

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Faculdade de Farmácia

Programa de Pós Graduação em Ciência dos Alimentos

Bárbara Luiza da Silva Freitas

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE ÓLEO DE BURITI EM FILMES DE BIOPOLÍMEROS
VEGETAIS**

Belo Horizonte

2025

Bárbara Luiza da Silva Freitas

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE ÓLEO DE BURITI EM FILMES DE BIOPOLÍMEROS
VEGETAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos da Faculdade de Farmácia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestra em Ciência de Alimentos.

Orientadora: Profa. Dr^a Adriana Silva França

Coorientador: Prof. Dr Leandro Soares de Oliveira

Belo Horizonte

2025

F862e Freitas, Bárbara Luiza da Silva.
Efeitos da adição de óleo de buriti em filmes de biopolímeros vegetais [recurso eletrônico] : / Bárbara Luiza da Silva Freitas. – 2025.
1 recurso eletrônico (152 f. : il.) : pdf.

Orientadora: Adriana Silva França.
Coorientador: Leandro Soares de Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Faculdade de Farmácia, Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Biopolímeros – Teses. 2. Uso de resíduos sólidos – Teses. 3. Molhabilidade – Teses. 4. Plastificantes – Teses. 5. Polissacarídeos – Teses. 6. Proteína – Teses. 7. Hidrofobicidade – Teses. 8. I. França, Adriana Silva. II. Oliveira, Leandro Soares de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Faculdade de Farmácia. IV. Título.

CDD: 664.092



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO**EFEITOS DA ADIÇÃO DE ÓLEO DE BURITI EM FILMES DE BIOPOLÍMEROS VEGETAIS****BÁRBARA LUIZA DA SILVA FREITAS**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DE ALIMENTOS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIA DE ALIMENTOS, área de concentração CIÊNCIA DE ALIMENTOS.

Aprovada em 17 de junho de 2025, pela banca constituída pelos membros:

Profa. Dra. Adriana Silva França (Orientadora e presidente da comissão) - UFMG

Prof. Dr. Leandro Soares de Oliveira (Coorientador) - UFMG

Dra. Pâmella Fronza Câmara - UFMG

Profa. Dra. Camila Argenta Fante - UFMG

Assinatura dos membros da banca examinadora:



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Silva França, Professora do Magistério Superior**, em 17/06/2025, às 14:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pâmella Fronza Câmara, Usuário Externo**, em 17/06/2025, às 14:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Soares de Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 17/06/2025, às 14:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Camila Argenta Fante, Professora do Magistério Superior**, em 17/06/2025, às 14:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4301851** e o código CRC **07B36E47**.

AGRADECIMENTO

Este trabalho é fruto de um esforço coletivo e de uma teia de apoio que se estendeu por toda a minha trajetória. Minha gratidão é imensa.

Aos meus pais, Valmir e Rosemary, por cada sacrifício, cada incentivo e por serem a minha maior inspiração. Às minhas irmãs, Gabriela e Mariana, e aos meus sobrinhos, Pedro e Maria Morena, por serem o lembrete constante de que a vida é mais doce com o apoio da família e a alegria dos pequenos. Ao meu amor, Bruno, por cada incentivo, cada palavra de carinho e por compartilhar comigo os sonhos e desafios.

No laboratório, a parceria foi a força motriz. Minhas companheiras Layla, Gisele, Ketlyn, Gabriela e Beatriz, a cada uma, meu muito obrigada pelas conversas, troca de ideias e pelo apoio mútuo. Em especial, a Noemi, a cumplicidade que nos uniu do começo ao fim foi um presente que levo com carinho.

Aos meus orientadores, Adriana Silva França e Leandro Soares de Oliveira, minha profunda gratidão pela confiança, pela paciência e por abrirem caminhos que transformaram a pesquisa em aprendizado e descoberta.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos da UFMG, e a todos os meus professores, que com sua dedicação e conhecimento, pavimentaram meu crescimento acadêmico e profissional. À Cooperativa Grande Sertão, pelo apoio fundamental que permitiu o avanço desta pesquisa.

Ao Prof. Herman S. Mansur do Centro de Nanociência, Nanotecnologia e Inovação – CeNano²I/CEMUCASI/ UFMG pela análise FTIR.

A Fapemig, pela bolsa concedida.

E a energia que me conecta ao universo, aos meus Orixás, por guiarem meus passos e abrirem meus caminhos.

“Aprender mesmo, a gente aprende quando o saber não é mercadoria. Quando é com mestres e mestras, eles não cobram: eles ensinam a manter o conhecimento vivo. Quando você compartilha o saber o saber só cresce. É como as águas que ‘confluenciam’.”

Antônio Bispo dos Santos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fruto do Buriti	40
Figura 2 – Extrato de fécula da casca e entrecasca da mandioca após precipitação.	49
Figura 3 – Fécula de mandioca após o fim do processo de extração.	50
Figura 4– Sistema CIE-Lab* de análise de cor.....	55
Figura 5– Amostras armazenadas em dessecador.	57
Figura 6– Amostras envoltas em envelopes de redes de nylon antes e depois de enterradas.	59
Figura 7– Amostras dispersas para análise de biodegradabilidade divididas por dias de acompanhamento.....	59
Figura 8– Espectros obtidos por análise de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e respectivas derivadas segundas para os filmes de LBG, fécula e seus conjugados.....	64
Figura 9– Fotografia digital dos filmes a base de goma de alfarroba e fécula de mandioca.....	68
Figura 10– Gráficos de perda de massa e 1ª derivada, gerados a partir de dados das análises termogravimétricas dos filmes de goma de alfarroba, fécula de mandioca e seus respectivos conjugados.	87
Figura 11– Acompanhamento fotográfico dos ensaios de biodegradabilidade dos filmes de goma de alfarroba.....	89
Figura 12– Acompanhamento fotográfico dos ensaios de biodegradabilidade dos filmes de conjugados de goma de alfarroba e fécula de mandioca.....	89
Figura 13– Acompanhamento fotográfico dos ensaios de biodegradabilidade dos filmes conjugados de goma de alfarroba e fécula de mandioca.....	90
Figura 14– Espectros obtidos por análise de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e respectivas derivadas segundas para os filmes de pectina, proteína isolada de semente de girassol e seus conjugados.....	106
Figura 15– Fotografia digital dos filmes a base de pectina e proteína isolada de semente de girassol.	111
Figura 16– Gráficos de perda de massa e 1ª derivada, gerados a partir de dados das análises termogravimétricas dos filmes de pectina e proteína isolada de semente de girassol.....	125

Figura 17– Acompanhamento fotográfico dos ensaios de biodegradabilidade dos filmes de pectina.	127
Figura 18– Acompanhamento fotográfico dos ensaios de biodegradabilidade dos filmes conjugados de pectina e proteína de semente de girassol.	127
Figura 19– Acompanhamento fotográfico dos ensaios de biodegradabilidade dos filmes de proteína de semente de girassol.	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Composição dos filmes a base de goma de alfarroba e fécula de mandioca.	52
Tabela 2– Valores médios de espessura, umidade e solubilidade dos filmes de goma de alfarroba, fécula de mandioca e seus respectivos conjugados.	60
Tabela 3– Valores médios da análise colorimétrica e de opacidade dos filmes de goma de alfarroba, fécula d mandioca e seus respectivos conjugados.	69
Tabela 4– Valores médios de taxa de transmissão de vapor de água (TTVA), permeabilidade ao vapor de água (PVA) e permeabilidade ao oxigênio (PVO) dos filmes de goma de alfarroba, fécula de mandioca e seus respectivos conjugados. ..	73
Tabela 5– Valores médios de limite de resistência à tração (LRT), percentual de alongamento na ruptura (%AL) e módulo de elasticidade (E) dos filmes de goma de alfarroba, fécula de mandioca e seus respectivos conjugados.	76
Tabela 6– Dados de interpretação das análises termogravimétricas dos filmes de goma de alfarroba, fécula de mandioca e seus respectivos conjugados.	83
Tabela 7 – Composição dos filmes a base de pectina cítrica e proteína de semente de girassol.....	100
Tabela 8 – Valores médios de espessura, umidade e solubilidade dos filmes de pectina, proteína de isolada de semente de girassol e seus respectivos conjugados.	102
Tabela 9– Valores médios da análise colorimétrica e de opacidade dos filmes de pectina, proteína isolada de semente de girassol e seus respectivos conjugados..	113
Tabela 10– Valores médios de taxa de transmissão de vapor de água (TTVA), permeabilidade ao vapor de água (PVA) e permeabilidade ao oxigênio (PVO) dos filmes de pectina, proteína isolada de semente de girassol e seus respectivos conjugados.	114
Tabela 11– Valores médios de limite de resistência à tração (LRT), percentual de alongamento na ruptura (%AL) e módulo de elasticidade (E) dos filmes de pectina, proteína isolada de semente de girassol e seus respectivos conjugados.	117
Tabela 12– Dados de interpretação das análises termogravimétricas dos filmes de pectina, proteína de semente de girassol e seus respectivos conjugados.	120

SUMÁRIO

1	Introdução Geral	10
2	Referencial Teórico.....	13
2.1	Filmes Biodegradáveis para uso em Embalagens de Alimentos	13
2.1.1	Propriedades desejáveis em filmes destinados a embalagens alimentícias	16
2.2	Valorização de Resíduos Agroalimentares.....	19
2.3	Fontes Poliméricas para o Desenvolvimento de Filmes	22
2.3.1	Polissacarídeo como matriz polimérica.....	23
2.3.2	Proteínas vegetais como matriz polimérica.....	31
2.4	Agente Plastificante	34
2.4.1	Glicerol como plastificante convencional	36
2.4.2	Óleos vegetais como plastificantes alternativos.....	38
3	Capítulo I: Filmes a base de goma de alfarroba e fécula extraída da casca e entrecasca da mandioca	43
3.1	Introdução	47
3.2	Metodologia	49
3.2.1	Extração da Fécula da casca e Entrecasca da Mandioca.....	49
3.2.2	Elaboração dos Filmes.....	50
3.2.3	Caracterização dos Filmes.....	53
3.2.4	Propriedades de Barreira	56
3.2.5	Propriedades Mecânicas.....	58
3.2.6	Análise Termogravimétrica (TGA).....	58
3.2.7	Biodegradabilidade	58
3.2.8	Análise Estatística.....	59
3.3	Resultados e Discussão	60
3.3.1	Espessura, Umidade e Solubilidade em Água	60
3.3.2	Análise Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....	62
3.3.3	Propriedades Ópticas.....	67
3.3.4	Propriedades de Barreira	72
3.3.5	Propriedades Mecânicas.....	75
3.3.6	Análise Termogravimétrica (TGA).....	80
3.3.7	Biodegradabilidade	88
3.4	Conclusão	91
4	Capítulo II: Filmes a base de pectina e proteína isolada de semente de girassol	93
4.1	Introdução	97
4.2	Metodologia.....	99
4.2.1	Elaboração dos filmes.....	99
4.2.2	Caracterização dos Filmes.....	101
4.3	Resultados e Discussão	102
4.3.1	Espessura, Umidade e Solubilidade em Água	102
4.3.2	Análise Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....	105
4.3.3	Propriedades Ópticas.....	110
4.3.4	Propriedades de Barreira	113
4.3.5	Propriedades Mecânicas.....	116
4.3.6	Análise Termogravimétrica (TGA).....	119
4.3.7	Biodegradabilidade	126

4.4	Conclusão	129
5	Conclusão Geral	131
6	Referências Bibliográficas	133

INTRODUÇÃO GERAL

A crescente conscientização global sobre os impactos ambientais adversos gerados pelo descarte inadequado e pela persistência de plásticos convencionais no meio ambiente tem impulsionado uma busca urgente por alternativas mais sustentáveis, especialmente no setor de embalagens.

Produzidos em escala global massiva e majoritariamente a partir de fontes petroquímicas (Plastics – The Fast Facts, 2024), os materiais plásticos representam uma parcela significativa dos resíduos sólidos urbanos. Seu ciclo de vida contribui para a emissão de gases de efeito estufa e, devido à gestão ineficiente de resíduos, resulta na poluição de ecossistemas terrestres e aquáticos (Huang *et al.*, 2025). Adicionalmente, a lixiviação de aditivos químicos presentes nesses materiais, como ftalatos, suscita preocupações quanto a potenciais danos à saúde humana e ao ambiente (Eales *et al.*, 2022; Huang *et al.*, 2025). Diante desse cenário, a indústria de embalagens de alimentos, uma das maiores utilizadoras de plásticos de uso único (Jahangiri, Mohanty e Misra, 2024), enfrenta o desafio premente de desenvolver soluções inovadoras que aliem desempenho funcional à responsabilidade ecológica.

Nesse contexto, os filmes biodegradáveis, formulados a partir de biopolímeros oriundos de fontes renováveis, surgem como uma alternativa promissora e estratégica (Bhargava *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2025). Estes materiais oferecem o potencial de mitigar o acúmulo de resíduos plásticos persistentes, uma vez que podem ser decompostos por microrganismos em componentes mais simples, reintegrando-se aos ciclos naturais (Bhargava *et al.*, 2020).

A transição para embalagens biodegradáveis está alinhada com os princípios da economia circular, que preconiza a otimização do uso de recursos e a minimização da geração de resíduos (Krzywonos, Difonzo e Pasqualone, 2025; Pomoni *et al.*, 2024). Uma vertente particularmente relevante desta abordagem é a valorização de resíduos e coprodutos da agroindústria (Dejene, 2025). Estes, além de representarem um passivo ambiental quando não gerenciados adequadamente, são frequentemente ricos em biopolímeros como polissacarídeos e proteínas (Bhargava *et al.*, 2020; Butler *et al.*, 2023), passíveis de serem convertidos em materiais de alto valor agregado.

Apesar do grande potencial, os filmes baseados em biopolímeros puros, como polissacarídeos e proteínas, frequentemente apresentam limitações intrínsecas. Filmes de polissacarídeos, por exemplo, embora possam oferecer boa barreira a gases em baixa umidade, tendem a ser hidrofílicos e quebradiços (Jahangiri, Mohanty e Misra, 2024). Similarmente, filmes proteicos podem ser frágeis e sensíveis à umidade (Cheng *et al.*, 2024; Yadav *et al.*, 2025). Para superar esses desafios e melhorar a flexibilidade e processabilidade, a incorporação de aditivos, como os plastificantes, é uma prática comum e essencial (Farhan *et al.*, 2025; Suderman, Isa e Sarbon, 2018).

O glicerol é um dos plastificantes mais convencionalmente empregados em filmes biodegradáveis devido à sua eficácia e baixo custo (Ben, Samsudin e Yhaya, 2022). Contudo, sua alta higroscopicidade pode comprometer a estabilidade dos filmes em ambientes úmidos, afetar negativamente suas propriedades de barreira à água e levar à sua migração da matriz polimérica ao longo do tempo, alterando as propriedades do filme (Ben, Samsudin e Yhaya, 2022). Essas limitações têm motivado a exploração de plastificantes alternativos, preferencialmente de fontes renováveis, que possam não apenas conferir a plasticidade desejada, mas também agregar funcionalidades. Os óleos vegetais, por sua natureza hidrofóbica e composição rica em triglicerídeos, têm sido investigados com a perspectiva de melhorar a resistência à umidade dos filmes (Cheng *et al.*, 2024; Sun, Weng e Zhang, 2024).

Dentre a vasta biodiversidade brasileira, o óleo de buriti (*Mauritia flexuosa L.f.*), extraído de um fruto nativo de grande importância ecológica e sociocultural (Ferreira *et al.*, 2022; Sampaio e Carrazza, 2012), destaca-se por sua composição única, rica em ácido oleico, além de apresentar um notável conteúdo de carotenoides, como o β -caroteno, e tocoferóis, que lhe conferem propriedades bioativas relevantes (Bispo-Jr *et al.*, 2018; Resende, Franca e Oliveira, 2019; Silva, da e Rial, 2025). A extração é predominantemente realizada por prensagem mecânica, método que assegura a manutenção eficiente dos bioativos. No entanto, este processo resulta em um resíduo com um teor apreciável de óleo, possibilitando uma extração química subsequente, visando o máximo aproveitamento da matéria-prima. Embora existam indicações de seu potencial como plastificante (Bispo-Jr *et al.*, 2018), um estudo aprofundado do óleo de buriti especificamente nesta função em filmes biodegradáveis elaborados a partir de matrizes poliméricas como a goma de alfarroba, fécula extraída da casca e

entrecasca da mandioca (um resíduo agroindustrial), pectina (frequentemente extraída de subprodutos de frutas) e proteína de semente de girassol (um coproduto da indústria de óleo), representa uma área de investigação pouco explorada.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo geral desenvolver filmes biodegradáveis a partir de matrizes poliméricas como a goma de alfarroba, fécula extraída da casca e entrecasca da mandioca, pectina e proteína de semente de girassol, de forma isolada e como conjugados, incorporando o óleo de buriti, em diferentes proporções, como agente plastificante alternativo ao glicerol, com foco na valorização de resíduos agroalimentares e na obtenção de materiais com propriedades funcionais e de barreira para aplicação em embalagens sustentáveis.

REFERENCIAL TEÓRICO

FILMES BIODEGRADÁVEIS PARA USO EM EMBALAGENS DE ALIMENTOS

Os materiais plásticos tornaram-se onipresentes na vida moderna, desde embalagens de alimentos até a constituição de dispositivos eletrônicos, valorizados por sua leveza, durabilidade e baixo custo de produção (Plastics – The Fast Facts, 2024). Essa disseminada conveniência, no entanto, impõe um considerável ônus ambiental. A produção global de plásticos alcançou a marca de 413,8 milhões de toneladas métricas em 2023, com uma esmagadora maioria (90,4%) originada de combustíveis fósseis (Plastics – The Fast Facts, 2024). O volume expressivo de plásticos produzidos e subsequentemente descartados tem resultado em danos significativos aos ecossistemas em escala global. Adicionalmente, o ciclo de vida dos plásticos convencionais é responsável pela emissão de grandes quantidades de gases de efeito estufa, ao passo que uma gestão ineficiente dos resíduos plásticos frequentemente culmina em seu vazamento para o meio ambiente, desencadeando graves consequências ecológicas (Huang *et al.*, 2025).

Os plásticos convencionais, polímeros sintéticos majoritariamente derivados de fontes petroquímicas como petróleo ou gás natural, apresentam uma série de problemas inerentes que exacerbam a degradação ambiental. Sua notória durabilidade, embora vantajosa para aplicações de longo prazo, implica uma persistência de centenas de anos no ambiente (Haq *et al.*, 2025). Ao longo do tempo, esses materiais sofrem fragmentação por processos como fotodegradação e ação mecânica, originando os disseminados microplásticos que contaminam solos, corpos d'água e a atmosfera (Haq *et al.*, 2025).

Paralelamente, o envelhecimento dos plásticos no ambiente pode ocasionar a lixiviação de aditivos químicos, como os ésteres de ácido ftálico (PAEs) (Huang *et al.*, 2025), substâncias que, segundo estudos, podem comprometer a saúde humana, estando associadas à redução da qualidade seminal, distúrbios do neurodesenvolvimento, asma infantil e outras patologias (Eales *et al.*, 2022; Huang *et al.*, 2025). A própria produção de plásticos convencionais representa uma parcela substancial (cerca de 50,77%) das emissões de gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo de vida, sendo a incineração de resíduos plásticos outra fonte relevante dessas emissões (Huang *et al.*, 2025).

A problemática se agrava pela vasta gama de aditivos químicos empregados na indústria plástica, muitos dos quais com potencial de risco à saúde humana. A exposição a esses compostos pode ocorrer em âmbitos ocupacionais, através do uso de produtos finais ou pela migração de substâncias de embalagens para alimentos. Desde meados do século XX, com a ascensão da indústria plástica, houve uma proliferação de novos produtos químicos – estimando-se cerca de 140.000 –, dos quais apenas uma fração foi adequadamente avaliada quanto à toxicidade antes de sua introdução em larga escala no mercado (Eales *et al.*, 2022).

No segmento de embalagens alimentícias, os polímeros plásticos sintéticos consolidaram sua posição devido à combinação de flexibilidade para moldagem, baixo custo, boa printabilidade e eficiente barreira contra diversos fatores ambientais e mecânicos (Adhikary *et al.*, 2023; Bhargava *et al.*, 2020).

As embalagens desempenham funções vitais, como a proteção dos alimentos contra contaminação externa (odores, gases, umidade, luz, microrganismos) e danos físicos, assegurando assim a higiene, a segurança e a qualidade dos produtos, além de estender sua vida útil e, conseqüentemente, mitigar perdas e desperdícios (Cheng *et al.*, 2024; Jahangiri, Mohanty e Misra, 2024; Suderman, Isa e Sarbon, 2018). Ademais, atuam como ferramentas de marketing e proporcionam conveniência ao consumidor (Suderman, Isa e Sarbon, 2018). Contudo, a predominância de plásticos de origem petroquímica (como PVC, PP, PE, PS, PET) neste setor acarreta sérios passivos ambientais, notadamente pela geração de vastos volumes de resíduos não biodegradáveis, cuja decomposição natural pode estender-se por dezenas a milhares de anos (Jahangiri, Mohanty e Misra, 2024; Suderman, Isa e Sarbon, 2018). A persistência desses materiais no ambiente, somada à dificuldade de reciclagem e à potencial liberação de componentes tóxicos, tem intensificado a pressão por alternativas mais sustentáveis (Adhikary *et al.*, 2023).

Neste contexto desafiador, os filmes e embalagens biodegradáveis emergem como uma alternativa estratégica e promissora para amenizar o impacto ambiental associado aos plásticos convencionais (Bhargava *et al.*, 2020; Haq *et al.*, 2025). Consideram-se materiais poliméricos biodegradáveis aqueles que, ao final de sua vida útil, são suscetíveis à decomposição pela atividade de microrganismos (como bactérias, fungos e algas), resultando na formação de dióxido de carbono, água e

biomassa, compostos passíveis de reincorporação nos ciclos biogeoquímicos, por exemplo, via fotossíntese (Bhargava *et al.*, 2020; Cheng *et al.*, 2024). Processos como a compostagem, conduzida sob condições controladas, podem otimizar e acelerar essa biodegradação (Cheng *et al.*, 2024).

É consenso que os plásticos de base biológica, formulados a partir de fontes renováveis, apresentam maior alinhamento com os preceitos da economia circular em comparação aos seus congêneres de origem fóssil (Bhargava *et al.*, 2020). Biopolímeros de ocorrência natural, incluindo proteínas, lipídios e polissacarídeos, têm sido extensivamente investigados e aplicados como materiais de base para o desenvolvimento dessas embalagens inovadoras. Tais materiais destacam-se por atributos como reciclabilidade, capacidade de decomposição em prazos relativamente curtos, atoxicidade e perfil ecologicamente favorável (Bhargava *et al.*, 2020; Suderman, Isa e Sarbon, 2018).

A relevância dos plásticos biodegradáveis reside em seu potencial transformador da cadeia de produção, consumo e gerenciamento de plásticos, fomentando uma conduta ambientalmente mais íntegra e responsável (Haq *et al.*, 2025). Embora suas aplicações se estendam a setores como agricultura e medicina (Suderman, Isa e Sarbon, 2018; Wang, N. *et al.*, 2025), seu emprego em embalagens de alimentos é de particular interesse, visando a manutenção da higiene e o prolongamento da vida de prateleira de produtos perecíveis. A adoção crescente de plásticos biodegradáveis impulsiona a transição para uma economia mais circular, na qual se prioriza a reutilização, a reciclagem ou a compostagem dos materiais (Haq *et al.*, 2025). Para além dos benefícios ambientais, os bioplásticos podem gerar impactos socioeconômicos positivos, como a mitigação da dependência de recursos petroquímicos, o estímulo à sustentabilidade e a criação de "empregos verdes", dinamizando economias locais pelo aproveitamento de recursos renováveis (Haq *et al.*, 2025).

Não obstante o crescente interesse e os significativos avanços tecnológicos – catalisados pela sensibilização ambiental dos consumidores e pelo endurecimento das legislações pertinentes – a consolidação industrial dos plásticos biodegradáveis ainda se depara com desafios prementes (Cheng *et al.*, 2024; Wang, N. *et al.*, 2025). Persiste uma notável heterogeneidade no que tange ao desempenho e à capacidade

produtiva dos diversos tipos de plásticos biodegradáveis. A ausência de especificações técnicas e protocolos de identificação uniformes e padronizados também pode gerar contestações e obstáculos comerciais (Wang, N. *et al.*, 2025).

Organismos internacionais, como a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial, preconizam o incremento na produção desses materiais, o desenvolvimento de sistemas de identificação claros e a avaliação criteriosa e contínua dos benefícios ambientais a eles associados (Wang, N. *et al.*, 2025). Como reflexo, observa-se uma intensificação nas atividades de pesquisa e desenvolvimento voltadas aos plásticos biodegradáveis, com o objetivo de prover soluções para a problemática da poluição plástica e atenuar as pressões sobre os ecossistemas mediante inovações tecnológicas e otimizações nos processos de industrialização (Wang, N. *et al.*, 2025). Dessa forma, a sinergia entre pesquisa, desenvolvimento tecnológico e um ambiente regulatório favorável é determinante para acelerar a adoção de alternativas plásticas mais sustentáveis e para concretizar os benefícios ambientais e socioeconômicos dos bioplásticos (Haq *et al.*, 2025).

Propriedades desejáveis em filmes destinados a embalagens alimentícias

O desenvolvimento de filmes para embalagens alimentícias requer uma análise detalhada de diversas propriedades que asseguram a proteção, conservação e aceitação do produto. Estas características são cruciais para garantir a funcionalidade e a viabilidade do material de embalagem.

1.1.1.1 Propriedades Físico-químicas

A espessura dos filmes é um parâmetro fundamental, diretamente relacionado às suas propriedades mecânicas e de barreira (Liu, Z. *et al.*, 2024). Sua medição precisa, realizada com dispositivos como micrômetros digitais, é essencial para avaliar a homogeneidade do filme e a repetibilidade do processo de fabricação (Adhikary *et al.*, 2023).

A solubilidade em água é outro requisito significativo, definido como a porcentagem de matéria solúvel do filme após imersão em água (Liu, W. *et al.*, 2024) e é influenciada pela natureza hidrofílica ou hidrofóbica dos componentes do filme (Adhikary *et al.*, 2023). Para a maioria das aplicações em embalagens alimentícias, busca-se baixa solubilidade para proteger o produto da umidade externa e do próprio

alimento (Henning *et al.*, 2022). Contudo, uma maior solubilidade pode ser desejável para revestimentos comestíveis que se dissolvem rapidamente (Henning *et al.*, 2022).

A organização molecular e a cristalinidade da rede polimérica podem reduzir a hidrofiliabilidade e, conseqüentemente, a solubilidade do filme (Henning *et al.*, 2022). A capacidade de um material de embalagem em resistir à umidade é vital para alimentos sensíveis, influenciando diretamente a vida útil e a qualidade do sabor (Bai *et al.*, 2024).

1.1.1.2 Estrutura Química e Interação

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica rápida e não destrutiva crucial para analisar a estrutura química e as interações que ocorrem em filmes biopoliméricos, a partir da presença de grupos funcionais, obtendo informações em nível molecular identificando suas conformações de ligações químicas (Ahmed *et al.*, 2023; Spinei, Oroian e Ursachi, 2024). A análise FTIR avalia a energia liberada em flexões, alongamentos e vibrações de ligações, onde bandas de absorção claras e fortes indicam interações significativas entre moléculas (Henning *et al.*, 2022). Esta técnica também é poderosa para investigar a miscibilidade de misturas de polímeros, pois o deslocamento de bandas de absorção pode indicar boa interação entre os componentes (Martins *et al.*, 2012).

1.1.1.3 Propriedades de Barreira

As propriedades de barreira são essenciais para filmes de embalagem, pois determinam sua capacidade de resistir à troca de substâncias como umidade, gases (O_2 e CO_2) e luz com o ambiente externo (He *et al.*, 2025; Jahangiri, Mohanty e Misra, 2024). O controle da taxa de transmissão de vapor de água (TTVA) e da permeabilidade ao vapor de água (PVA) é crucial, pois a perda ou absorção de umidade afeta diretamente a qualidade e segurança dos alimentos (He *et al.*, 2025). A PVA é influenciado pelo conteúdo de componentes hidrofílicos na matriz do filme e pela sua estrutura de montagem (Adhikary *et al.*, 2023; He *et al.*, 2025). Fatores como espessura, tipo de polímero, plastificante e condições de processo também afetam a permeabilidade (Henning *et al.*, 2022).

A permeabilidade a gases como o oxigênio (PVO) também é vital. O processo de permeação envolve adsorção, difusão e dessorção do gás através do filme, sendo

influenciado pelo tamanho molecular do gás, volume livre no polímero, polaridade da cadeia e cristalinidade (Xue *et al.*, 2023). Para alimentos sensíveis à oxidação, como carnes, baixa PVO é necessária para evitar deterioração e descoloração (Bai *et al.*, 2024; Xue *et al.*, 2023). Para produtos que respiram, como frutas e vegetais, a permeabilidade do filme deve ser ajustada para manter uma atmosfera interna que retarde o amadurecimento e iniba o metabolismo respiratório excessivo (Xue *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023).

1.1.1.4 *Propriedades Mecânicas*

As propriedades mecânicas, como resistência à tração (TS), alongamento na ruptura (EB) e módulo de elasticidade (EM), determinam a capacidade do filme de suportar tensões durante o manuseio, transporte e armazenamento (Adhikary *et al.*, 2023; He *et al.*, 2025). Estas características são influenciadas pela conformação das cadeias poliméricas e pelas interações intermoleculares (Adhikary *et al.*, 2023). Filmes de moléculas rígidas tendem a ter alta resistência à tração e baixo alongamento na ruptura, enquanto o oposto ocorre com moléculas flexíveis. A cristalinidade e a força das conexões intermoleculares também aumentam a resistência mecânica (He *et al.*, 2025).

1.1.1.5 *Propriedades Termogravimétricas*

As características térmicas, avaliadas por análise termogravimétrica (TGA), são importantes para determinar a estabilidade dos filmes ao calor durante processos como pasteurização, congelamento ou armazenamento, e também para entender seu comportamento em descarte por incineração. A TGA mede a perda de massa do filme com o aumento da temperatura, indicando os estágios de decomposição dos seus componentes (Liu, W. *et al.*, 2024; Ursachi, Oroian e Spinei, 2024).

1.1.1.6 *Biodegradabilidade*

A biodegradabilidade é a capacidade de um material ser decomposto pela ação de microrganismos, sendo determinada pela estrutura do polímero e influenciada por fatores intrínsecos ao material e condições ambientais às quais estão expostos (Haq *et al.*, 2025). A degradação pode ocorrer por vias abióticas (hidrólise, fotodegradação) e bióticas (enzimáticas, que podem ser aeróbicas ou anaeróbicas) (Haq *et al.*, 2025).

Para serem considerados materiais biodegradáveis, devem degradar em cerca de 1 a 2 meses sob condições de compostagem (Cheng *et al.*, 2024). Critérios internacionais avaliam a biodegradação e compostabilidade de materiais de embalagens, considerando uma conversão de mais de 90% de carbono em CO₂, em menos de 6 meses, desintegração física de mais de 90% em pedaços de 2mm em menos de 3 meses, ausência de ecotoxicidade e qualidade do composto gerado (Cheng *et al.*, 2024).

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROALIMENTARES

A crescente pressão sobre os recursos naturais e a intensificação da poluição ambiental emergiram como questões críticas que demandam soluções urgentes em escala global. Por muitos anos, a interdependência entre o uso racional dos recursos naturais e os limites do desenvolvimento econômico tem sido uma preocupação central. Embora a industrialização nos últimos dois séculos tenha trazido benefícios inegáveis à sociedade, o modelo de desenvolvimento industrial tradicional frequentemente esteve atrelado ao crescimento material desenfreado e à consequente produção de resíduos, negligenciando a capacidade finita dos recursos terrestres e do ambiente. Nesse contexto, torna-se imperativo vincular o desenvolvimento industrial sustentável ao uso igualmente sustentável dos recursos naturais (Pomoni *et al.*, 2024).

Diante do esgotamento de recursos e das alterações climáticas globais, a implementação de uma economia circular tem ganhado destaque como um paradigma capaz de transformar o sistema econômico de um fluxo linear (extrair-produzir-descartar) para um modelo circular. Este novo modelo preconiza a extensão da vida útil dos recursos mediante a reutilização de materiais e a reciclagem ou remanufatura de produtos. A utilização de tecnologias modernas e práticas profissionais eficazes no aproveitamento de resíduos agrícolas, seus subprodutos e derivados contribui positivamente para a concretização da circularidade (Pomoni *et al.*, 2024). O setor agroalimentar, em particular, pode se beneficiar enormemente dessa abordagem, reintegrando resíduos na cadeia produtiva e reduzindo o alarmante problema do desperdício de alimentos (Krzywonos, Difonzo e Pasqualone, 2025).

Os setores agrícola e alimentício estão entre os maiores geradores de resíduos em nível mundial. Esses resíduos e subprodutos alimentares originam-se de diversas

etapas, incluindo processos de fabricação, processamento, pré-tratamento e maturação de alimentos e bebidas (Krzywonos, Difonzo e Pasqualone, 2025). Estima-se que resíduos como cascas, polpas, sementes, bagaço e tortas de óleo representem cerca de 30 a 50% do peso total dos alimentos processados (Bhargava *et al.*, 2020). O rápido crescimento populacional global, projetado para atingir 9,8 bilhões de pessoas até 2050, intensifica a pressão por maior produção de alimentos e, concomitantemente, por soluções inovadoras para a gestão dos resíduos gerados (Dejene, 2025).

O cultivo intensivo e o processamento de alimentos produzem volumes substanciais de resíduos orgânicos e biomassa, que, se não gerenciados adequadamente, podem impor desafios significativos de descarte e impactar negativamente o meio ambiente e a sociedade. As indústrias de processamento de frutas e vegetais, por exemplo, geram milhões de toneladas de resíduos anualmente, com perdas significativas ocorrendo em todas as etapas da cadeia (Dejene, 2025). Esses resíduos, frequentemente compostos por cascas, bagaço e sementes, muitas vezes são destinados a aterros sanitários ou descartados de forma inadequada, resultando em riscos ambientais como a emissão de gases de efeito estufa (responsáveis por aproximadamente 21-37% das emissões totais do setor agroalimentar), odores desagradáveis, proliferação de patógenos e contaminação do solo e da água (Dejene, 2025).

Apesar dos desafios ambientais que representam, os resíduos agroalimentares são ricos em compostos de alto valor. Sua composição frequentemente inclui níveis significativos de proteínas, carboidratos (como celulose, hemicelulose e pectina), lipídios, minerais, vitaminas, lignina, pigmentos, fibras alimentares e diversos outros fitoquímicos e compostos bioativos, como antioxidantes (Ahmad, Esposito e Cirillo, 2024; Bhargava *et al.*, 2020; Dejene, 2025; Sarker *et al.*, 2024).

Nesse sentido, o conceito de valorização de resíduos, como a transformação de materiais antes considerados descartáveis em produtos de valor agregado, apresenta-se como uma abordagem sustentável e estratégica para a gestão de recursos (Dejene, 2025). Avanços recentes em ciência e tecnologia têm viabilizado a conversão desses subprodutos em diversas aplicações de alto valor, tais como compostos biologicamente ativos, ingredientes funcionais, pigmentos, enzimas,

ácidos, biocombustíveis e, crucialmente para o presente estudo, materiais de embalagem ecológicos e biopolímeros (Krzywonos, Difonzo e Pasqualone, 2025; Kumar Gupta *et al.*, 2024; Sarker *et al.*, 2024). A conversão de resíduos agrícolas em produtos de valor agregado oferece uma solução dupla: mitiga a poluição causada tanto por plásticos sintéticos quanto pelo acúmulo dos próprios resíduos agrícolas (Mandal *et al.*, 2024).

A valorização de resíduos alimentares, que de outra forma não teriam valor econômico, pode tornar-se uma opção economicamente vantajosa, ao mesmo tempo em que promove materiais de embalagem sustentáveis e ambientalmente corretos (Bhargava *et al.*, 2020). Priorizar o aproveitamento desses fluxos de resíduos é fundamental não apenas por suas vantagens técnicas em processos de valorização, mas também para atender à necessidade urgente de soluções que minimizem o desperdício em toda a cadeia de suprimentos alimentares, apoiando práticas de produção e consumo mais circulares e sustentáveis (Marrocchi, 2025). O desenvolvimento de filmes a partir de resíduos agroalimentares alinha-se perfeitamente aos conceitos da economia circular, contribuindo para a criação de soluções inovadoras para a indústria de embalagens e para a competitividade do setor alimentício, que pode reduzir seu impacto ambiental ao incorporar subprodutos em novos

Nesse contexto de valorização, diversos subprodutos da agroindústria brasileira e mundial ganham destaque por seu potencial como fontes de biopolímeros e outros compostos de interesse. A casca e entrecasca da mandioca, por exemplo, um resíduo abundante da industrialização deste tubérculo, apresenta-se como uma fonte promissora de amido. Da mesma forma, resíduos do processamento de frutas, como cascas e bagaços, são reconhecidos como matérias-primas valiosas para a extração de pectina, um polissacarídeo com importantes propriedades funcionais. Similarmente, a torta ou farelo de semente de girassol, um coproduto da extração de óleo, é rica em proteínas com potencial para aplicação em novos materiais. Adicionalmente, a valorização de recursos nativos, como o óleo extraído do fruto do buriti, cujo aproveitamento integral e sustentável pode fornecer componentes bioativos e funcionais para os filmes, complementa a busca por ingredientes de fontes renováveis.

FONTES POLIMÉRICAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE FILMES

A escolha da fonte polimérica é um fator determinante na concepção de filmes biodegradáveis, pois a natureza dessas macromoléculas influencia diretamente as propriedades estruturais, mecânicas e de barreira do material final. Polímeros são, por definição, macromoléculas constituídas por unidades monoméricas que se repetem, podendo se organizar em estruturas lineares, ramificadas ou reticuladas. Polímeros lineares e ramificados frequentemente exibem comportamento termoplástico, amolecendo e fluindo sob aquecimento, uma característica relevante para o processamento de filmes (Prajapati *et al.*, 2013).

No contexto da sustentabilidade e da busca por alternativas aos plásticos convencionais, os biopolímeros têm ganhado destaque significativo. Estes são polímeros de origem biológica e inerentemente biodegradáveis, geralmente produzidos a partir de matérias-primas renováveis, como a biomassa (Suderman, Isa e Sarbon, 2018). A utilização de biopolímeros está alinhada com a valorização de recursos naturais e, crucialmente, com o aproveitamento de resíduos e coprodutos dos setores agrícola e alimentício, onde são frequentemente encontrados em abundância (Butler *et al.*, 2023). Esta abordagem não só confere um destino nobre a materiais antes subutilizados, mas também contribui para a redução das emissões de dióxido de carbono e para a transição rumo a uma economia mais circular (Suderman, Isa e Sarbon, 2018).

