ambientais ou geográficas.

Esse padrão também é observado em exemplares encontrados no litoral piauiense (Figura 2), os quais podem ultrapassar 18 cm de comprimento. A espécie ocorre tanto em hábito epifítico sobre outras macroalgas, como *Gracilaria domingensis* e *Sargassum vulgare*, quanto fixada diretamente ao substrato (Figura 2).

Figura 2 – Exemplar de *H. pseudomusciformis*, (A) Indivíduo de *H. pseudomusciformis* com detalhe morfológico em escala (18 cm); (B) Espécime fixada em substrato.



Fonte: Elaborada pelo autor.

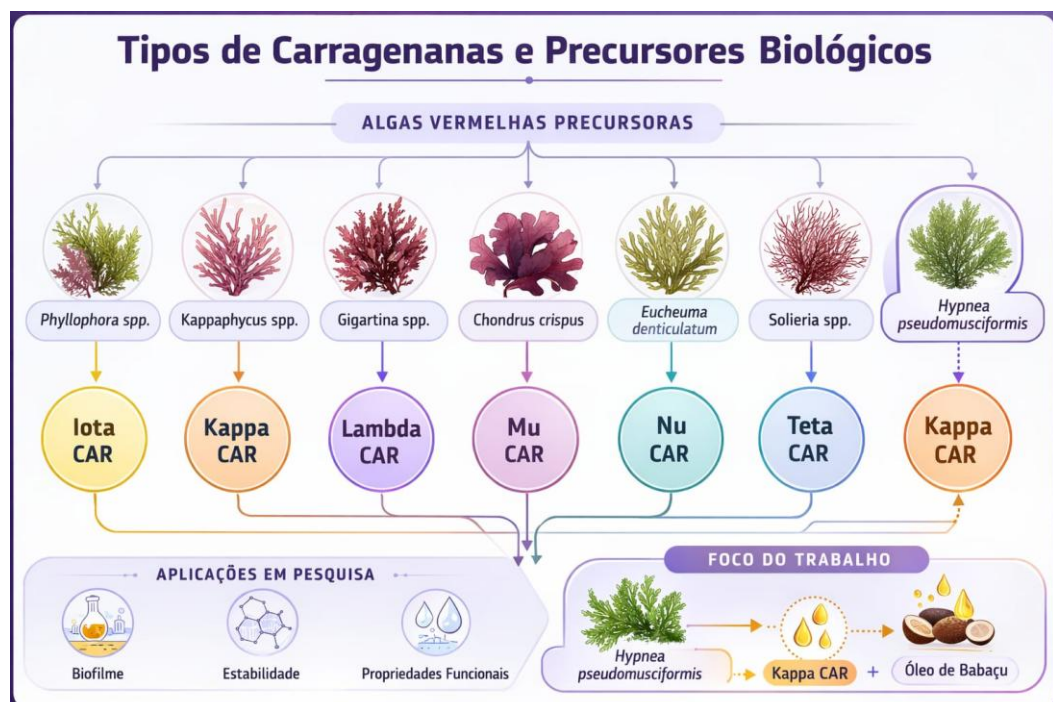
A espécie *H. pseudomusciformis* encontra-se distribuída ao longo do litoral brasileiro do Maranhão, Nordeste brasileiro ao Rio Grande do Sul, além da presença confirmada na ilha oceânica do Atol das Rocas (Jesus, 2012).

Embora existam muitos estudos sobre extração e aplicação de PS de *Hypnea* sp., uma pequena parcela desses trabalhos, após a reclassificação da espécie, trabalha especificamente com *H. pseudomusciformis*, sendo que nenhum investigou sua combinação com óleo de babaçu para produção de filmes.

## 2.4 Polissacarídeos sulfatados (Carragenanas)

Segundo Campo *et al.* (2009), as CAR compõem uma família de galactanas sulfatadas que apresentam variações em sua estrutura, principalmente devido a substituições de hidroxilas livres. Essas variações estruturais, resulta em propriedades específicas de acordo com os tipos de carragenanas. As seis formas básicas de divisão desses polissacarídeos sulfatados naturais são: Iota CAR, Kappa CAR, Lambda CAR, Mu CAR, Nu CAR e Teta CAR (Figura 3).

Figura 3 – Representação esquemática dos principais tipos de carragenanas (kappa, iota, lambda, mu) e sua relação com espécies de algas vermelhas produtoras, incluindo *H. pseudomusciformis*.



Fonte: Elaborada pelo autor

Com base em Campo *et al.* (2009), as setas indicam a relação biossintética entre os precursores ( $\mu$  e  $\nu$ ) e as carragenanas finais ( $\kappa$  e  $\iota$ ). A carragenana do tipo  $\lambda$  não possui precursor direto, sendo extraída em sua forma final. Nesse contexto, a espécie *H. pseudomusciformis*, objeto deste estudo, é predominantemente produtora de carragenana do tipo  $\kappa$ .

A produção e a composição de carragenanas nas algas podem variar significativamente em função de fatores ambientais e operacionais. Nesse sentido, Venugopal (2011) ressalta que a presença e a quantidade de carragenanas (CAR) dependem de diversos fatores, incluindo o local de coleta, a estação do ano e os métodos de extração empregados.

Entre os diferentes tipos de carragenana, a  $\kappa$ -carragenana destaca-se por suas propriedades tecnológicas. Presente em várias espécies de algas vermelhas, como *H. pseudomusciformis*, essa forma apresenta elevada capacidade de formar géis firmes e quebradiços na presença de íons potássio, sendo amplamente utilizada na indústria alimentícia para conferir textura e estabilidade a diversos produtos (Stanley, 1987). Do ponto de vista estrutural, a  $\kappa$ -carragenana apresenta grupos sulfato na posição C4 da galactose-4-sulfato e unidades de 3,6-anidrogactose, o que lhe confere a capacidade de formar géis com íons  $K^+$  e produzir filmes com resistência moderada à umidade (Campo *et al.*, 2009). Além disso, trata-se de um polissacarídeo com excelente capacidade de formação de filmes, amplamente utilizado não apenas na indústria alimentícia, mas também em aplicações farmacêuticas, devido às suas propriedades funcionais (Abdou; Sorour, 2014).

De forma mais abrangente, a carragenana é um polissacarídeo extraído de diversas espécies de algas vermelhas e amplamente empregado na indústria de alimentos como espessante, estabilizante e emulsificante. Além dessas funções, apresenta capacidade de formar filmes com propriedades de barreira, o que a torna particularmente útil na produção de embalagens alimentícias e filmes comestíveis. Esses materiais podem ser utilizados para revestir alimentos, proporcionando proteção contra a umidade e a contaminação microbiana (Van De Velde; De Ruyter, 2002; Fernández *et al.*, 2003; Silva, 2005; Rodrigues *et al.*, 2011).

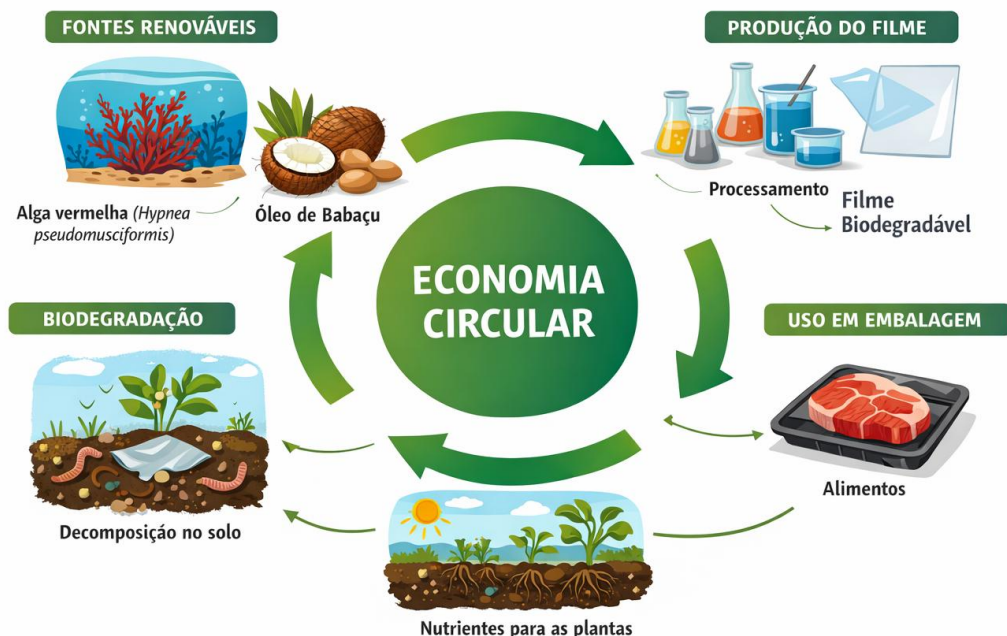
Nesse contexto, a carragenana enquadra-se na classe dos biopolímeros, ou seja, materiais de origem renovável (plantas, algas e microrganismos), biodegradáveis e atóxicos. Por apresentar essas características, a CAR oferece vantagens significativas em relação aos polímeros derivados de combustíveis fósseis, uma vez que pode ser decomposta por microrganismos no ambiente, reduzindo o acúmulo de resíduos plásticos, além de não liberar substâncias nocivas quando em contato com alimentos. Essas propriedades tornam os filmes à base de carragenana particularmente promissores para aplicações na indústria alimentícia,

pois aliam funcionalidade tecnológica à menor persistência ambiental (Bastos, 2007; Souza *et al.*, 2021).

Outra característica importante é a atoxicidade, que garante a segurança desses materiais para uso em contato com alimentos, uma vez que não liberam substâncias nocivas. Além disso, devido à sua biodegradabilidade, os biopolímeros permanecem no ambiente por um período significativamente menor em comparação aos plásticos tradicionais, contribuindo para a redução do impacto ambiental (Bastos, 2007; Souza *et al.*, 2021).

De modo geral, a maioria dos biopolímeros apresenta caráter biodegradável e oferece vantagens em relação aos filmes plásticos convencionais derivados do petróleo (Figura 4). Os revestimentos produzidos a partir desses materiais exibem propriedades específicas, como maior fragilidade em baixas temperaturas de deformação térmica e permeabilidade seletiva a gases com diferentes coeficientes de difusão. Essas características os tornam particularmente adequados para aplicações na indústria de embalagens alimentícias (Ray; Bousmina, 2005; Mohanty *et al.*, 2005; Severino *et al.*, 2011).

Figura 4 – Esquema ilustrativo do conceito de economia circular na produção de filmes biodegradáveis à base de polissacarídeos sulfatados de algas vermelhas e o óleo de babaçu.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os polímeros podem ser caracterizados por uma série de propriedades, incluindo suas interações intra e intermoleculares, bem como seu tamanho e estrutura química. Nesse

sentido, a caracterização dessas interações é essencial para compreender suas propriedades e comportamentos em diversas aplicações, como na indústria, na medicina, na eletrônica, entre outros campos (Mano *et al.*, 2005).

Assim, normas técnicas também desempenham papel relevante na padronização e no desenvolvimento de materiais poliméricos sustentáveis. Conforme estabelecido pela NBR 15448-1 (ABNT, 2008), que regulamenta fontes de biopolímeros como o amido, a celulose e derivados agroindustriais (cana-de-açúcar e milho), os filmes biodegradáveis representam uma aplicação direta desses materiais. Essa normativa fornece embasamento técnico para o desenvolvimento de filmes e revestimentos comestíveis, cujas matérias-primas, como polissacarídeos, proteínas e lipídeos de origem natural, podem ser obtidas tanto de subprodutos alimentares quanto de resíduos da indústria madeireira (Santos; Silva, 2017).

Apesar dessas vantagens, os filmes à base de polissacarídeos (PS) apresentam limitações que podem restringir suas aplicações práticas. De modo geral, esses materiais apresentam elevada hidrofiliabilidade (com solubilidade superior a 80%) e baixa flexibilidade (alongação inferior a 10%). Nesse sentido, a incorporação de plastificantes lipídicos, como óleos vegetais, tem sido proposta como uma estratégia promissora para superar essas limitações e melhorar as propriedades mecânicas e de barreira dos filmes.

## 2.5 Filmes Biodegradáveis e Sustentabilidade

A classificação desses filmes reflete sua composição, podendo ser dividida em três grupos principais: (1) hidrocoloides, constituídos por proteínas e/ou polissacarídeos; (2) lipídeos; e (3) compósitos, formados pela combinação de lipídeos com polissacarídeos ou proteínas (Villadiego, 2005). Essa categorização não apenas se alinha às fontes renováveis previstas na NBR 15448-1, como também evidencia o potencial de aplicação desses materiais em uma perspectiva de economia circular, ao possibilitar a valorização de resíduos agroindustriais, que é princípio central da sustentabilidade na produção de embalagens.

Nos últimos anos, observa-se uma tendência crescente de substituição dos materiais de embalagem convencionais, geralmente produzidos a partir de fontes não renováveis, por alternativas mais sustentáveis. Esses materiais representam uma opção promissora para substituir os plásticos derivados do petróleo na indústria alimentícia (Sáez-Orviz *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2022).

Entre essas alternativas, destacam-se os filmes ativos, formulados com compostos capazes de liberar substâncias bioativas, como antioxidantes, agentes antimicrobianos ou

absorvedores de oxigênio. Esses componentes podem contribuir para prolongar a vida útil dos alimentos, além de melhorar sua segurança e qualidade. De modo complementar, agentes antimicrobianos podem ser incorporados aos revestimentos com a finalidade de inibir o crescimento de microrganismos indesejáveis, reduzindo o risco de deterioração e contaminação dos alimentos (Vale *et al.*, 2017).

Embora a incorporação de compostos bioativos em filmes biodegradáveis seja uma estratégia promissora, estudos envolvendo a adição de óleos em filmes à base de carragenana (CAR) ainda são escassos. Pereira *et al.* (2020) relataram que a incorporação de 5% de óleo de coco aumentou a hidrofobicidade dos filmes em 40%, mas reduziu sua transparência em 60%. Até o momento, não foram identificados estudos utilizando óleo de babaçu em filmes de CAR, apesar de esse óleo ser rico em ácido láurico (45%–50%), composto que pode conferir vantagens antimicrobianas adicionais.

Nesse tipo de formulação, os plastificantes desempenham papel essencial na produção de filmes biodegradáveis, atuando como modificadores das propriedades mecânicas dos biopolímeros. Sua incorporação reduz a rigidez da matriz polimérica, aumentando a flexibilidade, a maleabilidade e a resistência a fraturas, o que facilita tanto o processamento quanto a aplicação prática desses materiais (Ballesteros-Mártinez *et al.*, 2020).

Entre as técnicas de produção, o método de *casting* destaca-se como uma das mais empregadas para a fabricação de filmes comestíveis e revestimentos biodegradáveis. Esse processo envolve três etapas principais: o preparo da solução filmogênica, a aplicação controlada do material sobre um substrato e a secagem sob condições otimizadas (Monterrey-Quintero; Sobral, 2000; Monteiro, 2017). A popularidade dessa técnica deve-se à sua versatilidade, simplicidade operacional e capacidade de produzir filmes com espessura uniforme e propriedades customizáveis, características que a tornam adequada tanto para estudos em escala laboratorial quanto para aplicações em escala industrial.

Contudo, desafios técnicos podem surgir durante a aplicação da solução filmogênica, especialmente em sistemas de maior viscosidade. Nesses casos, estratégias como o ajuste da viscosidade, por meio da concentração do polímero ou da temperatura, a seleção de equipamentos de espalhamento precisos, como dosadores automatizados, e o controle rigoroso de parâmetros ambientais, como umidade e temperatura, são fundamentais para garantir a reprodutibilidade do processo (Paula, 2013). A combinação desses fatores com a seleção adequada de plastificantes permite otimizar não apenas a fabricação dos filmes, mas também seu desempenho funcional, atendendo às demandas por embalagens sustentáveis e de alta performance.

## 2.6 Óleo de babaçu

A incorporação de óleos vegetais, como o óleo de babaçu, em filmes comestíveis pode conferir propriedades antimicrobianas e antioxidantes, devido à presença de compostos bioativos, como o ácido láurico e ácidos graxos insaturados (Costa *et al.*, 2018; Cerqueira *et al.*, 2012). Esses componentes podem inibir o crescimento de microrganismos patogênicos, incluindo bactérias, vírus e fungos, além de apresentarem potencial anti-inflamatório e antitumoral (Sousa *et al.*, 2019; Pereira *et al.*, 2020). Essa multifuncionalidade torna os filmes enriquecidos com óleos vegetais uma alternativa promissora para a preservação de alimentos, em consonância com a crescente demanda por soluções naturais e sustentáveis.

Para que esses benefícios sejam efetivamente aproveitados, o teor de lipídios na composição dos filmes deve ser cuidadosamente controlado, de modo a garantir equilíbrio entre funcionalidade e integridade estrutural. Concentrações de até 20% demonstraram melhorar significativamente a barreira ao vapor de água sem comprometer a coesão do material (Cerqueira *et al.*, 2012). Entretanto, teores superiores podem resultar em filmes mais frágeis e com propriedades de barreira reduzidas, evidenciando a importância de formulações precisas para aplicações práticas.

A utilização de óleos vegetais em embalagens comestíveis também atende à crescente demanda por produtos ecologicamente corretos e seguros para a saúde (Abdou; Sorour, 2014; Santos; Silva, 2017). Além dos benefícios tecnológicos, como a extensão da vida útil dos alimentos, essa abordagem favorece a valorização de recursos naturais e subprodutos agroindustriais, reforçando o papel das embalagens ativas e inteligentes na transição para uma economia circular. A combinação entre desempenho funcional, segurança alimentar e sustentabilidade posiciona esses materiais como uma alternativa viável para o futuro das embalagens alimentícias.

No caso específico do óleo de babaçu, sua composição lipídica apresenta características particularmente relevantes para a produção de filmes. Por conter elevado teor de ácidos graxos saturados, entre 85% e 90%, esse óleo tende a apresentar maior estabilidade oxidativa durante o processamento térmico quando comparado a óleos mais insaturados, como os de soja e girassol. Além disso, o ácido láurico, presente em proporções expressivas no babaçu, entre 44% e 47%, apresenta atividade antimicrobiana contra *Listeria* e *Escherichia coli*, sugerindo potencial para aplicação em filmes ativos.

Diante dessas características, a hipótese central deste trabalho é que a incorporação do óleo de babaçu, rico em ácido láurico, à matriz de polissacarídeos sulfatados

de *H. pseudomusciformis* atuará como agente hidrofóbico, melhorando as propriedades de barreira à umidade dos filmes. Adicionalmente, espera-se que o óleo exerça função de plastificante secundário, aumentando a flexibilidade do material, além de possibilitar a incorporação de propriedades antioxidantes e antimicrobianas, sem comprometer sua biodegradabilidade.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo geral

Desenvolver e caracterizar filmes biodegradáveis à base de polissacarídeos sulfatados (PS) extraídos da alga marinha *H. pseudomusciformis* incorporados com óleo de babaçu.

#### 3.2 Objetivos específicos

- Extrair os polissacarídeos sulfatados (carragenana) da alga *H. pseudomusciformis* por métodos de extração aquosa, possibilitando maior viabilidade as extrações a nível de larga escala de produção;
- Elaborar filmes biodegradáveis com variação de concentração de PS (5%, 10%, 15%) da alga *H. pseudomusciformis*, incorporados com óleo de babaçu em diferentes concentrações (1%, 3% ou 6%).
- Caracterizar as propriedades físicas (espessura, umidade), ópticas (transparência, cor) e de barreira (solubilidade em água) dos filmes de PS.
- Avaliar a biodegradabilidade em solo e a estabilidade térmica (DSC/TGA) dos filmes de PS.
- Identificar, por meio de análise multivariada (ACP), a formulação com melhor desempenho global.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Obtenção das algas marinhas

As algas foram coletadas manualmente durante o período de baixa-mar, em maré de sizígia, na Praia de Barra Grande (2°54'11"S; 41°24'21"W), localizada no município de Cajueiro da Praia, litoral do estado do Piauí. Durante a coleta, os espécimes foram retirados da porção acima do substrato, acondicionados em sacos plásticos contendo água do mar, a fim de evitar a desidratação do material, e encaminhados ao Laboratório de Tecnologia do Pescado (LATEP), da Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPAr).

#### 4.1.1 Processamento das algas marinhas

Em laboratório, as algas marinhas passaram pelos processos de triagem (separação de espécies), limpeza (retirada de sujidades e epífitas), lavagem com água corrente, secagem em estufa a 45°C, moagem em moinho de facas (Solab, SL 31) e foram armazenadas em sacos plásticos até posterior uso.

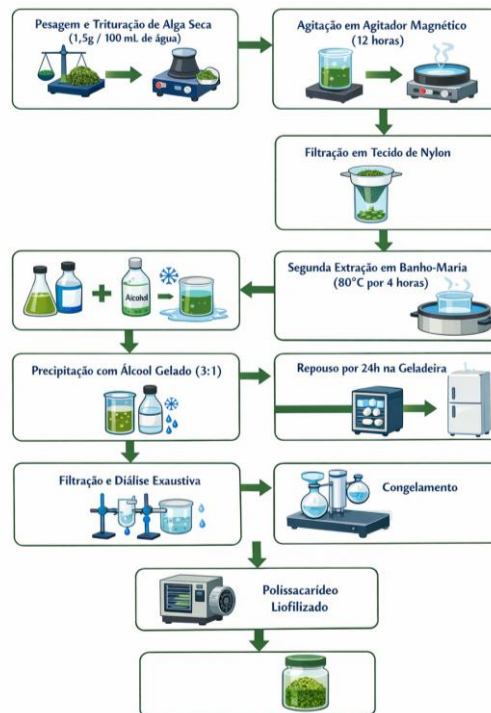
#### 4.1.2 Extração

A extração foi realizada no Laboratório de Bioquímica Marinha (BIOMAR), da Universidade Federal do Ceará (UFC). A metodologia utilizada para a extração dos polissacarídeos sulfatados foi baseada no procedimento previamente descrito por Rodrigues *et al.* (2011), contemplando duas abordagens: extração aquosa refinada e extração aquosa.

##### 4.1.2.1 Extração aquosa refinada (EAR)

Foram pesados 5 g de alga seca em balança analítica, respeitando-se a proporção de 1,5 g para cada 100 mL de água, resultando em uma concentração de 1,5% (m/v). Em seguida, adicionou-se água na proporção estabelecida, e a mistura foi submetida à agitação mecânica por 12 horas em agitador magnético (Figura 5).

Figura 5 – Fluxograma de extração aquosa refinada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, o material foi filtrado em tecido de nylon. O sobrenadante foi descartado, e o precipitado, correspondente ao resíduo sólido retido na filtração, foi submetido a uma segunda extração aquosa em banho-maria a 80 °C por 4 horas, com agitação a cada 30 minutos e adição de água na mesma proporção inicial. Após essa etapa, realizou-se uma nova filtração em tecido de nylon, e o sobrenadante obtido foi precipitado com álcool comercial resfriado, na proporção de 3:1, permanecendo em repouso por 24 horas sob refrigeração.

Após a precipitação, o material foi coletado por filtração e submetido ao processo de diálise exaustiva com água destilada, para remoção do álcool. Em seguida, o material dialisado foi congelado em recipientes plásticos retangulares e encaminhado para liofilização, obtendo-se, ao final, o PS liofilizado (Figura 7).

#### 4.1.2.2 Extração aquosa (EA)

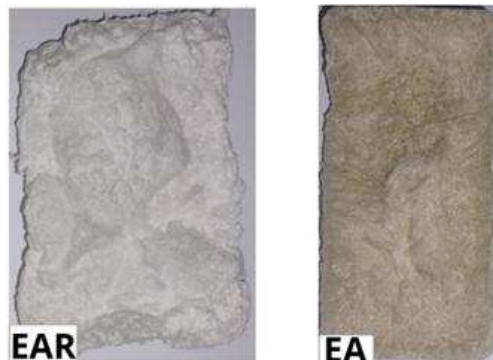
Esta metodologia é mais simples em etapas comparada com a extração aquosa refinada (Figura 6), ou seja, não passa pelo processo de agitação mecânica em agitador magnético, desta forma segue para a extração em banho-maria, utilizando as mesmas proporções, seguindo o mesmo passo a passo da metodologia descrita anteriormente.

Figura 6 – Fluxograma de extração aquosa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 7 – Aspecto do PS liofilizado proveniente da alga *H. pseudomusciformis*: comparação visual entre os métodos EAR e EA.



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2 Obtenção do óleo de babaçu

Segundo o diagnóstico realizado no Assentamento Fortaleza 3, em Esperantina-PI, a obtenção do óleo de babaçu (Figura 8) pelas mulheres quebradeiras de coco ocorre por meio de um processo artesanal e mecânico, iniciado com a coleta manual dos cocos nos babaçuais e seu transporte até a sede da associação.

A quebra dos cocos é realizada manualmente, com o auxílio de machado e pedaço

de madeira, para a extração das amêndoas, que posteriormente passam por seleção manual. Em seguida, as amêndoas são torradas em estufa, trituradas até a formação de uma massa pastosa, fazendo o uso de pilão, moinho manual ou máquinas forrageiras, e submetidas ao cozimento em panela ou tacho por aproximadamente 30 minutos, com agitação constante.

Durante o cozimento, ocorre a primeira apuração, etapa em que há separação do azeite e da água. O azeite obtido é levado novamente ao fogo para eliminação total dos resíduos de água, caracterizando a segunda apuração. Após o resfriamento, o óleo é filtrado e armazenado em embalagens plásticas ou de vidro, sendo destinado ao consumo familiar, à comercialização em feiras locais ou à entrega ao Programa Nacional de Alimentação Escolar (PNAE).

Todo o processo é acompanhado pelo Movimento Interestadual das Quebradeiras de Coco Babaçu (MIQCB), que oferece capacitações em boas práticas e cooperativismo.

Figura 8 – Óleo de babaçu em recipiente plástico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 4.3 Delineamento experimental

### 4.3.1 Estrutura do experimento

O experimento foi estruturado em delineamento fatorial completo  $3 \times 3$ , combinando três concentrações de PS com três concentrações de óleo de babaçu. Também foram incluídos tratamentos controle, nos quais o PS foi combinado com glicerol, sem adição de óleo de babaçu. Esse delineamento possibilita avaliar os efeitos individuais de cada fator, bem como sua interação, sobre as propriedades dos filmes.