Dentre a vasta gama de biopolímeros com potencial para o desenvolvimento de filmes, destacam-se os polissacarídeos e as proteínas, devido à sua abundância, biodegradabilidade e, em muitos casos, biocompatibilidade (He *et al.*, 2025; Suderman, Isa e Sarbon, 2018). Embora outros biomateriais como lipídios e certos poliésteres também possam ser empregados, os polissacarídeos e as proteínas formam a base de muitas pesquisas e aplicações em embalagens de alimentos, inclusive na forma de filmes comestíveis (Suderman, Isa e Sarbon, 2018). A estrutura molecular específica desses polímeros naturais, sejam eles polissacarídeos ou proteínas, dita muitas de suas funcionalidades e potencial de formação de filme (He *et al.*, 2025).

A qualidade e as características de um filme biodegradável são intrinsecamente ligadas aos materiais de partida. Estes biopolímeros podem ser utilizados de forma

isolada para a confecção de filmes ou, como estratégia para otimizar ou conferir novas propriedades, podem ser combinados em conjugados poliméricos (Suderman, Isa e Sarbon, 2018). A mistura de dois ou mais polímeros, bem como a aplicação de modificações químicas ou físicas às matérias-primas e o emprego de novas técnicas de síntese, representam abordagens para aprimorar propriedades como estabilidade térmica, resistência à tração e taxa de degradação (Adhikary *et al.*, 2023). Embora conjugados binários possam promover melhorias, elas também podem alterar outras características do filme, como propriedades reológicas e solubilidade em água. Conjugados ternários e a combinação de polissacarídeos com outros polímeros também são exploradas para se alcançar um balanço otimizado de propriedades, com amplas aplicações vislumbradas nos setores de embalagens de alimentos, farmacêutico e biomédico (Adhikary *et al.*, 2023). As subseções seguintes detalharão as características e o potencial dos polissacarídeos e das proteínas vegetais como matrizes poliméricas para o desenvolvimento de filmes biodegradáveis.

Polissacarídeo como matriz polimérica

Dentre as fontes poliméricas de origem natural, os polissacarídeos têm recebido considerável atenção e experimentado uma demanda crescente para a produção de filmes de alta qualidade destinados a embalagens, especialmente no setor alimentício. Esta classe de biopolímeros pode ser obtida de uma vasta gama de fontes, incluindo plantas, animais, organismos marinhos (como algas), microrganismos e fungos (Adhikary *et al.*, 2023). A abundância na natureza, a biodegradabilidade inerente e o perfil de baixa toxicidade são atributos que posicionam os polissacarídeos como alternativas promissoras e ambientalmente amigáveis aos polímeros sintéticos convencionais (Adhikary *et al.*, 2023).

Quimicamente, os polissacarídeos são macromoléculas de carboidratos, formadas por unidades de monossacarídeos unidas predominantemente por ligações glicosídicas (Adhikary *et al.*, 2023). Embora a D-glicose seja a unidade monomérica mais comum, outros açúcares como D-frutose, D-galactose, L-galactose, D-manose, L-arabinose e D-xilose, bem como derivados de monossacarídeos (a exemplo de amino-açúcares e ácidos urônicos), também compõem a estrutura de diversos polissacarídeos (Prajapati *et al.*, 2013). Exemplos notáveis de polissacarídeos empregados no desenvolvimento de filmes e revestimentos comestíveis incluem o

amido e seus derivados, derivados da celulose, alginato, pectina, quitosana e carragenina (Jahangiri, Mohanty e Misra, 2024).

A versatilidade dos polissacarídeos é evidenciada por sua ampla gama de propriedades funcionais, que incluem não apenas a capacidade de formação de filme, mas também atributos como espessamento, gelificação, emulsificação, estabilização, ligação de água e formação de estrutura (Adhikary *et al.*, 2023; Liu, W. *et al.*, 2024). Essas características são cruciais para diversas aplicações, incluindo a prevenção da perda de umidade e aroma e o controle do transporte de solutos em alimentos embalados (Adhikary *et al.*, 2023).

Quando processados na forma de filmes, os polissacarídeos frequentemente exibem uma barreira eficaz a gases como oxigênio e dióxido de carbono, especialmente sob condições de baixa umidade relativa. Esse comportamento é atribuído à sua estrutura compacta, rica em ligações de hidrogênio (Jahangiri, Mohanty e Misra, 2024). No entanto, a natureza intrinsecamente hidrofílica da maioria dos polissacarídeos resulta em uma elevada afinidade pela água, o que compromete sua eficácia como barreira à umidade e pode alterar suas propriedades mecânicas na presença de ambientes úmidos. Ademais, filmes baseados unicamente em polissacarídeos tendem a ser relativamente rígidos e quebradiços (Jahangiri, Mohanty e Misra, 2024). Essas limitações frequentemente requerem a adoção de estratégias de modificação, como a incorporação de plastificantes ou a formação de conjugados com outros polímeros, para otimizar a flexibilidade, a resistência à umidade e o desempenho geral dos filmes, tornando-os mais aptos para as exigências de embalagens.

1.1.1.7 Goma de Alfarroba (LBG)

A goma de alfarroba, também conhecida pela sigla LBG (do inglês, Locust Bean Gum), é um polissacarídeo natural extraído do endosperma das sementes da alfarrobeira (*Ceratonia siliqua* L.), uma leguminosa típica de regiões mediterrâneas. O processo de obtenção da LBG envolve a remoção da casca externa da semente, geralmente por tratamento termomecânico ou químico, seguida da separação do gérmen e da moagem do endosperma, resultando em um pó de coloração branca a branco-cremosa (Barak e Mudgil, 2014).

Estruturalmente, a LBG é uma galactomanana, um polissacarídeo neutro, não amiláceo e de alto peso molecular, que constitui mais de 85% do peso das sementes (Prajapati *et al.*, 2013; Sana *et al.*, 2024). As galactomananas são caracterizadas por uma cadeia principal linear de unidades de β -(1 $\rightarrow$ 4)-D-manopirranose, à qual se ligam, por meio de ligações α -(1 $\rightarrow$ 6), unidades laterais de α -D-galactopirranose. Essas ramificações de galactose não são distribuídas uniformemente ao longo da cadeia de manose (Barak e Mudgil, 2014).

A LBG se distingue de outras galactomananas comerciais, como a goma guar e a goma tara, por apresentar a menor proporção de galactose, com uma razão média de manose para galactose (M:G) de aproximadamente 3,5:1 (Barak e Mudgil, 2014). Essa baixa substituição por galactose influencia diretamente propriedades como a solubilidade em água; a LBG, por exemplo, exibe baixa solubilidade à temperatura ambiente, requerendo aquecimento para atingir a máxima dissolução e, conseqüentemente, sua ótima capacidade de ligação à água (Barak e Mudgil, 2014). A proporção exata de D-galactose para D-manose pode variar dependendo da origem do material e das condições de cultivo da planta (Prajapati *et al.*, 2013).

As propriedades físico-químicas das galactomananas, incluindo a LBG, são fortemente influenciadas tanto pelo teor de galactose quanto pela distribuição dessas unidades ao longo da cadeia principal de manose. Cadeias laterais de galactose mais longas, por exemplo, tendem a promover interações sinérgicas mais fortes com outros polímeros e, assim, uma maior funcionalidade (Prajapati *et al.*, 2013). Uma característica notável da LBG é sua capacidade de formar soluções aquosas altamente viscosas mesmo em concentrações relativamente baixas. Além disso, por ser um polímero neutro, sua viscosidade e solubilidade são pouco afetadas por variações de pH dentro de uma ampla faixa, tipicamente entre 3 e 11 (Barak e Mudgil, 2014; Sana *et al.*, 2024).

Historicamente, a LBG foi uma das primeiras galactomananas a ser utilizada como aditivo em diversas indústrias, como a alimentícia (onde atua como espessante, estabilizante de emulsões e substituto de gordura), de papel, têxtil, farmacêutica e cosmética (Barak e Mudgil, 2014). Mais recentemente, o interesse na LBG tem se expandido para o desenvolvimento de filmes para embalagens de alimentos, onde tem

demonstrado potencial promissor na preservação de diversos produtos, incluindo o monitoramento do frescor de itens perecíveis (Chen *et al.*, 2025).

A LBG exibe boa miscibilidade com uma variedade de outros biopolímeros, uma propriedade vantajosa na formulação de filmes de conjugados. A extensão dessa miscibilidade é um fator crítico que determina as interações entre os diferentes componentes no filme compósito, influenciando diretamente suas propriedades mecânicas finais (Chen *et al.*, 2025). Essa capacidade de interagir e formar conjugados eficazes é particularmente relevante, considerando-se que filmes baseados unicamente em polissacarídeos podem apresentar limitações, como mencionado anteriormente.

1.1.1.8 Amido de Mandioca

O amido, um biopolímero naturalmente abundante e de baixo custo, destaca-se como uma matéria-prima essencial para a criação de produtos ecologicamente corretos, sendo seu uso na produção de filmes biodegradáveis para aplicações como embalagens de alimentos uma prática consolidada na indústria de bioplásticos (Haq *et al.*, 2025; Henning *et al.*, 2022). As vantagens dos bioplásticos à base de amido são numerosas, originando-se da ampla disponibilidade de suas fontes, como mandioca, milho e batata, e da relativa simplicidade dos processos de fabricação, o que contribui para a viabilidade econômica (Haq *et al.*, 2025).

Quimicamente, o amido é o segundo biopolímero mais abundante na natureza, constituído por unidades de D-glicose unidas por ligações glicosídicas (Nilsson *et al.*, 2025). Ele se apresenta na forma de grânulos com estrutura semicristalina, o que dificulta sua solubilização em água fria (Nilsson *et al.*, 2025). Esses grânulos são compostos por dois polissacarídeos principais: a amilose, um polímero predominantemente linear com ligações α -(1 $\rightarrow$ 4) e que representa cerca de 20-25% da composição da maioria dos amidos; e a amilopectina, uma molécula extensamente ramificada com cadeias lineares de glicose unidas por ligações α -(1 $\rightarrow$ 4) e pontos de ramificação α -(1 $\rightarrow$ 6), constituindo 70-80% do amido (Henning *et al.*, 2022; Matheus *et al.*, 2023). A proporção entre amilose e amilopectina, bem como o tamanho e formato dos grânulos, variam conforme a fonte botânica e os estágios de desenvolvimento da planta (Henning *et al.*, 2022).

A interação entre amilose e amilopectina, com suas camadas concêntricas semicristalinas e amorfas, influencia a taxa de absorção de água; o aquecimento de suspensões de amido em água leva à ruptura das ligações de hidrogênio que estabilizam as estruturas de dupla hélice da amilose e das cadeias laterais da amilopectina, um processo conhecido como gelatinização, essencial para a formação de filmes (Adhikary *et al.*, 2023).

Filmes à base de amido e seus derivados são reconhecidos por sua boa capacidade de formação, alta solubilidade em água (após gelatinização), e, frequentemente, por apresentarem propriedades mecânicas e de transparência consideradas interessantes (Jahangiri, Mohanty e Misra, 2024). Contudo, uma das principais desvantagens desses filmes é sua natureza hidrofílica acentuada, derivada dos numerosos grupos hidroxila presentes em sua estrutura. Essa característica resulta em uma alta permeabilidade ao vapor d'água (WVTR), o que pode comprometer a proteção de alimentos embalados ao alterar o ambiente interno da embalagem, favorecendo o desenvolvimento microbiano e a perda de peso do produto (Henning *et al.*, 2022; Jahangiri, Mohanty e Misra, 2024).

Adicionalmente, o amido por si só não possui propriedades termoplásticas, e filmes produzidos apenas com amido tendem a ser quebradiços. Para contornar essa limitação e melhorar a processabilidade e flexibilidade, a adição de plastificantes à solução filmogênica é uma prática comum. Os plastificantes também desempenham um papel importante na prevenção da retrogradação do amido – a reorganização das cadeias de amilose e amilopectina em uma estrutura semicristalina mais ordenada durante o armazenamento do filme, o que pode levar ao aumento da fragilidade (Henning *et al.*, 2022).

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), nativa da América do Sul, é uma cultura de grande importância nutricional e econômica, servindo como alimento e matéria-prima para diversos produtos processados, incluindo o amido de mandioca, também conhecido como fécula ou tapioca (Cruz *et al.*, 2021; Matheus *et al.*, 2023). Classificada como a terceira fonte mais significativa de energia alimentar em regiões tropicais, a mandioca é crucial para a segurança alimentar (Borku, Tora e Masha, 2025). O Brasil, particularmente nas regiões Norte e Nordeste, destaca-se na produção desta cultura (Zhu, 2015). O amido, principal componente da raiz da

mandioca (podendo atingir até 80% do seu peso seco), é altamente valorizado por sua pureza e versatilidade (Borku, Tora e Masha, 2025; Zhu, 2015).

No entanto, o processamento industrial da mandioca para extração de amido gera um volume considerável de resíduos. Estima-se que para cada tonelada de mandioca processada, são gerados resíduos líquidos e uma quantidade significativa de resíduos sólidos, como o bagaço fibroso e, principalmente, as cascas (Matheus *et al.*, 2023). As cascas podem representar de 20 a 35% do peso total da raiz processada, constituindo o resíduo sólido mais abundante e um desafio ambiental considerável (Oghenejoboh *et al.*, 2021). Diante da crescente demanda por amido para fins industriais e da necessidade de fontes mais sustentáveis que não compitam diretamente com a alimentação humana e animal, a extração de amido a partir desses resíduos, como as cascas de mandioca, surge como uma alternativa promissora e alinhada aos princípios da economia circular (Amobonye *et al.*, 2025).

A utilização do amido de mandioca, inclusive o proveniente de suas cascas, para a produção de filmes biodegradáveis apresenta vantagens como boa capacidade filmogênica e transparência (Matheus *et al.*, 2023). Contudo, para que esses filmes sejam competitivos e adequados para aplicações em embalagens alimentícias, é frequentemente necessário aprimorar suas propriedades mecânicas e de barreira. Estratégias para alcançar tais melhorias incluem o uso de amido modificado e, principalmente, a incorporação de outros componentes na solução formadora do filme, como plastificantes (glicerol, sorbitol e óleos vegetais), nanopartículas ou a formação de conjugados com outros biopolímeros ou mesmo polímeros sintéticos (Henning *et al.*, 2022; Matheus *et al.*, 2023). A combinação com lipídios, por exemplo, é um método explorado para reduzir a hidrofiliabilidade dos filmes de amido, requerendo a emulsificação da solução filmogênica para uma dispersão homogênea das gotículas lipídicas na matriz polimérica (Henning *et al.*, 2022).

1.1.1.9 *Pectina*

A pectina é um heteropolissacarídeo estrutural complexo, encontrado principalmente na lamela média e na parede celular primária de plantas terrestres, e sua obtenção a partir de resíduos da industrialização de frutas, como cascas de citros (que respondem por cerca de 85,5% da produção comercial), bagaço de maçã (14,0%), e também de outras fontes como casca de kiwi, melão e romã, tem ganhado

destaque crescente (He *et al.*, 2025; Jahangiri, Mohanty e Misra, 2024; Syarifuddin *et al.*, 2025). Essa abordagem não só valoriza subprodutos da indústria de alimentos, mas também atende a um mercado de pectina em expansão, impulsionado pela alta demanda nos setores alimentício, farmacêutico e outras aplicações multifuncionais (Syarifuddin *et al.*, 2025). A similaridade química da pectina com outros biopolímeros filmogênicos, como o alginato, e sua abundância em resíduos, reforçam seu potencial (Butler *et al.*, 2023).

A estrutura molecular da pectina é predominantemente composta por unidades de ácido D-galacturônico (GalA) unidas por ligações α -(1 $\rightarrow$ 4), mas também pode conter outros açúcares como ramnose, galactose, arabinose e manose, em menores proporções (He *et al.*, 2025). A complexidade estrutural da pectina reside na organização desses monômeros em diferentes domínios polissacarídicos: o homogalacturonano (HG), o ramnogalacturonano I (RG-I) e o ramnogalacturonano II (RG-II) (Syarifuddin *et al.*, 2025). O HG, que constitui cerca de 50-70% da pectina, é uma cadeia linear de ácido poli- α -(1 $\rightarrow$ 4)-D-galacturônico, frequentemente referida como a região "lisa" da molécula (Butler *et al.*, 2023; Roy *et al.*, 2023). O RG-I, representando 20-35% da pectina, consiste em uma cadeia principal repetitiva do dissacarídeo $[\rightarrow 4)\text{-}\alpha\text{-D-GalA-(1}\rightarrow 2)\text{-}\alpha\text{-L-Rha-(1}\rightarrow n]$, com cadeias laterais de diversos açúcares neutros ligadas aos resíduos de ramnose, conferindo a esta a designação de região "rugosa" (Butler *et al.*, 2023; Roy *et al.*, 2023). O RG-II, embora compreenda apenas cerca de 10% da pectina, é o domínio mais complexo, consistindo em uma cadeia de HG com diversas e complexas cadeias laterais (Butler *et al.*, 2023; Roy *et al.*, 2023). Outros domínios menos expressos, como o xilogalacturonano (XGA) e o apiogalacturonano (AP), também podem estar presentes (Roy *et al.*, 2023). Essa variabilidade estrutural, influenciada pela fonte da pectina, estágio de desenvolvimento da planta e métodos de extração, confere diferentes propriedades físico-químicas às pectinas (Butler *et al.*, 2023; He *et al.*, 2025).

Uma característica fundamental da pectina é o grau de esterificação (DE) ou metoxilação (DM) de seus grupos carboxila do ácido galacturônico com metanol. Com base no DE, as pectinas são classificadas em pectinas de alta metoxilação (HM), com $\text{DE} \geq 50\%$, e pectinas de baixa metoxilação (LM), com $\text{DE} < 50\%$ (Butler *et al.*, 2023; Syarifuddin *et al.*, 2025). Esse parâmetro, juntamente com o peso molecular e a distribuição de cargas ao longo da cadeia, influencia diretamente a solubilidade e,

especialmente, a capacidade e o mecanismo de gelificação da pectina, uma de suas propriedades mais importantes (Roy *et al.*, 2023). As pectinas HM formam géis em presença de altas concentrações de açúcar e em meio ácido, enquanto as pectinas LM requerem a presença de íons divalentes, como o cálcio, para gelificar (Roy *et al.*, 2023).

A extração da protopectina insolúvel da parede celular vegetal e sua conversão em pectina solúvel pode ser realizada por métodos convencionais (hidrólise ácida) ou não convencionais (como extração assistida por micro-ondas, ultrassom ou enzimas), sendo que os parâmetros de extração (pH, temperatura, tempo, etc.) afetam significativamente o rendimento, a pureza e as características estruturais e funcionais da pectina obtida (Durga Gomathi Arumuganainar *et al.*, 2025; Kalita *et al.*, 2025; Syarifuddin *et al.*, 2025).

Devido à sua biodegradabilidade, biocompatibilidade e atoxicidade, a pectina tem sido amplamente explorada na produção de filmes e revestimentos comestíveis para alimentos (Syarifuddin *et al.*, 2025). Revestimentos à base de pectina podem minimizar o amadurecimento e a deterioração pós-colheita de frutas e vegetais, atuando como barreira à troca gasosa e à produção de etileno (Jahangiri, Mohanty e Misra, 2024). Além disso, a pectina exibe atividade antioxidante, relacionada à presença de grupos doadores de elétrons em sua estrutura e, em alguns casos, ao seu peso molecular, com fragmentos de pectina de baixo peso molecular (oligossacarídeos de pectina - POS) mostrando capacidade de sequestrar radicais livres (Roy *et al.*, 2023).

No entanto, filmes compostos unicamente por pectina apresentam limitações significativas para algumas aplicações em embalagens. Sua natureza hidrofílica resulta em altas taxas de transmissão de vapor d'água e oxigênio, o que pode levar à alta umidade superficial em alimentos embalados e reduzir sua vida útil (Syarifuddin *et al.*, 2025). Ademais, filmes de pectina pura tendem a ser fortes e rígidos, mas também quebradiços e altamente permeáveis (Butler *et al.*, 2023). Para superar esses desafios e aprimorar as propriedades dos filmes, a pectina é frequentemente incorporada em conjugados com outros biopolímeros ou combinada com agentes ativos funcionais e plastificantes. A adição de plastificantes, por exemplo, visa diminuir as interações intermoleculares entre as cadeias poliméricas, resultando em filmes

mais flexíveis e processáveis, características desejáveis para materiais de embalagem (Butler *et al.*, 2023; Syarifuddin *et al.*, 2025).

Proteínas vegetais como matriz polimérica

Além dos polissacarídeos, as proteínas representam outra importante classe de biopolímeros naturais com grande potencial para o desenvolvimento de filmes biodegradáveis. Sua estrutura molecular inerentemente complexa, resultante da sequência específica de cerca de 20 tipos diferentes de aminoácidos, confere às proteínas uma notável capacidade para estabelecer interações intra e intermoleculares diversificadas, como ligações de hidrogênio, iônicas e covalentes (Chen *et al.*, 2024; Suderman, Isa e Sarbon, 2018). Essa característica é fundamental para a formação de redes tridimensionais coesas, essenciais na estrutura de um filme. Para tanto, durante o processo de elaboração do filme, as proteínas globulares (estruturas esféricas dobradas, solúveis em água e outros solventes) geralmente passam por um processo de desnaturação, induzido por calor, solventes, ácidos ou bases, que promove o desenovelamento de suas cadeias polipeptídicas. Essa alteração conformacional expõe grupos funcionais antes internos, permitindo novas interações que resultam na formação de filmes viscoelásticos e coesos (Aggarwal, Kathuria e Singh, 2025; Li *et al.*, 2022).

As proteínas têm sido extensivamente pesquisadas como matérias-primas para biomateriais, especialmente em aplicações que se beneficiam da solubilidade em água e/ou alta interação com a água, levando a plásticos facilmente degradáveis por hidrólise (Nilsson *et al.*, 2025). A rápida biodegradação das proteínas em diversas condições (hidrolítica, enzimática, compostagem) e a natureza não tóxica de seus produtos de degradação – peptídeos curtos e aminoácidos, que podem servir como nutrientes para plantas – são vantagens ambientais significativas (Nilsson *et al.*, 2025).

Um interesse particular tem emergido no uso de proteínas de origem vegetal, como as extraídas de leguminosas (soja, ervilha), cereais (glúten, zeína) e sementes oleaginosas (girassol, chia, linhaça) (Cheng *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2023). Essa preferência é impulsionada pela possibilidade de valorização da biomassa proveniente de coprodutos das indústrias agroalimentares, como os farelos resultantes da extração de óleo de sementes oleaginosas (Kaur e Ghoshal, 2022; Nilsson *et al.*,

2025). Tais farelos, ricos em proteínas e fibras, frequentemente subutilizados como ração animal ou descartados, representam uma fonte abundante e de baixo custo para a obtenção de proteínas (Kaur e Ghoshal, 2022). Adicionalmente, as proteínas vegetais tendem a apresentar menor potencial alergênico em humanos em comparação com algumas proteínas de origem animal, e seu uso permite a rotulagem de produtos como veganos, acessando um mercado consumidor crescente (Nilsson *et al.*, 2025).

Filmes à base de proteínas geralmente exibem excelentes propriedades de barreira a gases como oxigênio e dióxido de carbono, especialmente sob baixa umidade relativa, superando frequentemente os filmes de polissacarídeos nesse aspecto Cheng *et al.*, 2024; Suderman, Isa e Sarbon, 2018; Yadav *et al.*, 2025). Também podem apresentar propriedades mecânicas superiores às de muitos filmes de polissacarídeos (Suderman, Isa e Sarbon, 2018). No entanto, assim como os polissacarídeos, a natureza predominantemente hidrofílica das proteínas confere aos seus filmes uma alta sensibilidade à umidade e, conseqüentemente, uma fraca barreira ao vapor d'água (Cheng *et al.*, 2024). Além disso, embora possam ter boa resistência mecânica, filmes proteicos puros tendem a ser quebradiços e suscetíveis a rachaduras, devido à alta densidade de energia coesiva do polímero (Yadav *et al.*, 2025).

Para mitigar essas limitações e otimizar o desempenho dos filmes proteicos, diversas estratégias são empregadas. A incorporação de plastificantes, como o glicerol, é uma abordagem comum para aumentar a mobilidade das cadeias poliméricas, reduzir a fragilidade e melhorar a viscoelasticidade e extensibilidade das redes proteicas (Cheng *et al.*, 2024). A combinação de proteínas com outros biopolímeros, como lipídios ou polissacarídeos, também é explorada para modular as propriedades finais do material (Cheng *et al.*, 2024). A seguir, será detalhada a proteína de semente de girassol, uma fonte vegetal promissora investigada neste trabalho.

1.1.1.10 Proteína Isolada de Semente de Girassol (PISG)

A semente de girassol (*Helianthus annuus* L.), uma dicotiledônea da família Asteraceae, figura como a quarta oleaginosa mais produzida no mundo, com seu óleo sendo amplamente utilizado na alimentação humana e para fins oleoquímicos (Kaur e

Ghoshal, 2022). As sementes contêm teores significativos de proteína (21-50% em matéria seca, podendo chegar a 66% no farelo desengordurado), além de lipídios (34-55%) e fibras (Kaur e Ghoshal, 2022; Zhang *et al.*, 2023). Após a extração do óleo, seja por prensagem mecânica ou extração por solvente, obtém-se um resíduo sólido, torta ou farelo, que se apresenta como uma fonte concentrada e valiosa de proteínas (Kaur e Ghoshal, 2022). Este coproduto, frequentemente subutilizado como ração animal ou mesmo descartado, tem atraído considerável atenção como uma matéria-prima de baixo custo e ampla disponibilidade para a obtenção de proteínas com potencial para diversas aplicações, incluindo o desenvolvimento de biomateriais (Kaur e Ghoshal, 2022; Sara *et al.*, 2020).

As proteínas da semente de girassol são majoritariamente compostas por duas classes principais: as globulinas, conhecidas como heliantinina (fração 11S), que representam 60-80% do total proteico; e as albuminas, que constituem 25-35% (Kaur e Ghoshal, 2022; Sara *et al.*, 2020; Yadav *et al.*, 2025). A heliantinina é uma proteína oligomérica com peso molecular em torno de 300-350 kDa, cuja forma hexamérica predominante (11S) é composta por seis monômeros, cada um consistindo de uma cadeia polipeptídica ácida (32-44 kDa) e uma básica (21-27 kDa) unidas por pontes dissulfeto (Kaur e Ghoshal, 2022; Sara *et al.*, 2020). As albuminas de girassol (SFAs), por sua vez, são um grupo diverso de proteínas de baixo peso molecular (10-18 kDa), com um coeficiente de sedimentação de 2S, o que lhes confere caráter básico e boa solubilidade em água, pouco afetada por pH e força iônica (Kaur e Ghoshal, 2022).

O processo de extração do óleo das sementes de girassol, especialmente quando envolve altas temperaturas (comuns para aumentar o rendimento), pode levar à desnaturação das proteínas, resultando em frações com menor solubilidade e funcionalidade comprometida. Adicionalmente, a presença de compostos fenólicos, como o ácido clorogênico, na semente de girassol pode levar à formação de complexos com as proteínas, afetando suas propriedades funcionais, digestibilidade e causando escurecimento nos produtos derivados (Kaur e Ghoshal, 2022). Portanto, para a utilização da proteína de girassol em aplicações alimentícias ou na formulação de biomateriais, são frequentemente empregados processos para obtenção de concentrados ou isolados proteicos. Estes processos geralmente envolvem a extração das proteínas do farelo desengordurado em pH alcalino (onde a solubilidade é maior, podendo atingir até 90%), seguida de etapas de purificação e concentração, como a

precipitação isoelétrica, centrifugação e secagem (Kaur e Ghoshal, 2022; Sara *et al.*, 2020). A eficácia da extração e as propriedades finais da proteína isolada (como solubilidade, capacidade de retenção de água, propriedades emulsificantes e de formação de espuma) são influenciadas por diversos fatores, incluindo pH, força iônica, temperatura e razão sólido/líquido (Kaur e Ghoshal, 2022).

Apesar dos desafios relacionados à sua extração e funcionalidade inicial, estudos têm demonstrado que os isolados de proteína de semente de girassol possuem boas propriedades de formação de filme, resultando em materiais caracterizados por maciez e flexibilidade (Alves *et al.*, 2024). Embora as propriedades de gelificação e formação de espuma possam ser inicialmente limitadas, elas podem ser aprimoradas por meio de modificações químicas ou enzimáticas (Yadav *et al.*, 2025).

Assim como outros filmes proteicos, aqueles baseados em proteína de girassol podem se beneficiar da incorporação de plastificantes para melhorar a flexibilidade e processabilidade, e de outros aditivos, como agentes antimicrobianos e antioxidantes, para conferir funcionalidades específicas (Cheng *et al.*, 2024; Yadav *et al.*, 2025). A combinação com outros biopolímeros, como polissacarídeos e óleos, também é uma estratégia promissora para modular propriedades de barreira, especialmente ao vapor d'água, uma limitação comum em filmes hidrofílicos (Yadav *et al.*, 2025). Contudo, as interações específicas entre proteínas de girassol e polissacarídeos, particularmente os não iônicos com alto grau de substituição, ainda são pouco exploradas na literatura, indicando um campo fértil para pesquisa e desenvolvimento (Alves *et al.*, 2024). A valorização deste coproduto abundante para a obtenção de filmes biodegradáveis representa, portanto, uma área de investigação relevante, com potencial para contribuir para soluções de embalagem mais sustentáveis.

AGENTE PLASTIFICANTE

A formulação de filmes para embalagens, especialmente aqueles baseados em biopolímeros como polissacarídeos e proteínas, frequentemente requer a inclusão de componentes aditivos para otimizar suas propriedades e funcionalidade. Dentre esses, os agentes plastificantes desempenham um papel crucial, sendo frequentemente indispensáveis para conferir aos filmes as características mecânicas adequadas para sua aplicação e manuseio (Farhan *et al.*, 2025; Jahangiri, Mohanty e

Misra, 2024). Biopolímeros, em seu estado puro, tendem a formar filmes rígidos e quebradiços devido às fortes interações intermoleculares entre suas cadeias. Os plastificantes são, portanto, adicionados para mitigar essa fragilidade, aumentar a flexibilidade e melhorar a processabilidade do material (Farhan *et al.*, 2025; Suderman, Isa e Sarbon, 2018).

Plastificantes são tipicamente moléculas de baixo peso molecular e baixa volatilidade que, quando incorporadas a uma matriz polimérica, modificam suas propriedades físicas e mecânicas (Suderman, Isa e Sarbon, 2018). O mecanismo fundamental da plastificação envolve a inserção dessas moléculas entre as cadeias do polímero. Ao se posicionarem nesse espaço intersticial, os plastificantes reduzem a densidade das interações diretas polímero-polímero (como ligações de hidrogênio), aumentam o volume livre no sistema e facilitam a mobilidade segmentar das cadeias poliméricas. Como consequência, observa-se uma redução na rigidez do material, uma diminuição da sua temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura na qual o polímero passa de um estado vítreo e quebradiço para um estado mais maleável, e um aumento no alongamento na ruptura, conferindo maior flexibilidade e elasticidade ao filme (Farhan *et al.*, 2025; Suderman, Isa e Sarbon, 2018).

A eficácia de um plastificante é fortemente dependente de sua compatibilidade com o polímero. Idealmente, deve haver uma boa interação entre o plastificante e a matriz polimérica para garantir uma dispersão homogênea e evitar a exsudação do plastificante ao longo do tempo (Farhan *et al.*, 2025). A polaridade das moléculas é um fator determinante nessa compatibilidade; plastificantes polares são geralmente mais eficazes em polímeros polares, e a localização do grupo polar em uma cadeia alifática (mais móvel) pode ser vantajosa em relação a uma aromática (Suderman, Isa e Sarbon, 2018).

A natureza do plastificante, seja ele hidrofílico ou hidrofóbico, também influencia significativamente as propriedades do filme. Plastificantes hidrofílicos (como polióis, mono e dissacarídeos), que são comuns em filmes de biopolímeros, podem aumentar a difusão de água na matriz se usados em altas concentrações, embora também possam atrair moléculas de água que contribuem para o efeito plastificante. Por outro lado, plastificantes hidrofóbicos podem reduzir a absorção de água, mas correm o risco de separação de fases se não houver compatibilidade adequada, o que

pode levar à perda de flexibilidade ou ao aumento da permeabilidade ao vapor de água (Farhan *et al.*, 2025; Suderman, Isa e Sarbon, 2018).

É importante notar que a concentração do plastificante é um parâmetro crítico. Em baixas concentrações, alguns compostos podem atuar como antiplastificantes, resultando em um aumento da rigidez do filme. Portanto, a otimização da quantidade de plastificante é essencial para alcançar o nível desejado de flexibilidade e trabalhabilidade sem comprometer outras propriedades importantes do filme (Farhan *et al.*, 2025; Suderman, Isa e Sarbon, 2018). A escolha de um plastificante adequado, em uma concentração ótima, é fundamental na formulação de filmes biodegradáveis, pois uma seleção inadequada pode afetar negativamente o desempenho do material final (Farhan *et al.*, 2025).

Glicerol como plastificante convencional

O glicerol ($C_3H_8O_3$), quimicamente conhecido como propano-1,2,3-triol e comercialmente como glicerina, é um álcool poliidrico que se destaca pela presença de três grupos hidroxila em sua estrutura (Ben, Samsudin e Yhaya, 2022; Syarifuddin *et al.*, 2025). Em condições ambiente, apresenta-se como um líquido transparente, viscoso, incolor, inodoro e com acentuada natureza higroscópica, o que facilita a formação de ligações de hidrogênio com a umidade atmosférica. Essa característica, somada à sua miscibilidade com a água e ao seu alto ponto de ebulição (290 °C), classifica-o como um composto semivolátil, favorecendo sua compatibilidade e uso como plastificante em materiais para embalagens de alimentos (Ben, Samsudin e Yhaya, 2022). O glicerol pode ser obtido sinteticamente, embora mais comumente derive de fontes naturais, como da hidrólise ou transesterificação de triglicerídeos (óleos vegetais e gorduras animais), sendo um coproduto significativo da indústria oleoquímica e, notadamente, da produção de biodiesel (Ben, Samsudin e Yhaya, 2022).

Devido à sua estrutura e propriedades, o glicerol é amplamente reconhecido e utilizado como um plastificante convencional para uma vasta gama de biopolímeros hidrofílicos, incluindo polissacarídeos e proteínas (Ben, Samsudin e Yhaya, 2022). Sua eficácia em conferir flexibilidade a esses materiais reside na sua capacidade de reduzir as interações intermoleculares entre as cadeias poliméricas. As pequenas moléculas de glicerol se inserem entre as macromoléculas do polímero,

interrompendo as ligações de hidrogênio polímero-polímero e aumentando o espaçamento intermolecular. Isso resulta em maior mobilidade segmentar das cadeias, aumento do volume livre no sistema e, conseqüentemente, na redução da temperatura de transição vítrea (T_g) do material, tornando o filme menos rígido e mais extensível (Ben, Samsudin e Yhaya, 2022; Suderman, Isa e Sarbon, 2018). Diversas teorias, como a da lubricidade (glicerol atuando como lubrificante entre as cadeias), a teoria do gel (glicerol protegendo sítios de ligação polímero-polímero) e a teoria do volume livre, buscam explicar detalhadamente esses mecanismos de plastificação (Ben, Samsudin e Yhaya, 2022).

Apesar de sua eficácia como plastificante, o uso do glicerol apresenta limitações significativas que podem comprometer o desempenho dos filmes em determinadas aplicações. Um dos principais inconvenientes é sua elevada higroscopicidade. Embora a atração de moléculas de água possa contribuir para o efeito plastificante, ela também leva a uma acentuada absorção de umidade pelo filme em ambientes com alta umidade relativa. Isso resulta em uma drástica redução da propriedade de barreira ao vapor d'água do filme, além de poder alterar suas propriedades mecânicas, estabilidade dimensional e, em alguns casos, aumentar a sua pegajosidade (Ben, Samsudin e Yhaya, 2022; Farhan *et al.*, 2025).

Outro desafio relevante é a migração ou lixiviação do glicerol da matriz polimérica ao longo do tempo, especialmente em condições de alta umidade ou contato com líquidos. Por ser um plastificante externo (não ligado quimicamente ao polímero) e de baixo peso molecular, o glicerol pode difundir-se para a superfície do filme e, eventualmente, para o ambiente ou para o produto embalado. Essa perda de plastificante não apenas compromete a flexibilidade do filme, tornando-o progressivamente mais rígido e quebradiço, mas também pode conferir uma consistência oleosa à superfície do material e afetar a integridade da embalagem (Ben, Samsudin e Yhaya, 2022).

Adicionalmente, a concentração de glicerol na formulação do filme é crítica. Em baixas concentrações (inferiores a 10%), o glicerol pode exercer um efeito antiplastificante, ocupando os espaços livres nas regiões de contato polímero-polímero e restringindo a mobilidade das cadeias, o que paradoxalmente aumenta a rigidez e a fragilidade do filme. Por outro lado, concentrações excessivas de glicerol

(superiores a 50%) podem levar à superplastificação, resultando em filmes excessivamente pegajosos, com possível separação de fases devido à incompatibilidade e à incapacidade da matriz polimérica de reter o excesso de plastificante (Ben, Samsudin e Yhaya, 2022). Essas limitações intrínsecas ao glicerol, especialmente sua alta afinidade pela água e a instabilidade de sua permanência na matriz do filme, motivam a busca por plastificantes alternativos que possam oferecer um perfil de desempenho mais equilibrado para filmes biodegradáveis.

Óleos vegetais como plastificantes alternativos

As limitações apresentadas por plastificantes convencionais hidrofílicos, como o glicerol, notadamente sua alta afinidade pela água e a consequente redução da capacidade de barreira à umidade dos filmes biopoliméricos, têm impulsionado a pesquisa por aditivos alternativos. Nesse contexto, os lipídios, em particular os óleos vegetais, emergem como uma classe promissora de materiais devido à sua pronunciada natureza hidrofóbica, conferida por seus grupos químicos predominantemente apolares (Chen *et al.*, 2024; Farhan *et al.*, 2025). Os óleos vegetais são majoritariamente compostos por triglicerídeos, que são ésteres formados por glicerol e três cadeias de ácidos graxos, podendo estas ser saturadas ou insaturadas e de comprimentos (Sun, Weng e Zhang, 2024).

A incorporação de óleos vegetais em matrizes poliméricas hidrofílicas, como as de polissacarídeos e proteínas, visa primordialmente reduzir a sensibilidade à água desses materiais e melhorar suas propriedades de barreira ao vapor d'água (Cerqueira *et al.*, 2011; Cheng *et al.*, 2024). Ao conferir maior hidrofobicidade à superfície e à estrutura interna do filme, os óleos podem minimizar a absorção de umidade do ambiente, um fator crítico para a conservação de muitos produtos alimentícios (Aggarwal, Kathuria e Singh, 2025; Farhan *et al.*, 2025). Além de atuarem como agentes de barreira, os óleos vegetais também podem exercer um efeito plastificante. Sugere-se que suas cadeias graxas, mais flexíveis, podem se dispersar e se interpor entre as cadeias poliméricas da matriz, aumentando o espaçamento intermolecular, a mobilidade segmentar e, consequentemente, a flexibilidade e processabilidade do filme (Cheng *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2022; Sun, Weng e Zhang, 2024)). Adicionalmente, os óleos vegetais são atraentes por serem derivados de

fontes renováveis, apresentarem boa degradabilidade, atributos não tóxicos e, frequentemente, baixo custo (Sun, Weng e Zhang, 2024).