As concentrações de PS foram definidas com base em análises anteriores descritas por Lima *et al.* (2021), enquanto as concentrações de óleo de babaçu foram estabelecidas de

acordo com Queiroz *et al.* (2023).

#### 4.3.2 Elaboração dos filmes

A elaboração dos filmes foi realizada a partir dos PS extraídos da alga marinha *H. pseudomusciformis*, conforme o delineamento apresentado na Tabela 2. O glicerol foi utilizado como plastificante, na concentração de 0,36 g. Após a pesagem, todos os componentes foram misturados com água destilada, de acordo com as proporções definidas no delineamento experimental.

Para fins de identificação e padronização ao longo do trabalho, os tratamentos foram codificados de T1 a T6, conforme apresentado na Tabela 2. A composição detalhada de cada tratamento encontra-se descrita na referida tabela.

Tabela 2 – Matriz de planejamento para os tratamentos dos filmes à base de PS e óleo de babaçu.

Tratamento	Concentração de PS	Concentração de óleo de babaçu/glicerol
Tratamento 1	5%	Glicerol
Tratamento 2	10%	Glicerol
Tratamento 3	15%	Glicerol
Tratamento 4	5%	1% + Glicerol
Tratamento 5	10%	3% + Glicerol
Tratamento 6	15%	6% + Glicerol

Legenda: T1 = Tratamento 1 (PS 5%); T2 = Tratamento 2 (PS 10%); T3 = Tratamento 3 (PS 15%); T4 = Tratamento 4 (PS 5% + óleo 1%); T5 = Tratamento 5 (PS 10% + óleo 3%); T6 = Tratamento 6 (PS 15% + óleo 6%). Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, as soluções foram levadas às chapas aquecedoras com agitadores magnéticos, até que a temperatura da mistura fosse elevada a 80 °C e homogeneizadas por 40 minutos (Figura 9).

Figura 9 – Fluxograma de obtenção dos filmes de PS e PS + óleo de babaçu.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após o processo de homogeneização, 30 g de cada solução filmogênica foram adicionados a placas de Petri e submetidos à secagem em estufa a 100 °C, durante 9 horas. Em seguida, os filmes foram retirados das placas e armazenados em placas de Petri até a realização das análises posteriores. Todos os tratamentos foram realizados em triplicata, utilizando-se a técnica de *casting*.

#### 4.4 Caracterização dos filmes à base de PS e óleo de babaçu

##### 4.4.1 Aspecto visual

A avaliação subjetiva dos filmes foi realizada de acordo com as metodologias propostas por Gontard (1991) e Martiny *et al.* (2020). Após a retirada da estufa, os filmes foram avaliados quanto aos aspectos visual e tátil, com a finalidade de selecionar apenas aqueles que apresentassem homogeneidade adequada. Para isso, foram considerados os seguintes critérios: continuidade, caracterizada pela ausência de trincas ou quebras após a secagem; homogeneidade, definida pela ausência de partículas, bolhas ou variações visíveis de cor e opacidade; e facilidade de manuseio, relacionada à resistência à ruptura durante a manipulação.

##### 4.4.2 Espessura

As espessuras dos filmes foram determinadas utilizando um paquímetro digital (TMX, Micrômetro externo digital-MED25), de acordo com o método descrito pela ASTM F2251-13 (ASTM, 2013), avaliando 8 medidas de posições aleatórias para cada filme.

#### 4.4.3 *Transparência*

A transparência dos filmes foi determinada segundo a metodologia descrita por Gontard, Guilbert e Cuq (1992), por meio de medidas de transmitância óptica em espectrofotômetro UV-Vis. O procedimento foi realizado conforme as etapas descritas a seguir.

1. Preparação das amostras: os filmes foram cortados em retângulos de dimensões adequadas, por exemplo, 1,0 × 4,0 cm, e cuidadosamente acondicionados no interior de uma cubeta de quartzo. As amostras foram posicionadas perpendicularmente ao feixe de luz, de modo a evitar espaços vazios que permitissem a passagem da luz sem atravessar o filme.
2. Análise espectral: as amostras foram submetidas à varredura no espectro visível, na faixa de comprimento de onda de 400 a 800 nm, com resolução de 1 nm. Para o ajuste da linha de base, foi utilizada uma cubeta de quartzo vazia, contendo apenas ar, no compartimento de referência. Essa abordagem permitiu descontar as perdas ópticas inerentes à cubeta e ao caminho óptico, isolando a contribuição exclusiva do filme. Para cada tratamento, as leituras foram realizadas em triplicata, utilizando-se diferentes porções do filme.
3. Cálculo da transparência: a transmitância em 600 nm ( $T_{600}$ ) foi registrada e utilizada como parâmetro para avaliação da transparência do material. Valores mais elevados de  $T_{600}$  indicam maior transparência dos filmes.

#### 4.4.4 *Solubilidade*

Para a análise da solubilidade, foi utilizada a metodologia proposta por Wen *et al.* (2022), com modificações. Sob temperatura de 27 °C, os filmes foram cortados em amostras de massa previamente determinada (m). Em seguida, cada amostra foi imersa em 50 mL de água destilada e submetida à agitação em agitador magnético até a completa dispersão do filme na água (Figura 10).

O tempo de dissolução da amostra do filme foi registrado. A solubilidade em água (WS) foi calculada de acordo com a seguinte equação (1):

$$WS \text{ (g/s)} = m / t$$

Onde: WS = solubilidade em água (gramas por segundo), m = massa da amostra (gramas) e t = tempo de dissolução (segundos).

Figura 10 – Fluxograma da análise de solubilidade dos filmes em água.



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.4.5 Umidade

A determinação de umidade foi realizada utilizando a metodologia descrita por (Lima *et al.*, 2018). A partir de filmes recortados em pedaços de 2 cm de diâmetro e secos em estufa a 105 °C por 24 h. Após secas, as amostras foram colocadas em um dessecador durante 15 minutos com finalidade de estabilizar a temperatura. Ao final, utilizamos a (Eq.2) para encontrar a umidade em percentagem.

$$U\% = \left[ \frac{m_i - m_f}{m_i} \right] \times 100, \quad (2)$$

Sendo que U corresponde a umidade em porcentagem,  $m_i$  a massa inicial e  $m_f$  a massa final.

#### 4.4.6 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

O FTIR foi determinado através da metodologia descrita por (WEN *et al.*, 2022). Todas as amostras de filme foram previamente secas em estufa por 9h. Em seguida, os espectros da região interna das películas foram registrados na faixa de 4000–500  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$  e 64 scans utilizando a técnica de reflectância total atenuada (ATR) em um espectrômetro FTIR modelo IRXROSS, (fabricante SHIMADZU, Japão).

#### 4.4.7 Cor

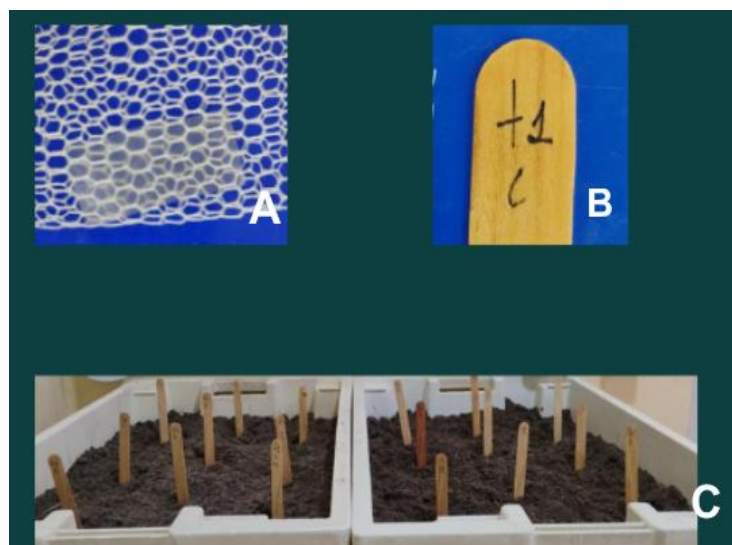
Os parâmetros de cor e opacidade dos filmes foram determinados utilizando colorímetro (Minolta, CR-400, Osaka, Japan), através do sistema CIEL\*a\*b analisando parâmetros: L (luminosidade), a\* (verde e vermelho) e b\* (azul e amarelo). A cor dos filmes foi expressa como diferença total de cor ( $\Delta E^*$ ) (CIE, 1986). Os valores foram calculados conforme Equação 3.

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L)^2 + (a^* - a)^2 + (b^* - b)^2}$$

#### 4.4.8 Biodegradabilidade

O ensaio de biodegradação em solo foi conduzido conforme protocolo adaptado por (Jaramillo *et al.*, 2017; Filipini, 2019). O solo utilizado foi coletado na Cidade de Parnaíba, Piauí, Brasil. Em seguida, foram preenchidas bandejas de polietileno (25 × 40 × 13 cm) com uma camada de solo de 10 cm de altura. Os filmes foram recortados em dimensões de 2 cm × 2 cm e fixados entre telas de suporte, formando um conjunto (tela + amostra + tela). Esse sistema foi enterrado verticalmente nas bandejas contendo o solo de forma aleatória (Figura 11).

Figura 11 – Avaliação da biodegradabilidade com umidade e temperatura controlada.



A: amostra de filme no suporte, B: Marcação do respectivo tratamento e C: disposição dos filmes de forma aleatória em basquetas. Fonte: Elaborada pelo autor.

As bandejas foram mantidas sob condições controladas de temperatura ( $24 \pm 1$  °C), umidade relativa ( $67 \pm 6\%$ ) e umidade do solo ( $32 \pm 2\%$ ). A manutenção da umidade do solo foi realizada por meio de borrifagem periódica de água na superfície, com base na avaliação visual e tátil do substrato.

As amostras foram avaliadas macroscopicamente a cada cinco dias, totalizando 10 dias de exposição. Em cada intervalo de avaliação, os filmes foram retirados do solo, fotografados e analisados visualmente quanto à redução de área, conforme metodologia adaptada de Martiny *et al.* (2020). A Figura 5 ilustra esquematicamente o método utilizado.

#### ***4.4.9 Análise de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)***

A técnica de calorimetria diferencial de varredura (DSC) foi empregada para investigar as transições térmicas do material. Os ensaios foram realizados em um calorímetro SHIMADZU, série TA-60WS. As amostras, com massa aproximada de 30 mg, foram encapsuladas e seladas em recipientes de alumínio. A varredura térmica foi executada a 10 °C/min, partindo da temperatura ambiente (25 °C) até 300 °C.

#### ***4.4.10 Análise termogravimétrica (TGA)***

A perda de massa em função da temperatura foi determinada por análise termogravimétrica (TGA), realizada em equipamento da SHIMADZU (DTG-60). Sob fluxo de ar de 20 mL/min e taxa de aquecimento de 10 °C/min. Amostras, cerca de 30 mg, foram aquecidas a partir da temperatura ambiente (23 °C) até 400 °C, permitindo o registro contínuo da variação de massa durante o processo térmico.

## 5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi conduzida em três etapas sequenciais, de caráter descritivo-exploratório. Inicialmente, foram aplicadas estatísticas descritivas, incluindo média, desvio-padrão e coeficiente de variação, além de representações gráficas, como boxplots e gráficos de média  $\pm$  desvio-padrão (DP), com o objetivo de caracterizar a variabilidade intra e entre tratamentos.

Em seguida, realizou-se a Análise de Componentes Principais (ACP) com base nas médias das propriedades físico-químicas e ópticas, visando sintetizar os padrões multivariados observados entre os tratamentos. Por fim, a biodegradabilidade foi incorporada como variável ativa na ACP, permitindo integrar o comportamento degradativo ao espaço multivariado das demais propriedades avaliadas.

As análises foram realizadas pelo StatLab, Laboratório de Inovação em Estatística da Universidade Federal do Ceará (UFC), utilizando o *software* estatístico R (R Core Team, 2024).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Rendimento de PS da macroalga *H. pseudomusciformis*

As amostras apresentaram diferença significativa quanto ao rendimento, onde a extração de PS da alga marinha *H. pseudomusciformis*, pela metodologia aquosa, apresentou valores acima de 31% de rendimento (Tabela 3).

Tabela 3– Rendimento do polissacarídeo sulfatado (PS) pelas metodologias EAR e EA.

Rendimento de Carragenana	
Metodologia Aquosa Refinada	10,35 ± 2,50%
Metodologia Aquosa	31,50 ± 2,61%

Fonte: Elaborada pelo autor.

A superioridade do rendimento obtido pela extração aquosa (31,50%) em relação à metodologia aquosa refinada (10,35%), observada no presente trabalho, aliada à comparação com dados da literatura, permite inferir que processos extrativos mais agressivos ou compostos por múltiplas etapas podem ocasionar perdas significativas de polissacarídeos, reduzindo o rendimento final. O resultado descrito por Rodrigues *et al.* (2011) corrobora essa observação, indicando que métodos como a extração aquosa a 80 °C podem ser bastante eficientes.

Ao comparar esses resultados com os rendimentos reportados na literatura, observa-se variação significativa entre espécies e métodos de extração. Rodrigues *et al.* (2011), por exemplo, obtiveram rendimentos superiores para *H. musciformis*, tanto na extração aquosa a 80 °C (44,77%) quanto na digestão enzimática (49,05%). Essa disparidade, observada tanto entre métodos de um mesmo estudo quanto entre diferentes estudos, reforça que o rendimento é fortemente influenciado pelo protocolo extrativo, incluindo parâmetros como temperatura, tempo e número de etapas de obtenção, além de variações na composição bioquímica intrínseca de cada espécie.

No presente estudo, a extração aquosa de carragenana a partir de *H. pseudomusciformis* resultou em rendimento de 31,50 ± 2,61%, valor expressivo que demonstra o potencial dessa espécie como fonte do biopolímero. Comparativamente, Zarei Jellani *et al.* (2021) observaram, para *Hypnea flagelliformis*, rendimentos entre 18% e 22%

pelo método aquoso e entre 30% e 37% pelo método alcalino, com variação sazonal.

## 6.2 Análise dos filmes

Nos ensaios preliminares, a intenção inicial era utilizar apenas os polissacarídeos sulfatados (PS) obtidos por extração aquosa refinada, com adição de óleo de babaçu à formulação. Contudo, observou-se que, embora a mistura tenha formado filme, sua remoção do suporte foi inviável, impossibilitando a avaliação das propriedades do material.

Por outro lado, o PS obtido exclusivamente por extração aquosa, sem adição de óleo, formou filme com adequada desmoldabilidade, permitindo a realização das análises subsequentes.

### 6.2.1 Análise Visual

Todos os filmes apresentaram boa continuidade, não sendo observadas falhas aparentes. Entretanto, os tratamentos T2 e T4 apresentaram regiões mais frágeis e quebradiças nas extremidades (Tabela 4).

Quanto à facilidade de manuseio, apenas o tratamento T5 apresentou baixa homogeneidade, com presença de gotículas de óleo na superfície do filme. O filme T6 destacou-se como o mais equilibrado, apresentando desempenho satisfatório nas três propriedades avaliadas. Por outro lado, embora o T5 tenha apresentado boa continuidade e facilidade de manuseio, sua homogeneidade deficiente pode limitar sua aplicação em situações nas quais transparência e uniformidade sejam características críticas.

*Tabela 4– Avaliação visual dos filmes segundo metodologia de Gontard (1991).*

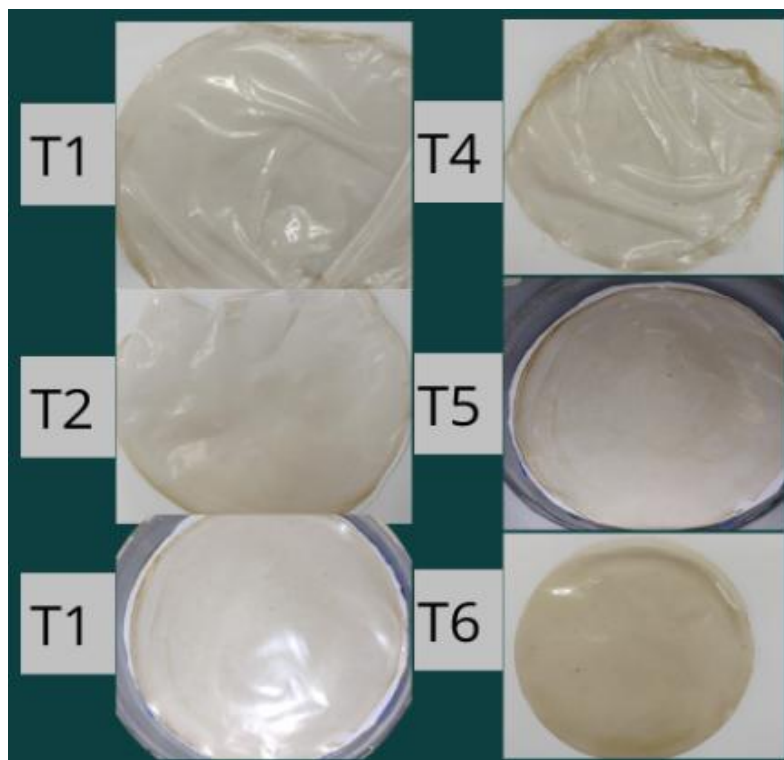
<b>Propriedade</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>
<b>Continuidade</b>	Elevado	Baixo	Moderado	Moderado	Elevado	Elevado
<b>Homogeneidade</b>	Elevado	Moderado	Moderado	Elevado	Baixo	Elevado
<b>Facilidade de manuseio</b>	Moderado	Moderado	Moderado	Elevado	Elevado	Elevado

Legenda da escala: Elevado =Excelente; Moderado = Bom; Baixo = Insatisfatório. Fonte: Elaborada pelo autor.

Tais diferenças podem estar relacionadas à presença de plastificantes, à compatibilidade entre os componentes ou às condições de secagem, fatores amplamente reportados na literatura como determinantes para a qualidade superficial e mecânica de filmes biodegradáveis (Gontard, 1991; Sobral *et al.*, 2001).

Os resultados de homogeneidade e facilidade de manuseio observados nos filmes T1, T4 e T6 assemelham-se aos relatados por Martiny *et al.* (2020) para filmes de carragenana com extrato de folha de oliveira, os quais apresentaram excelente uniformidade e flexibilidade. Em contrapartida, o tratamento T2 apresentou homogeneidade deficiente (Figura 12), indicando possível incompatibilidade entre os componentes da formulação ou falhas no processo de secagem.

Figura 12 – Aspecto visual dos filmes biodegradáveis à base de PS da alga *H. pseudomusciformis* e incorporado com óleo de babaçu em diferentes concentrações.



Abreviações: T1, Filme de PS 5%; T2, Filme de PS 10%; T3, Filme de PS 15%; T4, Filme de PS 5% + 1% de óleo de babaçu; T5, Filme de PS + 3% de óleo de babaçu; T6, Filme de PS+ 9 % de óleo de babaçu. Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na Figura 12, a continuidade dos filmes, avaliada visualmente pela ausência de trincas ou quebras, apresentou variações entre os tratamentos.

Nos filmes sem óleo de babaçu (T1 a T3), observou-se comportamento distinto em função da concentração de polissacarídeos sulfatados (PS). O tratamento T1, contendo 5% de PS, apresentou elevada continuidade, enquanto o T2, com 10% de PS, exibiu o desempenho mais baixo para essa propriedade. Já o T3, formulado com 15% de PS, apresentou continuidade moderada.

A incorporação do óleo de babaçu nos tratamentos T4 a T6 contribuiu para a melhoria da continuidade dos filmes. Entre esses tratamentos, T5 (10% de PS + 3% de óleo) e T6 (15% de PS + 6% de óleo) apresentaram elevada continuidade, indicando que a adição do óleo pode ter contribuído para corrigir a fragilidade observada em formulações equivalentes sem óleo.

Em suma, a análise indica que a continuidade dos filmes de polissacarídeos sulfatados de *H. pseudomusciformis* foi influenciada tanto pela concentração do polímero quanto pela presença do óleo de babaçu. A incorporação do óleo mostrou-se uma estratégia eficiente para melhorar essa propriedade, especialmente nas formulações com média e alta concentração de polímero (T5 e T6), resultando em filmes mais íntegros e estruturalmente estáveis.

### 6.2.2 Espessura

De acordo com a Figura 7, a espessura média variou entre 0,055 mm (T4) e 0,0938 mm (T2), com elevada variabilidade intra-filme, evidenciada por coeficientes de variação (CV) entre 26,56% (T6) e 54,16% (T1). A dispersão observada nos *boxplots* (Figura 13) reforça a heterogeneidade estrutural dos filmes.

Figura 13 – Espessura média (mm) dos filmes biodegradáveis à base de polissacarídeo sulfatado (PS) da alga *H. pseudomusciformis* e incorporado com óleo de babaçu.



Legenda: As barras representam o desvio-padrão. T1 = PS 5%; T2 = PS 10%; T3 = PS 15%; T4 = PS 5% + óleo 1%; T5 = PS 10% + óleo 3%; T6 = PS 15% + óleo 6%. Fonte: Elaborada pelo autor.

A variabilidade da espessura, quantificada pelo coeficiente de variação (CV), foi elevada nos tratamentos sem óleo, especialmente em T1 (CV = 54,16%) e T2 (CV  $\approx$  45%), indicando distribuição não uniforme dos componentes durante a secagem. Esse fenômeno já foi reportado por Gontard *et al.* (1992) em filmes poliméricos.

A incorporação do óleo de babaçu reduziu a variabilidade da espessura, com destaque para o tratamento T6 (15% de PS + 6% de óleo), que apresentou o menor CV (26,56%), evidenciando maior homogeneidade estrutural. Segundo Ghanbarzadeh e Almasi (2011), o aumento da espessura em filmes poliméricos pode estar associado à formação de microgotículas de óleo durante o preparo da solução filmogênica.

### 6.2.3 Transparência

A transparência, avaliada por meio da absorvância a 600 nm, apresentou a maior variabilidade entre todas as propriedades analisadas, com coeficientes de variação (CV) superiores a 100% nos tratamentos T1 (127,41%) e T2 (110,41%). Os valores médios de absorvância variaram de 0,123, em T5, a 0,397, em T3.

É importante destacar que a absorvância é inversamente proporcional à transparência. Assim, valores mais baixos de absorvância indicam filmes mais transparentes, enquanto valores mais elevados correspondem a filmes mais opacos (Figura 14).

Figura 14 – Transparência (absorvância a 600 nm) dos filmes biodegradáveis à base de polissacarídeo sulfatado (PS) da alga *H. pseudomusciformis* e incorporado com óleo de babaçu.



Legenda: Menor absorvância = maior transparência.  
T1 a T6 conforme descrito na Figura 14. Abs = absorvância. Fonte: Elaborada pelo autor.

Essa elevada dispersão indica que a transparência dos filmes é sensível a variações locais na matriz, possivelmente relacionadas à distribuição não homogênea do óleo

e/ou à formação de microestruturas durante a secagem. Martiny *et al.* (2020) também observaram que modificações na composição dos filmes podem afetar significativamente suas propriedades ópticas, fenômeno igualmente reportado em filmes compostos por Wen *et al.* (2022).

No presente estudo, a presença do óleo de babaçu parece ter influenciado a organização da matriz de carragenana (CAR), resultando em regiões com diferentes graus de transmissão luminosa.

#### **6.2.4 Solubilidade**

A solubilidade apresentou comportamento heterogêneo entre os tratamentos. O coeficiente de variação (CV), medida estatística que quantifica a dispersão dos dados em torno da média, foi utilizado para avaliar a uniformidade da solubilidade nos filmes. Os tratamentos T3 e T5 apresentaram baixa dispersão, com CV de aproximadamente 9% e 5%, respectivamente, indicando matrizes poliméricas mais homogêneas e com dissolução uniforme.

Em contraste, o tratamento T6 exibiu CV extremamente elevado (129,62%) (Figura 15), com valores médios de solubilidade variando entre  $0,80 \times 10^{-4}$  e  $2,92 \times 10^{-4}$ . Esse elevado coeficiente de variação reflete alta heterogeneidade estrutural, sugerindo a formação de domínios distintos no filme: regiões hidrofóbicas, ricas em óleo, e regiões hidrofílicas, ricas em PS. Essa organização pode ter resultado em velocidades de dissolução contrastantes ao longo da matriz.

Resultado semelhante foi reportado por Wen *et al.* (2022), que observaram redução da solubilidade em água em filmes formados pela combinação de polissacarídeos, atribuída a interações moleculares entre os componentes. No presente estudo, os resultados obtidos com PS e óleo de babaçu sugerem que a incorporação lipídica em alta concentração, como observado em T6, aumentou a heterogeneidade da solubilidade, possivelmente devido à formação de domínios hidrofóbicos e hidrofílicos distintos. Hanani Nur *et al.* (2017) relataram que a adição de óleos vegetais (especialmente azeite de oliva) reduziu significativamente a solubilidade em água de filmes de  $\kappa$ -carragenana, devido à interação entre grupos hidroxila do polímero e componentes do óleo.

Figura 15 – Solubilidade em água (g/s) dos filmes biodegradáveis à base de polissacarídeo sulfatado (PS) da alga *H. pseudomusciformis* e incorporado com óleo de babaçu.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A variabilidade da solubilidade, quantificada pelo coeficiente de variação (CV), reflete o grau de homogeneidade ou heterogeneidade da dissolução ao longo do filme. Valores baixos de CV, como os observados em T3 ( $\approx 9\%$ ) e T5 ( $\approx 5\%$ ), indicam maior homogeneidade da matriz polimérica, com distribuição mais uniforme dos componentes e, conseqüentemente, velocidades de dissolução semelhantes nas diferentes regiões do filme.