Apesar do potencial, a utilização de óleos vegetais em filmes biopoliméricos apresenta desafios. A principal dificuldade reside na compatibilidade e na obtenção de uma dispersão homogênea de um componente hidrofóbico, dentro de uma matriz predominantemente hidrofílica. Uma incorporação inadequada pode levar à separação de fases, formação de heterogeneidades estruturais, textura oleosa indesejada e, paradoxalmente, até mesmo a um aumento na permeabilidade ao vapor d'água, caso a integridade da rede polimérica seja comprometida (Farhan *et al.*, 2025). Materiais puramente lipídicos, embora excelentes como barreira à umidade, tendem a formar filmes mecanicamente fracos e quebradiços (Aggarwal, Kathuria e Singh, 2025; Farhan *et al.*, 2025). Portanto, o balanço entre a quantidade de óleo adicionada, sua interação com a matriz polimérica e o método de incorporação (como a formação de emulsões estáveis na solução filmogênica) são cruciais para otimizar as propriedades do filme compósito (Farhan *et al.*, 2025; Henning *et al.*, 2022). A estrutura química específica do óleo, como o comprimento e o grau de saturação de suas cadeias de ácidos graxos, também desempenha um papel importante na modulação das propriedades funcionais finais do filme (Cheng *et al.*, 2024; Henning *et al.*, 2022). A investigação de óleos vegetais específicos, com composições e propriedades particulares, torna-se assim fundamental para o desenvolvimento de plastificantes alternativos eficazes.

1.1.1.11 Óleo de Buriti

O buriti (*Mauritia flexuosa* L.f.), palmeira majestosa da família Arecaceae, é uma espécie nativa da América do Sul, amplamente distribuída em ecossistemas como a Amazônia, Caatinga e, notadamente, o Cerrado brasileiro, onde forma os característicos buritizais em áreas úmidas (Barboza *et al.*, 2022; Ferreira *et al.*, 2022). Conhecida popularmente como a "Árvore da Vida", o buriti desempenha um papel ecológico crucial na manutenção de nascentes e cursos d'água, além de fornecer recursos essenciais (alimento, matéria-prima para artesanato, construção e medicina tradicional) para a fauna e para diversas comunidades locais e indígenas, possuindo profundo significado sociocultural e econômico (Barboza *et al.*, 2022; Rodrigues *et al.*, 2024; Sampaio e Carrazza, 2012; Silva, da e Rial, 2025). Diante de sua importância,

a valorização de seus produtos, como o óleo extraído de seus frutos, é fundamental para incentivar a conservação da espécie e dos biomas onde ocorre (Silva, da e Rial, 2025).

Figura 1- Fruto do Buriti



Fonte: Autor (2025).

O fruto do buriti, de casca marrom-avermelhada, como pode ser visto na Figura 1, possui uma polpa comestível de cor alaranjada intensa, macia e rica em nutrientes, utilizada na produção de doces, sucos, sorvetes e outros produtos alimentícios (Resende, Franca e Oliveira, 2019; Soares *et al.*, 2024). Desta polpa é extraído o óleo de buriti, um óleo vegetal de coloração que varia do amarelo-alaranjado ao vermelho intenso, característica que se deve à sua composição química singular (Bispo-Jr *et al.*, 2018).

A composição lipídica do óleo de buriti é predominantemente constituída por triglicerídeos, sendo rico em ácidos graxos insaturados (aproximadamente 81,10% do total de ácidos graxos). O ácido oleico (C18:1) é o principal componente, representando cerca de 76-78% do perfil de ácidos graxos, um teor comparável ao do azeite de oliva extravirgem. Segue-se o ácido palmítico (C16:0), com cerca de 17-

18%, e frações menores de outros ácidos como o esteárico e o linolênico (Barboza *et al.*, 2022; Bispo-Jr *et al.*, 2018; Resende, Franca e Oliveira, 2019; Silva, da e Rial, 2025). No entanto, o grande diferencial do óleo de buriti reside em seu excepcional conteúdo de compostos bioativos, notadamente carotenoides e tocoferóis (Bispo-Jr *et al.*, 2018). Ele é considerado uma das fontes naturais mais ricas em pró-vitamina A, devido à altíssima concentração de β -caroteno, o principal carotenoide presente, responsável pela sua cor vibrante e por suas potentes propriedades antioxidantes (Barboza *et al.*, 2022; Bhargava *et al.*, 2020; Silva, da e Rial, 2025). Os carotenoides são pigmentos lipofílicos conhecidos por sua capacidade de neutralizar radicais livres e proteger contra o estresse oxidativo (Bhargava *et al.*, 2020).

Devido a essa rica composição, o óleo de buriti já encontra aplicações nas indústrias de cosméticos, como emoliente e protetor solar natural (devido aos carotenoides), e na indústria farmacêutica e alimentícia, por seu valor nutricional e propriedades antioxidantes (Resende, Franca e Oliveira, 2019). A literatura aponta que substâncias como o óleo de buriti podem ser utilizadas como plastificantes para melhorar as propriedades físicas e químicas de matrizes poliméricas (Bispo-Jr *et al.*, 2018). Considerando sua natureza de óleo vegetal, composto por triglicerídeos e ácidos graxos, espera-se que o óleo de buriti possa exercer um efeito plastificante em filmes biopoliméricos, atuando de maneira similar a outros óleos vegetais, ou seja, por meio da inserção de suas cadeias lipídicas entre as cadeias poliméricas, aumentando o volume livre, a mobilidade segmentar e, conseqüentemente, a flexibilidade do material, ao mesmo tempo em que poderia contribuir para reduzir a hidrofobicidade do filme.

Além do potencial efeito plastificante, a incorporação do óleo de buriti em filmes biodegradáveis se mostra particularmente promissora devido à possibilidade de agregar funcionalidades extras ao material. Seu alto teor de β -caroteno e tocoferóis poderia conferir aos filmes propriedades antioxidantes, protegendo tanto o próprio material polimérico quanto o produto embalado contra processos oxidativos. Adicionalmente, sua cor intensa natural poderia ser explorada para o desenvolvimento de filmes com coloração diferenciada, sem a necessidade de corantes sintéticos, e, potencialmente, com capacidade de barreira à luz UV.

Apesar dessas perspectivas promissoras e da crescente valorização de produtos da sociobiodiversidade brasileira, o estudo do óleo de buriti especificamente como plastificante em filmes biodegradáveis, e em particular como um potencial substituto ao glicerol nas matrizes poliméricas de interesse desta dissertação (goma de alfarroba, fécula de mandioca, pectina e proteína de girassol), ainda é uma área com escassas investigações científicas publicadas. Esta lacuna na literatura reforça a originalidade e a relevância do presente trabalho, que busca não apenas desenvolver filmes biodegradáveis a partir de fontes renováveis e resíduos agroalimentares, mas também explorar o potencial de um óleo nativo com características únicas para a obtenção de materiais com propriedades funcionais e de barreira aprimoradas para aplicações em embalagens sustentáveis.

CAPÍTULO I: FILMES A BASE DE GOMA DE ALFARROBA E FÉCULA EXTRAÍDA DA CASCA E ENTRECASCA DA MANDIOCA

RESUMO

Diante dos crescentes desafios ambientais impostos pelo descarte inadequado de embalagens plásticas e da urgência em valorizar recursos naturais e resíduos agroalimentares, a ciência busca incessantemente por alternativas mais sustentáveis, e o uso de biopolímeros representa uma solução promissora. Neste capítulo, o foco foi o desenvolvimento de filmes biodegradáveis a partir de goma de alfarroba (LBG) e fécula de mandioca, esta última extraída da casca e entrecasca como parte da estratégia de aproveitamento de resíduos agroindustriais. Avaliou-se o uso do óleo de buriti como possível agente plastificante, em substituição parcial ou total ao glicerol, em filmes individuais e em conjugados de LBG/fécula.

Os filmes foram preparados pelo método de moldagem e caracterizados quanto às suas propriedades físico-químicas, estruturais, ópticas, de barreira, mecânicas e térmicas, bem como sua biodegradabilidade.

Os resultados indicaram que a incorporação do óleo de buriti influenciou significativamente as características dos filmes, com efeitos diversos conforme a constituição do material polimérico. Em relação às propriedades físico-químicas, observou-se uma diminuição da higroscopicidade e da capacidade de dissolução em água em todas as matrizes e a umidade dos filmes e a solubilidade em água diminuíram significativamente com a substituição do glicerol pelo óleo. As propriedades ópticas foram impactadas pela coloração natural do óleo, que atuou como corante em todas as matrizes.

Em termos de propriedades de barreira, os filmes de LBG apresentaram melhor desempenho, com a taxa de transmissão de vapor de água (TTVA) e a permeabilidade ao oxigênio (PVO) sendo reduzidas em mais de 50% na substituição total do glicerol pelo óleo. Para os filmes de fécula, a barreira ao oxigênio foi significativamente melhorada, com uma redução de quase 50%. Os atributos mecânicos nos filmes de LBG foram positivamente influenciados, com o limite de resistência à tração (LRT) dobrando e o Módulo de Elasticidade (EM) aumentando mais de 100 vezes, embora com perda drástica de flexibilidade. Nesse caso, o óleo atuou como agente de reforço. Contudo, a substituição de glicerol pelo óleo de buriti acarretou em não uniformidade

de alguns filmes, impactando seu desempenho mecânico, especialmente nas misturas de LBG/fécula. A substituição completa do glicerol pelo óleo de buriti em filmes de fécula e seus conjugados levou a uma redução drástica da flexibilidade e aumento da fragilidade.

A análise termogravimétrica (TGA) indicou que a temperatura de máxima degradação ($T_{\text{máx}}$) dos polímeros principais permaneceu relativamente constante, mostrando que o óleo não prejudicou a estabilidade térmica das cadeias poliméricas. A capacidade de biodegradação dos materiais também foi afetada, permitindo um prolongamento da vida útil sem prejuízo à decomposição natural.

Em suma, o óleo de buriti mostrou potencial promissor para aprimorar as propriedades de barreira e, em certas matrizes como a LBG, a resistência mecânica de filmes biopoliméricos. Contudo, desafios de homogeneidade e o impacto negativo na flexibilidade, especialmente em substituições totais, demandam otimização de formulações para o uso mais eficaz do óleo como aditivo funcional.

Palavras-chave: goma de alfarroba; fécula de mandioca; aproveitamento de resíduos; higroscopicidade; agente plastificante.

ABSTRACT

Facing the growing environmental challenges imposed by the inadequate disposal of plastic packaging and the urgency to valorize natural resources and agri-food waste, science relentlessly seeks more sustainable alternatives, and the use of biopolymers represents a promising solution. In this chapter, the focus was on the development of biodegradable films from locust bean gum (LBG) and cassava starch, the latter extracted from the peel and inner bark as part of an agri-industrial waste valorization strategy. The use of buriti oil was evaluated as a possible plasticizing agent, in partial or total replacement of glycerol, in individual films and in LBG/cassava starch conjugates.

The films were prepared by the casting method and characterized for their physicochemical, structural, optical, barrier, mechanical, and thermal properties, as well as their biodegradability.

The results indicated that the incorporation of buriti oil significantly influenced the film characteristics, with diverse effects depending on the polymeric material's composition. Regarding physicochemical properties, a decrease in hygroscopicity and water dissolution capacity was observed across all matrices, and the films' moisture content and water solubility significantly decreased with the replacement of glycerol with oil. Optical properties were impacted by the oil's natural coloration, which acted as a colorant in all matrices.

In terms of barrier properties, LBG films showed better performance, with the water vapor transmission rate (TTVA) and oxygen permeability (PVO) being reduced by more than 50% with the total replacement of glycerol by oil. For cassava starch films, the oxygen barrier was significantly improved, with a reduction of almost 50%. Mechanical attributes in LBG films were positively influenced, with tensile strength (LRT) doubling and Elastic Modulus (EM) increasing more than 100 times, although with a drastic loss of flexibility. In this case, the oil acted as a reinforcing agent. However, replacing glycerol with buriti oil led to non-uniformity in some films, impacting their mechanical performance, especially in LBG/cassava starch mixtures. The complete replacement of glycerol with buriti oil in cassava starch films and their conjugates led to a drastic reduction in flexibility and increased fragility.

Thermogravimetric analysis (TGA) indicated that the maximum degradation temperature ($T_{\text{máx}}$) of the main polymers remained relatively constant, showing that the oil did not impair the thermal stability of the polymeric chains. The biodegradability of the materials was also affected, allowing for an extended shelf life without compromising natural decomposition.

In summary, buriti oil showed promising potential for enhancing barrier properties and, in certain matrices like LBG, the mechanical resistance of biopolymeric films. However, challenges regarding homogeneity and the negative impact on flexibility, especially in total replacements, demand formulation optimization for the more effective use of the oil as a functional additive.

Keywords: locust bean gum; cassava starch; waste utilization; hygroscopicity; plasticizing agent.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções de embalagem sustentáveis é um imperativo ambiental e econômico, impulsionando o desenvolvimento de filmes biodegradáveis a partir de biopolímeros (Bhargava et al., 2020; Haq et al., 2025). Nesse cenário, a valorização de resíduos agroalimentares, como a casca e entrecasca da mandioca – abundante coproduto da industrialização deste tubérculo (Matheus et al., 2023) –, representa uma fonte promissora de amido para a produção de filmes (Amobonye et al., 2025). Paralelamente, a goma de alfarroba (LBG), um polissacarídeo natural extraído de sementes (Barak e Mudgil, 2014), tem demonstrado potencial para a formulação de filmes (Chen et al., 2025). Embora filmes baseados em polissacarídeos apresentem boa barreira a gases e capacidade filmogênica, são tipicamente hidrofílicos e frágeis, o que limita suas aplicações sem a adição de plastificantes (Jahangiri, Mohanty e Misra, 2024). O glicerol, amplamente empregado, possui alta higroscopicidade e pode comprometer a estabilidade dos filmes (Ben, Samsudin e Yhaya, 2022).

Diante disso, a exploração de plastificantes alternativos de fontes renováveis, como o óleo de buriti, torna-se relevante (Farhan et al., 2025). O óleo de buriti (*Mauritia flexuosa* L.f.), extraído de um fruto nativo brasileiro de grande importância ecológica e sociocultural (Barboza et al., 2022; Ferreira et al., 2022), destaca-se por sua natureza hidrofóbica e rica composição em ácidos graxos insaturados e carotenoides, como o β -caroteno, que lhe conferem propriedades bioativas e antioxidantes (Bispo-Jr et al., 2018; Resende, Franca e Oliveira, 2019; Silva, da e Rial, 2025). Espera-se que o óleo de buriti possa exercer um efeito plastificante em filmes biopoliméricos, de maneira similar a outros óleos vegetais, aumentando a flexibilidade e contribuindo para reduzir a hidrofiliabilidade do filme (Cheng et al., 2024; Li et al., 2022; Sun, Weng e Zhang, 2024). Além disso, sua incorporação é particularmente promissora pela possibilidade de agregar funcionalidades extras, como propriedades antioxidantes e cor natural (Resende, Franca e Oliveira, 2019). No entanto, o estudo aprofundado do óleo de buriti especificamente como plastificante em filmes biodegradáveis elaborados a partir de LBG e fécula de mandioca (especialmente de resíduo) ainda é uma área com escassas investigações científicas publicadas (Bispo-Jr et al., 2018).

Este capítulo tem como objetivo geral investigar o desenvolvimento e a caracterização de filmes biodegradáveis à base de goma de alfarroba e fécula de mandioca (extraída de resíduos), individualmente e em conjugados, avaliando o óleo de buriti como plastificante alternativo ao glicerol.

Para alcançar este objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos neste capítulo:

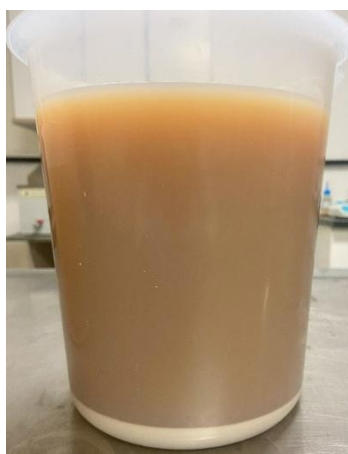
- Extração da fécula da casca e entrecasca da mandioca para sua utilização como matéria-prima na elaboração dos filmes biodegradáveis.
- Desenvolver filmes à base de goma de alfarroba, fécula de mandioca e seus conjugados, estabelecendo as formulações controle plastificadas com glicerol e as incorporadas com óleo de buriti.
- Analisar o impacto do óleo de buriti no desempenho dos filmes quanto às suas propriedades físico-químicas, estruturais, ópticas, de barreira, mecânicas e térmicas, bem como sua biodegradabilidade, para estas matrizes.

METODOLOGIA

Extração da Fécula da casca e Entrecasca da Mandioca

A extração da fécula da mandioca foi feita seguindo a metodologia de Fronza et al. (2023). As cascas e entrecasas de diferentes variedades foram obtidas de comércios de Belo Horizonte – MG e manipuladas no laboratório de aproveitamento de resíduos da Universidade Federal de Minas Gerais. As cascas e entrecasas foram selecionadas e lavadas em água corrente até a remoção completa de sujidades, sendo posteriormente, sanitizadas com hipoclorito de sódio à 30 mg.ml^{-1} por 20 minutos; em seguida, foram enxaguadas em água destilada para remoção do cloro. Todo o material foi armazenado em sacos plásticos herméticos e os mesmos foram mantidos sob refrigeração por 24 horas. O material foi então triturado em liquidificador industrial de baixa rotação (Metvisa, modelo LQL.4) com adição de água destilada a uma proporção de 1:1 por 5 minutos até a obtenção de uma pasta; em seguida, foi homogeneizado em agitador mecânico (Fisatom, modelo 715) por 30 minutos e posteriormente filtrado com o auxílio de tecido 100% poliéster, até a retirada máxima do líquido e obtenção da massa bruta. A massa obtida passou pelo processamento de trituração, homogeneização e filtragem por mais 3 vezes até que o líquido obtido não estivesse mais leitoso, garantindo a extração completa da fécula.

Figura 2 – Extrato de fécula da casca e entrecasca da mandioca após precipitação.

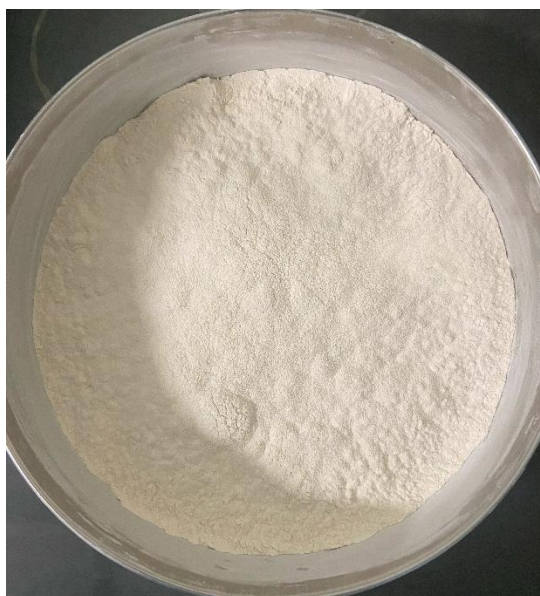


Fonte: Autor (2025).

O filtrado obtido, nomeado de “extrato de fécula” foi mantido sob refrigeração a 7°C por 12 horas para decantação da fécula, como visto na Figura 2. O sobrenadante foi então descartado e o precipitado reservado e levado para estufa convectiva com

circulação de ar (Nova Ética, modelo 420-1DE) a 50°C por 12 horas para secagem. O extrato já seco foi macerado e tamisado em peneira de inox de 100 mesh para padronização da granulometria, obtendo ao final um pó fino e branco, semelhante ao amido comercial, como demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Fécula de mandioca após o fim do processo de extração.



Fonte: Autor (2025).

Elaboração dos Filmes

Para a elaboração dos filmes deste capítulo, os reagentes utilizados incluíram: fécula extraída da casca e entrecasca da mandioca; goma de alfarroba (LBG, peso molecular ~1000 kDa), adquirida da Sigma-Aldrich Co. (St. Louis, MO, EUA); glicerol (Synth, Diadema, SP, Brasil); goma arábica em pó pura, densidade 1,35 (Êxodo Científica, Sumaré, SP, Brasil); e óleo de buriti (lote MFR 24001), doado pela Cooperativa Grande Sertão (Montes Claros, MG, Brasil). Os demais reagentes utilizados para as análises de caracterização dos filmes foram de grau analítico.

O laudo com os dados de caracterização do óleo de buriti, realizados pelo cliente Industria e Comércio de Cosméticos Natura no momento de avaliação de compra do lote, foram fornecidos pela Cooperativa Grande Sertão, em anexo.

A emulsão de óleo de buriti foi feita utilizando a goma arábica como emulsificante a uma proporção de 30% em relação a base lipídica. O óleo de buriti e a goma, já pesados, de acordo com a formulação de cada filme, foram adicionados

em béqueres junto a 30 ml de água. A mistura foi sonicada utilizando ultrassom de ponteira (Ultranique, modelo Desruptor, QR350) por 3 minutos a 85Khz, ou até que estivesse completamente emulsificada.

Os filmes de goma de alfarroba e fécula de mandioca foram produzidos pelo método de moldagem conforme a metodologia descrita por Fronza et al. (2024) com algumas alterações. Os filmes definidos como controle foram os de composição de 100% de fécula extraída da casca e entrecasca da mandioca, 100% de goma de alfarroba e 75% de fécula somado a 25% de goma de alfarroba, que foi considerada a melhor proporção segundo estudos anteriores realizados por Fronza et al. (2024).

Foram produzidos os seguintes filmes: (I) F1 – filme base utilizando glicerol como plastificante; (II) F2 – filme base com adição de goma arábica (para avaliar o efeito da adição do emulsificante utilizado para incorporação do óleo de buriti); (III) F3 – filme com adição de óleo de buriti emulsificado, mantendo a concentração inicial de glicerol; e (IV) F4 – filme com substituição parcial (50%) e (V) F5 – filme com substituição total (100%) do glicerol por óleo de buriti emulsificado. Cada filme foi preparado conforme as formulações descritas na Tabela 2, usando água destilada como solvente, com um volume total de 200ml para cada solução filmogênica.

Tabela 1– Composição dos filmes a base de goma de alfarroba e fécula de mandioca.

Amostra		Goma de Alfarroba	Fécula de Mandioca	Glicerol	Óleo de Buriti	Goma Arábica	Massa Total
LBG	F1	3 g	-	0,6 g	-	-	3,6g
	F2	3 g	-	0,6 g	-	0,045 g	3,645g
	F3	3 g	-	0,6 g	0,15 g	0,045 g	3,795g
	F4	3 g	-	0,3 g	0,3 g	0,09 g	3,69g
	F5	3 g	-	-	0,6 g	0,18 g	3,78g
LBG/Fécula (25:75)	F1	0,75 g	2,25 g	0,6 g	-	-	3,6g
	F2	0,75 g	2,25 g	0,6 g	-	0,045 g	3,645g
	F3	0,75 g	2,25 g	0,6 g	0,15 g	0,045 g	3,795g
	F4	0,75 g	2,25 g	0,3 g	0,3 g	0,09 g	3,69g
	F5	0,75 g	2,25 g	-	0,6 g	0,18 g	3,78g
Fécula	F1	-	3 g	0,6 g	-	-	3,6g
	F2	-	3 g	0,6 g	-	0,045 g	3,645g
	F3	-	3 g	0,6 g	0,15 g	0,045 g	3,795g
	F4	-	3 g	0,3 g	0,3 g	0,09 g	3,69g
	F5	-	3 g	-	0,6 g	0,18 g	3,78g

F1 = filme controle; F2 = filme controle + emulsificante; F3 = filme controle + óleo buriti emulsificado; F4 = filme com substituição parcial (50%) do glicerol; F5 = filme com substituição total do glicerol. Médias com as mesmas letras na mesma coluna, em um mesmo grupo amostral, não apresentam diferenças estatísticas ($p > 0.05$).

Fonte: Dados Experimentais (2025).

A fécula, a goma de alfarroba e o glicerol, nas quantidades descritas na Tabela 1, foram suspensos em água destilada sob agitação constante por um período de 45 minutos em temperatura ambiente. Posteriormente, as misturas formadoras de filme foram aquecidas, ainda sob agitação, por 1 hora, à temperatura de 70 °C até que houvesse formação de gel.

Após a etapa de aquecimento, a mistura permaneceu sob agitação até que atingisse uma temperatura abaixo dos 50°C, neste momento a emulsão de óleo de buriti em água foi adicionada. Em seguida a dispersão foi colocada em banho de ultrassom (Unique, modelo USC-165A) (25kHz,150W), sob aquecimento, por um período de uma hora, para remoção de bolhas contidas no interior da solução. Ao fim desse processo, 138g da solução filmogênica foi vertida em forma de silicone e levada para estufa convectiva com circulação de ar (Nova Ética, modelo 420-1DE) à 30°C

por 24 horas para secagem. Os filmes foram cuidadosamente retirados da forma e armazenados em sacos plásticos hermeticamente fechados.

Para as análises de caracterização os filmes foram mantidos em ambiente com temperatura e umidade controlados ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $40 \pm 5\%$ de umidade relativa do ar) por pelo menos 48 horas antes de cada análise.

Caracterização dos Filmes

1.1.1.12 Espessura, Umidade e Solubilidade em Água

As espessuras das amostras foram medidas utilizando micrômetro externo (103-137, Mitutoyo Corporation, Japão), de precisão de 0,001 mm, em 24 pontos aleatórios distribuídos no mesmo filme. Os valores de espessura obtidos foram utilizados para os cálculos de permeabilidade ao vapor de água e propriedades mecânicas dos filmes.

O conteúdo de água presente em cada filme foi determinado segundo o método gravimétrico definido pela ASTM D644-99. Foram cortadas amostras quadradas (2 cm^2), em triplicata, e pesadas (peso inicial). As amostras foram então secas em estufa convectiva com circulação de ar (Nova Ética, modelo 420-1DE) à 105°C por 24 horas e novamente pesadas (peso final). A umidade (%) foi determinada pela variação do peso inicial e final de cada amostra após a secagem e expressa em base úmida conforme Equação (1).

$$Umidade (\%) = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} \times 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

Para as análises de solubilidade em água, utilizou-se o método de Gontard et al. (1994) com adaptações. Amostras quadradas (2 cm^2) dos filmes, foram submetidas a secagem em estufa convectiva com circulação de ar (Nova Ética, modelo 420-1DE) à 105°C por 24 horas, afim de medir o peso inicial das amostras. Após a secagem, os filmes foram submersos em tubos falcons contendo 30 ml de água destilada e mantidos sob agitação de 100 rpm por 24 horas a 25°C em incubadora com agitação orbital (Quimis, modelo Marco-Q250). Em sequência, as amostras foram filtradas em papel de filtro, previamente secos e pesados, para recuperação do resíduo não solúvel dos filmes. Os papéis de filtro contendo as amostras foram secos novamente em

estufa por 24 horas a 105 °C e avaliado o peso final que foi utilizado para quantificação da solubilidade em água (%), a partir da Equação (2).

$$\text{Solubilidade (\%)} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} \times 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

1.1.1.13 *Análise Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)*

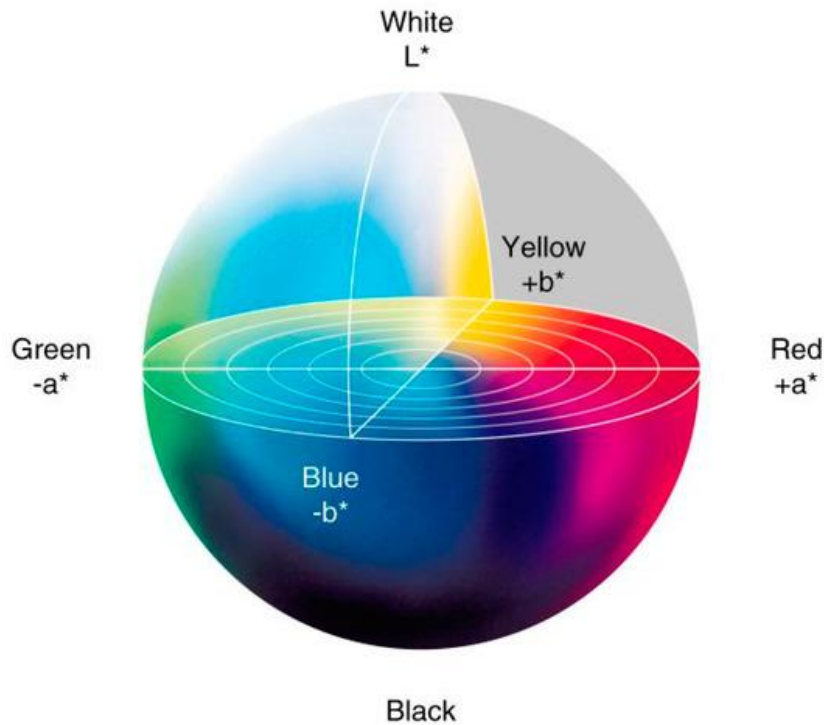
A caracterização funcional dos filmes foi realizada no laboratório de Nanotecnologia e Inovação – CeNano²I/CEMUCASI/UFMG, utilizando espectrofotômetro Thermo Fischer, Nicolet 6700, na faixa de varredura de 4000-700 cm⁻¹, com resolução de 4 cm⁻¹ e 16 scans. Os espectros foram obtidos usando um acessório de Refletância Total Atenuada (ATR), sendo cada amostra analisada em triplicata.

1.1.1.14 *Propriedades Ópticas*

1.1.1.14.1 *Análise de Cor*

Para avaliar a qualidade da cor dos materiais, utiliza-se convencionalmente o sistema de cor de superfície CIE-Lab*, que estabelece um sistema de coordenadas espaciais com variáveis de cor. Nesse sistema tridimensional CIELAB (Figura 4), o eixo L* representa a luminosidade, variando do preto escuro (L* = 0) ao branco brilhante (L* = 100). Os eixos cromáticos a* e b* indicam, respectivamente, a variação entre verde (a* < 0) e vermelho (a* > 0), e entre azul (b* < 0) e amarelo (b* > 0) (Conceição Ribeiro et al. 2018; McGrath, Beck e Hill, 2017; Yao et al., 2023).

Figura 4– Sistema CIE-Lab* de análise de cor.



Fonte: Conceição Ribeiro et al. (2018).

A análise colorimétrica deste estudo foi conduzida utilizando um colorímetro triestímulo (Hunterlab, modelo Colorflex 45/0) pela medição dos parâmetros L^* , a^* e b^* . A partir dos resultados foram calculadas as propriedades croma (c) pela Equação (3) e ângulo de tonalidade (h) pela Equação (4) ou (5) de acordo com os valores de a^* e b^* (Alves et al., 2024; Fronza et al., 2024).

$$\text{Croma } (c^*) = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\text{Ângulo de tonalidade } (H^*) = 180 + \sqrt{\tan \frac{b^*}{a^*}}, \text{ para } a^* < 0 \text{ e } b^* > 0 \quad \text{Eq. (4)}$$

$$\text{Ângulo de tonalidade } (H^*) = \sqrt{\tan \frac{b^*}{a^*}}, \text{ para } a^* \text{ e } b^* > 0 \quad \text{Eq. (5)}$$

1.1.1.14.2 Opacidade

Para o cálculo de opacidade, foi medida em espectrofotômetro UV-vis (Spectrum, modelo SP-2000UV) a absorção dos filmes, em triplicata, a um comprimento de onda de 600 nm em cubetas de quartzo. Os valores obtidos foram utilizados na Equação (6) para obtenção dos resultados.

$$Opacidade = \frac{A_{600}}{x} \quad \text{Eq. (6)}$$

Sendo A_{600} o valor correspondente a absorção da amostra a 600 nm e X a espessura da média da amostra, calculado pela metodologia descrita na seção 3.4.3.1 (Alves *et al.*, 2024).

Propriedades de Barreira

1.1.1.15 Permeabilidade ao Vapor de Água e Taxa de Transmissão de Vapor de Água

As análises de permeabilidade ao vapor de água e taxa de transmissão de vapor de água foram realizadas por metodologia gravimétrica, seguindo procedimento descrito na norma ASTM E96-15 com adaptações de Alves *et al.* (2024) e Sarker, Matak e Jaczynski (2025). Amostras quadradas de cada filme foram cortadas com 1,5 cm², em triplicata, tamanho correspondente a extremidade aberta de tubos de vidro, de 15 mL, com tampas de rosca de abertura de 12mm de diâmetro.

Cada tubo foi preenchido com sílica, previamente seca em estufa convectiva com circulação de ar (Nova Ética, modelo 420-1DE) à 105°C por 24 horas, até um terço de seu volume, e com o auxílio de graxa de silicone os filmes foram fixados nas extremidades dos tubos, entre as tampas de rosca e o frasco. Os frascos foram acondicionados em dessecadores, como mostra a Figura 5, contendo solução saturada de cloreto de sódio, promovendo um ambiente hermético com $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $75 \pm 1\%$ de umidade relativa. Os frascos foram pesados a cada 24 horas por um período de 7 dias e a partir dessas pesagens foi construída uma curva de calibração referente ao ganho de massa da sílica ao longo do tempo de análise. A partir dos dados obtidos nessa curva e segundo as Equações (7) e (8) foram calculados os valores de permeabilidade ao vapor de água (PVA) e taxa de transmissão de vapor de água (TTVA).

$$\text{Permeabilidade ao Vapor de Água (PVA)} = \frac{G}{t} \times \frac{e}{(\Delta P \times A)} \quad \text{Eq. (7)}$$

$$\text{Taxa de Transmissão de Vapor de Água (TTVA)} = \frac{G}{t \times A} \quad \text{Eq. (8)}$$

Em que, G/t é a inclinação da curva referente ao ganho de massa (G) em relação ao tempo (t); e é valor médio de espessura da amostra em milímetros; ΔP é a

pressão de saturação do vapor da água a 20°C (2339,21 Pa) e A é a área de permeação da amostra em m².

1.1.1.16 Permeabilidade ao Oxigênio

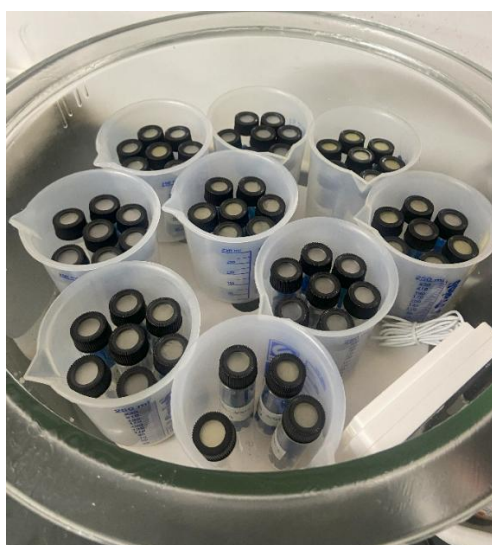
Para o cálculo de permeabilidade ao oxigênio também foi seguida metodologia descrita por Alves et al. (2024), utilizando tubos de vidro de 15 ml, cobertos na extremidade com amostras de filmes cortadas nas dimensões de 1,5 cm², fixadas com graxa de silicone entre o tubo e as tampas de rosca com abertura de 12 mm de diâmetro, contendo 3g de reagente *deoxidizer* (ferro metálico em pó, carvão ativado e cloreto de sódio, nas proporções de 0,5:1:1,5) em cada tubo.

Os frascos foram pesados (peso inicial) e acondicionados em dessecador contendo solução saturada de cloreto de bário, como demonstrado na Figura 5, a uma umidade relativa de 99% e 24 ± 1°C, por 48 horas, quando foi novamente pesado (peso final). Os valores de massa obtidos foram utilizados para os cálculos realizados segundo a Equação (9).

$$\text{Permeabilidade ao Oxigênio (PVO)} = \frac{\text{peso final} - \text{peso inicial}}{t \times A} \quad \text{Eq. (9)}$$

Em que o peso final e inicial é calculado em grama; t é o tempo de equilíbrio, em segundos e A é a área de abertura da tampa em m².

Figura 5– Amostras armazenadas em dessecador.



Fonte: Autor (2025).

Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas foram determinadas com base na resistência à tração, alongamento na ruptura e módulo elástico, seguindo os protocolos estabelecidos pela norma ASTM D882-12, com adaptações. Os ensaios foram realizados no laboratório DCA/ESAL/UFLA, em texturômetro (TA.XT plus, Stable Micro Systems) em uma célula de carga de capacidade de 50kgf e velocidade de teste de 0,80 mm por segundo. Os corpos de provas foram cortados em pedaços com dimensões de 10 x 100 mm, partindo de uma separação inicial de 50 mm entre as garras. Oito repetições de cada amostra foram analisadas e considerou-se para os cálculos um mínimo de cinco execuções amostrais. Para os cálculos referentes as propriedades mecânicas foram utilizados os dados médios de espessura obtidos pela metodologia descrita na seção 3.3.1.

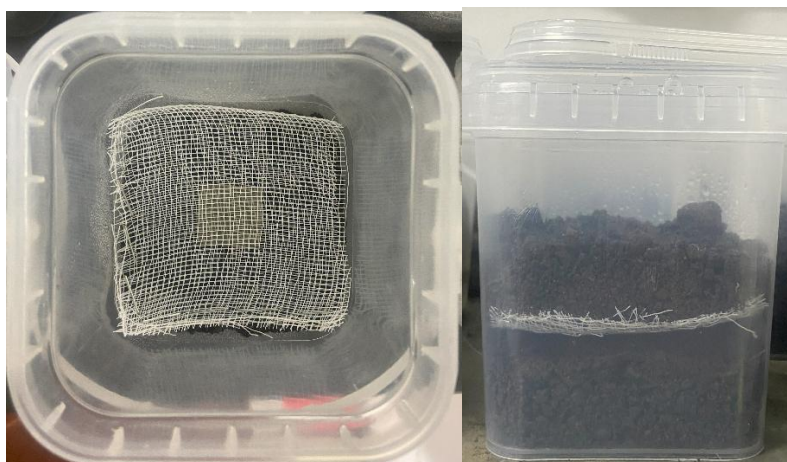
Análise Termogravimétrica (TGA)

A estabilidade térmica e a degradação dos filmes foram analisadas com base em análises termogravimétricas (TGA), realizadas com o Analisador Térmico TA Struments, modelo SDT Q600. Cerca de 10 mg de cada amostra foi colocada em cadinhos de alumínio e submetidas a uma faixa de temperatura de 25 a 600°C a uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto, sob uma atmosfera de nitrogênio de 50 ml por minuto, evitando reações termo – oxidativas (Alves *et al.*, 2024; Martins *et al.*, 2012).

Biodegradabilidade

A análise de biodegradabilidade dos filmes foi conduzida com base no método descrito por Alves *et al.* (2024) com adaptações. Amostras com dimensões de 2 cm² foram inseridas em envelopes de redes de nylon de aproximadamente 5 cm², como pode ser visto na Figura 6, e enterradas em uma mistura 1:1 de solo agrícola e solo tipo turfa (All Garden, Holambra, Brasil), umedecida com água destilada (60% de umidade), a 3 cm de profundidade, em recipientes plásticos. A terra foi mantida úmida, com a adição de 10 ml de água destilada a cada 3 dias, e as amostras foram cuidadosamente desenterradas e fotografadas a cada 5 dias para acompanhamento e simulação de biodegradabilidade em condições ambientais naturais. A disposição das amostras para análise pode ser visualizada na Figura 7.

Figura 6– Amostras envoltas em envelopes de redes de nylon antes e depois de enterradas.



Fonte: Autor (2025).

Figura 7– Amostras dispersas para análise de biodegradabilidade divididas por dias de acompanhamento.



Fonte: Autor (2025).

Análise Estatística

Todos os ensaios foram realizados em triplicata e calculou-se a média e o desvio-padrão. Foi feita análise de variância (ANOVA) e o teste de comparação de médias Tukey, a 5% de significância utilizando o software Minitab Statistical Software, versão 21.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Espessura, Umidade e Solubilidade em Água

Na Tabela 2 estão descritos os valores médios de espessura, umidade e solubilidade dos filmes feitos a partir da goma de alfarroba (LBG), fécula de mandioca e um conjugado dos dois polímeros, variando a presença e proporção de óleo de buriti e glicerol presentes na amostra. A análise dos dados revela que tanto a matriz polimérica utilizada quanto a proporção de substituição do plastificante glicerol por óleo de buriti influenciam significativamente essas propriedades.

Tabela 2– Valores médios de espessura, umidade e solubilidade dos filmes de goma de alfarroba, fécula de mandioca e seus respectivos conjugados.

Amostra		Espessura (mm)	Umidade (%)	Solubilidade (%)
LBG	F1	0,046±0,006 ^b	11,748±0,307 ^a	77,010±3,350 ^a
	F2	0,056±0,006 ^a	11,070±1,151 ^{ab}	61,040±3,420 ^b
	F3	0,056±0,006 ^{ab}	9,557±0,452 ^b	61,960±5,150 ^b
	F4	0,056±0,005 ^a	9,511±0,656 ^b	43,850±2,170 ^c
	F5	0,058±0,009 ^a	10,223±0,518 ^a	54,270±3,040 ^b
LBG/Fécula (25:75)	F1	0,041±0,014 ^b	9,597±0,690 ^a	25,596±1,573 ^a
	F2	0,042±0,005 ^b	8,711±0,534 ^{ab}	12,015±1,166 ^b
	F3	0,046±0,004 ^b	8,265±0,087 ^{ab}	22,850±5,920 ^a
	F4	0,076±0,015 ^{ab}	7,785±0,252 ^b	14,549±1,597 ^b
	F5	0,088±0,055 ^a	5,574±0,960 ^c	9,057±0,371 ^b
Fécula	F1	0,035±0,007 ^c	10,286±0,354 ^a	17,000±5,370 ^a
	F2	0,039±0,005 ^c	7,798±0,662 ^b	16,788±1,304 ^a
	F3	0,048±0,003 ^b	7,414±0,579 ^b	11,037±1,711 ^{ab}
	F4	0,048±0,005 ^b	6,796±1,079 ^b	9,341±1,057 ^b
	F5	0,058±0,008 ^a	7,567±0,369 ^b	14,830±0,929 ^{ab}

F1 = filme controle; F2 = filme controle + emulsificante; F3 = filme controle + óleo buriti emulsificado; F4 = filme com substituição parcial (50%) do glicerol; F5 = filme com substituição total do glicerol. Médias com as mesmas letras na mesma coluna, em um mesmo grupo amostral, não apresentam diferenças estatísticas ($p > 0.05$).

Fonte: Dados Experimentais (2025).

De forma geral, observou-se um aumento da espessura dos filmes com a substituição crescente de glicerol por óleo de buriti, independentemente da matriz polimérica utilizada. Nos filmes de LBG, por exemplo, a espessura passou de 0,04583

$\pm 0,00617$ mm no filme F1 para $0,5771 \pm 0,00895$ mm na formulação F5. Nos conjugados de LBG/fécula (25:75), a espessura aumentou ainda mais, dobrando de valor e atingindo $0,0883 \pm 0,0553$ mm no F5 onde pode-se observar também um alto desvio padrão que pode ser explicado pela não homogeneidade do filme, enquanto nos filmes exclusivamente de fécula os valores variaram de $0,034 \pm 0,00669$ (controle) até $0,5815 \pm 0,00827$ mm (100%). Este comportamento pode ser atribuído à incorporação do óleo que contribui para uma estrutura mais densa ou espessa, aumentando a massa final presente na matriz dos filmes (Liu, Z. *et al.*, 2024).

No caso dos conjugados, o aumento da espessura foi mais pronunciado, possivelmente devido a interação sinérgica entre os dois polímeros e o óleo, que pode ter gerado uma rede mais heterogênea, já que os diferentes componentes presentes na solução filmogênica podem afetar tanto o alinhamento como a compactação da matriz no processo da secagem do filme (Alves *et al.*, 2024).

Em relação à umidade, houve uma redução significativa nos valores com a adição do óleo, sendo este efeito mais evidente nos filmes com fécula em sua composição. Os filmes controle (F1) são os que apresentaram os maiores teores de umidade, principalmente quando comparados com os filmes com substituição total do glicerol pelo óleo de buriti (F5). Esse comportamento é coerente com a diferença de polaridade entre o glicerol (hidrofílico) e o óleo de buriti (hidrofóbico), sendo o último, menos propenso a absorver ou reter água (Farahnaky, Saberi e Majzoobi, 2013).

As amostras F2 não apresentaram alterações significativas em suas espessuras, entretanto, para a umidade, em especial para o filme a base de fécula, houve um pequeno aumento, sugerindo que a goma arábica além de atuar como emulsificante, pode interferir na estrutura dos filmes, possivelmente, contribuindo para uma diferente organização da matriz polimérica, aumentando a capacidade de retenção hídrica (Criollo-Feijoo *et al.*, 2024).

A solubilidade em água dos filmes também foi significativamente influenciada pela composição da matriz polimérica e pela presença de óleo de buriti. Nos filmes de LBG, a solubilidade do filme controle (F1) foi a mais elevada (77,010%), comportamento esperado para polissacarídeos hidrofílicos. A incorporação de goma arábica e óleo (F2 e F3) e, mais notavelmente, a substituição parcial do glicerol por óleo de buriti (F4), resultaram em uma redução significativa da solubilidade, atingindo

o menor valor de 43,850% para a LBG. No entanto, a substituição total de glicerol (F5) demonstrou um ligeiro aumento na solubilidade em comparação com F4, mas ainda inferior ao controle. Já nos conjugados de LBG/fécula (25:75) e nos filmes de fécula pura, a solubilidade apresentou valores consideravelmente menores que os filmes de LBG, indicando a menor hidrofiliçidade da fécula. Nos filmes de conjugados, a solubilidade do filme controle (F1) foi de 25,596%, com a substituição de glicerol por óleo de buriti resultando em reduções progressivas, sendo o filme com substituição total (F5) o menos solúvel (9,057%). Similarmente, nos filmes de fécula, a solubilidade já era baixa no controle (17,000%) e foi ainda mais reduzida com a adição de óleo, especialmente na substituição parcial (F4, com 9,341%), demonstrando a eficácia do óleo de buriti em conferir caráter hidrofóbico aos filmes.

Fazendo uma comparação entre as diferentes matrizes poliméricas, nos filmes de LBG, a adição do óleo reduziu a umidade em todas as formulações, com exceção da substituição total (F5) que apresentou valor próximo ao controle (F1), semelhante ao ocorrido em sua solubilidade, o que pode estar relacionado a variação da miscibilidade entre óleo e matriz em altas concentrações, ou a formação de moléculas de água encapsuladas na matriz filmogênica como relatado também por Criollo-Feijoo et al. (2024) e Hernández, Ludueña e Flores (2024). Considerando a estrutura da goma de alfarroba, uma galactomanana com uma razão manose:galactose específica (Barak e Mudgil, 2014), é possível que em altas concentrações de óleo e a ausência total de glicerol, a interação entre o polissacarídeo e o lipídio seja menos eficiente, resultando em uma estrutura heterogênea, capaz de aprisionar umidade ou apresentar diferentes afinidades pela água em microdomínios distintos.

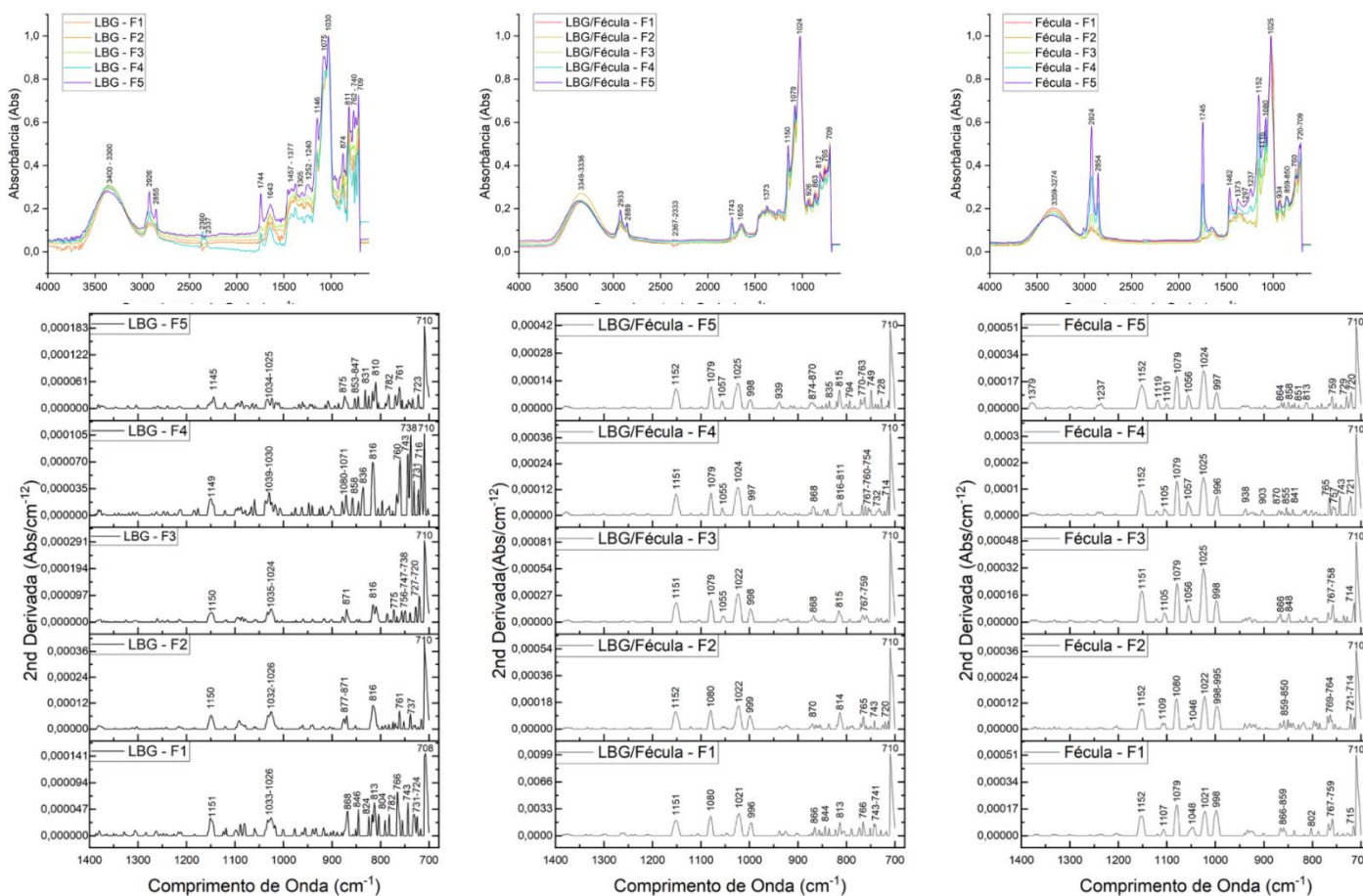
Nos filmes LBG/fécula (25:75), a substituição progressiva levou a queda mais acentuada dos teores de umidade, o que sugere que a interação entre os dois polímeros favoreceu o encapsulamento do óleo e restringiu a absorção de água. Já nos filmes a base de fécula, a redução foi significativa já com a substituição parcial (F4) e manteve-se na substituição total (F5), indicando que a fécula responde de forma mais direta a presença do plastificante lipídico.

Análise Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Os resultados para análise de infravermelho com transformada de Fourier são apresentados na Figura 8, em espectros obtidos para cada amostra, considerando as

diferentes composições de filmes de um mesmo polímero. Também na Figura 8, são apresentados os módulos dos picos negativos da derivada segunda da região denominada “impressão digital” do polissacarídeo (de 1400 a 700 cm^{-1}), visando aumentar a resolução espectral e permitir a identificação e o acompanhamento de picos individuais que, de outra forma, permaneceriam ocultos, facilitando assim o detalhamento das interações moleculares (Alves *et al.*, 2024)

Figura 8– Espectros obtidos por análise de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e respectivas derivadas segundas para os filmes de LBG, fécula e seus conjugados.



Fonte: Autor (2025)

Para os filmes de LBG, a formulação F1 apresentou uma banda O-H larga e característica em $\sim 3400\text{-}3300\text{ cm}^{-1}$, refletindo a interação da galactomanana com o glicerol por meio de ligações de hidrogênio, além dos picos associados às vibrações de estiramento de C-H em $\sim 2926\text{ cm}^{-1}$. Esta região de estiramento O-H é altamente sensível a interações intermoleculares (Ahmed *et al.*, 2023; Costa *et al.*, 2022; Henning *et al.*, 2022). A região de impressão digital exibiu as bandas típicas do LBG, incluindo as vibrações das unidades de β -D-manopiranosose ($\sim 870\text{-}875\text{ cm}^{-1}$) e α -D-galactopiranosose ($\sim 810\text{-}817\text{ cm}^{-1}$), e os estiramentos das ligações O-C-O, C-O e C-O-C em $\sim 1150, 1075, 1030\text{ cm}^{-1}$, respectivamente (Ektiren, Güneş e Vardin, 2025; Liu *et al.*, 2020). A adição do emulsificante (F2) resultou em poucas alterações evidentes, similarmente a outros sistemas poliméricos. A introdução do óleo de buriti (F3) e a subsequente substituição do glicerol (F4 e F5) levaram ao surgimento e aumento progressivo de uma banda em torno de $\sim 1744\text{ cm}^{-1}$, atribuída ao estiramento C=O dos grupos éster presentes no óleo de buriti (Costa *et al.*, 2022), e a um aumento na intensidade das bandas de estiramento C-H ($\sim 2926\text{ cm}^{-1}$ e $\sim 2854\text{ cm}^{-1}$) devido às longas cadeias alifáticas do óleo. As alterações na banda O-H foram cruciais para inferir a formação de novas ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxila do LBG e os grupos éster do óleo, especialmente com a diminuição da contribuição do glicerol. Deslocamentos nos picos da região de impressão digital do LBG, podem indicar que o novo ambiente plastificante afeta a conformação molecular do LBG, uma vez que a literatura reporta que interações em misturas podem deslocar picos característicos de galactomananas (Martins *et al.*, 2012).

Nos filmes conjugados LBG/fécula, a amostra F1 (controle) apresentou um espectro complexo com contribuições de ambos os polissacarídeos e do glicerol, em que interações por ligações de hidrogênio entre LBG-fécula, LBG-glicerol e fécula-glicerol são esperadas. O efeito do emulsificante (F2) foi similarmente discreto. A incorporação do óleo de buriti (F3) e a substituição do glicerol (F4, F5) foram claramente evidenciadas pelo aumento da banda de estiramento das ligações C=O do éster do óleo ($\sim 1743\text{ cm}^{-1}$). A substituição do glicerol pelo óleo pode modular não apenas as interações polímero-plastificante, mas também as interações polímero-polímero (LBG-fécula). Deslocamentos nos picos característicos da fécula ou do LBG na presença um do outro e sob diferentes condições de plastificação podem indicar alterações na miscibilidade ou no tipo de interação entre os dois polissacarídeos,

como o envolvimento de grupos C-O-C em interações intermoleculares, conforme sugerido por estudos como o de Martins et al. (2012) em misturas de LBG/k-carragena. A região da impressão digital se apresentou rica em vibrações de estiramento das ligações C-O ($\sim 1050\text{ cm}^{-1}$, 1150 cm^{-1} a 1080 cm^{-1}) presentes nos grupos hidroxila e nas ligações éter C-O-C ($1160\text{-}1030\text{ cm}^{-1}$) que formam as conexões glicosídicas entre as unidades monoméricas (Henning et al., 2022; Liu et al., 2020).

Já nos filmes à base de fécula, o espectro do filme controle (F1) exibiu o perfil característico do amido plastificado. Uma proeminente banda larga é observada em torno de $3300\text{-}3274\text{ cm}^{-1}$, correspondente à região de estiramento O-H, refletindo as múltiplas ligações de hidrogênio entre a fécula, o glicerol e a água residual (Costa et al., 2022; Henning et al., 2022; Weligama Thuppahige et al., 2023). Picos de estiramento C-H, provenientes da estrutura do polissacarídeo, foram identificados em $\sim 2924\text{ cm}^{-1}$ (Costa et al., 2022). A banda de éster em $\sim 1745\text{ cm}^{-1}$, marcador para o óleo de buriti (Costa et al., 2022), está praticamente ausente. A adição do emulsificante na formulação F2 não promoveu alterações drásticas perceptíveis. Com a introdução do óleo de buriti emulsificado em F3, o surgimento da banda em $\sim 1745\text{ cm}^{-1}$ e o aumento na intensidade das bandas C-H indicam a presença do óleo. A progressiva substituição do glicerol pelo óleo de buriti em F4 e F5 intensificou significativamente estas características. Concomitantemente, a banda O-H sofreu alterações notáveis, a redução da quantidade de glicerol tendeu a diminuir a intensidade geral desta banda (Ahmed et al., 2023), e deslocamentos observados podem indicar a formação de novas ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxila da fécula e os grupos carbonila (C=O) dos ésteres do óleo (Henning et al., 2022).

Nos espectros de derivada segunda da região de impressão digital, o aparecimento ou intensificação de picos, como o observado em 1379 cm^{-1} para a amostra F5 de fécula, juntamente com possíveis deslocamentos nas bandas de C-O (~ 1152 , 1079 , $1021\text{-}1025\text{ cm}^{-1}$), podem sinalizar interações específicas e rearranjos estruturais do amido induzidos pela presença do óleo de buriti na ausência de glicerol (Henning et al., 2022).

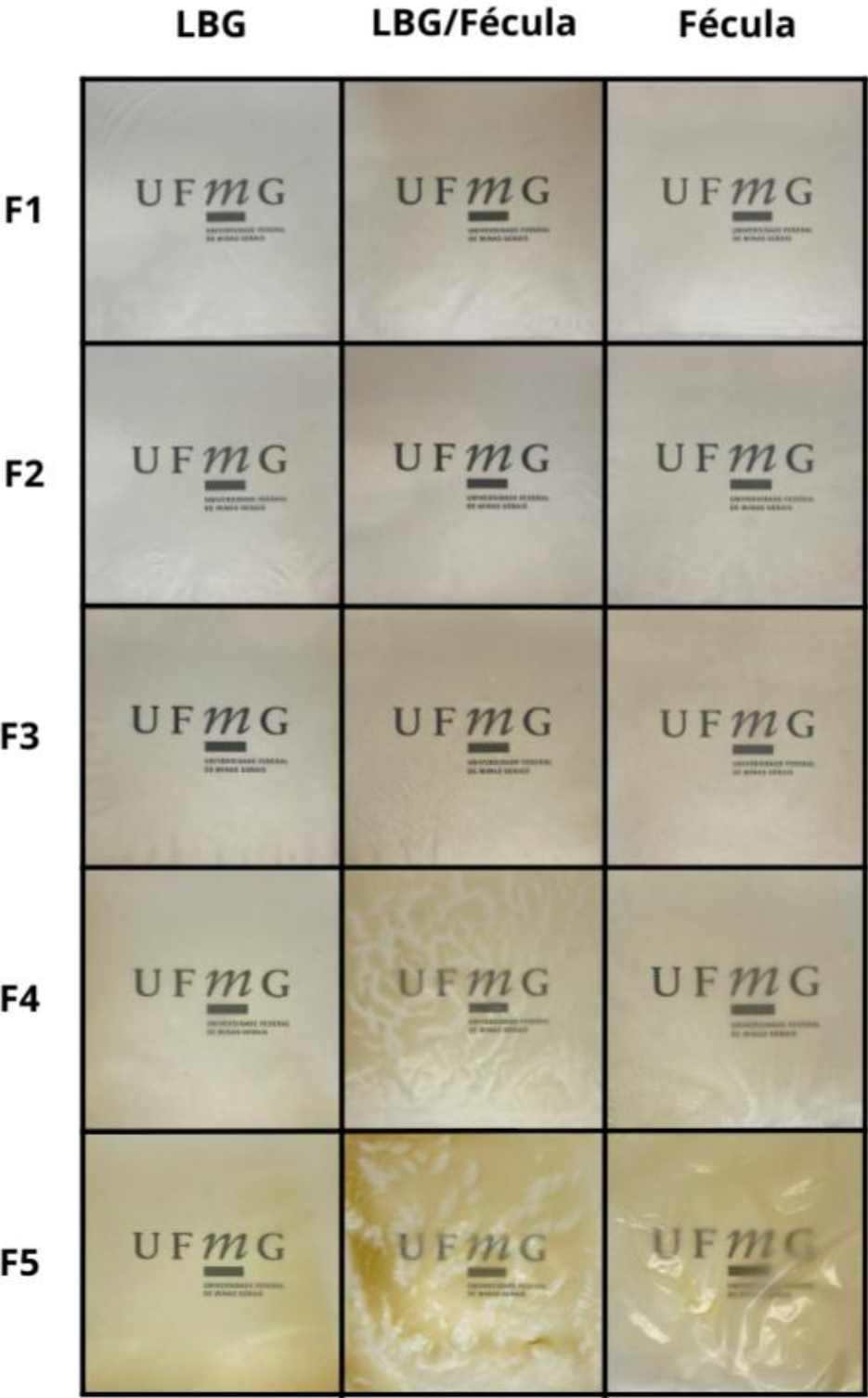
A transição do glicerol para o sistema de óleo de buriti como plastificante induziu mudanças espectrais consistentes em todos os sistemas poliméricos. O glicerol atua eficientemente na formação de segunda de hidrogênio com os

polissacarídeos (Ahmed *et al.*, 2023). Sua remoção e substituição pelo óleo de buriti altera fundamentalmente a natureza das interações; enquanto o óleo pode formar segunda de hidrogênio por intermédio dos oxigênios dos respectivos grupos éster ($\text{C=O} \cdots \text{H-O-polímero}$), a ausência de grupos O-H doadores no óleo (comparado ao glicerol) e a presença das cadeias apolares sugerem um mecanismo de plastificação e interações distintas. A diminuição da intensidade da banda O-H e os possíveis deslocamentos observados com a substituição do glicerol corroboram essa mudança no padrão de ligações de hidrogênio. Interações entre óleo de buriti e amido, evidenciadas por alterações em bandas de FTIR, já foram demonstradas anteriormente (Costa *et al.*, 2022).

Propriedades Ópticas

As propriedades ópticas dos filmes desenvolvidos, avaliadas pelos parâmetros de cor (L^* , a^* , b^* , c^* , H^*) e opacidade, demonstrados na Tabela 3, evidenciam o impacto da composição da matriz polimérica e da incorporação do óleo de buriti em diferentes proporções. As imagens complementares permitem uma observação visual direta da aparência dos filmes, reforçando os dados obtidos instrumentalmente, como visto na Figura 9.

Figura 9– Fotografia digital dos filmes a base de goma de alfarroba e fécula de mandioca.



Fonte: Autor (2025).

Tabela 3– Valores médios da análise colorimétrica e de opacidade dos filmes de goma de alfarroba, fécula d mandioca e seus respectivos conjugados.

Amostra		L*	a*	b*
LBG	F1	28,217±0,816 ^c	-0,030±0,075 ^b	5,270±0,190 ^{cd}
	F2	27,343±0,335 ^c	0,237±0,130 ^a	4,600±0,271 ^d
	F3	30,493±0,491 ^b	-0,097±0,105 ^b	6,030±0,211 ^{bc}
	F4	31,097±1,286 ^b	-0,163±0,057 ^b	6,500±0,524 ^b
	F5	33,343±0,346 ^a	-0,093±0,055 ^b	9,600±0,560 ^a
		c*	H*	Opacidade
	F1	5,270±0,189 ^{cd}	90,346±0,841 ^a	13,920±0,136 ^a
	F2	4,608±0,264 ^d	86,990±1,760 ^b	11,702±0,526 ^b
	F3	6,031±0,209 ^{bc}	90,932±1,033 ^a	11,236±0,188 ^b
	F4	6,502±0,523 ^b	91,460±0,553 ^a	11,585±0,569 ^b
	F5	9,601±0,559 ^a	90,571±0,351 ^a	14,146±1,235 ^a
LBG/Fécula (25:75)		L*	a*	b*
	F1	24,863±1,527 ^c	0,317±0,182 ^a	5,023±0,837 ^b
	F2	27,213±0,327 ^{bc}	0,360±0,269 ^a	5,047±0,234 ^b
	F3	30,710±0,697 ^a	0,627±0,041 ^a	9,9967±0,118 ^{ab}
	F4	29,467±0,344 ^{ab}	0,287±0,085 ^a	7,120±0,759 ^{ab}
	F5	31,860±2,160 ^a	0,937±1,347 ^a	14,240±6,740 ^a
		c*	H*	Opacidade
	F1	5,035±0,846 ^b	86,503±1,504 ^a	16,422±0,503 ^a
	F2	5,065±0,218 ^b	85,840±3,190 ^a	16,266±0,230 ^b
	F3	10,016±0,116 ^{ab}	86,411±0,268 ^a	16,505±0,237 ^a
	F4	7,126±0,762 ^{ab}	87,727±0,468 ^a	9,670±0,265 ^c
	F5	14,290±6,820 ^a	87,250±3,230 ^a	9,679±0,115 ^c
Fécula		L*	a*	b*
	F1	20,907±1,445 ^c	1,113±0,265 ^a	8,553±0,111 ^a
	F2	30,493±0,827 ^a	0,803±0,129 ^{ab}	6,127±0,181 ^d
	F3	27,453±0,159 ^b	0,473±0,169 ^{bc}	6,203±0,126 ^d
	F4	26,460±0,539 ^b	0,207±0,182 ^c	6,897±0,189 ^c
	F5	26,690±1,810 ^b	0,257±0,110 ^c	7,767±0,222 ^b

Tabela 3 – (continuação)

Amostra		c*	H*	Opacidade
Fécula	F1	8,628±0,081 ^a	82,570±1,830 ^b	21,461±1,137 ^a
	F2	6,180±0,197 ^d	82,550±0,957 ^b	11,906±1,211 ^c
	F3	6,223±0,123 ^d	85,632±1,577 ^{ab}	12,765±1,503 ^{bc}
	F4	6,901±0,182 ^c	88,256±1,572 ^a	15,591±0,574 ^b
	F5	7,771±0,219 ^b	88,094±0,848 ^a	10,720±1,089 ^c

F1 = filme controle; F2 = filme controle + emulsificante; F3 = filme controle + óleo buriti emulsificado; F4 = filme com substituição parcial (50%) do glicerol; F5 = filme com substituição total do glicerol. Médias com as mesmas letras na mesma coluna, em um mesmo grupo amostral, não apresentam diferenças estatísticas ($p > 0.05$).

Fonte: Dados Experimentais (2025).

Com relação ao parâmetro de luminosidade (L^*), os filmes com LBG apresentaram um aumento significativo desse valor com a adição de óleo, sendo o filme F5 o mais claro ($L^* = 33,343$), isso sugere que a incorporação do óleo pode ter promovido uma maior homogeneidade na dispersão da luz. De forma semelhante, nas formulações com LBG/fécula (25:75), os valores de L^* aumentaram progressivamente com o teor de óleo, alcançando 31,860 na amostra F5, refletindo maior luminosidade e brilho, o que também é notável na fotografia, onde esses filmes exibem coloração amarelada mais intensa e aparência translúcida, embora com maior heterogeneidade superficial. Já nas formulações de fécula, mesmo com o aumento de L^* com a adição de óleo, os valores permaneceram inferiores aos observados nas demais formulações, e as imagens mostram filmes mais opacos e com aspecto visual mais espesso e rugoso, especialmente na formulação F5.

Souza, de et al. (2022) notou o mesmo em seu trabalho ao analisar a interação entre o amido de mandioca e o óleo de buriti em filmes biodegradáveis, sugerindo que a incorporação de lipídeos na matriz polimérica causa a dispersão de gotículas de óleos que afetam a transparência do filme modificando o fluxo de luz.

A intensidade de cor (c^*), que expressa a saturação da cor, foi marcadamente maior nas amostras com óleo, principalmente naquelas com 100% de substituição (F5), com destaque para os filmes LBG/fécula (25:75), que atingiram 14,29. Isso está diretamente relacionado a coloração amarelada, como evidenciado tanto pelos altos valores de b^* quanto pelas imagens dos filmes, que mostram a tonalidade amarelada mais intensa nos filmes com maior teor de óleo, especialmente nas matrizes com

fécua. Visualmente, isso se confirma pela coloração mais vívida, característica dessa formulação.

A intensificação da coloração amarelada e o aumento da saturação da cor (c^*) nos filmes com óleo de buriti são atribuíveis diretamente ao seu rico perfil de pigmentos naturais (Bispo-Jr *et al.*, 2018; Resende, Franca e Oliveira, 2019; Silva, da e Rial, 2025), que são responsáveis por sua coloração amarelo alaranjada intensa. A incorporação desses cromóforos lipofílicos na matriz do filme justifica as alterações observadas nos parâmetros colorimétricos, sugerindo também um potencial do óleo como corante natural para os biomateriais desenvolvidos.

O parâmetro H^* , que define o matiz da cor, apresentou certas particularidades entre as matrizes. Nos filmes LBG, os valores de H^* para as amostras controle e as contendo óleo de buriti (F3, F4 e F5) situaram-se muito próximos a 90° , indicando uma tonalidade amarela bastante pura. A amostra LBG F2 apresentou um H^* ligeiramente menor ($87,0^\circ$). Por outro lado, os filmes de fécula pura tenderam a apresentar valores de H^* um pouco mais baixos, variando de $82,5^\circ$ a $88,2^\circ$, e os filmes de conjugados LBG/fécua (25:75) mostraram H^* entre $85,8^\circ$ e $87,7^\circ$. Embora todos permaneçam no quadrante amarelo, os valores de H^* mais próximos de 90° nos filmes de LBG com óleo sugerem um amarelo mais neutro.

Visualmente, nas imagens, a intensidade da coloração amarela (relacionada também ao croma, c^*) parece mais pronunciada nos filmes com maior teor de fécula e óleo (F3, F4 e F5), o que pode ser devido à combinação do matiz com a saturação da cor (valores de c^*), conferindo-lhes um aspecto de amarelo mais vibrante em comparação com alguns filmes de LBG que, apesar do H^* próximo a 90° , podem ter uma saturação de cor (c^*) diferente.

A opacidade dos filmes, por sua vez, apresentou comportamento inverso à transparência visual percebida. Os filmes controle de fécula (F1) exibiram o maior valor (21,46), indicando menor transparência, o que pode estar relacionado à microestrutura intrínseca da rede de amido e suas características de espalhamento de luz (Adhikary *et al.*, 2023). A incorporação do óleo reduziu significativamente a opacidade nas três matrizes, no entanto, as imagens revelam que a presença de óleo em altas proporções pode gerar heterogeneidades e áreas de aglomeração, especialmente nas formulações de fécula pura e LBG/fécua, evidenciando possíveis

separações de fase, fenômeno comum em sistemas mistos de biopolímeros devido à incompatibilidade termodinâmica dos dois polímeros ou problemas de emulsificação (Wang, Q. *et al.*, 2025). A maior transparência em filmes para embalagens de alimentos é uma característica vantajosa, pois permite a visualização do produto, auxiliando na avaliação de sua qualidade e influenciando positivamente a aceitação pelo consumidor (Rahman e Bhoi, 2021).

Propriedades de Barreira

As propriedades de barreira dos filmes, especialmente quanto à taxa de transmissão de vapor de água (TTVA), permeabilidade ao vapor de água (PVA) e permeabilidade ao oxigênio (PVO), foram significativamente influenciadas pela composição das formulações, como pode ser observado na Tabela 4. De modo geral, a incorporação do óleo de buriti, como alternativa ao glicerol, afetou os parâmetros de barreira de maneira distinta entre as diferentes matrizes poliméricas.

Tabela 4– Valores médios de taxa de transmissão de vapor de água (TTVA), permeabilidade ao vapor de água (PVA) e permeabilidade ao oxigênio (PVO) dos filmes de goma de alfarroba, fécula de mandioca e seus respectivos conjugados.

Amostra		TTVA	PVA	PVO
		($\times 10^{-3}$ g/s.m ²)	($\times 10^{-10}$ g/s.m.Pa)	($\times 10^{-9}$ g/s.mm ²)
LBG	F1	4,884 $\pm$ 0,721 ^a	0,957 $\pm$ 0,141 ^{ab}	5,908 $\pm$ 0,542 ^a
	F2	4,681 $\pm$ 0,873 ^a	1,130 $\pm$ 0,211 ^a	6,466 $\pm$ 0,252 ^a
	F3	3,504 $\pm$ 0,143 ^{ab}	0,833 $\pm$ 0,034 ^{abc}	6,348 $\pm$ 0,183 ^a
	F4	2,692 $\pm$ 0,628 ^b	0,647 $\pm$ 0,151 ^{bc}	2,985 $\pm$ 0,113 ^b
	F5	2,223 $\pm$ 0,353 ^b	0,548 $\pm$ 0,087 ^c	2,917 $\pm$ 0,576 ^b
LBG/Fécula (25:75)	F1	3,438 $\pm$ 0,925 ^a	0,603 $\pm$ 0,162 ^b	3,363 $\pm$ 0,141 ^a
	F2	3,165 $\pm$ 0,245 ^{ab}	0,572 $\pm$ 0,044 ^b	3,307 $\pm$ 0,034 ^a
	F3	2,971 $\pm$ 0,191 ^{ab}	0,587 $\pm$ 0,038 ^b	3,495 $\pm$ 0,705 ^a
	F4	2,123 $\pm$ 0,261 ^b	0,694 $\pm$ 0,085 ^b	3,355 $\pm$ 0,946 ^a
	F5	3,580 $\pm$ 0,359 ^a	1,352 $\pm$ 0,135 ^a	2,896 $\pm$ 0,765 ^a
Fécula	F1	3,268 $\pm$ 0,684 ^a	0,486 $\pm$ 0,102 ^a	6,276 $\pm$ 0,083 ^a
	F2	3,139 $\pm$ 0,336 ^a	0,526 $\pm$ 0,056 ^a	3,166 $\pm$ 0,197 ^c
	F3	3,378 $\pm$ 0,477 ^a	0,695 $\pm$ 0,098 ^a	3,670 $\pm$ 0,212 ^c
	F4	3,077 $\pm$ 1,280 ^a	0,633 $\pm$ 0,263 ^a	3,092 $\pm$ 0,383 ^c
	F5	2,566 $\pm$ 0,580 ^a	0,638 $\pm$ 0,144 ^a	4,550 $\pm$ 0,369 ^b

F1 = filme controle; F2 = filme controle + emulsificante; F3 = filme controle + óleo buriti emulsificado; F4 = filme com substituição parcial (50%) do glicerol; F5 = filme com substituição total do glicerol. Médias com as mesmas letras na mesma coluna, em um mesmo grupo amostral, não apresentam diferenças estatísticas ($p > 0.05$).

Fonte: Dados Experimentais (2025).

Nos filmes elaborados com goma de alfarroba (LBG), observou-se uma redução significativa da TTVA nas formulações com 50 e 100% de substituição de glicerol por óleo (F4 e F5), com valores diminuindo de $4,884 \pm 0,721 \times 10^{-3}$ g/s.m² (F1) para $2,223 \pm 0,353 \times 10^{-3}$ g/s.m² na formulação com 100% de óleo (F5). Essa redução pode ser atribuída ao caráter hidrofóbico do óleo, que tende a dificultar a difusão de moléculas de água através da matriz (Hernández, Ludueña e Flores, 2024; Iacovone, Guz e Famá, 2024). Comportamento semelhante foi observado na PVA, com valores decrescendo até $0,5483 \pm 0,0872 \times 10^{-10}$ g/s.m.Pa, indicando melhora na resistência à permeação de vapor de água. Além disso, houve queda expressiva na PVO, com

redução de aproximadamente 50% nas amostras com óleo, sugerindo que o óleo também impacta positivamente na barreira ao oxigênio.

Os resultados obtidos para a permeabilidade ao vapor de água (PVA) e para a taxa de transmissão de vapor de água (TTVA) dos filmes formulados com goma de alfarroba apresentaram-se compatíveis com dados reportados na literatura para essa classe de biopolímero. Autores como Mostafavi et al. (2016) relataram valores de PVA em torno de $0,75 \times 10^{-10} \text{ g/(s}\cdot\text{m}\cdot\text{Pa)}$ e TTVA de $5,3555 \times 10^{-3} \text{ g/(s}\cdot\text{m}^2)$ em filmes baseados em goma de alfarroba, resultados similares aos observados nesta pesquisa. Gouvêa et al. (2024) também encontraram valores próximos, com TTVA de $0,544 \times 10^{-3} \text{ g/(s}\cdot\text{m}^2)$ em filmes de LBG contendo 15% de glicerol como plastificante. Já Kurt e Kahyaoglu (2014) reportaram uma permeabilidade de $0,34 \times 10^{-10} \text{ g/(s}\cdot\text{m}\cdot\text{Pa)}$ em filmes de goma de alfarroba com 10% de glicerol, evidenciando que tanto a matriz polimérica quanto a proporção de plastificante exercem influência direta sobre as propriedades de barreira dos filmes.

Nas amostras LBG/fécua, a resposta ao óleo foi mais variável. Embora a TTVA tenha diminuído significativamente na formulação F4, atingindo $2,123 \pm 0,261 \times 10^{-3} \text{ g/s}\cdot\text{m}^2$, a formulação F5 apresentou valor elevado ($3,580 \pm 0,359 \times 10^{-3} \text{ g/s}\cdot\text{m}^2$), comparável ao controle (F1). Tal resultado pode indicar uma limitação na dispersão do óleo na matriz, especialmente em teores elevados, o que pode levar à formação de domínios lipídicos desorganizados que reduzem a coesão da rede e favorecem a permeação de vapor (Costa *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2021). A PVA também aumentou significativamente nesse ponto ($1,3519 \pm 0,1354 \times 10^{-10} \text{ g/s}\cdot\text{m}\cdot\text{Pa}$), o que reforça essa hipótese. No entanto, a PVO não apresentou nenhuma redução significativa nas formulações com óleo (Lopes *et al.*, 2023).