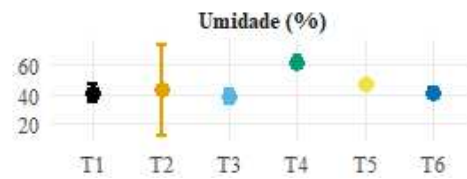
Por outro lado, o CV extremamente elevado observado em T6 (129,62%) demonstra que a solubilidade foi altamente heterogênea. Nesse tratamento, o desvio-padrão das medidas foi superior ao valor médio da solubilidade, evidenciando a coexistência de regiões com velocidades de dissolução acentuadamente distintas. Esse comportamento pode ser atribuído à formação de domínios hidrofílicos, ricos em PS e com dissolução mais rápida, e domínios hidrofóbicos, ricos em óleo de babaçu e com dissolução mais lenta, na matriz do filme. Tal organização possivelmente está relacionada à incorporação de 6% de óleo na formulação.

Dessa forma, o CV da solubilidade pode ser considerado um indicador sensível da miscibilidade entre os polissacarídeos sulfatados (PS) e o óleo de babaçu na formulação dos filmes. Esse resultado está alinhado com a literatura, que associa a adição de lipídios a alterações na organização da matriz polimérica e na interação dos filmes com a água (Gontard *et al.*, 1992).

### 6.2.5 Umidade

A umidade média variou de 38,70% (T3) a 62,13% (T4), (Figura 13). A variabilidade intrafilme foi mais pronunciada em T2 (CV = 72,18%), enquanto T4 e T5 apresentaram maior uniformidade (CV  $\approx 5-7\%$ ).

Figura 16 – Umidade (%) dos filmes biodegradáveis à base de polissacarídeo sulfatado (PS) da alga *H. pseudomusciformis* e incorporado com óleo de babaçu.



Fonte: Elaborada pelo autor.

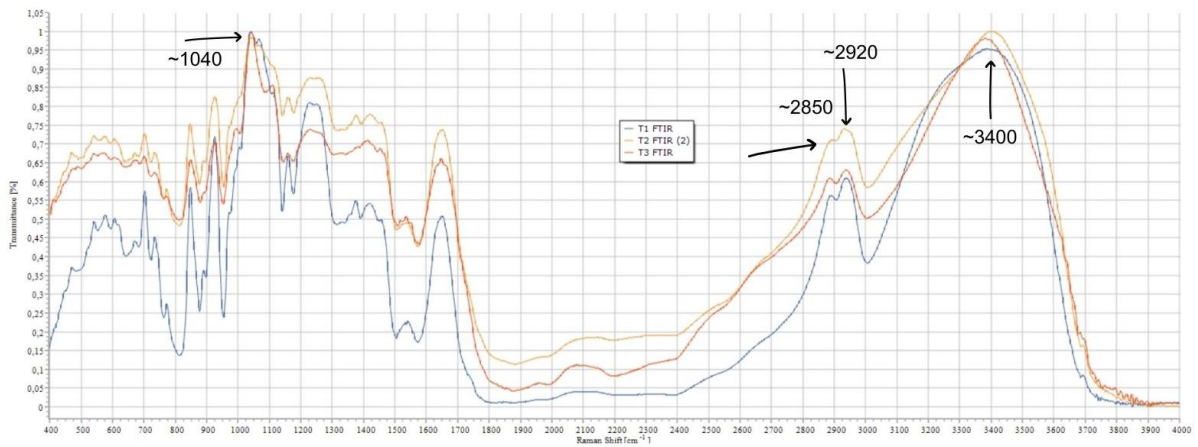
A maior umidade observada em T4 pode estar associada à presença de óleo em baixa concentração (1%), o qual pode ter contribuído para a retenção de água sem comprometer a homogeneidade da matriz. Por outro lado, a elevada variabilidade observada em T2 sugere possível inconsistência na distribuição do glicerol ao longo do filme.

Resultado semelhante foi reportado por Wen *et al.* (2022), que constataram que filmes com proporções balanceadas de alginato de sódio e goma xantana mantiveram teores de umidade próximos aos do alimento revestido, no caso, a noz de areca, favorecendo a compatibilidade entre o filme e o substrato.

### 6.2.6 FTIR

Os espectros FTIR dos filmes T1, T2 e T3 (Figura 17) apresentaram os padrões característicos de filmes à base de  $\kappa$ -carragenana, corroborando a identidade do biopolímero extraído de *H. pseudomusciformis* (CAMPO *et al.*, 2009; RODRIGUES *et al.*, 2025). Foram observadas bandas principais atribuíveis as estruturas de polissacarídeos sulfatados ( $\sim 1040 \text{ cm}^{-1}$ ) tais como, grupos C-H ( $\sim 2920$ ,  $\sim 2850 \text{ cm}^{-1}$ ) e grupos hidroxila ( $\sim 3400 \text{ cm}^{-1}$ ), este último amplificado pela presença do plastificante glicerol.

Figura 17 – Espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) dos filmes de polissacarídeo sulfatado (PS) nas concentrações de 5% (T1), 10% (T2) e 15% (T3).



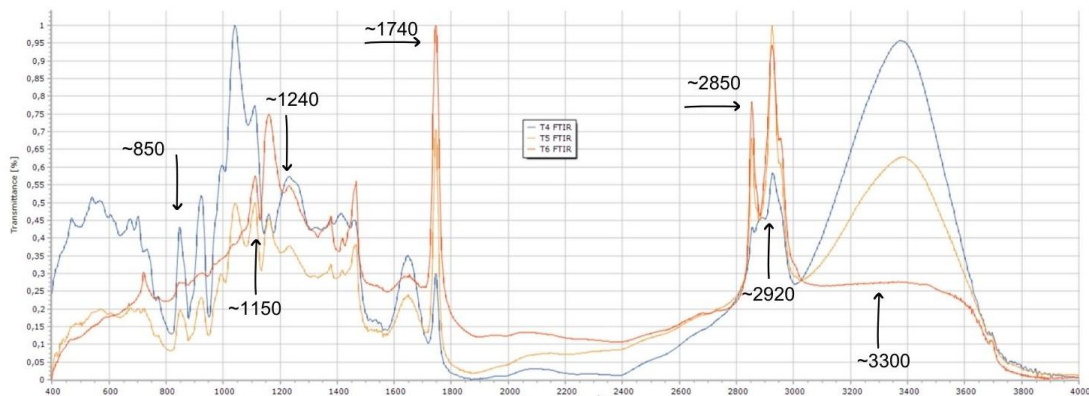
Fonte: Elaborada pelo autor.

As diferenças observadas na intensidade relativa das bandas entre os tratamentos estão diretamente relacionadas à variação na concentração de polissacarídeos sulfatados (PS) e, conseqüentemente, à espessura final dos filmes, conforme descrito na Tabela 2. O filme T1, contendo 5% de PS, exibiu bandas de menor intensidade, possivelmente em razão da menor quantidade de material polimérico na matriz. Por sua vez, os filmes T2 (10% de PS) e T3 (15% de PS) apresentaram espectros com bandas mais pronunciadas.

A banda característica do grupo sulfato (S=O), esperada em aproximadamente  $1240\text{ cm}^{-1}$  para  $\kappa$ -carragenana, pode não estar claramente resolvida em todos os espectros. Esse comportamento é comum em filmes compósitos, nos quais bandas largas associadas ao grupo OH, provenientes do glicerol e da umidade residual, podem sobrepor regiões espectrais específicas, especialmente em filmes de maior espessura, como o T3. Dessa forma, a análise confirma que a matriz polimérica dos filmes é constituída por  $\kappa$ -carragenana, enquanto as variações espectrais refletem, principalmente, parâmetros físico-estruturais relacionados à concentração de PS, à espessura dos filmes e às interações com o glicerol, inerentes ao processo de elaboração de cada tratamento.

Os espectros de FTIR dos filmes incorporados com óleo de babaçu (Figura 18) confirmaram a formação dos filmes compósitos. Todos os espectros apresentaram bandas características da  $\kappa$ -carragenana, evidenciadas pelos picos atribuídos ao estiramento S=O do grupo sulfato, em aproximadamente  $1240\text{ cm}^{-1}$ , e à ligação C–O–SO<sub>4</sub>, em aproximadamente  $850\text{ cm}^{-1}$ , corroborando a identidade do biopolímero extraído (Campo *et al.*, 2009; Rodrigues *et al.*, 2011).

Figura 18 – Representação dos espectros FTIR dos filmes elaborados com PS e óleo de babaçu (T4: 5% PS +1% Óleo, T5: 10% PS +3% Óleo, T6: 15% PS +6% Óleo).



Fonte: Elaborada pelo autor.

A incorporação do óleo de babaçu foi verificada pela presença de uma banda distintiva em  $\sim 1740\text{ cm}^{-1}$ , atribuída ao estiramento C=O dos grupos éster dos triglicerídeos do óleo (Sousa *et al.*, 2019). A intensidade relativa desta banda aumentou progressivamente nos espectros, o que está em concordância com o incremento da concentração de óleo de babaçu nos tratamentos (1%, 3% e 6%).

Nota-se que a intensidade das bandas referentes a composição polissacarídica ( $\sim 1150$ ,  $\sim 1070$ ,  $\sim 1040\text{ cm}^{-1}$ ) e aos grupos C-H ( $\sim 2920$ ,  $2850\text{ cm}^{-1}$ ) também apresentaram um aumento, refletindo a maior concentração de CAR na matriz do filme (5%, 10% e 15%). A ampla banda em  $\sim 3300\text{ cm}^{-1}$ , associada às vibrações de estiramento O-H, indica uma matriz polimérica altamente hidrofílica, com extensa rede de ligações de hidrogênio, mesmo com a presença do componente lipídico.

### 6.2.7 Cor

A análise colorimétrica dos filmes biodegradáveis produzidos com polissacarídeos sulfatados de *H. pseudomusciformis*, com e sem incorporação de óleo de babaçu, evidenciou que a cor foi uma das propriedades mais consistentes entre os tratamentos. Os baixos coeficientes de variação observados confirmam essa homogeneidade, mantida mesmo após a incorporação da fase lipídica.

Os valores médios do parâmetro  $L^*$  variaram de 20,14, em T1, a 30,28, em T5 (Figura 19), indicando tonalidade escura nos filmes. Essa característica pode estar associada tanto à origem dos PS utilizados quanto à presença do óleo de babaçu. Entre os tratamentos, a

cor apresentou elevada uniformidade, com CV variando de 0,55%, em T4, a 8,44%, em T6.

Figura 19 – Parâmetros colorimétricos (L, a, b e  $\Delta E$ ) dos filmes biodegradáveis à base de polissacarídeo sulfatado (PS) da alga *H. pseudomusciformis* e incorporado com óleo de babaçu.



Legenda: L\* = luminosidade (0 = preto, 100 = branco); a\* = coordenada verde-vermelho; b\* = coordenada azul-amarelo;  $\Delta E^*$  = diferença total de cor. T1 a T6 conforme descrito na Figura 13. Fonte: Elaborada pelo autor.

Martiny *et al.* (2020) incorporaram extrato de folhas de oliveira, contendo compostos fenólicos totais (115,96 mg GAE·g<sup>-1</sup>), oleuropeína (11,59 mg·g<sup>-1</sup>) e atividade antioxidante de 89,52%, em filmes de  $\kappa$ -carragenana. Os autores observaram aumento da espessura (28%), redução da permeabilidade ao vapor de água (54%) e escurecimento do material ( $\Delta E^* = 64,72\%$ ).

Em contraste, o presente estudo utilizou óleo de babaçu como agente hidrofóbico, resultando em aumento da estabilidade térmica e da homogeneidade estrutural dos filmes de PS. Esses resultados demonstram que a natureza química do aditivo, seja hidrofílica ou hidrofóbica, influencia de maneira distinta as propriedades finais do material.

A síntese dos resultados de cor indica que a incorporação do óleo de babaçu exerceu influência significativa na aparência visual dos filmes de PS, tendência alinhada à literatura. Essa alteração, contudo, não comprometeu a homogeneidade do material. Associada à adição de um componente lipídico funcional, essa característica amplia o potencial de aplicação desses filmes como embalagens biodegradáveis ativas.

### 6.2.8 Biodegradabilidade

A produção de plásticos derivados do petróleo cresceu de forma expressiva nas

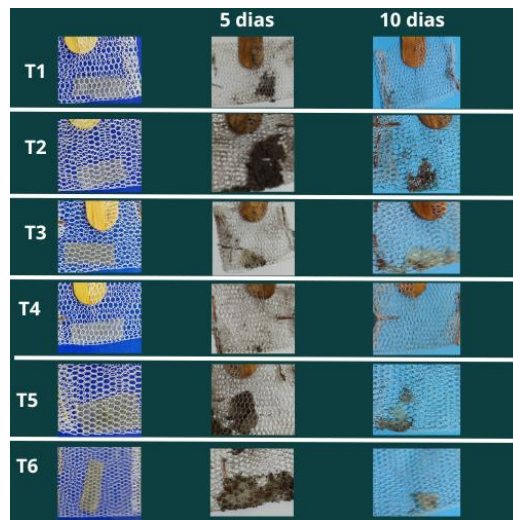
últimas seis décadas, impulsionada por sua ampla aplicação em diversos setores industriais. Esse crescimento, entretanto, acarretou graves consequências ambientais, uma vez que a persistência e o acúmulo desses materiais nos ecossistemas vêm desencadeando impactos negativos de ordem social e ecológica (Avio; Gorbi; Regoli, 2017).

Nos filmes desenvolvidos neste estudo, a presença do óleo de babaçu retardou a biodegradação inicial, especialmente no tratamento T5, formulado com 3% de óleo. Esse comportamento pode estar associado ao aumento do caráter hidrofóbico do material, reduzindo a acessibilidade da matriz polimérica à água e aos microrganismos. Além disso, em maiores concentrações, a fração lipídica pode ocasionar toxicidade inicial no solo, inibindo temporariamente a atividade microbiana. Esse fenômeno já foi reportado durante a biodegradação de óleos vegetais, em que a formação de compostos secundários pela atividade microbiana inicial pode levar ao aumento temporário da toxicidade no solo (Tamada *et al.*, 2012).

Apesar desse retardo inicial, após 10 dias de exposição, mesmo os filmes incorporados com óleo apresentaram degradação avançada, confirmando seu caráter biodegradável. Os tratamentos T1 e T4 apresentaram maior velocidade de degradação em comparação aos demais, uma vez que, no quinto dia, encontravam-se praticamente degradados. No mesmo período de avaliação, a degradação variou de 15%, em T5, a 92,5%, em T3. Após 10 dias, todos os tratamentos apresentaram degradação superior a 55%, com T3 e T4 próximos de 100% de degradação (Figura 20).

Esses resultados indicam que todos os filmes desenvolvidos neste estudo apresentam potencial para aplicação como materiais biodegradáveis em embalagens, embora a concentração de óleo de babaçu deva ser cuidadosamente ajustada para equilibrar hidrofobicidade, funcionalidade e velocidade de degradação.

Figura 20 – Imagens da análise de biodegradabilidade em solo dos filmes elaborados com polissacarídeo sulfatado (PS) da alga *H. pseudomusciformis* adicionado de óleo de babaçu.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em trabalhos publicados com filmes de PS adicionados óleos/ extratos deram ênfase as propriedades de barreira e antimicrobianas (Martiny *et al.*, 2020; Nazurah; Hanani, 2016), poucos estudos relatam a biodegradabilidade desses materiais (Tabela 5).

Tabela 5– Comparativo da biodegradabilidade de filmes nos trabalhos reportados na literatura e o presente estudo.

Parâmetro	Jaramillo <i>et al.</i> (2017)	Nogueira & Martins (2018)	Este estudo	Filipini (2019)
<b>Material</b>	Amido + erva-mate	Glúten	<b>PS + óleo babaçu</b>	Polímeros + jambolão
<b>Período avaliado</b>	12 dias	10 dias	<b>10 dias</b>	15 dias
<b>Degradação completa</b>	12 dias	10 dias	<b>T3, T1: 10 dias</b>	15 dias
<b>Tipo de avaliação</b>	Visual/gravimétrica	Visual	<b>Visual</b>	Visual/gravimétrica
<b>Meio</b>	Solo	Compostagem	<b>Solo</b>	Solo

Fonte: elaborada pelo autor.

Observou-se também que, após 10 dias, os tratamentos com maior teor de óleo de babaçu (T5 e T6) apresentaram degradação avançada, variando de 55% a 82,5%. Esse resultado confirma que a incorporação lipídica não comprometeu a biodegradabilidade final do material, mas modulou sua cinética de degradação.

Esse aspecto é relevante para aplicações em embalagens ativas, nas quais é desejável alcançar equilíbrio entre durabilidade durante o uso e degradação após o descarte.

### 6.2.9 Calorimetria diferencial de varredura (DSC) e análise termogravimétrica (TGA)

As curvas de análise termogravimétrica (TGA) e sua derivada (DTG) evidenciaram comportamento típico de materiais poliméricos naturais, com três estágios principais de perda de massa (Tabela 6). O primeiro estágio, observado abaixo de 120 °C, está associado à eliminação de água adsorvida e de água ligada à estrutura do polissacarídeo, refletindo o caráter hidrofílico da matriz.

Além do comportamento térmico, a biodegradabilidade dos filmes também foi influenciada pela presença do óleo de babaçu. Observou-se que a incorporação lipídica retardou a biodegradação inicial, especialmente no tratamento T5, que apresentou menor degradação no quinto dia de avaliação. No entanto, após 10 dias, os filmes incorporados com óleo apresentaram degradação avançada, indicando que a presença da fração lipídica não comprometeu a biodegradabilidade final do material, mas alterou sua cinética de degradação.

Tabela 6 – Propriedades térmicas dos filmes obtidas por calorimetria diferencial de varredura (DSC) e análise termogravimétrica (TGA).

Filmes	T <sub>g</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)	Perda de massa (%) até T <sub>m</sub> (°C)
T1	64 ± 2	205 ± 3	19,3
T2	66 ± 2	212 ± 3	18,4
T3	68 ± 2	220 ± 3	17,6
T4	71 ± 2	232 ± 3	16,2
T5	74 ± 2	245 ± 3	15,1
<b>T6</b>	<b>77 ± 2</b>	<b>258 ± 3</b>	<b>13,8</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

As análises térmicas permitem investigar o desempenho dos filmes sob diferentes temperaturas e fluxos de calor, correlacionando a mobilidade das cadeias poliméricas com sua estabilidade térmica. Essas informações são fundamentais para aplicações práticas, uma vez que revelam as possibilidades e limitações de cada material em processos que envolvem degradação ou conformação térmica (Filipini, 2019).

A Tabela 7 apresenta a perda de massa dos filmes até sua temperatura de fusão (T<sub>m</sub>). Observou-se que o filme T6 apresentou maior resistência térmica em comparação aos demais tratamentos, com redução de apenas 13,8% de sua massa. Esse comportamento pode estar associado à menor umidade do filme e à formação de uma estrutura mais compacta e coesa. Em contraste, o tratamento T1 apresentou perda de massa de 19,3%, indicando menor estabilidade térmica.

De modo geral, os filmes produzidos com PS e óleo de babaçu apresentaram baixa perda de massa até o ponto de fusão (T<sub>m</sub>), com reduções de até 16,2%. Na área de embalagens, uma menor perda de massa quando o material é exposto a temperaturas elevadas geralmente indica maior resistência térmica. Assim, polímeros com esse comportamento tendem a ser mais adequados para aplicações em embalagens que possam ser submetidas ao aquecimento, sem comprometer a segurança dos alimentos.

Todos os filmes avaliados apresentaram transição endotérmica abaixo de 100 °C. Esse comportamento difere do observado por Filipini (2019), ao avaliar embalagens biodegradáveis ativas produzidas a partir de polímeros naturais e extrato de jambolão. O tratamento T1 registrou as menores temperaturas de fusão (T<sub>m</sub>) e transição vítrea (T<sub>g</sub>), o que sugere uma matriz estruturalmente mais frágil e com interações intermoleculares menos robustas. Conseqüentemente, esse material demonstrou menor resistência térmica em relação aos demais filmes avaliados.

Resultado semelhante foi observado por Bhatia *et al.* (2025) em filmes de PS incorporados com óleo essencial de melissa. No presente estudo, a adição de óleo de babaçu aumentou a estabilidade térmica dos filmes, evidenciada pelo aumento de T<sub>g</sub> e T<sub>m</sub> e pela redução da perda de massa inicial. Esse efeito pode ser atribuído ao fortalecimento das interações hidrofóbicas na matriz polimérica, resultando em uma estrutura mais coesa e termicamente resistente.

Além disso, a maior estabilidade térmica observada nas amostras T5 e T6 pode estar relacionada a melhorias nas propriedades mecânicas e de barreira, uma vez que uma matriz mais estável e compacta tende a apresentar maior resistência estrutural e menor permeabilidade.

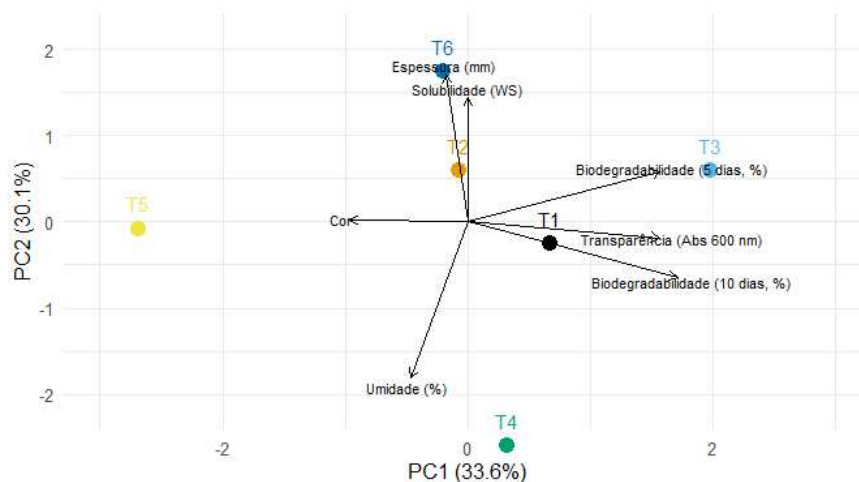
#### **6.2.10 Síntese dos resultados da Análise de Componentes Principais (ACP)**

Os resultados demonstram uma correlação entre composição, estrutura e propriedades dos filmes. De modo geral, o aumento da concentração de óleo de babaçu

contribuiu para maior homogeneidade visual e estabilidade térmica, mas também esteve associado à redução da transparência e ao retardo da biodegradação inicial. A análise multivariada por Análise de Componentes Principais (ACP) reforça essa interpretação, ao evidenciar que as propriedades avaliadas não variam de forma isolada, mas de maneira conjunta.

Conforme apresentado nas Figuras 21 e 22, os dois primeiros componentes principais, PC1 e PC2, explicaram 63,72% da variância total dos dados, sendo 33,6% atribuídos ao PC1 e 30,1% ao PC2. Em termos práticos, esse resultado indica que o plano PC1  $\times$  PC2 é adequado para uma leitura integrada inicial dos tratamentos, especialmente considerando o número reduzido de unidades experimentais, composto por seis tratamentos, e a presença de múltiplas propriedades de naturezas distintas.

Figura 21 – Biplot dos componentes principais (ACP)



Legenda: PC1 e PC2 = primeiro e segundo componentes principais, responsáveis por 63,72% da variância total. T1 a T6 = tratamentos (conforme Figura 13). Os vetores representam as variáveis original: Umidade (%), Espessura (mm), Solubilidade (WS), Transparência (Abs. 600 nm), Cor ( $\Delta E^*$ ) e Biodegradabilidade (5 e 10 dias). Fonte: Elaborada pelo autor.

A distribuição dos tratamentos no *biplot* revelou agrupamentos distintos em função das propriedades avaliadas. No quadrante superior direito, caracterizado por valores positivos de PC1 e PC2, destacou-se o tratamento T4 (5% de PS + 1% de óleo), que apresentou o maior escore positivo em PC1 (+2,406). Esse posicionamento indica forte associação com o gradiente relacionado à biodegradabilidade e à transparência, além de escore levemente positivo em PC2, sugerindo perfil intermediário quanto às propriedades

estruturais.

No quadrante superior esquerdo, com PC1 negativo e PC2 positivo, posicionaram-se os tratamentos T2 (10% de PS) e T3 (15% de PS). Esses tratamentos apresentaram menor associação com o gradiente de biodegradabilidade/transparência e maior influência das propriedades estruturais, especialmente T2, que exibiu o maior escore positivo em PC2 (+1,361).

No quadrante inferior esquerdo, caracterizado por valores negativos em PC1 e PC2, o tratamento T6 (15% de PS + 6% de óleo) apresentou o escore mais negativo em PC1 (-1,593) e valor fortemente negativo em PC2 (-1,305). Esse posicionamento indica perfil oposto ao gradiente de biodegradabilidade/transparência e menor associação com a umidade, alinhando-se mais fortemente às variáveis espessura e solubilidade.

No quadrante inferior direito, com PC1 positivo e PC2 negativo, o tratamento T5 (10% de PS + 3% de óleo) destacou-se pelo escore mais negativo em PC2 (-1,728) e escore positivo moderado em PC1 (+0,459). Esse comportamento caracteriza a formulação como associada ao gradiente de umidade, no sentido negativo de PC2, além de apresentar associação moderada com biodegradabilidade e transparência.

O tratamento T1 (5% de PS), por sua vez, posicionou-se próximo à origem, com escores moderados em ambos os componentes principais. Esse posicionamento indica perfil intermediário no contexto global das propriedades avaliadas, sem associação predominante com um grupo específico de variáveis.

Em relação aos vetores, biodegradabilidade aos 5 dias e biodegradabilidade aos 10 dias apontaram em direções próximas, indicando que, neste conjunto de tratamentos, as duas medidas tenderam a variar de forma relativamente alinhada. Esse comportamento é coerente com o fato de ambas representarem estágios temporais de um mesmo processo degradativo.

O vetor referente à transparência, avaliada por absorvância a 600 nm, apontou para o mesmo sentido geral do PC1 positivo, sugerindo covariância com a biodegradabilidade no conjunto de tratamentos analisados. Contudo, é importante ressaltar que a absorvância é inversamente proporcional à transparência; portanto, valores mais elevados de absorvância indicam menor transparência e maior opacidade dos filmes.