Tais resultados de propriedades de barreira dos filmes de conjugados podem também ser explicados pela não homogeneidade apresentada pelos filmes, visivelmente perceptíveis, principalmente nos filmes com substituição total do glicerol (F5). A não homogeneidade pode facilitar a dispersão dos gases e vapor de água pela matriz polimérica (Hernández, Ludueña e Flores, 2023; Zhou *et al.*, 2021).

Já os filmes compostos majoritariamente por fécula de mandioca apresentaram comportamento distinto. A TTVA não diferiu significativamente entre as formulações, mantendo-se em torno de 3. Isso sugere uma baixa sensibilidade da matriz amilácea

pura à modificação lipídica, possivelmente pela estrutura mais densa da rede de amido, que limita a mobilidade e incorporação eficaz do óleo, o mesmo foi relatado por Zhou et al. (2021) ao adicionar óleo de canela em filmes a base de fécula de mandioca. A PVA também não apresentou diferenças estatísticas relevantes. Por outro lado, a PVO sofreu redução nas formulações com adição de óleo, especialmente na amostra F2 ($3,166 \pm 0,197 \times 10^{-9} \text{ g/s}\cdot\text{mm}^2$) e F3 ($3,092 \pm 0,383 \times 10^{-9} \text{ g/s}\cdot\text{mm}^2$), em comparação com o controle (F1) ($6,2765 \pm 0,0829 \times 10^{-9} \text{ g/s}\cdot\text{mm}^2$), o que sugere que a adição de goma arábica pode favorecer a formação de barreiras eficazes ao oxigênio, possivelmente pela indução de estruturas mais organizadas, com uma melhor interação entre os componentes da mistura, mesmo que presentes na matriz polimérica em uma proporção tão baixa (Criollo-Feijoo *et al.*, 2024).

Para filmes de conjugados de goma de alfarroba e amido, encontram-se na literatura estudos como os de Fronza et al. (2024) que utilizou metodologia similar ao do presente estudo e encontrou valores de $0,42 \times 10^{-10} \text{ g/s}\cdot\text{m}\cdot\text{Pa}$ para o PVA de seus filmes controles.

Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos filmes, representadas pelo limite de resistência à tração (LRT), percentual de alongamento na ruptura (%AL) e módulo de elasticidade (E), apresentaram variações expressivas conforme a composição da matriz polimérica e o tipo de plastificante utilizado, como observado na Tabela 5. Os resultados evidenciam o impacto significativo da incorporação do óleo de buriti na estrutura dos filmes, alterando sua resistência, flexibilidade e rigidez.

Tabela 5– Valores médios de limite de resistência à tração (LRT), percentual de alongamento na ruptura (%AL) e módulo de elasticidade (E) dos filmes de goma de alfarroba, fécula de mandioca e seus respectivos conjugados.

Amostra		Limite de Resistência à Tração (MPa)	Percentual de Alongamento na Ruptura (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
LBG	F1	24,230±2,750 ^b	75,320±8,700 ^a	10,315±1,342 ^c
	F2	31,460±2,350 ^b	70,850±5,480 ^{ab}	20,690±4,430 ^c
	F3	25,968±1,509 ^b	62,460±3,540 ^b	17,220±1,959 ^c
	F4	45,920±3,750 ^a	33,190±5,050 ^c	970,900±143,600 ^b
	F5	43,630±7,320 ^a	8,950±4,010 ^d	1563±435 ^a
LBG/Fécula (25:75)	F1	2,371±0,456 ^b	73,610±5,570 ^a	1,740±0,363 ^b
	F2	5,911±1,293 ^a	68,850±6,740 ^a	3,954±1,368 ^b
	F3	3,373±1,261 ^b	67,650±11,140 ^a	3,171±0,200 ^b
	F4	3,121±0,548 ^b	7,678±1,882 ^b	88,100±51,300 ^a
	F5	0,302±0,109 ^c	1,726±0,853 ^b	-
Fécula	F1	1,749±0,822 ^b	131,600±61,800 ^{ab}	1,234±0,234 ^b
	F2	2,568±0,350 ^b	78,850±4,840 ^b	21,890±6,200 ^b
	F3	1,751±0,107 ^b	139,400±24,200 ^a	10,900±3,110 ^b
	F4	5,310±2,540 ^a	2,481±0,509 ^c	415,700±109,800 ^a
	F5	1,517±1,448 ^b	1,124±0,233 ^c	-

F1 = filme controle; F2 = filme controle + emulsificante; F3 = filme controle + óleo buriti emulsificado; F4 = filme com substituição parcial (50%) do glicerol; F5 = filme com substituição total do glicerol. Médias com as mesmas letras na mesma coluna, em um mesmo grupo amostral, não apresentam diferenças estatísticas ($p > 0.05$).

Fonte: Dados Experimentais (2025).

Para os filmes à base de goma de alfarroba (LBG), observou-se que o controle, formulado apenas com glicerol (F1), apresentou valores intermediários de resistência ($24,23 \pm 2,75$ MPa) e elevada flexibilidade, com alongamento na ruptura de $75,32 \pm 8,70$ %. A adição de goma, sem o óleo (F2), causou apenas um leve aumento no LRT ($31,46 \pm 2,35$ MPa), porém sem diferença significativa, mantendo também um bom desempenho em %AL ($70,85 \pm 5,48$ %), indicando que a matriz de LBG, quando combinada com o glicerol, promove boa coesão entre as cadeias poliméricas sem comprometer a elasticidade (Lopes *et al.*, 2023). No filme com adição do óleo de buriti, mantendo a proporção do glicerol (F3), o LRT ($25,968 \pm 1,509$ MPa) se manteve

similar ao controle, enquanto o %AL teve uma redução para $62,46 \pm 3,54$ %, sugerindo que a adição do óleo, mesmo que em pequena quantidade, promove menor mobilidade entre as cadeias.

Os filmes obtidos com utilização do óleo de buriti em substituição ao plastificante (F4 e F5) apresentaram alterações mais significativas com relação às propriedades mecânicas. O LRT aumentou significativamente para $45,92 \pm 3,75$ MPa (50%) e $43,63 \pm 7,32$ MPa (100%), indicando interações intermoleculares que conferem maior coesão à matriz (Lopes *et al.*, 2023). Por outro lado, o AL% decresceu drasticamente, atingindo apenas $8,95 \pm 4,01$ % na formulação com 100% de óleo (F5). Esse comportamento evidencia uma fragilidade estrutural crescente com a substituição do glicerol, refletindo em uma maior rigidez e perda de elasticidade (Matheus *et al.*, 2023).

Esse fato é corroborado pelos altos valores de módulo de elasticidade observados nas amostras com óleo, que saltaram de $10,315 \pm 1,342$ MPa (F1) para $970,9 \pm 143,6$ MPa (F4) e 1563 ± 435 MPa (F5). Tais argumentos sugerem que o óleo de buriti atua nesse caso, não como plastificante, mas como agente de reforço estrutural, o que pode ocorrer por possuírem cadeias mais longas, quando comparadas as do glicerol, promovendo filmes mais rígidos e menos elásticos (Chen *et al.*, 2025; Matheus *et al.*, 2023).

A atuação do óleo de buriti como agente de reforço ou mesmo como um antiplastificante nestas formulações de LBG pode ser atribuída à sua estrutura molecular de triglicerídeo de cadeia longa, que, em vez de facilitar a mobilidade das cadeias poliméricas como o pequeno e polar glicerol, pode estar restringindo o movimento segmentar ou preenchendo espaços livres de forma a aumentar a rigidez da rede. A possível incompatibilidade parcial entre o óleo hidrofóbico e a matriz de LBG também pode levar à formação de domínios lipídicos que agem como pontos de concentração de tensão, reduzindo o alongamento, um fenômeno que pode ocorrer quando a interação polímero-plastificante não é otimizada (Farhan *et al.*, 2025; Suderman, Isa e Sarbon, 2018).

Lopes *et al.* (2023) relatam em seus estudos que a redução do glicerol de 30% para 15% em materiais à base de pó de moagem de alfarroba de 5 g/100 mL aumentou significativamente a resistência à tração dos bioplásticos de 5 MPa para 11

MPa e o módulo de Young de 26 MPa para 253 MPa. Em contrapartida, o alongamento na ruptura caiu de 85% para 23% na menor concentração de glicerol testada. Esses resultados indicam que a redução do teor de glicerol promove maior rigidez aos filmes. O mesmo comportamento foi observado em bioplásticos formulados com 10 g/100 mL de pó de moagem de alfarroba, reforçando que o glicerol, como plastificante, diminui a interação entre os constituintes do material, melhorando suas propriedades mecânicas.

Em relação aos filmes conjugados (LBG/fécula), observou-se um perfil mecânico bastante distinto (vide Tabela 7). O controle (F1) apresentou baixa resistência ($2,371 \pm 0,456$ MPa) e alto alongamento ($73,61 \pm 5,57$ %), características típicas de materiais plastificados com glicerol em estruturas predominantemente amilácea, como relatado por Matheus et al. (2023). A adição da goma (F2) promoveu um aumento expressivo no LRT ($5,911 \pm 1,293$ MPa), com boa retenção da flexibilidade (%AL de $68,85 \pm 6,74$ %), sugerindo que a presença da goma arábica contribuiu para reforçar a estrutura sem comprometer a capacidade de deformação (Criollo-Feijoo *et al.*, 2024; Farahnaky, Saberi e Majzoobi, 2013).

Já com a adição do óleo, o LRT aumentou levemente em relação ao controle F1 ($3,373 \pm 1,261$ MPa), mantendo a flexibilidade (%AL de $67,65 \pm 11,14$ %). Contudo, com a substituição do parcial (F4) do glicerol pelo óleo de buriti, o LRT caiu para $3,121 \pm 0,548$ MPa e o %AL despencou para $7,678 \pm 1,882$ %, revelando que a redução do glicerol comprometeu severamente a capacidade de deformação do material, efeito que foi ainda mais acentuado na formulação com substituição total (F5), que apresentou valores mínimos de resistência ($0,3026 \pm 0,1092$ MPa) e alongamento ($1,726 \pm 0,853$ %). Esses dados indicam que a junção dos polímeros goma de alfarroba e fécula de mandioca, quando associada ao óleo de buriti, sem glicerol, formam uma estrutura frágil e quebradiça, provavelmente devido à má dispersão do óleo na matriz rica em amido, ou à formação de uma fase descontínua, causada pela não homogeneidade da estrutura, que dificulta a propagação uniforme das tensões (Auras, Arroyo e Selke, 2009; Bergo *et al.*, 2008; Criollo-Feijoo *et al.*, 2024).

O módulo elástico refletiu essas mudanças estruturais, aumentando de $1,740 \pm 0,363$ MPa no controle (F1) para $88,1 \pm 51,3$ MPa na substituição parcial (F4), mostrando um ganho de rigidez expressivo com a retirada de parte do glicerol. Esse

aumento, associado à perda de elasticidade, reforça a ideia de que o óleo promove maior rigidez estrutural, mas à custa da flexibilidade, especialmente em matrizes com menor compatibilidade lipídica, como é o caso da fécula (Criollo-Feijoo *et al.*, 2024; Hernández, Ludueña e Flores, 2023).

Para os filmes à base de fécula pura, observou-se um comportamento mecânico particular. O filme controle (F1), formulado apenas com glicerol, apresentou baixa resistência à tração ($1,749 \pm 0,822$ MPa), porém uma notável flexibilidade, com um percentual de alongamento na ruptura de $131,6 \pm 61,8\%$. Esses valores são condizentes com as características de materiais predominantemente amiláceos e plastificados, que tendem a ser mais flexíveis e menos resistentes, como já relatado na literatura (Farahnaky, Saberi e Majzoobi, 2013; Matheus *et al.*, 2023). A adição do emulsificante na amostra F2 resultou em um leve aumento na resistência ($2,568 \pm 0,350$ MPa), mas com uma redução significativa na flexibilidade ($78,85 \pm 4,84\%$), sugerindo que a goma, apesar de conferir um pequeno reforço à estrutura, pode ter limitado a mobilidade das cadeias poliméricas da fécula, um comportamento que pode ser associado à interação entre polissacarídeos (Criollo-Feijoo *et al.*, 2024).

Quando o óleo de buriti foi incorporado à formulação, mantendo a proporção de glicerol (F3), o limite de resistência à tração ($1,7509 \pm 0,1075$ MPa) manteve-se similar ao controle, assim como o alongamento na ruptura ($139,4 \pm 24,2\%$), indicando que, nessa proporção e na presença do glicerol, o óleo não atuou como um agente de reforço nem comprometeu a elasticidade da matriz de fécula. No entanto, os filmes obtidos com a substituição parcial do glicerol pelo óleo de buriti (F4) apresentaram alterações drásticas nas propriedades mecânicas. O LRT aumentou significativamente para $5,31 \pm 2,54$ MPa, enquanto o percentual de alongamento na ruptura despencou drasticamente para $2,481 \pm 0,509\%$. Esse comportamento, acompanhado por um alto módulo de elasticidade ($415,7 \pm 109,8$ MPa), evidencia uma transição para um material muito mais rígido e frágil, característica que pode ser explicada pela redução do plastificante glicerol, como discutido por Lopes *et al.* (2023).

A substituição total do glicerol pelo óleo de buriti na amostra F5 resultou em um filme com resistência à tração ($1,517 \pm 1,448$ MPa) similar ao controle, mas com o alongamento na ruptura reduzido a um valor mínimo de $1,124 \pm 0,233\%$. Esses resultados para a fécula pura, especialmente nas formulações com substituição do

glicerol, reforçam a ideia de que o óleo de buriti não atuou como plastificante efetivo nessa matriz, mas, ao contrário, em certas concentrações, induziu uma maior rigidez e fragilidade ao material. A provável incompatibilidade ou má dispersão do óleo na matriz hidrofílica da fécula de mandioca pode estar causando a formação de uma estrutura descontínua que dificulta a dissipação de tensões, levando à redução drástica da capacidade de deformação e ao aumento da fragilidade (Auras, Arroyo e Selke, 2009; Nguyen *et al.*, 2025).

Estudos como os de Farahnaky, Saberi e Majzoobi (2013) testaram os efeitos do glicerol como plastificante em filmes de amido, variando a proporção do plastificante de 0 a 50% com base na matriz polimérica e obtendo valores que variaram de 19,52 a 2,87 MPa LRT, 2,15 a 16,69 de AL% e 1,05 a 124,14 MPa de módulo elástico, resultados condizentes com os obtidos no presente estudo.

As curvas tensão-deformação (vide anexo), obtidas para os filmes de fécula e LBG/fécula (25:75), com substituição total do glicerol por óleo de buriti (F5), apresentaram comportamentos típicos de materiais frágeis, com múltiplos picos de tensão seguidos por quedas abruptas, e uma curta região linear inicial na curva, impossibilitando a determinação exata do módulo de elasticidade, que pode ser considerado um dos parâmetros fundamentais sobre a rigidez do filme. Esse padrão pode ser associado a falta de um agente plastificante na formulação, evidenciando que para filmes com essas matrizes o óleo de buriti não assumiu essa função, reduzindo a coesão entre as cadeias poliméricas, tornando- mais denso e impossibilitando o movimento do polímero pela cadeia quando em situação de estresse, aumentando sua resistência e fragilidade (Costa *et al.*, 2022). Nguyen *et al.* (2025) testaram também a adição de diferentes óleos essenciais em filmes a base de amido de mandioca e relataram que a incorporação desses óleos em altas concentrações e baixo teor de plastificante deixou os filmes quebradiços impedindo que fossem realizados testes de ensaio mecânico.

Análise Termogravimétrica (TGA)

A estabilidade térmica e o comportamento de decomposição dos filmes desenvolvidos foram investigados por meio de análise termogravimétrica (TGA) e sua derivada (DTG), conforme ilustrado na Figura 10 e com os dados sumarizados na Tabela 6. De maneira geral, os filmes exibiram um comportamento de degradação

térmica em múltiplas etapas, um perfil comum para formulações biopoliméricas complexas, onde diferentes picos na curva DTG podem indicar a sobreposição de eventos de decomposição.

O primeiro estágio de perda de massa, com picos DTG evidenciados entre aproximadamente 71°C e 94°C, corresponde à evaporação da água ligada à matriz do filme. Nos filmes à base de LBG, observou-se uma tendência de redução da perda de umidade com a incorporação do óleo de buriti, como chegando a uma redução de quase 50% na amostra F3 em comparação com a amostra controle F1. Este comportamento é esperado, dado que o glicerol é altamente higroscópico, enquanto o óleo confere maior hidrofobicidade (Ahmed *et al.*, 2023; Martins *et al.*, 2012). No entanto, a substituição total do glicerol por óleo (F5) resultou em uma perda de umidade similar à do controle, sugerindo que a ausência completa de glicerol pode afetar a homogeneidade da dispersão do óleo, influenciando a retenção de água. Comportamento semelhante pode ser observado para os conjugados, a menor perda de umidade foi observada na amostra F4, com substituição parcial do plastificante, porém a substituição total F5 resultou em uma perda bem próxima à do controle.

Nos filmes de fécula pura, um comportamento distinto foi notado, as amostras com substituição de glicerol por óleo (F4 e F5) apresentaram perdas de umidade superior à do controle. Este aumento pode indicar que, para a matriz de fécula pura, a interação com o óleo de buriti pode levar a uma estrutura que, adsorve ou retém mais umidade superficialmente, ou que a eficiência do óleo em reduzir a afinidade da matriz pela água é menor nesta amostra específico (Criollo-Feijoo *et al.*, 2024; Hernández, Ludueña e Flores, 2024).

Notavelmente, em todas as três matrizes poliméricas, as formulações contendo goma arábica tenderam a apresentar valores de perda de umidade entre os mais elevados, sugerindo que a goma, apesar de seu papel emulsificante, pode contribuir para uma maior afinidade do sistema com a água ou alterar a microestrutura do filme de forma a aumentar a retenção de umidade (Ahmed *et al.*, 2023).

Um segundo evento térmico, evidenciado por picos ou ombros nas curvas DTG, ocorreu em uma faixa de temperatura de aproximadamente 198°C a 254°C. Este estágio é caracteristicamente associado à decomposição do glicerol nas amostras que o continham, um evento frequentemente relatado na literatura ocorrendo em

temperaturas próximas a 198°C ou na faixa de 170-230°C, podendo se estender até cerca de 290°C (Ahmed *et al.*, 2023; Criollo-Feijoo *et al.*, 2024; Dilkushi *et al.*, 2024; Martins *et al.*, 2012). Nas formulações onde o glicerol foi total ou parcialmente substituído pelo óleo de buriti, observou-se uma modificação neste perfil. Especificamente, as amostras F5 não apresentaram este evento.

A principal etapa de degradação dos polissacarídeos ocorreu em temperaturas mais elevadas, caracterizada por picos intensos no DTG, indicando a maior taxa de perda de massa. Para os filmes de LBG, a temperatura de máxima degradação (T_{máx}) situou-se consistentemente entre 310°C (F4) e 317°C (F1 e F4). Estes valores são compatíveis com os reportados para a decomposição térmica de LBG e outras galactomananas, próximas a 319 °C (Martins *et al.*, 2012). Nos filmes de fécula de mandioca, a T_{máx} da degradação principal ocorreu entre 328°C (F4 e F5) e 331°C (F2), valores um pouco mais altos do que os indicados pela literatura, que indicam que a degradação do amido de mandioca ocorre em torno de 250°C a 311°C, assim como os resíduos de mandioca, que mostraram comportamento térmico similar ao amido convencional (Hernández, Ludueña e Flores, 2024; Weligama Thuppahige *et al.*, 2023). Para os filmes de conjugados, a T_{máx} da degradação principal variou de 325°C (F5) a 328°C (F2). A relativa constância da T_{máx} dos polissacarídeos principais em cada sistema, mesmo com a variação dos plastificantes, sugere que a estabilidade térmica intrínseca das cadeias poliméricas não foi drasticamente alterada.

Tabela 6– Dados de interpretação das análises termogravimétricas dos filmes de goma de alfarroba, fécula de mandioca e seus respectivos conjugados.

Amostra	Estágios	Faixa de Degradação (°C)	Picos da DTG (°C)	Perda de Massa (%)	
LBG	F1	1°	35,91 - 160,20	83	12,993
		2°	164,95 - 487,57	198 - 317	65,117
		3°	489,26 - 599,29		4,549
		Resíduo			17,341
	F2	1°	36,12 - 161,48	85	11,881
		2°	164,29 - 431,77	220 - 316	64,477
		3°	433,46 - 599,19		7,531
		Resíduo			16,111
	F3	1°	49,02 - 159,27	92	6,923
		2°	184,50 - 349,71	220 - 316	58,400
		3°	352,21 - 435,61	419	9,198
		4°	441,53 - 599,35		7,365
		Resíduo			18,114
	F4	1°	40,71 - 169,89	90	9,934
		2°	172,97 - 352,77	254 - 317	51,674
		3°	355,90 - 458,98	423	13,392
		4°	463,49 - 599,23		6,315
		Resíduo			18,685
	F5	1°	40,77 - 202,99	82	11,905
		2°	224,80 - 346,62	254 - 310	42,025
3°		351,14 - 453,49	420	19,764	
4°		457,68 - 599,59		8,329	
Resíduo				17,977	

Tabela 6 – (continuação)

Amostra	Estágios	Faixa de Degradação (°C)	Picos da DTG (°C)	Perda de Massa (%)	
LBG/Fécula (25:75)	F1	1°	36,54 - 144,69	81	10,185
		2°	155,90 - 481,72	220 - 327	69,174
		3°	484,04 - 599,74		4,480
		Resíduo			16,161
	F2	1°	38,97 - 173,55	88	12,068
		2°	176,30 - 518,75	243 - 328	69,906
		3°	519,81 - 599,27		2,739
		Resíduo			15,287
	F3	1°	41,52 - 175,20	83	10,985
		2°	177,98 - 526,13	230 - 327	71,140
		3°	527,91 - 599,78		2,756
		Resíduo			15,119
	F4	1°	37,06 - 157,08	82	9,232
		2°	160,15 - 359,92	242 - 326	57,829
		3°	362,23 - 524,18	420	14,575
		4°	528,78 - 599,36		2,666
		Resíduo			15,698
	F5	1°	38,33 - 151,23	80	10,788
		2°	181,64 - 372,07	325	52,416
		3°	376,20 - 527,36	417	18,548
4°		529,85 - 599,64		3,367	
Resíduo				14,881	

Tabela 6 – (continuação)

Amostra	Estágios	Faixa de	Picos da DTG	Perda de Massa	
		Degradação (°C)	(°C)	(%)	
Fécua	F1	1°	38,98 - 152,68	83	9,280
		2°	156,70 - 462,78	227 - 329	76,510
		3°	463,65 - 599,44		7,290
		Resíduo			6,920
	F2	1°	36,78 - 148,67	75	11,241
		2°	153,38 - 438,50	230 - 331	73,764
		3°	442,14 - 599,86		7,087
		Resíduo			7,908
	F3	1°	38,69 - 143,31	72	9,730
		2°	147,43 - 487,53	220 - 330	76,777
		3°	491,15 - 599,29		5,676
		Resíduo			7,817
	F4	1°	38,58 - 180,86	80	10,480
		2°	183,45 - 485,36	252 - 328	73,219
		4°	487,52 - 599,64		6,282
		Resíduo			10,019
	F5	1°	35,02 - 160,88	71	10,280
		2°	228,22 - 367,20	328	54,522
		3°	371,26 - 518,85	413	18,576
		4°	521,16 - 599,43		3,280
		Resíduo			13,342

F1 = filme controle; F2 = filme controle + emulsificante; F3 = filme controle + óleo buriti emulsificado; F4 = filme com substituição parcial (50%) do glicerol; F5 = filme com substituição total do glicerol.

Fonte: Dados Experimentais (2025).

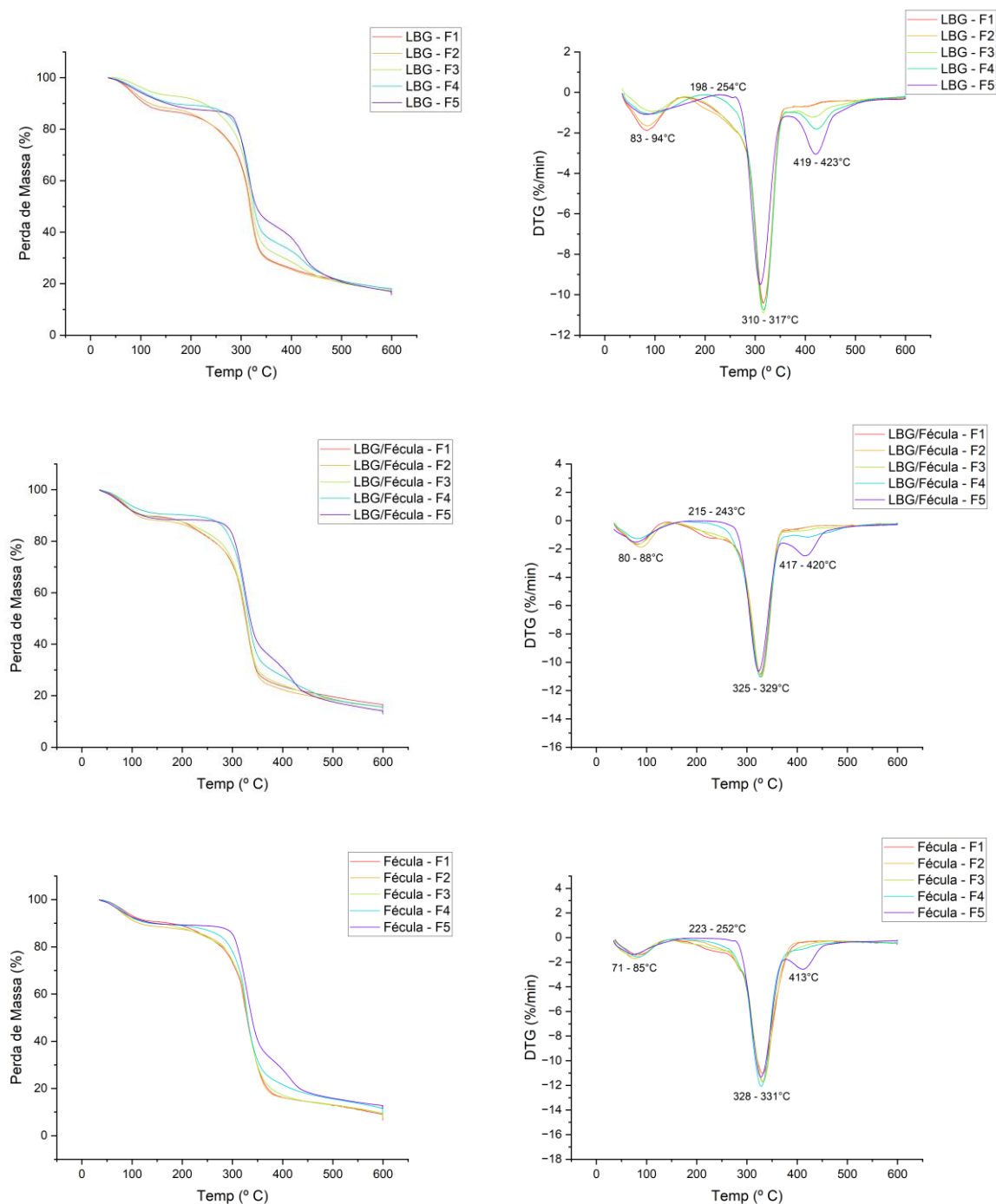
Em temperaturas ainda mais elevadas, observou-se um terceiro estágio de decomposição, antecessor ao estágio final, particularmente para as amostras contendo óleo de buriti. Nos filmes de LBG F3, F4 e F5, picos distintos no DTG entre 419°C e 423°C com perdas de massa de 9,198, 13,392 e 19,764% respectivamente, indicam a degradação de frações mais estáveis do óleo de buriti. Nos filmes LBG/fécua com 50% e 100% de óleo (F4 e F5), picos DTG em torno de 420°C a 417°C com perdas de massa de 14,575% e 18,548%, respectivamente, também são atribuídos a componentes do óleo. Para os filmes de fécua, apenas a amostra F5

apresentou este evento com pico DTG a 413°C e perda de 18,576%. Este evento foi notavelmente mais pronunciado nas formulações com maior teor de óleo e ausência de glicerol.

Finalmente, o último estágio de perda de massa, correspondente à carbonização lenta dos resíduos formados e à quebra adicional de produtos da decomposição, ocorreu em temperaturas acima de 450°C estendendo-se até o final da análise. Este estágio não apresentou picos agudos e característicos nas curvas de DTG, indicando um processo de decomposição mais gradual. O percentual de resíduo final a 600°C variou entre as amostras, para LBG, de 16,111% (F2) a 18,685% (F4); para os filmes de conjugados, de 14,881% (F5) a 16,161% (F1) e para fécula, de 6,920% (f1) a 13,342% (F5). De forma geral, os filmes à base de LBG tenderam a apresentar um resíduo final ligeiramente superior em comparação com os filmes de fécula pura. O aumento do resíduo em algumas formulações com óleo de buriti, como observado para LBG F4 e Fécula F5 em relação aos seus respectivos controles, pode indicar que o óleo contribui para a formação de uma maior quantidade de resíduo carbonáceo sólido (char) (Ahmed *et al.*, 2023; Martins *et al.*, 2012).

Em resumo, a incorporação do óleo de buriti modificou o perfil de degradação térmica dos filmes de LBG, fécula e seus conjugados, principalmente pela introdução de estágios de decomposição próprios do óleo e pela alteração na perda de umidade inicial. A estabilidade térmica dos polissacarídeos principais, indicada pela T_{máx} de sua maior etapa de decomposição, permaneceu relativamente constante, um resultado positivo considerando que algumas interações, com aditivos em filmes biopoliméricos, podem reduzir a estabilidade térmica de gomas (Ahmed *et al.*, 2023). Todos os filmes formulados demonstraram estabilidade térmica em temperaturas inferiores a 100°C, o que é relevante para embalagens de alimentos (Martins *et al.*, 2012). As diferenças observadas ressaltam a complexidade das interações térmicas em filmes biopoliméricos de formulações complexas.

Figura 10– Gráficos de perda de massa e 1ª derivada, gerados a partir de dados das análises termogravimétricas dos filmes de goma de alfarroba, fécula de mandioca e seus respectivos conjugados.



Fonte: Dados Experimentais (2025).

Biodegradabilidade

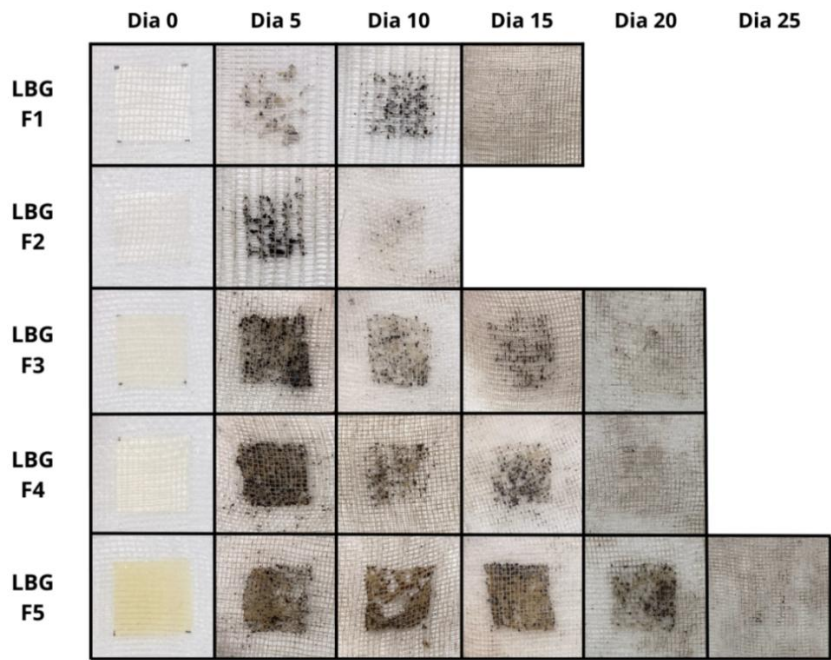
Na avaliação da biodegradabilidade dos filmes, observou-se que as diferentes formulações influenciaram significativamente o tempo máximo de degradação, vide Figuras 11, 12 e 13. Os filmes controle (F1), produzidos apenas com glicerol como plastificante, apresentaram tempos de degradação que variaram entre 10 e 15 dias, indicando maior suscetibilidade à degradação. Isto pode ser atribuído à natureza hidrofílica do glicerol, que favorece a absorção de umidade e a ação microbiana. Fronza et al. (2024) reportou que houve degradação quase completa de filmes a base de goma de alfarroba e fécula após três dias.

A incorporação de goma arábica como emulsificante (F2) promoveu ligeiras alterações, com aumento do tempo de degradação em alguns sistemas, sugerindo possível reforço estrutural ou formação de barreira adicional (Kaczmarek-Szczepańska *et al.*, 2021). Por outro lado, os filmes com adição de óleo de buriti (F3), apresentaram aumento no tempo de degradação (até 25 dias), o que pode ser relacionado à maior hidrofobicidade conferida pelo óleo à matriz polimérica (Tokiwa *et al.*, 2009).

As formulações com substituição parcial (F4) e total (F5) do glicerol pelo óleo de buriti como plastificante apresentaram os maiores tempos de degradação em todas as matrizes testadas, atingindo até 30 dias nos filmes compostos apenas por fécula. Esses resultados indicam que o óleo de buriti atuou de forma eficaz como plastificante hidrofóbico, reduzindo a disponibilidade de água na matriz e, consequentemente, retardando a ação de microrganismos (Cai *et al.*, 2023).

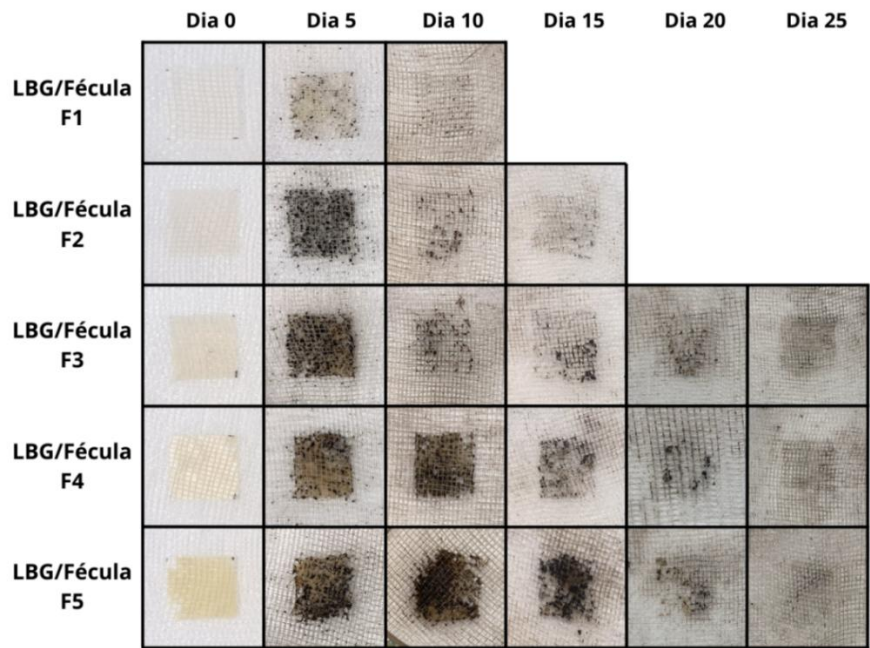
Entre os três sistemas avaliados (LBG, conjugados de LBG/fécula (25:75) e fécula pura), os filmes de fécula com 100% de substituição de glicerol (F5) apresentaram maior resistência à degradação, enquanto os filmes de LBG controle (F1) foram os mais rapidamente degradados. De maneira geral, a substituição do glicerol por óleo de buriti, mostrou-se eficiente na modulação da biodegradabilidade, sendo um fator determinante para o prolongamento da estabilidade dos filmes, mas mantendo sua biodegradabilidade.

Figura 11– Acompanhamento fotográfico dos ensaios de biodegradabilidade dos filmes de goma de alfarroba.



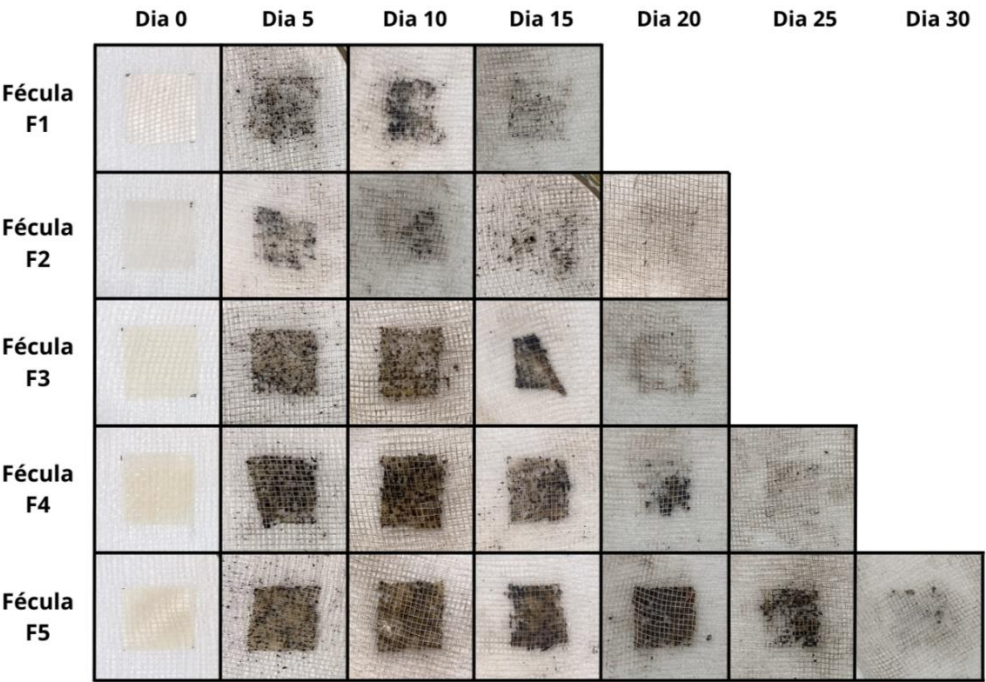
Fonte: Autor (2025).

Figura 12– Acompanhamento fotográfico dos ensaios de biodegradabilidade dos filmes de conjugados de goma de alfarroba e fécula de mandioca.



Fonte: Autor (2025).

Figura 13– Acompanhamento fotográfico dos ensaios de biodegradabilidade dos filmes conjugados de goma de alfarroba e fécula de mandioca.



Fonte: Autor (2025).

CONCLUSÃO

Este capítulo focou no desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis formulados com goma de alfarroba (LBG) e fécula de mandioca, esta última obtida de resíduos, investigando a inclusão do óleo de buriti como plastificante alternativo ao glicerol. Os achados indicaram o impacto variado do óleo sobre as propriedades do material.

Em termos de características físico-químicas, o óleo promoveu uma diminuição na absorção de umidade e na capacidade de dissolução aquosa em todas as formulações. Observou-se um aumento na espessura dos filmes com a incorporação do óleo, mais notável nos conjugados LBG/fécula. A redução nos níveis de umidade e na solubilidade em água foi estatisticamente significativa com a substituição do glicerol pelo óleo. A análise estrutural por FTIR confirmou a presença do óleo pelas bandas características de C=O ($\sim 1744\text{ cm}^{-1}$) e C-H (~ 2926 e $\sim 2854\text{ cm}^{-1}$). Visualmente, as propriedades ópticas revelaram que o óleo conferiu coloração, agindo como um pigmento natural, e alterou a intensidade do matiz amarelado. As características térmicas, avaliadas por TGA, indicaram que a temperatura de máxima degradação dos polímeros principais manteve-se relativamente constante, sugerindo que o óleo não comprometeu a estabilidade térmica das cadeias poliméricas.

No que tange às propriedades de barreira, filmes de LBG se destacaram; a substituição completa do glicerol pelo óleo de buriti resultou em uma redução de mais de 50% na taxa de transmissão de vapor de água (TTVA) e na permeabilidade ao oxigênio (PVO). Para filmes de fécula, a barreira ao oxigênio também foi aprimorada significativamente, com uma diminuição de quase 50%.

Os atributos mecânicos apresentaram um comportamento dual. Em filmes de LBG, o óleo de buriti reforçou a estrutura, resultando em mais que o dobro da resistência à tração (LRT) e um aumento superior a 100 vezes no módulo de elasticidade (EM), embora a flexibilidade tenha sido drasticamente reduzida. Contudo, em filmes de fécula (sejam isolados ou em conjugados LBG/fécula), a substituição completa do glicerol pelo óleo resultou em fragilidade acentuada e perda de maleabilidade, por vezes associada à não uniformidade.

A análise termogravimétrica (TGA) indicou que a temperatura de máxima degradação ($T_{\text{máx}}$) dos polímeros principais (LBG e fécula) manteve-se relativamente constante. Um novo pico de degradação surgiu em altas temperaturas (entre 413°C e 423°C) apenas nos filmes contendo óleo.

A biodegradabilidade foi favoravelmente modulada; o tempo de decomposição dos filmes com óleo foi prolongado em até 30 dias para os filmes de fécula, indicando maior durabilidade sem sacrificar a decomposição natural.

De forma geral, o óleo de buriti demonstrou potencial para otimizar as características de barreira e, em certas matrizes como LBG, aprimorar a robustez mecânica dos materiais poliméricos. No entanto, a ausência total do glicerol frequentemente levou a uma perda de maleabilidade e integridade estrutural, especialmente em matrizes de fécula e seus conjugados.

CAPÍTULO II: FILMES A BASE DE PECTINA E PROTEÍNA ISOLADA DE SEMENTE DE GIRASSOL

RESUMO

A crescente urgência em desenvolver soluções de embalagens ecologicamente viáveis, frente aos impactos do descarte de plásticos convencionais, direciona a pesquisa científica para o aproveitamento de biopolímeros sustentáveis e fontes renováveis. Este capítulo dedicou-se à elaboração de filmes biodegradáveis empregando pectina cítrica e proteína isolada de semente de girassol (PISG), tanto como polímeros isolados quanto em suas combinações, investigando a eficácia do óleo de buriti na substituição parcial ou total do plastificante glicerol.

Os materiais foram desenvolvidos pelo método de moldagem e foram submetidos a análises de caracterização físico-química, estrutural, óptica, propriedades de barreira, comportamento mecânico e estabilidade térmica, além de sua biodegradabilidade.

Os resultados revelaram que a substituição do glicerol pelo óleo de buriti acarretou modificações notáveis, com impactos distintos dependendo da composição polimérica. Nas propriedades físico-químicas, embora a espessura tenha aumentado significativamente em filmes com proteína, manteve-se estável para a pectina pura. A umidade e a solubilidade em água declinaram com a adição do óleo, especialmente nos sistemas ricos em PISG. Contudo, a alta solubilidade da pectina pura foi mantida, indicando uma interação limitada do óleo com essa matriz hidrofílica. As propriedades ópticas evidenciaram que o óleo conferiu coloração, alterando a luminosidade e intensificando a tonalidade amarelada dos filmes.

Em relação às propriedades de barreira, o óleo de buriti aprimorou substancialmente a resistência ao vapor de água em filmes de pectina, já em filmes de proteína, a barreira ao oxigênio foi significativamente melhorada. Os conjugados de pectina/PISG, por sua vez, exibiram o desempenho mais abrangente, demonstrando melhorias notáveis tanto na barreira ao vapor de água quanto ao oxigênio.

As propriedades mecânicas foram, em grande parte, comprometidos pela substituição total do glicerol, de forma geral, os filmes apresentaram uma redução

drástica na flexibilidade e um aumento da fragilidade, sugerindo que o óleo, isoladamente, não funcionou como um plastificante eficaz para essas matrizes, diferentemente do glicerol. A biodegradabilidade dos materiais foi controlada pela presença do óleo, prolongando o tempo de decomposição em comparação aos controles.

O óleo de buriti revelou-se um aditivo funcional promissor para aprimorar as propriedades de barreira em filmes biopoliméricos. Contudo, sua aplicação como plastificante exclusivo resultou em fragilidade generalizada nas matrizes de pectina e PISG, ressaltando a necessidade de otimização das formulações, talvez através de blends de plastificantes ou aprimoramento das técnicas de incorporação, para explorar plenamente seu potencial multifuncional.

Palavras-chave: polissacarídeo; proteína; hidrofobicidade; rigidez; durabilidade.

ABSTRACT

The increasing urgency to develop ecologically viable packaging solutions, facing the impacts of conventional plastic disposal, directs scientific research towards the utilization of sustainable biopolymers and renewable sources. This chapter focused on the elaboration of biodegradable films using citric pectin and isolated sunflower seed protein (PISG), both as isolated polymers and in their combinations, investigating the effectiveness of buriti oil in the partial or total replacement of glycerol as a plasticizer.

The materials were developed by the casting method and subjected to characterization analyses including physicochemical, structural, optical properties, barrier properties, mechanical behavior, and thermal stability, in addition to their biodegradability.

The results revealed that the replacement of glycerol with buriti oil led to notable modifications, with distinct impacts depending on the polymeric composition. In terms of physicochemical properties, although the thickness significantly increased in protein-based films, it remained stable for pure pectin. Film moisture and water solubility decreased with the addition of the oil, especially in PISG-rich systems. However, the high solubility of pure pectin was largely maintained, indicating a limited interaction of the oil with this hydrophilic matrix. Optical properties showed that the oil imparted color, altering luminosity and intensifying the yellowish hue of the films.

Regarding barrier properties, buriti oil substantially improved water vapor resistance in pectin films, while in protein films, oxygen barrier was significantly enhanced. Pectin/PISG conjugates, in turn, exhibited the most comprehensive performance, demonstrating notable improvements in both water vapor and oxygen barrier.

Mechanical properties were largely compromised by the total replacement of glycerol. Generally, the films showed a drastic reduction in flexibility and an increase in fragility, suggesting that the oil, when used alone, did not function as an effective plasticizer for these matrices, unlike glycerol. The biodegradability of the materials was controlled by the presence of the oil, extending the decomposition time compared to the controls.

Buriti oil proved to be a promising functional additive for enhancing barrier properties in biopolymeric films. However, its application as an exclusive plasticizer resulted in generalized fragility in pectin and PISG matrices, highlighting the need for formulation optimization, perhaps through blends of plasticizers or improvement of incorporation techniques, to fully explore its multifunctional potential.

Keywords: polysaccharide; protein; hydrophobicity; stiffness; durability.

INTRODUÇÃO

No contexto da transição para embalagens mais sustentáveis e da economia circular, o aproveitamento de biopolímeros oriundos de resíduos agroindustriais ganha destaque (Krzywonos, Difonzo e Pasqualone, 2025; Pomoni et al., 2024). A pectina, um heteropolissacarídeo estrutural complexo, pode ser obtida a partir de resíduos da industrialização de frutas, como cascas de citros e bagaço de maçã (He et al., 2025; Jahangiri, Mohanty e Misra, 2024; Syarifuddin et al., 2025). Da mesma forma, a proteína isolada de semente de girassol (PISG) é um coproduto valioso da extração de óleo, frequentemente subutilizado (Kaur e Ghoshal, 2022). Ambas as classes de biopolímeros, polissacarídeos como a pectina e proteínas vegetais como a PISG, são amplamente investigadas para a produção de filmes biodegradáveis devido à sua abundância e características ecologicamente favoráveis (He et al., 2025; Suderman, Isa e Sarbon, 2018). Contudo, filmes baseados puramente nestes biopolímeros tendem a ser frágeis e hidrofílicos, necessitando de aditivos como plastificantes para otimizar suas propriedades (Cheng et al., 2024; Farhan et al., 2025; Yadav et al., 2025).

O glicerol, embora um plastificante eficaz, apresenta limitações como alta higroscopicidade e migração, o que motiva a busca por alternativas (Ben, Samsudin e Yhaya, 2022). O óleo de buriti (*Mauritia flexuosa* L.f.), um óleo vegetal rico em ácidos graxos e notável por seu conteúdo de carotenoides e tocoferóis (Bispo-Jr et al., 2018; Resende, Franca e Oliveira, 2019), surge como um candidato promissor para conferir propriedades hidrofóbicas e funcionais aos filmes (Cheng et al., 2024; Sun, Weng e Zhang, 2024). É relevante notar que, embora sua extração predominantemente ocorra por prensagem mecânica, o processo pode resultar em um resíduo com teor apreciável de óleo, possibilitando uma extração química subsequente para máximo aproveitamento da matéria-prima. A utilização do

óleo de buriti como plastificante em filmes de pectina e PISG, de forma isolada ou em conjugados, representa uma lacuna importante na literatura, e este trabalho busca preenchê-la, contribuindo para a valorização de um recurso estratégico da biodiversidade brasileira (Bispo-Jr et al., 2018).

Este capítulo tem como objetivo geral investigar o desenvolvimento e a caracterização de filmes biodegradáveis à base de pectina cítrica e proteína isolada

de semente de girassol, individualmente e em conjugados, avaliando o óleo de buriti como plastificante alternativo ao glicerol.

Para alcançar este objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos neste capítulo:

- Desenvolver filmes à base de pectina cítrica, proteína isolada de semente de girassol e seus conjugados, estabelecendo as formulações controle plastificadas com glicerol e as incorporadas com óleo de buriti.
- Analisar o impacto do óleo de buriti no desempenho dos filmes quanto às suas propriedades físico-químicas, estruturais, ópticas, de barreira, mecânicas e térmicas, bem como sua biodegradabilidade, para estas matrizes.

METODOLOGIA

Elaboração dos filmes

Para a elaboração dos filmes deste capítulo, os reagentes utilizados incluíram: pectina cítrica (Dinâmica Química Contemporânea, Indaiatuba, SP, Brasil); proteína de semente de girassol com baixo teor de ácidos clorogênicos (PISG - SUNPROTEIN, 80% proteína bruta), doada por “Bio Technologies” LLC (Moscou, Rússia); glicerol (Synth, Diadema, SP, Brasil); e goma arábica em pó pura, densidade 1,35 (Êxodo Científica, Sumaré, SP, Brasil). O óleo de buriti (lote MFR 24001), doado pela Cooperativa Grande Sertão (Montes Claros, MG, Brasil), foi utilizado como agente plastificante. Os demais reagentes utilizados para as análises de caracterização dos filmes foram de grau analítico.

O laudo com os dados de caracterização do óleo de buriti foi fornecido pela Cooperativa Grande Sertão e encontra-se em anexo a este trabalho. A emulsão do óleo de buriti em água, utilizando goma arábica como emulsificante, foi preparada conforme a metodologia detalhada na Seção 3.4.2 (Elaboração dos Filmes) deste trabalho, seguindo a proporção de 30% de goma arábica em relação à base lipídica.

Os filmes de pectina cítrica e proteína isolada da semente de girassol (PISG) também foram produzidos pelo método de moldagem seguindo as metodologias de Alves *et al.* (2024) e Siqueira *et al.* (2022) com algumas alterações. Os filmes definidos como controle foram os de composição de 100% pectina cítrica comercial, 100% de proteína isolada da semente de girassol (PISG) e 75% de proteína somado a 25% de pectina.

Para avaliar o efeito da substituição do glicerol como plastificante foram produzidos os seguintes filmes: (I) F1 – filme base utilizando glicerol como plastificante; (II) F2– filme com substituição parcial (50%) e (V) F3 – filme com substituição total (100%) do glicerol por óleo de buriti emulsificado.

Os filmes foram feitos seguindo as formulações descritas na Tabela 7, usando a água destilada como solvente, sendo assumido um volume total de 200ml para cada solução filmogênica.

Tabela 7 – Composição dos filmes a base de pectina cítrica e proteína de semente de girassol

Amostra		Pectina Cítrica	PISG	Glicerol	Óleo de Buriti	Goma Arábica	Massa Total
Pectina	F1	3 g	-	0,6 g	-	-	3,6g
	F2	3 g	-	0,3 g	0,3 g	0,09 g	3,69g
	F3	3 g	-	-	0,6 g	0,18 g	3,78g
Pectina/PISG (25:75)	F1	0,75 g	2,25 g	0,6 g	-	-	3,6g
	F2	0,75 g	2,25 g	0,3 g	0,3 g	0,09 g	3,69g
	F3	0,75 g	2,25 g	-	0,6 g	0,18 g	3,78g
PISG	F1	-	3 g	0,6 g	-	-	3,6g
	F2	-	3 g	0,3 g	0,3 g	0,09 g	3,69g
	F3	-	3 g	-	0,6 g	0,18 g	3,78g

F1 = filme controle; F2 = filme com substituição parcial (50%) do glicerol; F3 = filme com substituição total do glicerol.

Fonte: Dados Experimentais (2025).

Os filmes de pectina foram preparados a partir da suspensão da pectina em água, nas quantidades descritas na Tabela 3, sob agitação constante por um período de 1 hora e 30 minutos em temperatura ambiente. A mistura formadora de filme foi então aquecida a 70°C, e mantida por mais 30 minutos sob agitação. Após o aquecimento, a mistura permaneceu sob agitação até que atingisse uma temperatura abaixo dos 50°C, para adição do glicerol e da emulsão de óleo de buriti. A dispersão foi colocada em banho de ultrassom (Unique, modelo USC-165A) (25kHz,150W), por um período de 30 minutos, até a remoção de bolhas.

Para os filmes contendo proteína de semente de girassol, a mesma, nas quantidades descritas na Tabela 3 foi suspensa em água destilada. O pH da mistura foi corrigido para 11 com solução de hidróxido de sódio 2M, e esta foi mantida sob agitação constante por 30 minutos a temperatura ambiente. Posteriormente, o glicerol foi adicionado à mistura, juntamente com a emulsão de óleo de buriti, quando aplicável, e a solução homogeneizada por 5 minutos. Por fim, a solução filmogênica foi submetida a sonicação por 15 minutos em banho ultrassônico (Unique, modelo USC-165A) (25kHz,150W) seguidos de 2 minutos de ultrassom de ponteira (Ultranique, modelo Desruptor, QR350) a 85kHz, para garantir a remoção completa de bolhas presentes na mistura.

Nos filmes contendo pectina e proteína na composição, cada solução foi preparada independentemente, respeitando o processo de gelificação de cada polímero, e a mistura das soluções foi feita no momento de adição da emulsão do óleo de buriti e do glicerol.

As soluções filmogênicas foram então adicionadas em formas de silicone (142g) e levadas para estufa convectiva com circulação de ar (Nova Ética, modelo 420-1DE) à 30°C por 24 horas para secagem. Os filmes foram cuidadosamente retirados das formas e armazenados em sacos plásticos hermeticamente fechados. Para as análises de caracterização os filmes foram mantidos em ambiente com temperatura e umidade controlados ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $40 \pm 5\%$ de umidade relativa do ar) por pelo menos 48 horas antes de cada análise.

Caracterização dos Filmes

As propriedades físico-químicas, estruturais, ópticas, de barreira, mecânicas, térmicas e a biodegradabilidade dos filmes foram avaliadas seguindo as metodologias detalhadas na Seção 3.4.3 (Caracterização dos Filmes) deste trabalho, sendo aplicadas da mesma forma para as formulações deste capítulo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Espessura, Umidade e Solubilidade em Água

Os resultados de espessura, umidade e solubilidade dos filmes a base de pectina, proteína de semente de girassol e de conjugados de pectina/PISG (25:75) estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores médios de espessura, umidade e solubilidade dos filmes de pectina, proteína de isolada de semente de girassol e seus respectivos conjugados.

Amostra		Espessura (mm)	Umidade (%)	Solubilidade (%)
Pectina	F1	0,054±0,004 ^a	15,790±2,610 ^a	86,830±3,230 ^a
	F2	0,069±0,0155 ^a	10,637±0,277 ^b	82,400±5,020 ^a
	F3	0,053±0,016 ^a	13,187±0,025 ^{ab}	83,408±0,543 ^a
Pectina/PISG (25:75)	F1	0,065±0,003 ^c	13,533±0,925 ^a	50,610±5,340 ^a
	F2	0,074±0,003 ^b	7,996±0,629 ^b	36,470±3,740 ^b
	F3	0,089±0,005 ^a	8,741±0,200 ^b	38,420±4,150 ^b
PISG	F1	0,041±0,004 ^b	13,960±2,920 ^a	42,960±2,440 ^a
	F2	0,059±0,009 ^a	8,294±0,516 ^b	17,890±3,380 ^c
	F3	0,065±0,006 ^a	8,030±2,490 ^b	29,050±1,830 ^b

F1 = filme controle; F2 = filme com substituição parcial (50%) do glicerol; F3 = filme com substituição total do glicerol. Médias com as mesmas letras na mesma coluna, em um mesmo grupo amostral, não apresentam diferenças estatísticas ($p > 0.05$).

Fonte: Dados Experimentais (2025).

Considerando o conjunto dos dados, observou-se que a substituição do glicerol pelo óleo de buriti promoveu alterações significativas na espessura dos filmes, especialmente nas formulações contendo proteínas. Nos filmes com a matriz exclusivamente proteica, por exemplo, a espessura aumentou de 0,04104 ± 0,00471 mm (F1) para 0,06519 ± 0,00603 mm na formulação F3. Esse aumento pode ser atribuído à interação hidrofóbica entre os constituintes proteicos e o óleo, que pode alterar a conformação da rede polimérica e gerar filmes mais espessos (Orliac *et al.*, 2003).

Nos conjugados contendo pectina/PISG (25:75), o aumento da espessura também foi evidente, com valores que passaram de 0,06500 ± 0,00321 mm (F1) para

$0,08944 \pm 0,00559$ mm (F3), o que reforça a hipótese de que a matriz proteica tenha alta responsividade à presença do óleo de buriti.

Por outro lado, os filmes elaborados apenas com pectina não apresentaram diferenças significativas de espessura entre as formulações ($p > 0,05$), com valores oscilando entre $0,05313 \pm 0,01656$ mm e $0,06896 \pm 0,01556$ mm. Esse comportamento pode estar relacionado a maior afinidade da pectina com compostos polares, o que dificulta a integração eficiente de substâncias hidrofóbicas como o óleo de buriti à matriz polimérica, mantendo a espessura relativamente constante (Alves *et al.*, 2024; Bhatia *et al.*, 2024).

Com relação a umidade dos filmes, verificou-se uma tendência geral de redução com o aumento da proporção do óleo de buriti, semelhante ao observado nos filmes a base de goma de alfarroba e fécula. O óleo, por ser apolar, dificulta a retenção de água na matriz em contraste com o glicerol, altamente higroscópico (Syarifuddin *et al.*, 2025). Esse efeito foi mais pronunciado nas formulações com alto teor proteico. Nos filmes de proteína pura, por exemplo, a umidade reduziu-se de $13,960 \pm 2,92\%$ (F1) para $8,030 \pm 2,49\%$ (F3). Da mesma forma, nos conjugados com pectina/PISG (25:75), a substituição total do glicerol levou a uma redução da umidade de $13,533 \pm 0,925\%$ para $8,741 \pm 0,200\%$.

Nos filmes de pectina, o comportamento da umidade foi mais variável. A formulação com 50% de óleo (F2) apresentou menor umidade ($10,637 \pm 0,277\%$), enquanto a com 100% (F3) apresentou valor intermediário ($13,187 \pm 0,0253\%$), inferior ao controle F1 ($15,790 \pm 2,61\%$). Essa flutuação pode indicar que a incorporação do óleo nem sempre promove uma distribuição homogênea na matriz de pectina, sendo influenciada por fatores como a emulsificação e compatibilidade entre os componentes.

Em relação à solubilidade em água, observou-se um comportamento distinto para cada matriz polimérica. Os filmes de pectina apresentaram alta solubilidade, com o filme controle (F1) registrando 86,830%. Notavelmente, a substituição parcial (F2)(82,400%) e total (F3)(83,408%) do glicerol pelo óleo de buriti não resultou em diferenças estatisticamente significativas na solubilidade. Esse resultado corrobora a observação sobre a espessura, sugerindo que a pectina, com sua maior afinidade por compostos polares, limita a integração efetiva de substâncias hidrofóbicas como o

óleo de buriti na matriz, mantendo sua alta hidrofiliicidade (Alves et al., 2024; Bhatia et al., 2024).

Por outro lado, os filmes com proteína demonstraram uma clara redução na solubilidade com a incorporação do óleo, saindo de 42,960% no filme controle F1 para 17,890% com a substituição parcial do glicerol (F2), indicando a formação de uma rede mais hidrofóbica devido à interação da proteína com o óleo.

Interessantemente, a substituição integral do glicerol na formulação F3 resultou em um incremento na solubilidade, atingindo 29,05%, em comparação à formulação F2, embora esse valor permaneça significativamente inferior ao observado na amostra controle. A tendência de aumento da solubilidade em F3, após a acentuada redução verificada em F2, pode ser atribuída à saturação da matriz proteica pelo componente lipídico, promovendo uma reorganização conformacional que favorece a exposição de grupos funcionais hidrofílicos. Alternativamente, tal comportamento pode refletir uma compatibilidade limitada entre os constituintes da formulação em elevadas concentrações de óleo (Chen et al., 2024; Nilsson et al., 2025).

Nos conjugados de pectina/PISG (25:75), a solubilidade do filme controle (F1) foi de 50,610%, e a incorporação do óleo promoveu uma redução significativa, embora F2 e F3 não tenham diferido estatisticamente entre si. Isso sugere que a presença da proteína nos filmes de conjugados favoreceu a incorporação do óleo, resultando em filmes com menor solubilidade em água, atuando como uma barreira eficaz à umidade, conforme observado por outros autores para filmes proteicos (Orliac et al., 2003; Salgado et al., 2013).

A análise comparativa entre os diferentes grupos poliméricos reforça que os filmes contendo proteína de semente de girassol (PISG) foram mais sensíveis à substituição do plastificante, apresentando as maiores variações tanto em espessura quanto em solubilidade e umidade. Isso pode estar relacionado à alta reatividade das cadeias peptídicas, que favorecem a reorganização estrutural diante da inserção de plastificantes hidrofóbicos (Hadidi *et al.*, 2022).

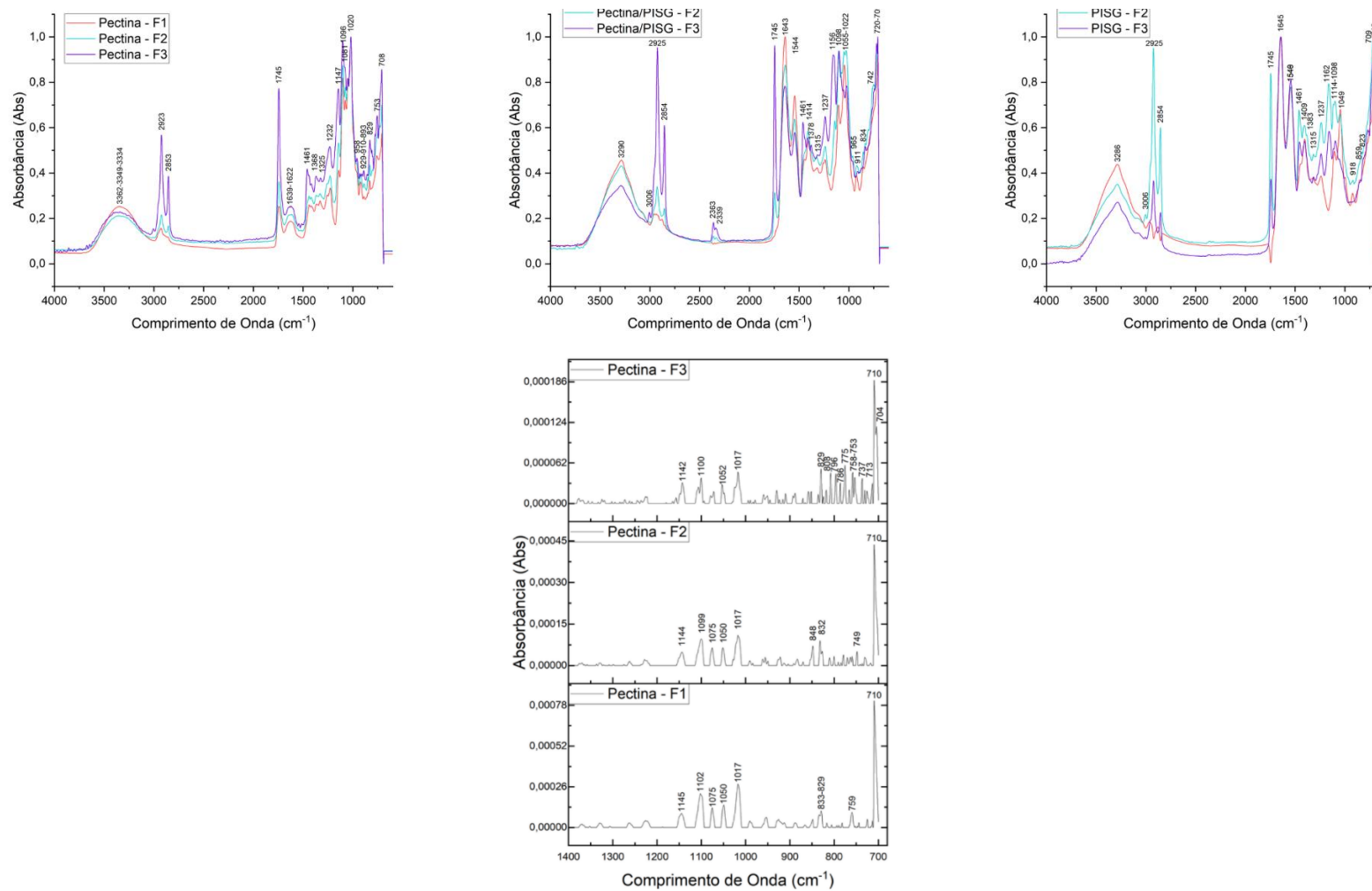
Essa maior responsividade dos filmes contendo proteína de semente de girassol pode ser atribuída à natureza anfifílica e à estrutura mais complexa das proteínas em comparação com polissacarídeos como a pectina. As proteínas

possuem uma variedade de cadeias laterais de aminoácidos, com diferentes polaridades, que podem estabelecer interações diversificadas (hidrofóbicas, hidrofílicas, iônicas) com o óleo de buriti. O processo de desnaturação durante a formação do filme expõe esses grupos, e a subsequente reorganização na presença de um componente lipídico pode levar a um arranjo estrutural significativamente diferente daquele obtido com um plastificante polar como o glicerol, influenciando tanto a espessura quanto a capacidade de retenção de água (Chen *et al.*, 2024; Nilsson *et al.*, 2025). Portanto, de forma geral os lipídeos atuam como uma barreira eficaz a umidade em filmes proteicos como relatado por outros autores como Orliac *et al.* (2003) e Salgado *et al.* (2013). Já os filmes de pectina demonstram comportamento mais estável, possivelmente devido a estrutura linear rígida atribuída pelas interações entre as cadeias pectina-pectina que favorecem ligações intramoleculares fortes, o que pode dificultar a penetração ou interferência do óleo na matriz (Butler *et al.*, 2023).

Análise Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A análise dos dados espectrais, obtidos para cada amostra, permitiu uma comparação detalhada entre as diferentes composições. Para refinar a interpretação, particularmente na complexa região de impressão digital dos polissacarídeos (compreendida entre 1400 e 700 cm^{-1}), utilizou-se a técnica da derivada segunda dos espectros, para as amostras compostas majoritariamente por pectina. Os módulos dos picos negativos da derivada segunda dos espectros podem ser visualizados na Figura 14.

Figura 14– Espectros obtidos por análise de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e respectivas derivadas segundas para os filmes de pectina, proteína isolada de semente de girassol e seus conjugados.



Fonte: Autor (2025).

Nos filmes de pectina, a amostra controle F1 apresentou um perfil espectral característico. Observou-se uma banda larga de estiramento O-H com máximo em $\sim 3362\text{ cm}^{-1}$, indicativa das ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxila da pectina, glicerol e água (Ursachi, Oroian e Spinei, 2024). Os picos de estiramento C-H apresentaram baixa intensidade, localizados em $\sim 2923\text{ cm}^{-1}$ e com um ombro em $\sim 2853\text{ cm}^{-1}$. Uma banda destacada em $\sim 1745\text{ cm}^{-1}$, um pouco mais intensa, é atribuída ao estiramento C=O dos grupos alquil ésteres da pectina (Ursachi, Oroian e Spinei, 2024). Uma banda em $\sim 1639\text{-}1622\text{ cm}^{-1}$, provavelmente relacionada à vibração de deformação de moléculas de água adsorvidas, também foi notada (Fronza *et al.*, 2024). A região de impressão digital mostrou picos em $\sim 1147\text{ cm}^{-1}$, associado às ligações glicosídicas em pectina, e um conjunto de bandas intensas entre 1100 e 1000 cm^{-1} , possivelmente associadas às vibrações de estiramento de ligações C-O e C-C em anéis da cadeia principal de pectina (Liu *et al.*, 2021; Ursachi, Oroian e Spinei, 2024).

Com a substituição parcial de glicerol por óleo de buriti no filme F2, a banda O-H ($\sim 3349\text{ cm}^{-1}$) mostrou-se ligeiramente deslocada e com aparente menor intensidade em relação a F1, sugerindo uma reorganização das ligações de hidrogênio devido à redução na quantidade de glicerol e à introdução do óleo. Houve um considerável aumento na intensidade do pico C-H em $\sim 2853\text{ cm}^{-1}$, confirmando a presença das cadeias alifáticas do óleo de buriti (Costa *et al.*, 2022). Notavelmente, o pico C=O do éster em $\sim 1745\text{ cm}^{-1}$ apresentou um aumento em intensidade em relação a F1. Esta observação sugere que a contribuição do estiramento C=O dos ésteres do óleo de buriti (Costa *et al.*, 2022) se somou à dos ésteres da pectina, resultando em uma banda mais intensa. A banda em $\sim 1639\text{-}1622\text{ cm}^{-1}$ também exibiu intensidade maior que F1, o que pode indicar uma alteração no teor ou no estado de ligação da água. A observada redução geral na intensidade das bandas na região de impressão digital ($1100\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$) em F2 pode indicar uma alteração na ordem molecular ou nas interações C-O da pectina.

Nos filmes com substituição total do glicerol (F3), as alterações foram mais pronunciadas. A banda O-H ($\sim 3334\text{ cm}^{-1}$) tornou-se a mais larga e apresentou a menor intensidade entre as três amostras, refletindo a ausência total dos grupos O-H do glicerol e o estabelecimento de novas interações entre a pectina e o óleo. Os picos

C-H ($\sim 2923\text{ cm}^{-1}$ e $\sim 2853\text{ cm}^{-1}$) atingiram sua máxima intensidade, especialmente em $\sim 2853\text{ cm}^{-1}$, confirmando a predominância do óleo de buriti. Uma alteração significativa ocorreu na região de $1800\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$, o pico em $\sim 1745\text{ cm}^{-1}$ apresentou a maior intensidade entre as três amostras. Este aumento expressivo indica uma forte contribuição dos grupos C=O de ésteres do óleo de buriti, que agora é o principal componente não polimérico, e pode também refletir interações específicas entre o óleo e os grupos ésteres remanescentes da pectina, ou uma sobreposição que resulta em maior absorbância. A banda em $\sim 1639\text{-}1622\text{ cm}^{-1}$ tornou-se relativamente mais proeminente, o que sugere um complexo rearranjo de interações e possivelmente do estado da água no filme. A menor intensidade geral na região de impressão digital, comparada a F1, embora com o pico em $\sim 1020\text{ cm}^{-1}$ ainda relativamente intenso, sugere que a plastificação exclusiva pelo óleo promove um ambiente molecular diferente para as vibrações da cadeia da pectina.

Considerando os filmes conjugados de pectina/PISG, a amostra F1 exibiu uma banda larga O-H/N-H, referente a ligação tipo amida A, com máximo em $\sim 3290\text{ cm}^{-1}$, apresentando a maior intensidade entre as amostras de filmes conjugados (Alves *et al.*, 2024). Observaram-se picos de C-H em $\sim 2925\text{ cm}^{-1}$ e $\sim 2854\text{ cm}^{-1}$. Uma observação crucial em F1 do conjugado foi a ausência de um pico nítido do alquil éster da pectina em $\sim 1745\text{ cm}^{-1}$. Esta ausência, pode sugerir que, na presença de PISG e glicerol, os grupos alquil ésteres da pectina estão envolvidos em interações intensas, alterando significativamente sua vibração. Em contraste, a presença da proteína foi claramente indicada pela forte banda Amida I em $\sim 1643\text{ cm}^{-1}$, em que é sugerida a presença de estiramento C=O peptídico, e Amida II em $\sim 1544\text{ cm}^{-1}$ inferindo a presença de deformação N-H e estiramento C-N (Alves *et al.*, 2024).

Com a substituição parcial de glicerol por óleo de buriti no F2 conjugado, a banda O-H/N-H ($\sim 3290\text{ cm}^{-1}$) apresentou intensidade ligeiramente menor que F1. Os picos C-H ($\sim 2925\text{ cm}^{-1}$ e $\sim 2854\text{ cm}^{-1}$) mostraram um aumento, e um pico em $\sim 3006\text{ cm}^{-1}$ começou a aparecer, indicando a incorporação do óleo. Notavelmente, um pico em $\sim 1745\text{ cm}^{-1}$ (agora atribuível principalmente ao C=O do éster do óleo de buriti) apareceu com uma certa intensidade, o que é esperado com a adição do óleo. As bandas Amida I ($\sim 1643\text{ cm}^{-1}$) e Amida II ($\sim 1544\text{ cm}^{-1}$) podem ser descritas como

relativamente menores, indicando possíveis pequenas alterações no ambiente proteico.

Na formulação F3 do conjugado, a banda O-H/N-H ($\sim 3290\text{ cm}^{-1}$) apresentou a menor intensidade e maior largura, refletindo a ausência de glicerol e a forte influência do óleo nas ligações de hidrogênio. Os picos C-H ($\sim 2925\text{ cm}^{-1}$, $\sim 2854\text{ cm}^{-1}$, e $\sim 3006\text{ cm}^{-1}$) exibiram a maior intensidade, confirmando a máxima concentração de óleo. O pico em $\sim 1745\text{ cm}^{-1}$ (C=O da ligação éster do óleo) tornou-se bem definido e muito intenso, consideravelmente maior do que em F2 do conjugado. As bandas Amida I ($\sim 1643\text{ cm}^{-1}$) e Amida II ($\sim 1544\text{ cm}^{-1}$) mantiveram-se fortes, embora com pequenas reduções na forma ou intensidade, sugerindo que a estrutura proteica fundamental é mantida, mas não imune a sutis alterações conformacionais induzidas pelo óleo como plastificante exclusivo.

A análise dos filmes de PISG, também revelou dinâmicas interessantes. No filme controle F1, a banda larga O-H/N-H em $\sim 3290\text{ cm}^{-1}$ apresentou a maior intensidade, esperado devido à combinação dos grupos N-H da proteína (Amida A) e O-H do glicerol e da água (Alves *et al.*, 2024). Os picos C-H em $\sim 2925\text{ cm}^{-1}$ e $\sim 2854\text{ cm}^{-1}$ apareceram de forma bem discreta. As fortes bandas Amida I em $\sim 1645\text{ cm}^{-1}$ e Amida II em $\sim 1540\text{ cm}^{-1}$ são as assinaturas da proteína (Alves *et al.*, 2024). Nos filmes F2, a banda O-H/N-H ($\sim 3306\text{ cm}^{-1}$) teve sua intensidade ligeiramente reduzida. O aumento dos picos C-H e o início do aparecimento do pico em $\sim 3006\text{ cm}^{-1}$ indicaram a incorporação do óleo de buriti. O surgimento de um pico muito intenso em $\sim 1745\text{ cm}^{-1}$ é atribuído ao estiramento de C=O das ligações ésteres do óleo. Crucialmente, as bandas Amida I ($\sim 1643\text{ cm}^{-1}$) e Amida II ($\sim 1544\text{ cm}^{-1}$) permaneceram inalteradas em relação a F1, sugerindo que a substituição parcial do glicerol pelo óleo não induziu alterações detectáveis por FTIR na estrutura secundária global da PISG.