O vetor de cor apresentou direção aproximadamente oposta ao conjunto biodegradabilidade/transparência ao longo de PC1, com carga negativa, sugerindo que essa variável atua como contraste em relação ao gradiente principal. Já em PC2, a oposição mais evidente ocorreu entre umidade, no sentido negativo, e espessura/solubilidade, no sentido positivo. Esse resultado indica que essas propriedades compõem uma segunda dimensão de

variação, distinguindo tratamentos com diferentes perfis estruturais e de interação com a água.

A ACP com biodegradabilidade como variável ativa (Tabela 8) adiciona um nível de integração que complementa as análises descritivas e os gráficos univariados. Enquanto as estatísticas por variável permitem visualizar diferenças específicas entre os tratamentos, a ACP evidencia que os tratamentos se diferenciam por combinações de propriedades, e não por variáveis isoladas. A biodegradabilidade e a transparência estruturam o primeiro eixo (PC1), enquanto umidade versus espessura/solubilidade definem o segundo eixo (PC2). Assim, T3 associa-se à maior biodegradabilidade e transparência; T5, predominantemente à cor; T6, à maior espessura e solubilidade; e T4, à maior umidade. A incorporação de óleo de babaçu, portanto, introduz *trade-offs* funcionais claros entre as formulações.

Conforme apresentado na Tabela 7, os dois primeiros componentes principais explicaram 63,72% da variância total, sendo 33,60% atribuídos ao PC1 e 30,11% ao PC2.

Tabela 7– Estatísticas descritivas (n, mínimo, máximo, média, desvio padrão e coeficiente de variação) das propriedades avaliadas para cada tratamento dos filmes à base de polissacarídeo sulfatado (PS) da alga *H. pseudomusciformis* e incorporado com óleo de babaçu.

Componente	Desvio - padrão	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
Componente Principal 1 (PC1)	1,5340	33,60	33,60
Componente Principal 2 (PC2)	1,4519	30,11	63,72
Componente Principal 3 (PC3)	1,0717	16,41	80,13
Componente Principal 4 (PC4)	0,9591	13,14	93,27
Componente Principal 5 (PC5)	0,6866	6,74	100,00
Componente Principal 6 (PC6)	≈ 0	0,00	100,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 6.2.10.1 Interpretação dos eixos a partir das cargas fatoriais

A Análise de Componentes Principais (ACP) evidenciou que os seis tratamentos se organizaram em dois eixos interpretáveis, os quais resumiram 63,72% da variância total dos dados. Conforme apresentado na Tabela 8, o primeiro componente principal (PC1) explicou 33,6% da variância, enquanto o segundo componente principal (PC2) respondeu por 30,1%.

O primeiro eixo (PC1) representa um gradiente de “degradabilidade óptica”. Tratamentos com escores positivos, como T3, apresentaram maior biodegradabilidade, tanto aos 5 quanto aos 10 dias, além de maior transparência/opacidade, avaliada por absorvância a 600 nm. Em contrapartida, tratamentos com escores negativos, como T5, tenderam a apresentar menor biodegradabilidade e coloração mais pronunciada, uma vez que a variável cor atua em oposição nesse eixo. Em termos práticos, quanto mais à direita no PC1, mais rapidamente degradável e opticamente menos transparente é o filme; quanto mais à esquerda, maior a resistência à degradação inicial e maior o destaque da cor.

O segundo eixo (PC2) representa um gradiente estrutural e de interação com a água. Escores positivos, como os observados em T6, associaram-se à maior espessura e à maior solubilidade, caracterizando filmes mais espessos e com maior tendência à desintegração em água. Por outro lado, escores negativos, como os observados em T4, associaram-se à maior umidade, indicando filmes com maior retenção interna de água. Assim, quanto mais acima no PC2, mais espesso e solúvel é o filme; quanto mais abaixo, maior sua umidade.

Essa organização evidencia que a incorporação do óleo de babaçu não altera uma única propriedade isoladamente, mas reconfigura o perfil funcional dos filmes, criando *trade-offs* entre biodegradabilidade, transparência, cor, espessura, solubilidade e umidade. Essa diferenciação permite identificar formulações potencialmente mais adequadas a diferentes aplicações tecnológicas. O primeiro eixo (PC1, 33,6% da variância) representa um gradiente de “degradabilidade óptica”, conforme evidenciado pelas cargas fatoriais apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8– Cargas das variáveis nos dois primeiros componentes principais.

Variável	PC1	PC2
Biodegradabilidade (10 dias, %)	<b>+0,5698</b>	-0,2161
Biodegradabilidade (5 dias, %)	<b>+0,5224</b>	+0,1918
Transparência (Abs 600 nm)	<b>+0,5211</b>	-0,0623
Cor	<b>-0,3216</b>	+0,0087
Umidade (%)	-0,1543	<b>-0,6019</b>
Espessura (mm)	-0,0605	<b>+0,5652</b>
Solubilidade (WS)	-0,0009	<b>+0,4804</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

O Componente Principal 1 (PC1 – 33,6%) apresentou as maiores contribuições absolutas associadas à biodegradabilidade aos 10 dias (+0,570), à biodegradabilidade aos 5 dias (+0,522) e à transparência, avaliada por absorbância a 600 nm (+0,521), contrapondo-se parcialmente à variável cor, que apresentou carga negativa (-0,322). Esses valores indicam que o PC1 representa, predominantemente, um gradiente conjunto relacionado à biodegradabilidade, em curto e médio prazo, e à resposta óptica medida por absorbância.

Em termos descritivos, tratamentos com escores mais elevados em PC1 tendem a se alinhar ao sentido positivo da biodegradabilidade e da transparência/opacidade, enquanto escores mais negativos associam-se ao sentido oposto desse gradiente, com maior influência relativa da variável cor.

O Componente Principal 2 (PC2 – 30,1%) apresentou maior contribuição das variáveis umidade (carga -0,602), espessura (carga +0,565) e solubilidade (carga +0,480). Esse padrão indica que o PC2 se organiza como um gradiente estrutural, no qual o sentido positivo do eixo está mais associado à espessura e à solubilidade, enquanto o sentido negativo se relaciona à maior retenção de umidade.

Assim, o PC2 separa tratamentos com perfil de maior espessura e maior solubilidade daqueles com maior retenção de umidade.

A ACP com biodegradabilidade como variável ativa adicionou um nível de integração que

complementa as análises descritivas univariadas. Enquanto as estatísticas por variável permitem visualizar diferenças específicas entre os tratamentos, a ACP evidencia que:

1. os tratamentos se diferenciam por combinações de propriedades, e não por uma única medida isolada;
2. a biodegradabilidade, quando analisada juntamente com propriedades instrumentais, constitui um elemento estruturante do espaço multivariado, contribuindo expressivamente para a organização dos tratamentos ao longo do PC1;
3. as dimensões globais organizam-se em dois eixos interpretáveis:
  - a. PC1: eixo dominado pela biodegradabilidade e pela transparência;
  - b. PC2: eixo dominado pela oposição entre umidade e espessura/solubilidade.

Os tratamentos T4 (5% de PS + 1% de óleo) e T3 (15% de PS) posicionaram-se como representantes do gradiente positivo de biodegradabilidade, enquanto T5 (10% de PS + 3% de óleo) e T6 (15% de PS + 6% de óleo) ocuparam posições contrastantes, evidenciando o efeito da incorporação do óleo de babaçu sobre o perfil global dos filmes.

Dessa forma, a ACP reforça o caráter exploratório e comparativo do estudo, fornecendo uma síntese visual e quantitativa dos *trade-offs* entre propriedades. Além disso, oferece subsídios para discutir quais formulações apresentam perfis mais promissores, a depender do critério tecnológico considerado, como maior biodegradabilidade, maior uniformidade estrutural ou melhor desempenho óptico.

## 7 CONCLUSÕES

Os filmes biodegradáveis elaborados apresentaram potencial para aplicações em embalagens sustentáveis, considerando a avaliação de suas propriedades físico-químicas, ópticas e de biodegradabilidade.

A composição das formulações influenciou significativamente as características dos filmes. A incorporação do óleo de babaçu melhorou a facilidade de manuseio e a homogeneidade visual, especialmente nas formulações T4 (1% de óleo) e T6 (6% de óleo), além de retardar a biodegradação inicial sem comprometer a degradação final após 10 dias.

Com base nos resultados obtidos, os melhores tratamentos variaram conforme o critério de aplicação: T5 apresentou maior transparência; T6 destacou-se pela maior estabilidade térmica e homogeneidade estrutural; T1 e T3 apresentaram biodegradação mais rápida; e T4 demonstrou melhor equilíbrio geral entre as propriedades avaliadas.

Do ponto de vista tecnológico e ambiental, os filmes desenvolvidos apresentam características compatíveis com aplicações em embalagens biodegradáveis, especialmente naquelas que exigem equilíbrio entre propriedades de barreira, integridade visual e degradabilidade controlada. A combinação entre PS e óleo de babaçu mostrou-se viável e funcional, oferecendo uma alternativa renovável e sustentável aos plásticos convencionais.

Recomenda-se, para estudos futuros, a avaliação do desempenho dos filmes em sistemas reais de embalagem de alimentos.

## REFERÊNCIAS

- ABDOU, E. S.; SOROUR, M. A. Preparation and characterization of starch / carrageenan edible films. **International Food Research Journal**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 189–193, 2014.
- AIDER, M. Aplicação de quitosana na produção de filmes ativos de base biológica e potencial na indústria alimentícia: revisão. **LWT - Food Science and Technology**, [s. l.], v. 43, n. 6, p. 837-842, 2010.
- AMIT, S. K. *et al.* A review on mechanisms and commercial aspects of food preservation and processing. **Agriculture & Food Security**, [s.l.], v. 6, n. 1, p. 51, 2017.
- ASGHER, M. *et al.* Materiais de embalagem de alimentos ativos de base biológica: alternativa sustentável aos materiais de embalagem convencionais à base de petroquímicos. **Food Research International**, [s. l.], v. 137, p. 109625, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15448-1**: embalagens plásticas degradáveis e/ou de fontes renováveis – parte 1: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- AVIO, C. G.; GORBI, S.; REGOLI, F. Plastics and microplastics in the oceans: from emerging pollutants to emerged threat. **Marine Environmental Research**, [s. l.], v. 128, p. 2-11, 2017.
- BALLESTEROS-MÁRTINEZ, L.; PÉREZ-CERVERA, C.; ANDRADE-PIZARRO, R. Effect of glycerol and sorbitol concentrations on mechanical, optical, and barrier properties of sweet potato starch film. **NFS Journal**, [s. l.], v. 18, p. 1-10, 2020.
- BASIAK, E. *et al.* Efeito da laminação de óleo entre camadas de amido plastificado nas propriedades do filme. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 195, p. 56-63, 2016.
- BASTOS, V. D. Biopolímeros e polímeros de matérias-primas renováveis alternativos aos petroquímicos. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 28, p. 201-234, 2007.
- BRASIL. **Instrução Normativa nº 20, de 31 de julho de 2000**. Anexo I – Regulamento técnico de identidade e qualidade de almôndegas. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2000.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Promoção nacional da cadeia de valor do coco babaçu**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2009.
- BHATIA, S. *et al.* Development and functional characterization of *Melissa* essential oil fortified k-carrageenan-based active packaging films. **Journal of Agriculture and Food Research**, [s. l.], v. 21, p. 101870, 2025.
- CAMPO, V. L. *et al.* Carrageenans: biological properties, chemical modifications and structural analysis – a review. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 77, n. 2, p. 167-180, 2009.
- CERQUEIRA, M. A. *et al.* Effect of glycerol and corn oil on physicochemical properties of polysaccharide films: a comparative study. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 175-184,

2012.

CIEL. Fósseis, plásticos e matérias-primas petroquímicas. *In*: MUFFETT, C.; LUCEK, K.; FEIT, S. **Fueling Plastics: How Fracked Gas, Cheap Oil, and Unburnable Coal are Driving the Plastics Boom**. [S. l.], Center for International Environmental Law, 2017. p. 1-5.

COSTA, J. C. *et al.* Óleo essencial de alfavaca (*Ocimum gratissimum*) como aromatizante em bebidas silvestres formuladas. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, [s. l.], v. 20, p. 368-376, 2018.

DEVADAS, V. V. *et al.* Biopolímero de algas rumo a uma economia circular sustentável. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 325, p. 124702, 2021.

DUTTA, P. K. *et al.* Perspectivas para filmes antimicrobianos à base de quitosana em aplicações alimentícias. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 114, n. 4, p. 1173-1182, 2009.

FALGUERA, V. *et al.* Edible films and coatings: structures, active functions and trends in their use. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 292-303, 2011.

FAO. **Versión resumida de el estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024: la transformación azul en acción**. Roma: FAO, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cd0690es>. Acesso em: 05 abr. 2026.

FERNÁNDEZ, M. J. *et al.* Effect of the molecular structure and mechanical properties of carrageenan films on the microbial growth. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 453-458, 2003.

FILIPINI, G. da S. **Desenvolvimento de embalagens biodegradáveis ativas a partir de polímeros e extrato natural de jambolão**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Fortaleza, 2019.

GHANBARZADEH, B.; ALMASI, H. Physical properties of biodegradable films. *In*: GHANBARZADEH, B.; ALMASI, H. (org.). **Biodegradable films**. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. cap. 3, p. 45-78.