Para os filmes com substituição total do glicerol (F3), a banda O-H/N-H ($\sim 3290\text{ cm}^{-1}$) apresentou a menor intensidade e os picos C-H exibiram a maior intensidade. O pico em $\sim 1745\text{ cm}^{-1}$ associado ao estiramento de C=O das ligações éster do óleo permaneceu bem definido e intenso, porém, com intensidade menor do que em F2. Esta diminuição, apesar da maior concentração de óleo, pode indicar interações específicas do óleo com a matriz proteica que afetam a absorvidade da ligação C=O. As bandas Amida I ($\sim 1643\text{ cm}^{-1}$) e Amida II ($\sim 1544\text{ cm}^{-1}$) mantiveram-se fortes e

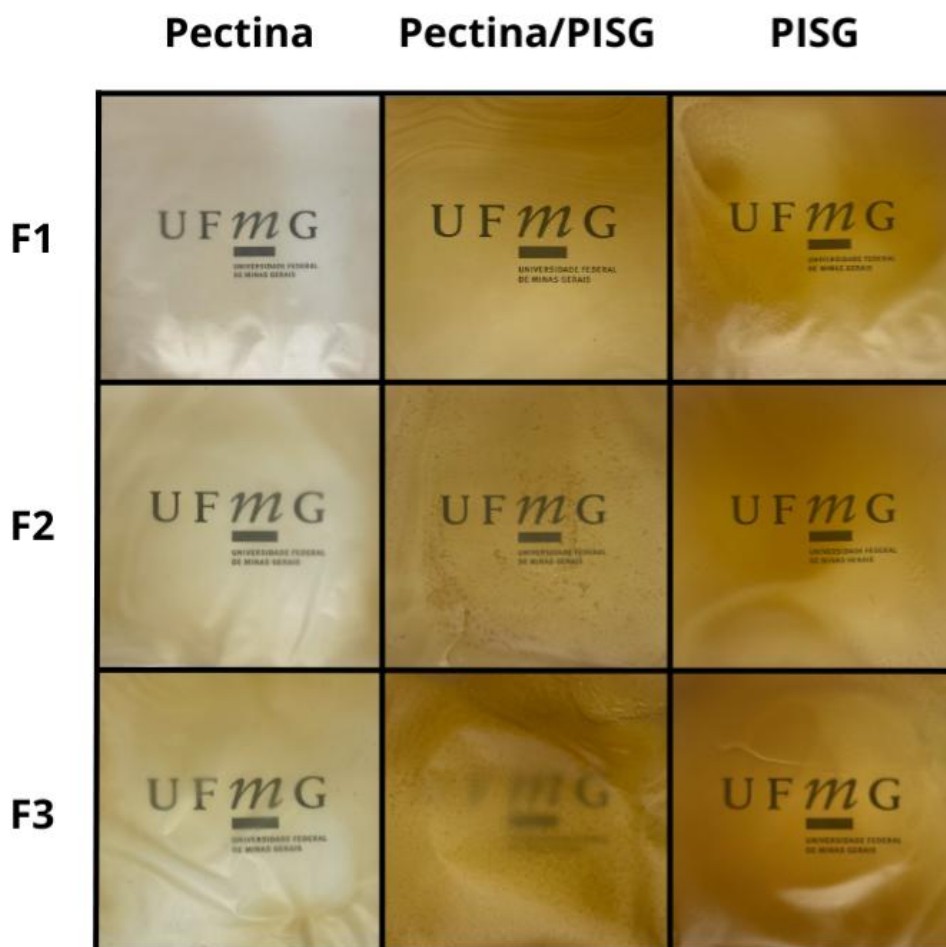
inalteradas, reforçando a notável resiliência da estrutura secundária da PISG à mudança no plastificante. A redução total dos picos na impressão digital sugere uma maior variação de sinais vibracionais devido às interações formadas.

De forma geral, a análise de FTIR, revela uma complexa rede de interações nos filmes de pectina, pectina/PISG e PISG. A substituição do glicerol pelo sistema de óleo de buriti representa uma mudança significativa no ambiente molecular dos biopolímeros. Esta transição afeta diferentemente cada matriz polimérica, entretanto, a relativa estabilidade das bandas Amida I e Amida II sugere que a estrutura secundária da proteína é preservada, embora haja algumas alterações causadas pela presença do óleo.

Propriedades Ópticas

As propriedades ópticas dos filmes foram significativamente influenciadas pela matriz polimérica utilizada e pela adição do óleo de buriti, conforme observado nos parâmetros de cor (L^* , a^* , b^* , c^* , H^*) e opacidade como demonstrado da Figura 15 e na Tabela 9.

Figura 15– Fotografia digital dos filmes a base de pectina e proteína isolada de semente de girassol.



Fonte: Autor (2025).

No que se refere à luminosidade (L^*), os filmes de pectina apresentaram os maiores valores (F1: $25,940 \pm 1,511$; F3: $37,410 \pm 1,182$), com aumento significativo após adição de óleo. Em contrapartida, os filmes de proteína pura e os conjugados pectina/PISG mostraram redução ou manutenção dos valores de L^* , indicando escurecimento, especialmente nos filmes de proteína F3, com 100% de óleo, ($18,930 \pm 2,07$). Esse comportamento está de acordo com a coloração visual observada nas imagens, onde os filmes proteicos com óleo apresentaram aspecto mais opaco e escuro.

A saturação de cor (c^*), calculada a partir de a^* e b^* , aumentou em todas as formulações com a incorporação do óleo, destacando-se os filmes de pectina F3, com valor de $10,42 \pm 3,27$ e os de proteína com $22,05 \pm 6,27$. Esses resultados indicam que

o óleo de buriti atua como agente intensificador da cor, sendo particularmente evidente na matriz proteica, que possui coloração própria mais pronunciada (Salgado *et al.*, 2013).

O parâmetro H^* (ângulo de matiz), que representa o tipo de cor percebido (tonalidade), variou pouco entre os tratamentos, mantendo-se na faixa de 70° a 103° , o que indica que a coloração dominante permaneceu no espectro amarelo, mesmo com o aumento da saturação. Os filmes de pectina F1, apresentaram o maior H^* ($103,44^\circ$), compatível com uma coloração mais pálida e amarelada, enquanto os de proteína e os conjugados tenderam a matizes mais avermelhados.

A opacidade dos filmes também foi alterada com a adição do óleo. Nos filmes de pectina, houve aumento significativo da opacidade de $9,005 \pm 0,197$ para $17,958 \pm 1,007$ com a substituição total do glicerol por óleo de buriti. O mesmo comportamento foi relatado por outros autores como Qin *et al.* (2024) e Ursachi, Oroian e Spinei (2024), fato que pode estar relacionado ao maior espalhamento da luz devido à maior incorporação de compostos lipídicos (Spinei, Oroian e Ursachi, 2024). Nos filmes de proteína, porém, observou-se uma redução da opacidade em relação ao controle F1, de $17,527 \pm 0,902$ para $13,827 \pm 1,018$ no F3, indicando que a presença do óleo promoveu maior homogeneidade óptica ou reorganização da matriz proteica. Já nos conjugados de pectina/PISG, a opacidade manteve-se estável, variando entre $12,223 \pm 0,656$ e $12,309 \pm 0,525$, sugerindo que a combinação de polímero hidrofílico (pectina) com a proteína gerou uma matriz de transição com comportamento visual intermediário.

Esses resultados, corroborados pelas imagens dos filmes (Figura 15), demonstram que a incorporação de óleo de buriti influencia diretamente as características visuais dos filmes, promovendo coloração mais intensa, especialmente em formulações com maior teor de proteína. A modulação da cor e da opacidade é desejável, dependendo da aplicação final do material, como embalagens translúcidas ou com função barreira à luz (Rahman e Bhoi, 2021).

Tabela 9– Valores médios da análise colorimétrica e de opacidade dos filmes de pectina, proteína isolada de semente de girassol e seus respectivos conjugados.

Amostra		L*	a*	b*
Pectina	F1	25,940±1,511 ^c	-0,367±0,140 ^a	1,600±0,382 ^b
	F2	32,910±0,513 ^b	-0,543±0,170 ^a	4,223±1,115 ^b
	F3	37,410±1,182 ^a	-0,113±0,395 ^a	10,420±3,280 ^a
		c*	H*	Opacidade
	F1	1,647±0,372 ^b	103,440±5,790 ^a	9,005±0,197 ^b
	F2	4,265±1,087 ^b	97,940±4,240 ^{ab}	8,387±0,249 ^b
	F3	10,420±3,270 ^a	91,250±3,020 ^b	17,958±1,007 ^a
Pectina/PISG (25:75)		L*	a*	b*
	F1	28,550±1,770 ^a	1,447±0,290 ^c	5,933±0,934 ^b
	F2	28,450±2,700 ^a	2,500±0,304 ^b	10,017±0,661 ^{ab}
	F3	24,190±179 ^a	3,413±0,196 ^a	12,54±3,560 ^a
		c*	H*	Opacidade
	F1	6,122±0,828 ^b	75,840±5,040 ^a	12,990±0,847 ^a
	F2	10,325±0,709 ^{ab}	76,017±0,926 ^a	12,223±0,565 ^a
	F3	13,020±3,46 ^a	74,080±3,900 ^a	12,309±0,525 ^a
PISG		L*	a*	b*
	F1	12,330±1,980 ^c	7,080±1,035 ^a	21,010±2,420 ^a
	F2	23,520±0,455 ^a	2,503±0,236 ^c	11,570±0,275 ^b
	F3	18,930±2,070 ^b	5,013±0,107 ^b	21,470±2,720 ^a
		c*	H*	Opacidade
	F1	21,270±1,990 ^a	70,240±4,540 ^b	17,527±0,902 ^a
	F2	11,840±0,226 ^b	77,777±1,381 ^a	14,434±0,665 ^b
	F3	22,050±2,670 ^a	76,738±1,438 ^{ab}	13,827±1,018 ^b

F1 = filme controle; F2 = filme com substituição parcial (50%) do glicerol; F3 = filme com substituição total do glicerol. Médias com as mesmas letras na mesma coluna, em um mesmo grupo amostral, não apresentam diferenças estatísticas ($p > 0.05$).

Fonte: Dados Experimentais (2025).

Propriedades de Barreira

A substituição do glicerol pelo óleo de buriti promoveu alterações significativas nas propriedades de barreira dos filmes produzidos com pectina, proteína de semente de girassol e seus conjugados. De maneira geral, observou-se que a incorporação do óleo influenciou de forma mais expressiva a permeabilidade ao vapor de água e a taxa

de transmissão de vapor de água (TTVA), enquanto os efeitos sobre a permeabilidade ao oxigênio (PVO) variaram conforme a composição da matriz, conforme pode ser observado na Tabela 10.

Tabela 10– Valores médios de taxa de transmissão de vapor de água (TTVA), permeabilidade ao vapor de água (PVA) e permeabilidade ao oxigênio (PVO) dos filmes de pectina, proteína isolada de semente de girassol e seus respectivos conjugados.

Amostra		TTVA ($\times 10^{-3}$ g/s.m ²)	PVA ($\times 10^{-10}$ g/s.m.Pa)	PVO ($\times 10^{-9}$ g/s.mm ²)
Pectina	F1	4,993 $\pm$ 0,315 ^a	1,146 $\pm$ 0,073 ^a	4,003 $\pm$ 0,775 ^a
	F2	2,048 $\pm$ 0,292 ^b	0,604 $\pm$ 0,086 ^b	3,897 $\pm$ 0,080 ^a
	F3	2,021 $\pm$ 0,638 ^b	0,459 $\pm$ 0,145 ^b	4,129 $\pm$ 0,730 ^a
Pectina/PISG (25:75)	F1	3,160 $\pm$ 0,624 ^a	0,878 $\pm$ 0,173 ^a	7,054 $\pm$ 0,269 ^a
	F2	1,588 $\pm$ 0,528 ^b	0,502 $\pm$ 0,167 ^a	6,665 $\pm$ 0,212 ^a
	F3	1,593 $\pm$ 0,510 ^b	0,609 $\pm$ 0,195 ^a	3,280 $\pm$ 0,578 ^b
PISG	F1	4,798 $\pm$ 0,224 ^a	0,842 $\pm$ 0,039 ^a	7,387 $\pm$ 0,152 ^a
	F2	3,443 $\pm$ 0,239 ^b	0,871 $\pm$ 0,060 ^a	3,965 $\pm$ 0,651 ^b
	F3	3,211 $\pm$ 0,197 ^b	0,895 $\pm$ 0,055 ^a	4,221 $\pm$ 0,913 ^b

F1 = filme controle; F2 = filme com substituição parcial (50%) do glicerol; F3 = filme com substituição total do glicerol. Médias com as mesmas letras na mesma coluna, em um mesmo grupo amostral, não apresentam diferenças estatísticas ($p > 0.05$).

Fonte: Dados Experimentais (2025).

Nos filmes elaborados com pectina, a adição de óleo resultou em uma redução significativa da TTVA, passando de $4,9932 \pm 0,315 \times 10^{-3}$ g/s.m² no controle (F1) para aproximadamente 2×10^{-3} g/s.m² nas formulações F4 e F5. Essa redução foi acompanhada por uma queda nos valores de PVA, que passaram de $1,1465 \pm 0,0732 \times 10^{-10}$ para $0,4591 \pm 0,1448 \times 10^{-10}$ g/s.m.Pa na formulação com maior proporção de óleo (F5). Esses resultados indicam que a presença do óleo de buriti contribuiu para uma estrutura mais hidrofóbica e menos permeável ao vapor de água, provavelmente devido a formação de domínios lipídicos que dificultam a difusão de moléculas de água pela matriz do filme (Bhatia *et al.*, 2024). No entanto, os valores de PVO nos filmes de pectina não apresentaram diferenças estatísticas relevantes entre as amostras, sugerindo que a modificação na matriz não foi suficiente para restringir significativamente o transporte de gases apolares como o oxigênio.

Autores como Amiri Samani et al. (2025), Bhatia et al. (2024) e Tristante et al. (2024) obtiveram resultados semelhantes ao analisar propriedades de barreira de filmes compostos por pectina com a adição de óleos vegetais, obtendo valores de PVA variando de $0,57$ a $0,63 \times 10^{-10}$ g/s.m.Pa para filmes de pectina extraída da pitaya, $2,35$ a $1,31 \times 10^{-10}$ g/s.m.Pa para filmes a base de pectina e proteína de feijão e $0,73$ a $0,56 \times 10^{-10}$ g/s.m.Pa para filmes de pectina com adição de óleo de toranja.

Nos conjugados pectina/PISG (25:75), a substituição do glicerol também impactou de forma significativa a TTVA, que foi reduzida de $3,160 \pm 0,624 \times 10^{-3}$ g/s.m² no F1 para valores próximos de $1,58 \times 10^{-3}$ g/s.m² nas formulações com óleo. A PVA apresentou comportamento semelhante, diminuindo de $0,878 \pm 0,173 \times 10^{-10}$ g/s.m.Pa para $0,5021 \pm 0,1668 \times 10^{-10}$ g/s.m.Pa com 50% de óleo (F2). Esses resultados indicam que a presença do óleo, mesmo em uma matriz mista, promoveu uma barreira mais eficaz contra a difusão de vapor de água, provavelmente por meio de interações hidrofóbicas entre os componentes proteicos e lipídicos. A PVO também foi reduzida consideravelmente, atingindo $3,280 \pm 0,578 \times 10^{-9}$ g/s.mm² na formulação com 100% de óleo (F3), o que sugere que a combinação entre proteína e óleo favoreceu a formação de uma rede densa e coesa, capaz de dificultar tanto o transporte de água quanto de oxigênio.

Nos filmes elaborados exclusivamente com proteína (PISG), a substituição do plastificante resultou em uma redução da TTVA de $4,798 \pm 0,224 \times 10^{-3}$ g/s.m² para $3,211 \pm 0,197 \times 10^{-3}$ g/s.m². Apesar da diminuição mais modesta em comparação com as demais matrizes, os resultados indicam um comportamento consistente de melhoria na barreira à umidade com a incorporação do óleo. A permeabilidade ao vapor de água (PVA) apresentou variações pontuais, porém manteve-se estatisticamente inalterada entre as diferentes proporções de óleo incorporadas aos filmes. Esses resultados estão em consonância com dados reportados por outros autores em investigações envolvendo filmes proteicos formulados com adição de óleos vegetais (Anjos et al., 2023; Silva E Silva, Da et al., 2018). Já a PVO apresentou uma redução mais pronunciada, passando de $7,3869 \pm 0,1518 \times 10^{-9}$ g/s.mm² para $3,965 \pm 0,651 \times 10^{-9}$ g/s.mm², o que pode estar relacionado à compatibilidade entre a matriz proteica e os constituintes hidrofóbicos do óleo de buriti, promovendo menor porosidade e dificultando o transporte de oxigênio (Salgado et al., 2013).

É relevante notar que as proteínas, por si só, já são reconhecidas por formarem filmes com boa barreira a gases como o oxigênio, especialmente em baixa umidade relativa, devido à sua estrutura compacta e capacidade de formar uma rede densa de ligações de hidrogênio (Suderman, Isa e Sarbon, 2018; Yadav *et al.*, 2025). A adição do óleo de buriti, neste caso, parece não apenas ter contribuído para a melhoria da barreira ao vapor de água, mas também pode ter potencializado ou complementado a barreira ao oxigênio da matriz proteica.

Propriedades Mecânicas

Nos filmes a base de pectina, as propriedades mecânicas demonstraram sensível variação em função da substituição do plastificante, vide Tabela 11. O filme controle (F1) apresentou um limite de resistência a tração de $22,291 \pm 2,226$ MPa, percentual de alongamento de ruptura de $19,550 \pm 2,169$ % e módulo elástico de $266,8 \pm 41,6$ MPa. Esses resultados indicam um material mecanicamente equilibrado, com boa resistência e deformabilidade, porém mais rígidos do que outros polímeros, o que corrobora com estudos de autores como (Amiri Samani *et al.*, 2025; Qin *et al.*, 2024) que relatam valores de LRT próximos a 20 MPa e alongamento próximo a 5%.

Tabela 11– Valores médios de limite de resistência à tração (LRT), percentual de alongamento na ruptura (%AL) e módulo de elasticidade (E) dos filmes de pectina, proteína isolada de semente de girassol e seus respectivos conjugados.

Amostra		Limite de Resistência à Tração (MPa)	Percentual de Alongamento na Ruptura (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Pectina	F1	22,291±2,226 ^a	19,550±2,169 ^a	266,800±41,600 ^b
	F2	20,850±6,830 ^a	10,515±2,188 ^b	373,800±95,500 ^a
	F3	9,840±5,720 ^b	4,073±1,710 ^c	-
Pectina/PISG (25:75)	F1	8,298±0,606 ^a	34,889±1,848 ^a	97,010±12,570 ^b
	F2	8,956±1,641 ^a	9,321±2,120 ^b	192,800±36,700 ^a
	F3	0,350±0,225 ^b	1,747±1,097 ^c	-
PISG	F1	6,456±0,840 ^a	157,000±27,900 ^a	28,870±4,150 ^b
	F2	4,418±0,408 ^b	29,480±5,930 ^b	73,290±8,410 ^a
	F3	1,700±1,513 ^c	1,171±0,642 ^c	-

F1 = filme controle; F2 = filme com substituição parcial (50%) do glicerol; F3 = filme com substituição total do glicerol. Médias com as mesmas letras na mesma coluna, em um mesmo grupo amostral, não apresentam diferenças estatísticas ($p > 0.05$).

Fonte: Dados Experimentais (2025).

Com a substituição de 50% do glicerol por óleo de buriti (F2), observou-se uma leve redução no LRT ($20,85 \pm 6,83$ MPa) sem diferença significativa, e uma queda acentuada no %AL ($10,515 \pm 2,188$ %), indicando que a incorporação lipídica e a substituição do plastificante comprometeu a flexibilidade do filme. O módulo de elasticidade também aumentou significativamente ($373,8 \pm 95,5$ MPa), o que sugere uma rigidez estrutural ainda maior, possivelmente decorrente da reorganização das cadeias poliméricas na substituição do glicerol pelo óleo. Na formulação com substituição de 100% por óleo de buriti como plastificante (F3), o desempenho mecânico fora substancialmente prejudicado. O LRT e o %AL reduziram drasticamente para $9,84 \pm 5,72$ MPa e $4,07 \pm 1,71$ %, não sendo possível calcular o módulo de elasticidade. Este comportamento já foi relatado em literatura por Spinei, Oroian e Ursachi (2024), que apontam que em alguns casos, óleos vegetais podem conferir maior rigidez ao filme ao interferirem na mobilidade polimérica, provavelmente devido à baixa compatibilidade entre o óleo e a estrutura hidrofílica da pectina, ou a chamada reticulação do óleo, comum em filmes de pectina.

No grupo de filmes pectina/PISG, o controle F1 apresentou um LRT de $8,30 \pm 0,61$ MPa, com alongamento de $34,89 \pm 1,85\%$ e módulo de elasticidade de $97,01 \pm 12,6$ MPa, indicando um material moderadamente resistente e flexível. A presença da matriz proteica favorece a formação de redes estruturadas via ligações de hidrogênio e interações hidrofóbicas internas, o que proporciona boa resistência mecânica (Silva E Silva, Da *et al.*, 2018).

Na formulação com substituição de 50% do glicerol por óleo de buriti (F2), o LRT se manteve estável ($8,96 \pm 1,64$ MPa), mas o %AL foi severamente reduzido para $9,32 \pm 2,12\%$, enquanto o módulo de elasticidade aumentou para $192,8 \pm 36,7$ MPa. O comportamento mecânico indica que o óleo atuou como um agente enrijecedor, reduzindo drasticamente a capacidade de deformação do filme, fenômeno que pode estar relacionado à redução das ligações entre cadeias proteicas e à formação de microdomínios lipídicos que prejudicam a continuidade da matriz (Tirgarian, Farmani e Milani, 2023). O mesmo foi relatado também por Orliac *et al.* (2003) ao adicionar propilenoglicol como plastificante em seus filmes a base de proteína de semente de girassol, observando que a presença de um grupo hidrofóbico no plastificante resultou em uma orientação específica das moléculas dentro da estrutura da proteína, levando o filme a se tornar mais frágil à medida que a quantidade do plastificante aumentava.

Já com a substituição total por óleo (F3), o filme apresentou desempenho mecânico extremamente reduzido, com LRT de apenas $0,35 \pm 0,22$ MPa e %AL de $1,75 \pm 1,10\%$, impossibilitando o cálculo do módulo de elasticidade. A queda acentuada reflete uma perda quase total de integridade mecânica, possivelmente devido à imiscibilidade entre o óleo e a fração proteica, comportamento que pode estar relacionado especificamente ao óleo de buriti e a proteína de semente de girassol, já que como relatado por outros autores como Silva E Silva, Da *et al.* (2018), diferentes óleos interagem de diferentes formas com cada proteína, modificando diretamente as propriedades mecânicas dos filmes levando à formação de filmes frágeis e descontínuos.

Por fim, os filmes compostos apenas de proteína de semente de girassol (PISG) apresentaram o perfil mais diferenciado. O controle, plastificado apenas com glicerol (F1), exibiu uma resistência de $6,46 \pm 0,84$ MPa e um percentual de alongamento muito elevado ($157,0 \pm 27,9\%$), com baixo módulo de elasticidade ($28,87 \pm 4,15$ MPa),

indicando grande capacidade de deformação elástica. Esse comportamento altamente plástico pode estar relacionado à flexibilidade estrutural da matriz proteica em presença do glicerol, que atua como potente redutor de tensões intermoleculares (Silva E Silva, Da *et al.*, 2018).

A substituição parcial do plastificante por óleo (F2) reduziu tanto a resistência ($4,42 \pm 0,41$ MPa) quanto o alongamento ($29,48 \pm 3,59\%$), ao passo que o módulo aumentou para $73,29 \pm 8,41$ MPa, apontando para um comportamento mais rígido e menos elástico. Já na amostra F3, houve perda marcante de desempenho: o LRT caiu para $1,70 \pm 1,51$ MPa, e o %AL para $1,17 \pm 0,64\%$, novamente sem cálculo de módulo possível. Este padrão reforça a hipótese de que o óleo de buriti, embora tenha potencial funcional, não se comporta como plastificante efetivo quando usados isoladamente em filmes proteicos, talvez com a aplicação de outras técnicas de homogeneização ou outros emulsificantes, como sugerido por Tirgarian, Farmani e Milani (2023) ao falar sobre a aplicação de diferentes óleos vegetais em filmes proteicos.

Análise Termogravimétrica (TGA)

A estabilidade térmica e o perfil de decomposição dos filmes à base de pectina, proteína isolada de semente de girassol (PISG) e seus conjugados (pectina/PISG (25:75)), formulados com diferentes proporções de glicerol e óleo de buriti, foram analisados por TGA/DTG, conforme ilustrado na Figura 16, e com os dados sumarizados na Tabela 12. O comportamento térmico destes filmes também se caracterizou por múltiplas etapas de perda de massa.

Tabela 12– Dados de interpretação das análises termogravimétricas dos filmes de pectina, proteína de semente de girassol e seus respectivos conjugados.

Amostra	Estágios	Faixa de Degradação (°C)	Picos da DTG (°C)	Perda de Massa (%)	
Pectina	F1	1°	39,62 - 118,55	76	10,828
		2°	122,97 - 201,21	187	9,287
		3°	205,92 - 307,10	245	35,334
		4°	311,86 - 599,50		20,125
		Resíduo			24,426
	F2	1°	36,44 - 117,69	75	10,237
		2°	123,45 - 210,56	187	8,154
		3°	214,04 - 328,89	247	34,230
		4°	334,77 - 466,04	420	15,999
		5°	469,74 - 599,64		4,487
		Resíduo			26,893
	F3	1°	39,07 - 209,48	71 - 189	15,601
		2°	216,67 - 294,40	252	26,440
		3°	309,24 - 476,09	427	24,377
		4°	482,01 - 599,35		4,334
		Resíduo			29,248
Pectina/PISG (25:75)	F1	1°	38,21 - 163,29	92	16,918
		2°	166,00 - 397,46	212 - 260 - 344	49,127
		3°	403,77 - 596,12	500	27,009
		Resíduo			6,946
	F2	1°	42,58 - 147,38	79	11,088
		2°	152,59 - 345,18	221 - 265	36,386
		3°	348,36 - 438,82	365	17,562
		4°	439,96 - 561,37	488	26,661
		Resíduo			8,303
	F3	1°	40,57 - 146,55	74	10,545
		2°	152,65 - 297,95	240	17,385
		3°	305,40 - 436,92	318 - 384	35,884
		4°	440,37 - 599,06		8,938
		Resíduo			27,248

Tabela 13 – (continuação)

Amostra	Estágios	Faixa de Degradação (°C)	Picos da DTG (°C)	Perda de Massa (%)	
PISG	F1	1°	38,86 - 153,50	94	15,882
		2°	156,18 - 515,73	242 - 326	58,563
		3°	517,43 - 599,19		1,542
		Resíduo			24,013
	F2	1°	33,79 - 159,27	86	13,063
		2°	160,90 - 514,65	265 - 364	59,602
		3°	515,76 - 599,18	446	2,190
		Resíduo			25,145
	F3	1°	38,76 - 178,22	75	13,079
		2°	179,13 - 521,77	325 - 370 - 454	58,718
		3°	522,84 - 599,12		2,393
		Resíduo			25,810

F1 = filme controle; F2 = filme com substituição parcial (50%) do glicerol; F3 = filme com substituição total do glicerol.

Fonte: Dados Experimentais (2025).

O primeiro estágio de perda de massa, com picos DTG geralmente ocorrendo abaixo de 100°C, corresponde à evaporação da água adsorvida e fracamente ligada à matriz do filme (Ahmed *et al.*, 2023; Dilkushi *et al.*, 2024; Martins *et al.*, 2012). De modo geral, observou-se que a presença de glicerol, como nos filmes controle de PISG (F1) e do conjugados pectina/PISG (F1), tendeu a resultar em maiores perdas de umidade nesta etapa da TGA, atingindo 15,88% e 16,92% respectivamente, o que é consistente com a natureza higroscópica deste plastificante. A incorporação do óleo de buriti, em muitos casos, levou a uma menor perda de umidade, sugerindo que o óleo pode conferir maior hidrofobicidade (Spinei, Oroian e Ursachi, 2024). Contudo, o comportamento não foi uniforme em todas as matrizes.

Notavelmente, para os filmes de pectina, a maior perda de umidade na análise TGA ocorreu para a formulação com substituição total do glicerol por óleo de buriti (F3), com 15,60%, superando o filme controle com glicerol (F1), que perdeu somente 10,83%. O resultado obtido para o filme F3 revela um comportamento atípico, uma vez que, mesmo na ausência de glicerol e na presença de um componente hidrofóbico

(óleo de buriti), foi observado uma maior perda de umidade. Tal resultado contraria a expectativa de menor afinidade com a umidade, porém é coerente com os dados obtidos na análise do teor de umidade dos filmes. Essa maior liberação de água na TGA para os filmes de pectina com substituição total do glicerol, pode indicar que a ausência total do plastificante e a presença exclusiva de óleo de buriti nesta matriz específica resultaram em uma microestrutura particular. Essa configuração estrutural possivelmente influenciou a retenção e a mobilidade da água no interior do material. É possível que a interação óleo-pectina, na falta de um plastificante hidrofílico como o glicerol, tenha levado a uma rede menos coesa ou com maior área superficial exposta, facilitando a adsorção de umidade do ambiente antes da análise ou uma retenção de água do processo de moldagem que não foi completamente eliminada na secagem e que só foi liberada com o aquecimento da TGA.

Um segundo evento térmico, evidenciado por picos ou ombros nas curvas DTG, geralmente entre 180°C e 265°C, foi atribuído à decomposição do glicerol nas amostras que o continham. Dados de literatura indicam que este estágio de decomposição do glicerol pode ocorrer na faixa de 180-250°C ou entre 170-230°C (Dilkushi *et al.*, 2024; Ursachi, Oroian e Spinei, 2024). Nas formulações com substituição total ou parcial do glicerol, modificações neste estágio foram observadas, com picos DTG indicando a decomposição ou volatilização de componentes mais leves do óleo de buriti (Criollo-Feijoo *et al.*, 2024; Hernández, Ludueña e Flores, 2023).

A principal etapa de degradação dos biopolímeros (pectina e/ou PISG) ocorreu em temperaturas mais elevadas, com picos DTG intensos. Para os filmes de pectina, a temperatura de máxima degradação ($T_{m\acute{a}x}$) variou de 245°C (F1) a 252°C (F3). Após este evento principal, um outro pico de decomposição foi observado no DTG para os filmes de pectina, ocorrendo entre 420°C (F2) e 427°C (F3). Este estágio em temperaturas mais altas, especialmente nas amostras F2 e F3 que contêm óleo de buriti, pode ser atribuído à decomposição de frações mais estáveis do óleo e/ou a uma carbonização mais lenta e em etapas da estrutura da pectina modificada pela presença do óleo. Dados de literatura indicam que filmes de celulose/pectina podem ter um estágio principal de degradação entre 260-350°C, e a adição de óleos pode influenciar a estabilidade térmica (Spinei, Oroian e Ursachi, 2024).

Os filmes contendo proteína, tanto pura quanto conjugado com pectina, apresentaram um pico adicional ou um ombro pronunciado na curva DTG, antecedendo a temperatura de máxima degradação da estrutura proteica principal. Este evento térmico intermediário, não observado com a mesma clareza nos demais filmes, sugere um processo de decomposição em etapas para a PISG. Estudos anteriores demonstraram que a decomposição de filmes de proteína pode ocorrer com múltiplos picos na curva DTG (Guo *et al.*, 2024). Isso pode ser reflexo da natureza heterogênea do isolado proteico, que contém diferentes frações como globulinas e albuminas, ou da degradação sequencial de estruturas secundárias e terciárias antes da completa fragmentação da cadeia polipeptídica principal. A interação da PISG com os plastificantes ou com a pectina nos conjugados pectina/PISG também pode influenciar este perfil de degradação.

O perfil térmico dos conjugados pectina/PISG foi distintamente influenciado pela composição do plastificante, com a degradação dos componentes poliméricos (PISG e pectina) ocorrendo em múltiplos eventos, especialmente visíveis antes do estágio final de carbonização. Nas amostras contendo glicerol (F1 e F2), a maior parte da decomposição polimérica ocorreu em dois ou três estágios principais, entre aproximadamente 260°C e 365°C, antes de um pico final de carbonização bem definido em torno de 490 e 500°C e com perdas de massa significativas, possivelmente devido à forma como o glicerol interage com a matriz e influencia a formação de resíduos carbonáceos que se decompõem tardiamente (Dilkushi *et al.*, 2024). Em contraste, no conjugado pectina/PISG com 100% de óleo (F3), a ausência de glicerol e a alta concentração de óleo de buriti resultaram em um perfil diferente, um evento de degradação, sugerindo uma decomposição principal conjunta dos polímeros e do óleo, e um evento de carbonização com menor perda de massa nesse último estágio, em comparação aos estágios finais de F1 e F2. Isso sugere que o tipo de plastificante (glicerol vs. óleo de buriti) altera não apenas os estágios iniciais, mas também o mecanismo e a temperatura de degradação final do conjugado pectina/PISG.

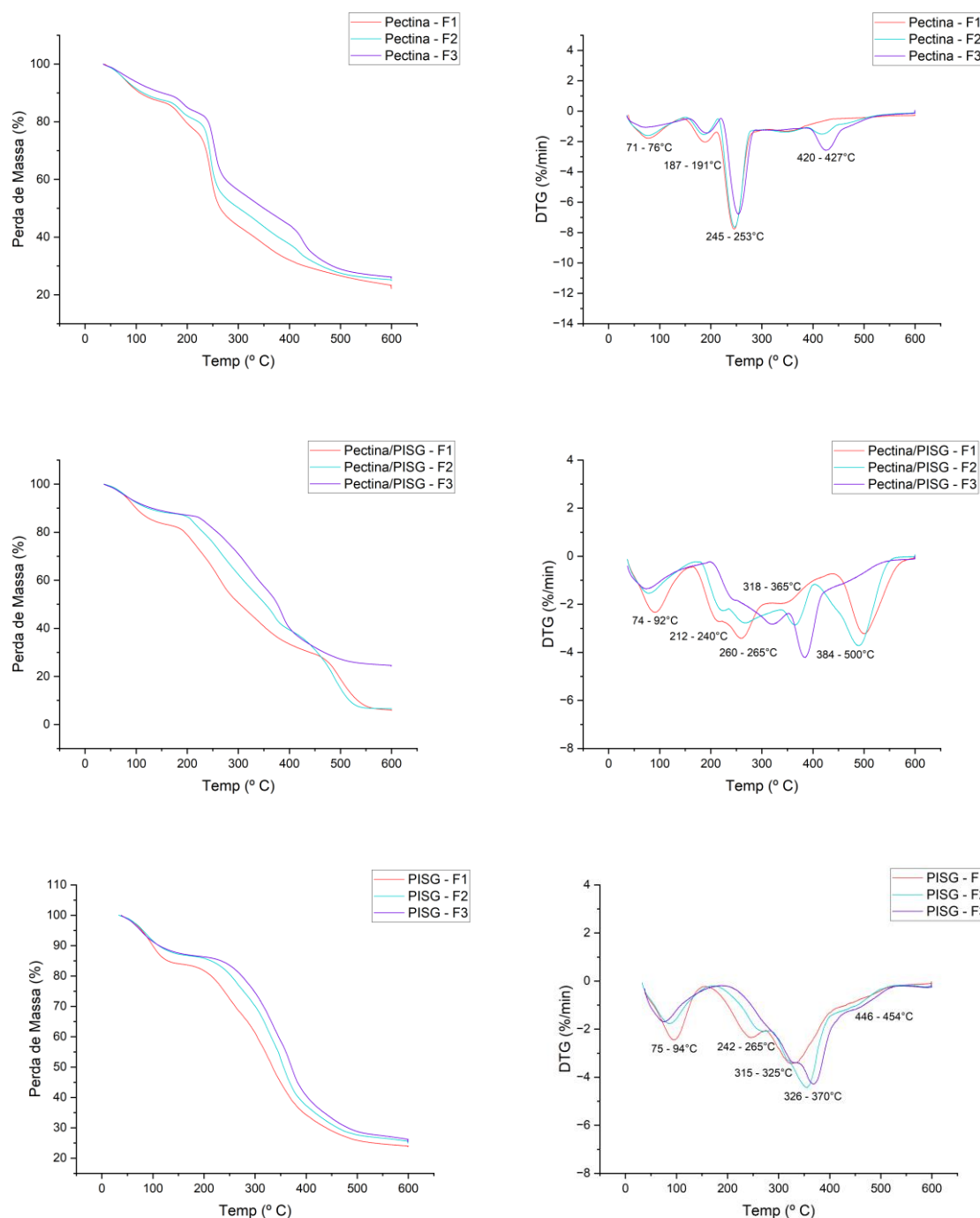
Nos filmes de PISG pura, a degradação principal da proteína ocorreu com $T_{\text{máx}}$ variando de 326°C (F1) a 370°C (F3). As amostras PISG com substituição parcial do óleo (F2) e total (F3) apresentaram ainda um último pico, pouco acentuado no DTG de decomposição em temperaturas muito elevadas, entre 446 e 454°C. Estes eventos

definidos para os filmes de PISG com óleo podem estar relacionados à decomposição de diferentes frações do óleo de buriti ou a interações específicas óleo-proteína que resultam em produtos com diferentes estabilidades térmicas, além da carbonização da proteína.

Por fim, o percentual de resíduo final a 600°C, correspondente ao material carbonáceo que não se decompôs ou volatilizou, apresentou variações significativas entre os diferentes sistemas poliméricos e formulações. Para os filmes de pectina, o resíduo variou de 24,426% (F1) a 29,248% (F3), e para os filmes de PISG variou de 24,013% (F1) a 25,810% (F3). Notavelmente, os filmes de conjugado pectina/PISG exibiram a maior disparidade e os menores valores de resíduo, variando de 6,946% (F1) a 27,248% (F3). Essa grande diferença no resíduo sugere que a combinação pectina/PISG com glicerol pode ter promovido uma decomposição mais completa em produtos voláteis, possivelmente devido a interações polímero-polímero específicas ou a um efeito do glicerol que alterou o mecanismo de degradação e reduziu a formação de carvão (Ahmed *et al.*, 2023). Diferentes interações em misturas podem levar a diversos mecanismos de decomposição (Martins *et al.*, 2012). Por outro lado, o maior resíduo na F3, similar aos polímeros puros com óleo, aponta para uma contribuição do óleo de buriti na formação de resíduo carbonáceo em altas temperaturas.

Em resumo, a adição do óleo de buriti influenciou o perfil de degradação dos filmes de pectina, PISG e seus conjugados, introduzindo ou modificando estágios de decomposição, especialmente em temperaturas mais elevadas. No que diz respeito à estabilidade térmica, embora tenham sido observadas variações nos polímeros principais conforme a matriz e a formulação, as curvas de perda de massa revelam um aumento consistente na estabilidade dos filmes quando o glicerol foi substituído pelo óleo de buriti, efeito este independente da matriz utilizada.

Figura 16– Gráficos de perda de massa e 1ª derivada, gerados a partir de dados das análises termogravimétricas dos filmes de pectina e proteína isolada de semente de girassol.



Fonte: Autor (2025).

Biodegradabilidade

Os resultados da biodegradabilidade dos filmes de pectina e proteína, bem como dos conjugados pectina/PISG (25:75), demonstram que a substituição do glicerol pelo óleo de buriti influenciou diretamente o tempo máximo para degradação, assim como ocorrido nos filmes do Capítulo I, como pode ser visto nas Figuras 17, 18 e 19. Os filmes controle F1, produzidos apenas com glicerol, apresentaram tempos de degradação mais curtos (10 dias para pectina e proteína pura), evidenciando a maior facilidade de degradação conferida pela natureza hidrofílica do glicerol.

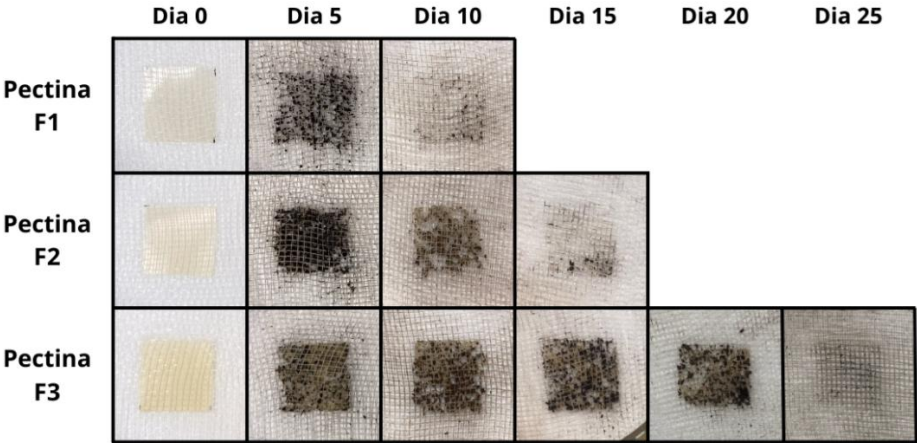
Períodos semelhantes de degradação foram registrados por (Alves *et al.*, 2024) tendo a degradação completa de seus filmes a base goma de alfarroba e proteína de semente de girassol no oitavo dia. Com a substituição parcial (F2) e total (F3) do glicerol por óleo de buriti, observou-se um aumento gradual na resistência à degradação, alcançando até 25 dias nos filmes de pectina e 20 dias nos filmes de proteína com substituição total (F3). Esse comportamento está relacionado à hidrofobicidade do óleo, que limita a absorção de umidade e a atividade microbiana (Cai *et al.*, 2023).