GONTARD, N.; GUILBERT, S.; CUQ, J.-L. Edible wheat gluten films: influence of the main process variables on film properties using response surface methodology. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 190-195, 1992.

HAN, J. W. *et al.* Embalagem de alimentos: uma revisão abrangente e tendências futuras. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 860-877, 2018.

HANANI, Z. A. N. *et al.* Caracterização físico-química de filmes à base de kappa-carragenana (*Eucheuma cottonii*) incorporados com vários óleos vegetais. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 157, p. 1479-1487, 2017.

HOPKINS, E. J. *et al.* Efeitos da concentração de óleo de linhaça no desempenho de um filme do tipo emulsão à base de isolado proteico de soja. **Food Research International**, [s. l.], v.

67, p. 418-425, 2015.

JARAMILLO, C. *et al.* Active and smart biodegradable packaging based on starch and natural extracts. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 176, p. 187-194, 2017.

JESUS, P. B. Hypnea. In: **Flora e Funga do Brasil**. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB140094>. Acesso em: 17 dez. 2024.

KUMAR, M. *et al.* A review on biodegradable plastics from renewable resources. **Journal of Polymers and the Environment**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 111-121, 2010.

KUMAR, A. *et al.* Tendências em filmes de embalagem comestíveis e seu futuro prospectivo em alimentos: uma revisão. **Applied Food Research**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 100118, 2022.

LI, X.; FARID, M. Uma revisão sobre o desenvolvimento recente em tecnologias não convencionais de esterilização de alimentos. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 182, p. 33-45, 2016.

LINDH, H.; OLSSON, A.; WILLIAMS, H. Percepções do consumidor sobre embalagens de alimentos: contribuindo ou neutralizando o desenvolvimento ambientalmente sustentável? **Packaging Technology and Science**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 3-23, 2015.

LIMA, K. O. *et al.* Avaliação da influência da adição de ácidos orgânicos em filmes à base de ágar extraído da macroalga *Gracilaria domingensis*. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 307-314, 2018.

LIMA, E. S. *et al.* Ficocoloide de alga marinha (*Hypnea pseudomusciformis*) em filmes como uma alternativa verde para embalagem de alimentos. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 1., 2021, Londrina. **Anais [...]**. Londrina: [s.n.], 2021. Disponível em: [https://www.even3.com.br/anais/ISCTABRASIL/451465-FICOCOLOIDE-DE-ALGA-MARINHA-\(HYPNEA-PSEDOMUSCIFORMIS\)-EMFILMES-COMO-UMA-ALTERNATIVA-VERDE-PARA-EMBALAGEM-DEALIM](https://www.even3.com.br/anais/ISCTABRASIL/451465-FICOCOLOIDE-DE-ALGA-MARINHA-(HYPNEA-PSEDOMUSCIFORMIS)-EMFILMES-COMO-UMA-ALTERNATIVA-VERDE-PARA-EMBALAGEM-DEALIM). Acesso em: 05 abr. 2026.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.

MARTINY, T. R. *et al.* Um novo filme biodegradável à base de  $\gamma$ -carragenina ativada com extrato de folhas de oliveira. **Food Science & Nutrition**, [s. l.], v. 8, n. 7, p. 3147-3156, 2020.

MSHIGENI, K. E.; CHAPMAN, D. J. Hypnea (Gigartinales, Rhodophyta). In: AKATSUKA, I. (org.). **Biology of economic algae**. The Hague: SPB Academic Publishing, 1994. p. 245-281.

MOHANTY, A. K. *et al.* Natural fibers, biopolymers, and biocomposites: an introduction. In: **Natural fibers, biopolymers and biocomposites**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.

MONTEIRO, A. R. **Produção e caracterização de filmes biodegradáveis à base de quitosana**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

- MONTERREY-QUINTERO, J. A.; SOBRAL, P. J. A. Efeito da concentração de plastificante nas propriedades de filmes comestíveis de gelatina. **Brazilian Journal of Food Technology**, [s. l.], v. 3, p. 167-173, 2000.
- MUSCAT, D. *et al.* Estudo comparativo do comportamento de formação de filme de amidos com baixo e alto teor de amilose usando glicerol e xilitol como plastificantes. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 109, n. 2, p. 189-201, 2012.
- NAUER, F.; CASSANO, V.; OLIVEIRA, M. C. Description of *Hypnea pseudomusciformis* sp. nov., a new species based on molecular and morphological analyses, in the context of the *H. musciformis* complex (Gigartinales, Rhodophyta). **Journal of Applied Phycology**, [s. l.], v. 27, p. 2405-2417, 2015.
- NCUBE, L. K. *et al.* Uma visão geral da geração e gestão de resíduos plásticos em indústrias de embalagens de alimentos. **Recycling**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 12, 2021.
- NAZURAH, R.; HANANI, Z. A. N. Physicochemical characterization of kappa-carrageenan films incorporated with various vegetable oils. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 157, p. 1479-1487, 2016.
- NOGUEIRA, A. C.; MARTINS, V. G. Biodegradation assessment of gluten-based films in composting environment. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 135, n. 15, p. 46125, 2018.
- PAULA, F. C. D. *et al.* Plásticos biodegradáveis prospectivos de processos de conversão de biomassa. [S. l.]: IntechOpen, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.75111>.
- PRATA, J. C. *et al.* Efeitos dos microplásticos nas populações de microalgas: uma revisão crítica. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 665, p. 400-405, 2019.
- PAULA, H. A. **Desenvolvimento de filmes de amido de mandioca reforçados com polpa de café**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- PEREIRA, L.; GHEDA, S. F.; RIBEIRO CLARO, P. J. Análise por espectroscopia vibracional de polissacarídeos de algas marinhas com potencial uso nas indústrias alimentícias, farmacêuticas e cosméticas. **International Journal of Carbohydrate Chemistry**, [s. l.], v. 2013, p. 1-7, 2013.
- PEREIRA, P. T. V. T. *et al.* Supplementation with babassu oil reduces fatigue and inflammation in breast cancer patients: a pilot randomized clinical trial. **Journal of Functional Foods**, [s. l.], v. 67, p. 103859, 2020.
- PERSIN, Z. *et al.* Desafios e oportunidades em pesquisa e tecnologia de polissacarídeos: as perspectivas da EPNOE para a próxima década nas áreas de materiais, alimentos e saúde. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 84, n. 1, p. 22-32, 2011.
- PRINCE, J. H.; JOHN, D. M.; LAWSON, G. W. Seaweeds of the western coast of tropical Africa and adjacent islands: a critical assessment. IV. Rhodophyta (Florideae) 3. Genera H-K. **Bulletin of the British Museum (Natural History) – Botany Series**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 1-

110, 1992.

QUEIROZ, L. H. S. *et al.* Efeito plastificante do óleo babaçu (*Attalea speciosa*) em filme biodegradável à base de amido. **Scientia Plena**, [s. l.], v. 19, n. 12, p. 1-10, 2023.

RAY, S. S.; BOUSMINA, M. Biodegradable polymers and their layered silicate nanocomposites: in greening the 21st century materials world. **Progress in Materials Science**, [s. l.], v. 50, n. 8, p. 962-1079, 2005.

RAWAT, S. Deterioração de alimentos: microrganismos e sua prevenção. **Asian Journal of Plant Science and Research**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 47-56, 2015.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024.

RODRIGUES, J. A. G. *et al.* Isolamento, fracionamento e avaliação toxicológica *in vivo* de polissacarídeos sulfatados de *Hypnea musciformis*. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 41, p. 1211-1217, 2011.

RODRIGUES, J. A. G. *et al.* Extração aquosa do antioxidante kappa-carragenana da maricultura de *Hypnea musciformis* (*Rhodophyta*). **Revista Brasileira de Engenharia de Pesca**, [s. l.], v. 3, p. 81-96, 2025.

SABERI, B. *et al.* Physical, barrier, and antioxidant properties of pea starch-guar gum biocomposite edible films by incorporation of natural plant extracts. **Food Bioprocess Technology**, [s.l.], v. 10, p. 2240-2250, 2017.

SANGRONIZ, A. *et al.* Materiais de embalagem com propriedades mecânicas e de barreira desejadas e reciclabilidade química completa. **Nature Communications**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 5264, 2019.

SÁEZ-ORVIZ, S. *et al.* Bioactive packaging based on delipidated egg yolk protein edible films with lactobionic acid and *Lactobacillus plantarum* CECT 9567: characterization and use as coating in a food model. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 119, p. 106849, 2021.

SANTOS, J. V. I.; SILVA, V. N. T. Aplicação de nanocristais de celulose de fibra vegetal no desenvolvimento de bioplásticos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 7., 2017, Ponta Grossa. **Anais [...]**, Ponta Grossa, [s. n.], 2017.

SCHIFFERSTEIN, H. N. J. *et al.* Transmissão de informações por meio de embalagens de alimentos: uma revisão de literatura comparando a legislação com as políticas de proteção ao consumidor. **Journal of Functional Foods**, [s. l.], v. 86, p. 104734, 2021.

SEVERINO, P. *et al.* Polímeros usados como sistemas de transporte de princípios ativos. **Polímeros**, [s. l.], v. 21, p. 361-368, 2011.

SID, S. *et al.* Polímeros de origem biológica como alternativas aos materiais convencionais para embalagens de alimentos: uma revisão. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 115, p. 87-104, 2021.

SILVA, R. M. **Desenvolvimento e caracterização de filmes comestíveis de carragenana**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SOBRAL, P. J. A. *et al.* Mechanical, water vapor barrier and thermal properties of gelatin based edible films. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 15, n. 4-6, p. 423-432, 2001.

SOUSA, E. *et al.* Avaliação da oxidação e de parâmetros de qualidade do óleo de babaçu por espectroscopia no infravermelho médio com transformada de Fourier (FTIR) e calibração multivariada. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 395-409, 2019.

SOUZA, M. H. S. L. *et al.* Ethnopharmacological use of babassu (*Orbignya phalerata* Mart) in communities of babassu nut breakers in Maranhão. **Journal of Ethnopharmacology**, Shannon, v. 133, p. 1-5, 2011.

SOUZA, F. R. A. *et al.* Biopolímeros na indústria de alimentos: do aproveitamento de resíduos agroindustriais à produção de biopolímeros. **Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos**, [s. l.], v. 4, 2021.

STANLEY, N. Production, properties and uses of carrageenan. *In*: MCCORMICK, K.; SMITH, J. (org.). **Production and utilization of products from commercial seaweeds**. Roma: FAO, 1987. (FAO Fisheries Technical Paper, v. 288). p. 116-146.

TALAN, A. *et al.* Estratégias de biorrefinaria para produção de bioplásticos microbianos: caminho sustentável para a bioeconomia circular. **Bioresource Technology Reports**, [s. l.], v. 17, p. 100875, 2022.

TAMADA, I. S. *et al.* Toxicological evaluation of vegetable oils and biodiesel in soil during the biodegradation process. **Brazilian Journal of Microbiology**, [s. l.], v. 43, n. 4, p. 1576-1581, 2012.

VALE, D. A. do. **Filmes e revestimentos do caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*) com aplicação em postas de serra (*Scomberomorus brasiliensis*) congeladas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Pesca) – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Pesca, Fortaleza, 2017.

VAN DE VELDE, F.; DE RUITER, G. A. Polysaccharides from eukaryotes. *In*: STEINBÜCHEL, A.; DEBAETS, S.; VANDAMME, E. J. (org.). **Biopolymers: polysaccharides II: polysaccharides from eukaryotes**. Weinheim: Wiley-VCH, 2002.

VENUGOPAL, V. Cosmeceuticals from marine fish and shellfish. *In*: VENUGOPAL, V. (org.). **Marine products for healthcare: functional and bioactive nutraceutical compounds from the ocean**. Boca Raton: CRC Press, 2011. p. 211-230.

VILLADIEGO, A. M. D. *et al.* Filmes e revestimentos comestíveis na conservação de produtos alimentícios. **Ceres**, [s. l.], v. 52, n. 300, p. 1-10, 2005.

YOUSUF, B. *et al.* Desenvolvimentos recentes na extensão da vida útil de frutas e vegetais frescos cortados pela aplicação de diferentes revestimentos comestíveis: uma revisão. **LWT - Food Science and Technology**, [s. l.], v. 89, p. 198-209, 2018.

YOUSUF, B.; WU, S.; GAO, Y. Características dos filmes à base de goma karaya: melhoria pela inclusão de óleo de *Schisandra chinensis* e seu oleogel na formulação de filmes. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 345, p. 128859, 2021.

WEN, Q. *et al.* Effect of synergism between sodium alginate and xanthan gum on characteristics of composite film and gloss of areca nut coating. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 50, p. 102113, 2022.

ZAREI JELLANI, S. E. *et al.* Seasonal variation in yield, chemical composition and biological activities of *Hypnea flagelliformis* (Gigartinales) from the Gulf of Mannar, India. **Journal of Applied Phycology**, [s. l.], v. 33, p. 2605-2620, 2021.

ZHANG, C. *et al.* Progresso e perspectiva sobre plásticos de algas – uma revisão crítica. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 289, p. 121700, 2019.