Dentre as formulações avaliadas, os filmes dos conjugados pectina/PISG apresentaram o maior tempo de degradação, atingindo até 30 dias na substituição total do glicerol F3, sugerindo que a combinação entre proteína e óleo de buriti favorece uma estrutura de maior estabilidade. Por outro lado, os filmes à base de proteína pura apresentaram uma resposta menos expressiva ao aumento do teor de óleo, com um máximo de 20 dias, o que pode estar relacionado à menor coesão estrutural da matriz proteica isolada, a morfologia dos polímeros afeta diretamente as taxas de biodegradação (Tokiwa *et al.*, 2009).

Dessa forma, a substituição do glicerol pelo óleo de buriti demonstrou ser uma estratégia que altera o perfil de degradação dos filmes. Ao conferir maior hidrofobicidade à matriz, especialmente quando associado à pectina ou ao conjugado com proteína, o óleo de buriti contribui para uma maior estabilidade e durabilidade do material frente a condições ambientais que favoreceriam uma rápida ação microbiana. Isso resulta em uma taxa de biodegradação mais controlada, o que pode ser vantajoso para certas aplicações em embalagens que requerem maior tempo de prateleira, sem

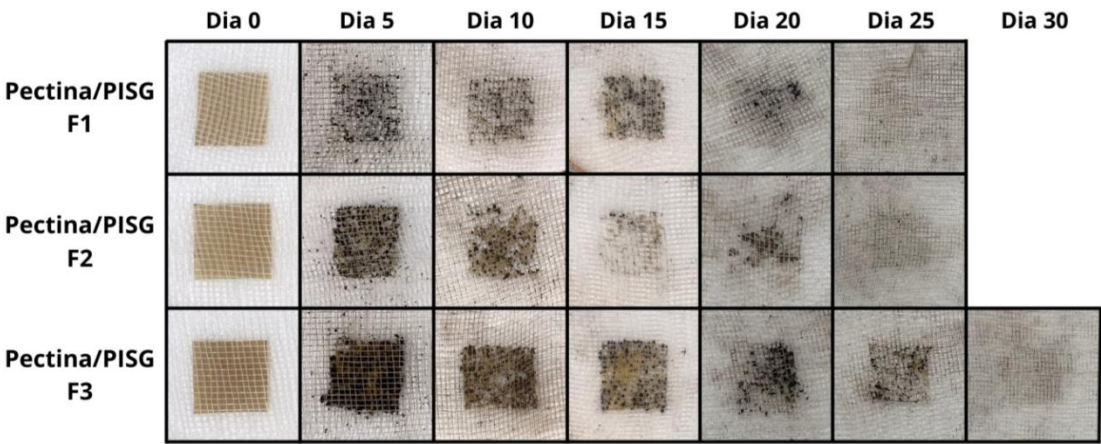
comprometer a natureza biodegradável fundamental do material ao final de seu ciclo de vida.

Figura 17– Acompanhamento fotográfico dos ensaios de biodegradabilidade dos filmes de pectina.



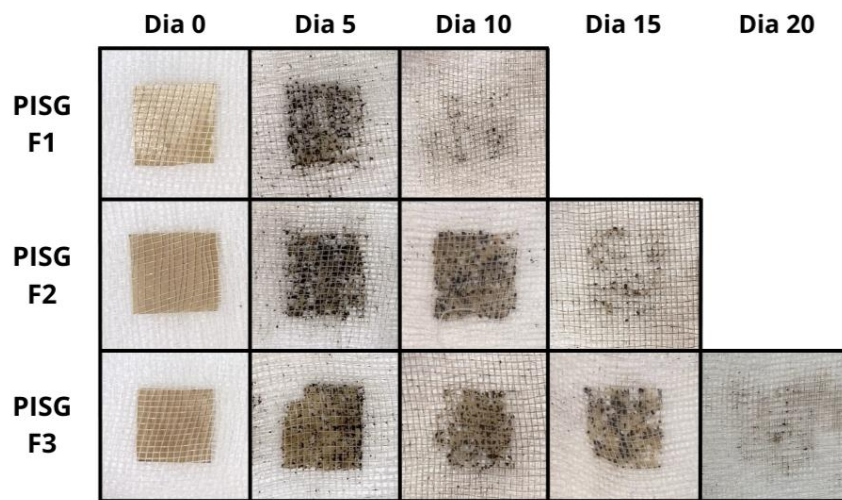
Fonte: Autor (2025).

Figura 18– Acompanhamento fotográfico dos ensaios de biodegradabilidade dos filmes conjugados de pectina e proteína de semente de girassol.



Fonte: Autor (2025).

Figura 19– Acompanhamento fotográfico dos ensaios de biodegradabilidade dos filmes de proteína de semente de girassol.



Fonte: Autor (2025).

CONCLUSÃO

Este capítulo investigou o impacto do óleo de buriti na substituição do glicerol em filmes de pectina cítrica e proteína isolada de semente de girassol (PISG), isolados e em conjugados.

Em termos de características físico-químicas, a inclusão do óleo geralmente resultou em menor absorção de umidade e menor solubilidade em água, particularmente acentuada em sistemas ricos em PISG. A espessura dos filmes aumentou significativamente em formulações proteicas, enquanto permaneceu estável para a pectina pura. Para os filmes de pectina, a umidade e a solubilidade em água se mantiveram altas, sugerindo uma interação limitada do óleo com essa matriz hidrofílica. As propriedades ópticas foram afetadas pela cor inerente do óleo, que intensificou o tom amarelado e alterou a luminosidade. A análise estrutural por FTIR confirmou a presença do óleo pelas bandas de C=O ($\sim 1745\text{ cm}^{-1}$) e C-H (~ 2925 e $\sim 2854\text{ cm}^{-1}$). Nos filmes de PISG pura, a notável estabilidade das bandas Amida I ($\sim 1645\text{ cm}^{-1}$) e Amida II ($\sim 1540\text{ cm}^{-1}$) sugere que a estrutura secundária da proteína foi preservada, mesmo com a substituição total do glicerol pelo óleo.

No que se refere às propriedades de barreira, o óleo de buriti aprimorou a resistência. Filmes de pectina apresentaram uma redução de aproximadamente 50% na taxa de transmissão de vapor de água (TTVA) e permeabilidade ao vapor de água (PVA). Filmes de PISG viram uma melhoria significativa na barreira ao oxigênio (PVO), com uma redução de quase 50%. Os filmes conjugados de pectina/PISG exibiram o desempenho mais abrangente, demonstrando otimização notável tanto na barreira à umidade quanto à oxigênio.

Os atributos mecânicos, contudo, foram substancialmente comprometidos pela substituição total do glicerol. Os filmes de pectina, PISG e seus conjugados exibiram uma acentuada perda de flexibilidade e aumento da fragilidade. Em muitos casos, houve uma completa perda de integridade mecânica, sugerindo que o óleo de buriti, quando aplicado isoladamente, não funcionou como um agente plastificante eficaz para essas matrizes polares.

A análise termogravimétrica (TGA) indicou que a estabilidade térmica dos polímeros principais manteve-se relativamente constante. Contudo, o perfil térmico

dos conjugados pectina/PISG foi distintamente influenciado pela composição do plastificante, com um adiantamento considerável da degradação principal e um comportamento bem distinto em cada formulação, sugerindo uma redução na estabilidade térmica e uma decomposição mais completa em produtos voláteis em comparação com a formação de resíduos carbonáceos nas formulações com óleo. A biodegradabilidade foi controlada positivamente pela presença do óleo, que prolongou o tempo de decomposição em comparação aos filmes controle. O conjugado pectina/PISG com 100% de óleo estendeu o tempo de decomposição para até 30 dias.

Em síntese, o óleo de buriti demonstrou ser um aditivo funcional promissor para otimizar as propriedades de barreira em filmes de pectina e PISG. No entanto, sua aplicação como plastificante exclusivo resultou em fragilidade generalizada, demandando otimizações futuras de formulação para equilibrar os benefícios de barreira com a integridade estrutural e a flexibilidade do filme final.

CONCLUSÃO GERAL

A investigação da substituição do glicerol por óleo de buriti como plastificante em filmes biopoliméricos, utilizando matrizes de goma de alfarroba (LBG), fécula de mandioca, pectina e proteína isolada de semente de girassol (PISG), e seus respectivos conjugados, revelou um conjunto de resultados complexos e com efeitos que variam conforme a natureza da matriz polimérica.

De um lado, a incorporação do óleo trouxe melhorias significativas em propriedades de barreira, como a redução da umidade e solubilidade em água em todas as matrizes, e aprimoramento da barreira ao vapor de água e ao oxigênio, notavelmente em filmes de LBG e conjugados pectina/PISG, indicando uma estrutura mais densa e protetora. Nos filmes de LBG, as propriedades mecânicas também se beneficiaram com o aumento da resistência à tração e do módulo de elasticidade, sugerindo um papel de reforço estrutural para o óleo. A biodegradabilidade foi favoravelmente modulada, resultando em maior durabilidade sem comprometer a natureza ecológica do material.

Contudo, essa substituição apresentou algumas dificuldades, como a homogeneidade dos filmes, com problemas de dispersão do óleo afetando o desempenho em algumas formulações, especialmente nos conjugados LBG/fécula. Mais criticamente, a substituição total do glicerol pelo óleo de buriti, particularmente em filmes de fécula pura, pectina, PISG e seus conjugados, resultou em uma perda acentuada de flexibilidade e aumento da fragilidade, sugerindo que o óleo, isoladamente, pode não atuar como um plastificante eficaz nessas matrizes, provavelmente devido à incompatibilidade ou à formação de domínios que prejudicam a continuidade da fase polimérica.

De forma geral, o óleo de buriti demonstrou o potencial de melhorar a hidrofobicidade e as propriedades de barreira em diversas matrizes biopoliméricas. No entanto, o desafio está em sua interação com as propriedades mecânicas, frequentemente resultando em maior rigidez e fragilidade, especialmente na ausência total de glicerol. Isso aponta para a necessidade de um equilíbrio cauteloso entre os benefícios de barreira e o impacto na integridade estrutural e flexibilidade do filme final.

Diante disso, futuras pesquisas são essenciais para otimizar a aplicação do óleo de buriti. Sugere-se a exploração de misturas de plastificantes, combinando o óleo de buriti com glicerol em proporções ajustadas ou com outros plastificantes naturais, visando obter um sinergismo de propriedades que mitigue a fragilidade. O refinamento das técnicas de incorporação do óleo, como o uso de nanoemulsões, ou tratamentos prévios do óleo, como epoxidação ou transesterificação, também podem ser boas sugestões para aprimorar a homogeneidade e compatibilidade com a matriz polimérica, consolidando o óleo de buriti como um plastificante promissor agregando valor a um fruto do Cerrado de grande importância socio-econômica e ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHIKARY, N. DAS; BAINS, A.; SRIDHAR, K.; KAUSHIK, R.; CHAWLA, P.; SHARMA, M. Recent advances in plant-based polysaccharide ternary complexes for biodegradable packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 253, p. 126725, 31 dez. 2023.

AGGARWAL, S.; KATHURIA, D.; SINGH, N. Edible films and coatings, its chemical crosslinking, starch-protein interaction and application in food system: A systematic review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 306, p. 141726, 1 maio 2025.

AHMAD, T.; ESPOSITO, F.; CIRILLO, T. Valorization of agro-food by-products: Advancing sustainability and sustainable development goals 2030 through functional compounds recovery. **Food Bioscience**, v. 62, p. 105194, 1 dez. 2024.

AHMED, J.; SANTHOSH, R.; THAKUR, R.; MULLA, M.; SARKAR, P. Thermo-mechanical, rheological, microstructural, and barrier properties of gum-based edible packaging: A review. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 38, p. 101117, 1 set. 2023.

ALVES, L. T. DE O.; FRONZA, P.; GONÇALVES, I.; SILVA, W. A. DA; OLIVEIRA, L. S.; FRANCA, A. S. Development of Polymeric Films Based on Sunflower Seed Proteins and Locust Bean Gum. **Polymers**, v. 16, n. 13, 1 jul. 2024.

AMIRI SAMANI, S.; POURVATANDOUST, S.; SAVAROLYIA, M.; ABOUTALEBZADEH, S.; KHEZRI, M.; KAZEMI, M.; KHODAIYAN, F.; HOSSEINI, S. S. Valorization of red grape pomace for sustainable food packaging: Development of pectin/kidney bean protein based biocomposite films enriched with grape pomace polyphenols. **Food Hydrocolloids**, v. 160, 1 mar. 2025.

AMOBONYE, A.; BENDORAITIENE, J.; PECIULYTE, L.; RUTKAITE, R. Review of recent advancements in starch modification: Improving the functionality of starch-based films. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 144354, 18 maio 2025.

ANJOS, H. A.; CASTRO, D. A. M.; SANTOS-NETO, A. G. DOS; LUZ, J. R. D. DA; GRAÇAS ALMEIDA, M. DAS; LEITE NETA, M. T. S.; NARAIN, N.; PAGANI, A. A. C.; FRANCESCHI, E.; HERNÁNDEZ-MACEDO, M. L.; LÓPEZ, J. A. Gelatin-based films

incorporated with buriti oil (*Mauritia flexuosa* L.) as active packaging for artisanal cheese conservation. **Bioresource Technology Reports**, v. 23, 1 set. 2023.

AURAS, R.; ARROYO, B.; SELKE, S. Production and properties of spin-coated cassava-starch-glycerol-beeswax films. **Starch/Staerke**, v. 61, n. 8, p. 463–471, 1 ago. 2009.

BAI, F.; CHEN, G.; HU, Y.; LIU, Y.; YANG, R.; LIU, J.; HOU, R.; LI, H.; WAN, X.; CAI, H. Understanding the effect of plastic food packaging materials on food flavor: A critical review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 148, p. 104502, 1 jun. 2024.

BARAK, S.; MUDGIL, D. Locust bean gum: Processing, properties and food applications—A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 66, p. 74–80, 1 maio 2014.

BARBOZA, N. L.; CRUZ, J. M. DOS A.; CORRÊA, R. F.; LAMARÃO, C. V.; LIMA, A. R.; INADA, N. M.; SANCHES, E. A.; BEZERRA, J. DE A.; CAMPELO, P. H. Buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.): An Amazonian fruit with potential health benefits **Food Research International** Elsevier Ltd, , 1 set. 2022.

BEN, Z. Y.; SAMSUDIN, H.; YHAYA, M. F. Glycerol: Its properties, polymer synthesis, and applications in starch based films. **European Polymer Journal**, v. 175, p. 111377, 15 jul. 2022.

BERGO, P. V. A.; CARVALHO, R. A.; SOBRAL, P. J. A.; SANTOS, R. M. C. DOS; SILVA, F. B. R. DA; PRISON, J. M.; SOLORZA-FERIA, J.; HABITANTE, A. M. Q. B. Physical properties of edible films based on cassava starch as affected by the plasticizer concentration. **Packaging Technology and Science**, v. 21, n. 2, p. 85–89, 1 mar. 2008.

BHARGAVA, N.; SHARANAGAT, V. S.; MOR, R. S.; KUMAR, K. Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 105, p. 385–401, 1 nov. 2020.

BHATIA, S.; AL-HARRASI, A.; SHAH, Y. A.; SAIF ALRASBI, A. N.; JAWAD, M.; KOCA, E.; AYDEMIR, L. Y.; ALAMOUDI, J. A.; ALMOSHARI, Y.; MOHAN, S. Structural,

mechanical, barrier and antioxidant properties of pectin and xanthan gum edible films loaded with grapefruit essential oil. **Heliyon**, v. 10, n. 3, 15 fev. 2024.

BISPO-JR, A. G.; OLIVEIRA, N. A.; CARDOSO, C. X.; LIMA, S. A. M.; JOB, A. E.; OSORIO-ROMÁN, I. O.; DANNA, C. S.; PIRES, A. M. Red-light-emitting polymer composite based on PVDF membranes and Europium phosphor using Buriti Oil as plasticizer. **Materials Chemistry and Physics**, v. 217, p. 160–167, 15 set. 2018.

BORKU, A. W.; TORA, T. T.; MASHA, M. Cassava in focus: A comprehensive literature review, its production, processing landscape, and multi-dimensional benefits to society. **Food Chemistry Advances**, v. 7, p. 100945, 1 jun. 2025.

BUTLER, I. P.; BANTA, R. A.; TYUFTIN, A. A.; HOLMES, J.; PATHANIA, S.; KERRY, J. Pectin as a biopolymer source for packaging films using a circular economy approach: Origins, extraction, structure and films propertiesFood Packaging and Shelf Life Elsevier Ltd, , 1 dez. 2023.

CAI, Z.; LI, M.; ZHU, Z.; WANG, X.; HUANG, Y.; LI, T.; GONG, H.; YAN, M. Biological Degradation of Plastics and Microplastics: A Recent Perspective on Associated Mechanisms and Influencing Factors. **Microorganisms**, v. 11, n. 7, p. 1661, 26 jun. 2023.

CERQUEIRA, M. A.; BOURBON, A. I.; PINHEIRO, A. C.; MARTINS, J. T.; SOUZA, B. W. S.; TEIXEIRA, J. A.; VICENTE, A. A. Galactomannans use in the development of edible films/coatings for food applications. **Trends in Food Science & Technology**, v. 22, n. 12, p. 662–671, 1 dez. 2011.

CHEN, K.; TIAN, R.; JIANG, J.; XIAO, M.; WU, K.; KUANG, Y.; DENG, P.; ZHAO, X.; JIANG, F. Moisture loss inhibition with biopolymer films for preservation of fruits and vegetables: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 263, p. 130337, 1 abr. 2024.

CHEN, Y.; GUO, J.; ALAMRI, A. S.; ALHOMRANI, M.; HUANG, Z.; ZHANG, W. Recent research progress on locust bean gum (LBG)-based composite films for food packaging **Carbohydrate Polymers**Elsevier Ltd, , 15 jan. 2025.

CHENG, J.; GAO, R.; ZHU, Y.; LIN, Q. Applications of biodegradable materials in food packaging: A review. **Alexandria Engineering Journal**, v. 91, p. 70–83, 1 mar. 2024.

CONCEIÇÃO RIBEIRO, R. C. DA; MARQUES FERREIRA DE FIGUEIREDO, P.; SILVA BARBUTTI, D. Multi-Analytical Investigation of Stains on Dimension Stones in Master Valentim's Fountain, Brazil. **Minerals** **2018**, Vol. **8**, Page **465**, v. 8, n. 10, p. 465, 18 out. 2018.

COSTA, D. S. DA; TAKEUCHI, K. P.; SILVA, R. M. DA; OLIVEIRA FILHO, J. G. DE; BERTOLO, M. R. V.; BELISÁRIO, C. M.; EGEA, M. B.; PLÁCIDO, G. R. Cassava-Starch-Based Films Incorporated with Buriti (*Mauritia flexuosa* L.) Oil: A New Active and Bioactive Material for Food Packaging Applications. **Polysaccharides**, v. 3, n. 1, p. 121–135, 1 mar. 2022.

CRIOLLO-FEIJOO, J.; SALAS-GOMEZ, V.; CORNEJO, F.; AURAS, R.; SALAZAR, R. Cassava bagasse starch and oregano essential oil as a potential active food packaging material: A physicochemical, thermal, mechanical, antioxidant, and antimicrobial study. **Heliyon**, v. 10, n. 16, 30 ago. 2024.

CRUZ, I. A.; SANTOS ANDRADE, L. R.; BHARAGAVA, R. N.; NADDA, A. K.; BILAL, M.; FIGUEIREDO, R. T.; ROMANHOLO FERREIRA, L. F. Valorization of cassava residues for biogas production in Brazil based on the circular economy: An updated and comprehensive review. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 4, p. 100196, 1 out. 2021.

DEJENE, B. K. Eco-friendly synthesis of metallic nanoparticles from agri-food waste extracts: Applications in food packaging and healthcare—A critical review. **Materials Today Chemistry**, v. 45, p. 102619, 1 abr. 2025.

DILKUSHI, H. A. S.; JAYARATHNA, S.; MANIPURA, A.; CHAMARA, H. K. B. S.; EDIRISINGHE, D.; VIDANARACHCHI, J. K.; PRIYASHANTHA, H. Development and characterization of biocomposite films using banana pseudostem, cassava starch and poly(vinyl alcohol): A sustainable packaging alternative. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 7, p. 100472, 1 jun. 2024.

DURGA GOMATHI ARUMUGANAINAR; DEEPA LAKSHMI RAMESH; PRAKASH PANDURANGAN; SWETHA SUNKAR; STANLEY ABRAHAM; ANTONY, V. S.; RAVI SAINANDHINI; THIRUMURUGAN, A.; MEIVELU MOOVENDHAN. Sustainable pectin extraction: Navigating industrial challenges and opportunities with fruit by-products – A review. **Process Biochemistry**, v. 154, p. 234–245, 1 jul. 2025.

EALLES, J.; BETHEL, A.; GALLOWAY, T.; HOPKINSON, P.; MORRISSEY, K.; SHORT, R. E.; GARSIDE, R. Human health impacts of exposure to phthalate plasticizers: An overview of reviews. **Environment International**, v. 158, p. 106903, 1 jan. 2022.

EKTIREN, D.; GÜNEŞ, S.; VARDIN, H. Determination of physicochemical, functional, and morphological properties of *Prosopis farcta* (Çeti) seed galactomannan as a new hydrocolloid source: Comparison with locust bean gum. **Carbohydrate Polymers**, v. 352, 15 mar. 2025.

FARAHNAKY, A.; SABERI, B.; MAJZOBI, M. Effect of Glycerol on Physical and Mechanical Properties of Wheat Starch Edible Films. **Journal of Texture Studies**, v. 44, n. 3, p. 176–186, 1 jun. 2013.

FARHAN, A.; FAZIAL, F. F.; AZFARALARIFF, A.; COSTA, M. J.; CERQUEIRA, M. A. Production of polysaccharide and protein edible films: Challenges and strategies to scale-up. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 307, p. 141909, 1 maio 2025.

FERREIRA, M. DAS G. R.; COSTA, C. J.; PINHEIRO, C. U. B.; SOUZA, E. R. B.; CARVALHO, C. O. *Mauritia flexuosa* - Buriti. *Em*: 1. ed. Brasília: Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região norte, 2022. p. 195–204.

FRONZA, P.; BATISTA, M. J. P. A.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. Bionanocomposite Based on Cassava Waste Starch, Locust Bean Galactomannan, and Cassava Waste Cellulose Nanofibers. **Foods**, v. 13, n. 2, 1 jan. 2024.

FRONZA, P.; COSTA, A. L. R.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. DE. Extraction and Characterization of Starch from Cassava Peels. **Starch/Stärke**, v. 75, n. 3–4, 1 mar. 2023.

GONTARD, N.; DUCHEZ, C.; CUQ, J.-L.; GUILBERT, S. Edible composite films of wheat gluten and lipids: Water vapour permeability and other physical properties. **International Journal of Food Science and Technology**, p. 39–50, 1994.

GUO, H.; XU, Y.; CHEN, H.; SI, X.; ZHOU, M.; ZHU, E. Antagonistic yeast and trehalose-enriched gelatin film: A bioactive antifungal packaging film for cherry tomato preservation. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 42, p. 101258, 1 mar. 2024.

HADIDI, M.; JAFARZADEH, S.; FOROUGH, M.; GARAVAND, F.; ALIZADEH, S.; SALEHABADI, A.; KHANEGHAH, A. M.; JAFARI, S. M. Plant protein-based food packaging films; recent advances in fabrication, characterization, and applications **Trends in Food Science and Technology** Elsevier Ltd, , 1 fev. 2022.

HAQ, F.; KIRAN, M.; KHAN, I. A.; MEHMOOD, S.; AZIZ, T.; HAROON, M. Exploring the pathways to sustainability: A comprehensive review of biodegradable plastics in the circular economy. **Materials Today Sustainability**, v. 29, p. 101067, 1 mar. 2025.

HE, B.; GAO, Y.; LOU, W.; WANG, J.; XIN, S.; MA, K.; LI, L. Biodegradable food packaging films: Material source, mechanical and water vapor barrier properties, and improvement strategies—A comprehensive review. **Food Research International**, v. 211, p. 116431, 1 jun. 2025.

HENNING, F. G.; ITO, V. C.; DEMIATE, I. M.; LACERDA, L. G. Non-conventional starches for biodegradable films: A review focussing on characterisation and recent applications in food packaging. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 4, p. 100157, 1 dez. 2022.

HERNÁNDEZ, M. S.; LUDUEÑA, L. N.; FLORES, S. K. Citric acid, chitosan and oregano essential oil impact on physical and antimicrobial properties of cassava starch films. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 5, 1 jun. 2023.

HERNÁNDEZ, M. S.; LUDUEÑA, L. N.; FLORES, S. K. Combined effect of oregano essential oil and glycerol on physicochemical properties of antimicrobial films based on chitosan and acetylated cassava starch. **Food Hydrocolloids**, v. 156, 1 nov. 2024.

HUANG, S.; DONG, Q.; CHE, S.; LI, R.; TANG, K. H. D. Bioplastics and biodegradable plastics: A review of recent advances, feasibility and cleaner production. **Science of The Total Environment**, v. 969, p. 178911, 15 mar. 2025.

JAHANGIRI, F.; MOHANTY, A. K.; MISRA, M. Sustainable biodegradable coatings for food packaging: challenges and opportunities. **Green Chemistry**, v. 26, n. 9, p. 4934–4974, 7 maio 2024.

KACZMAREK-SZCZEPAŃSKA, B.; SIONKOWSKA, M. M.; MAZUR, O.; ŚWIĄTCZAK, J.; BRZEZINSKA, M. S. The role of microorganisms in biodegradation of chitosan/tannic acid materials. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 184, p. 584–592, 1 ago. 2021.

KALITA, P.; BHATTACHARJEE, B.; PACHUAU, L.; ROY, S. Recent trends in pectin sources, extraction, and active-edible coating applications. **Food Control**, v. 171, p. 111105, 1 maio 2025.

KAUR, R. P.; GHOSHAL, G. Sunflower protein isolates-composition, extraction and functional properties. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 306, p. 102725, 1 ago. 2022.

KRZYWONOS, M.; DIFONZO, G.; PASQUALONE, A. Challenges and technological requirements in agri-food waste upcycling: The case study of olive leaf extract. **Future Foods**, v. 11, p. 100547, 1 jun. 2025.

KUMAR GUPTA, R.; AE ALI, E.; ABD EL GAWAD, F.; MECHEAL DAOOD, V.; SABRY, H.; KARUNANITHI, S.; PRAKASH SRIVASTAV, P. Valorization of fruits and vegetables waste byproducts for development of sustainable food packaging applications. **Waste Management Bulletin**, v. 2, n. 4, p. 21–40, 1 dez. 2024.

KURT, A.; KAHYAOGLU, T. Characterization of a new biodegradable edible film made from salep glucomannan. **Carbohydrate Polymers**, v. 104, n. 1, p. 50–58, 15 abr. 2014.

LACOVONE, C.; GUZ, L.; FAMÁ, L. Sustainable innovations in food packaging: Antioxidant basil-enriched cassava starch films with UV protection and enhanced water and mechanical resistance. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 45, 1 set. 2024.

LI, H.; ZHOU, M.; MOHAMMED, A. E. G. A. Y.; CHEN, L.; ZHOU, C. From fruit and vegetable waste to degradable bioplastic films and advanced materials: A review. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 30, p. 100859, 1 dez. 2022.

LIU, F.; CHANG, W.; CHEN, M.; XU, F.; MA, J.; ZHONG, F. Film-forming properties of guar gum, tara gum and locust bean gum. **Food Hydrocolloids**, v. 98, 1 jan. 2020.

LIU, W.; CHEN, L.; JULIAN MCCLEMENTS, D.; PENG, X.; XU, Z.; JIN, Z. Development of starch film to realize the value-added utilization of starch in food and biomedicine. **Food Bioscience**, v. 57, p. 103521, 1 fev. 2024.

LIU, X.; RENARD, C. M. G. C.; BUREAU, S.; BOURVELLEC, C. LE. Revisiting the contribution of ATR-FTIR spectroscopy to characterize plant cell wall polysaccharides. **Carbohydrate Polymers**, v. 262, p. 117935, 15 jun. 2021.

LIU, Z.; WANG, S.; LIANG, H.; ZHOU, J.; ZONG, M.; CAO, Y.; LOU, W. A review of advancements in chitosan-essential oil composite films: Better and sustainable food preservation with biodegradable packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 274, p. 133242, 1 ago. 2024.

LOPES, J.; FERREIRA, P.; COIMBRA, M. A.; GONÇALVES, I. Influence of glycerol, eggshells, and genipin on hydrophobicity and rigidity of antioxidant locust bean milling dust-derived bioplastics. **LWT**, v. 188, p. 115409, 1 out. 2023.

MANDAL, M.; ROY, A.; MITRA, D.; SARKAR, A. Possibilities and prospects of bioplastics production from agri-waste using bacterial communities: Finding a silver-lining in waste management. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 7, p. 100274, 1 jan. 2024.

MARROCCHI, A. A review of lignin as a precursor for macromonomers: Challenges and opportunities in utilizing agri-food waste. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 300, p. 140332, 1 abr. 2025.

MARTINS, J. T.; CERQUEIRA, M. A.; BOURBON, A. I.; PINHEIRO, A. C.; SOUZA, B. W. S.; VICENTE, A. A. Synergistic effects between κ -carrageenan and locust bean gum on physicochemical properties of edible films made thereof. **Food Hydrocolloids**, v. 29, n. 2, p. 280–289, 2012.

MATHEUS, J. R. V.; FARIAS, P. M. DE; SATORIVA, J. M.; ANDRADE, C. J. DE; FAI, A. E. C. Cassava starch films for food packaging: Trends over the last decade and future research **International Journal of Biological Macromolecules** Elsevier B.V., , 15 jan. 2023.

MCGRATH, J. R.; BECK, M.; HILL, M. E. Replicating Red: Analysis of ceramic slip color with CIELAB color data. **Journal of Archaeological Science: Reports**, v. 14, p. 432–438, 1 ago. 2017.

NGUYEN, D.; SAE-EAW, A.; CHOMPREEEDA, P.; SIRIPATRAWAN, U.; SUPPAKUL, P. Optimal synergistic formulation of essential oils: Antimicrobial and physical-mechanical properties of cinnamon-oregano oils-incorporated cassava starch films for fresh Vietnamese bread preservation. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 21, 1 jun. 2025.

NILSSON, F.; ELF, P.; CAPEZZA, A.; WEI, X.; TSEGAYE, B.; POLISETTI, V.; SVAGAN, A. J.; HEDENQVIST, M. Environmental concerns on water-soluble and biodegradable plastics and their applications – A review. **Science of The Total Environment**, v. 958, p. 177926, 1 jan. 2025.

OGHENEJOBOH, K. M.; ORUGBA, H. O.; OGHENEJOBOH, U. M.; AGARRY, S. E. Value added cassava waste management and environmental sustainability in Nigeria: A review. **Environmental Challenges**, v. 4, p. 100127, 1 ago. 2021.

ORLIAC, O.; ROUILLY, A.; SILVESTRE, F.; RIGAL, L. Effects of various plasticizers on the mechanical properties, water resistance and aging of thermo-moulded films made from sunflower proteins. **Industrial Crops and Products**, v. 18, n. 2, p. 91–100, 2003.

Plastics – The Fast Facts 2024. Disponível em: <<https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>>. Acesso em: 19 maio. 2025.

POMONI, D. I.; KOUKOU, M. K.; VRACHOPOULOS, M. GR.; VASILIDIS, L. Circular economy: A multilevel approach for natural resources and wastes under an agri-food perspective. **Water-Energy Nexus**, v. 7, p. 103–123, 1 dez. 2024.

PRAJAPATI, V. D.; JANI, G. K.; MORADIYA, N. G.; RANDERIA, N. P.; NAGAR, B. J. Locust bean gum: A versatile biopolymer. **Carbohydrate Polymers**, v. 94, n. 2, p. 814–821, 15 maio 2013.

QIN, C.; LI, Z.; ZHANG, J.; MENG, H.; ZHU, C. Preparation, physicochemical properties, antioxidant, and antibacterial activities of quaternized hawthorn pectin films

incorporated with thyme essential oil. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 41, 1 jan. 2024.

RAHMAN, M. H.; BHOI, P. R. An overview of non-biodegradable bioplastics **Journal of Cleaner Production** Elsevier Ltd, , 20 abr. 2021.

RESENDE, L. M.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. Buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.) fruit by-products flours: Evaluation as source of dietary fibers and natural antioxidants. **Food Chemistry**, v. 270, p. 53–60, 1 jan. 2019.

RODRIGUES, M. DE F.; SILVA, J. W. DA; LIMA, J. S. DE; RAMOS, B. DE A.; PAZ, S. T.; LOMONACO, D.; ZAMPIERI, D.; XIMENES, R. M. Antiulcer activity of *Mauritia flexuosa* L.f. (Arecaceae) pulp oil: An edible Amazonian species with functional properties. **Fitoterapia**, v. 174, 1 abr. 2024.

ROY, S.; PRIYADARSHI, R.; ŁOPUSIEWICZ, L.; BISWAS, D.; CHANDEL, V.; RHIM, J. W. Recent progress in pectin extraction, characterization, and pectin-based films for active food packaging applications: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 239, p. 124248, 1 jun. 2023.

SALGADO, P. R.; LÓPEZ-CABALLERO, M. E.; GÓMEZ-GUILLÉN, M. C.; MAURI, A. N.; MONTERO, M. P. Sunflower protein films incorporated with clove essential oil have potential application for the preservation of fish patties. **Food Hydrocolloids**, v. 33, n. 1, p. 74–84, 2013.

SAMPAIO, M. B.; CARRAZZA, L. R. Buriti (*Mauritia flexuosa*) Aproveitamento Integral do Fruto e da Folha do. 1º Edição ed. Brasília: [s.n.].

SANA, S. S.; RAORANE, C. J.; VENKATESAN, R.; ROY, S.; SWAIN, S. K.; KIM, S. C.; AL-TABAKHA, M.; BHANDARE, R. R.; RAJ, V.; LEE, S. State-of-the-art progress on locust bean gum polysaccharide for sustainable food packaging and drug delivery applications: A review with prospectives. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 275, 1 ago. 2024.

SARA, A. S.; MATHÉ, C.; BASSELIN, M.; FOURNIER, F.; AYMES, A.; BIANEIS, M.; GALET, O.; KAPEL, R. Optimization of sunflower albumin extraction from oleaginous meal and characterization of their structure and properties. **Food Hydrocolloids**, v. 99, p. 105335, 1 fev. 2020.

SARKER, A.; AHMMED, R.; AHSAN, S. M.; RANA, J.; GHOSH, M. K.; NANDI, R. A comprehensive review of food waste valorization for the sustainable management of global food waste. **Sustainable Food Technology**, v. 2, n. 1, p. 48–69, 25 jan. 2024.

SARKER, A.; MATAK, K.; JACZYNSKI, J. Effect of transglutaminase concentration on the properties of soy protein isolate-pectin composite edible films. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 47, 1 jan. 2025.

SILVA, E. K. A. DA; RIAL, R. C. Fatty acid profile, nutritional and therapeutic properties of vegetable oils from the Brazilian Cerrado. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 137, p. 106819, 1 jan. 2025.

SILVA E SILVA, N. DA; PINO HERNÁNDEZ, E. J. G.; SILVA ARAÚJO, C. DA; PEIXOTO JOELE, M. R. S.; LOURENÇO, L. DE F. H. Development and optimization of biodegradable fish gelatin composite film added with buriti oil. **CYTA - Journal of Food**, v. 16, n. 1, p. 340–349, 1 jan. 2018.

SIQUEIRA, R. A.; VERAS, J. M. L.; SOUSA, T. L. DE; FARIAS, P. M. DE; OLIVEIRA FILHO, J. G. DE; BERTOLO, M. R. V.; EGEA, M. B.; PLÁCIDO, G. R. Pequi mesocarp: a new source of pectin to produce biodegradable film for application as food packaging. **Food Science and Technology (Brazil)**, v. 42, 2022.

SOARES, S. D.; LIMA, A. DE S.; MIRANDA, C. T. C. DA S.; NERI NUMA, I. A.; PASTORE, G. M. Trends in the valorization of native Amazon palm trees as sources of bioactive lipids for use as functional ingredients. **Trends in Food Science & Technology**, v. 154, p. 104777, 1 dez. 2024.

SOUZA, M. N. DE; PIEDADE, A. B. S.; SANTOS, T. P.; BRITTO, V. F. DE; NASCIMENTO, E.; FARIA, J. L. B. DE; FARIA, R. A. P. G. DE. Interaction effect of cassava starch × buriti oil on the physical properties of edible films. **eFood**, v. 3, n. 6, p. e53, 1 dez. 2022.

SPINEI, M.; OROIAN, M.; URSACHI, V. F. Characterization of biodegradable films based on carboxymethyl cellulose and citrus pectin films enriched with bee bread oil and thyme oil. **LWT**, v. 214, p. 117088, 15 dez. 2024.

SUDERMAN, N.; ISA, M. I. N.; SARBON, N. M. The effect of plasticizers on the functional properties of biodegradable gelatin-based film: A review. **Food Bioscience**, v. 24, p. 111–119, 1 ago. 2018.

SUN, S.; WENG, Y.; ZHANG, C. Recent advancements in bio-based plasticizers for polylactic acid (PLA): A review. **Polymer Testing**, v. 140, p. 108603, 1 nov. 2024.

SYARIFUDDIN, A.; MUFLIH, M. H.; IZZAH, N.; FADILLAH, U.; AINANI, A. F.; DIRPAN, A. Pectin-based edible films and coatings: From extraction to application on food packaging towards circular economy- A review **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications** Elsevier Ltd, , 1 mar. 2025.

TIRGARIAN, B.; FARMANI, J.; MILANI, J. M. Edible oleofilms with high vegetable oil content obtained from novel soy protein isolate/gelatin/chitosan nanofiber emulgels. **Food Hydrocolloids**, v. 134, p. 108082, 1 jan. 2023.

TOKIWA, Y.; CALABIA, B. P.; UGWU, C. U.; AIBA, S. Biodegradability of Plastics. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 10, n. 9, p. 3722–3742, 26 ago. 2009.

TRISTANTO, N. A.; CAO, W.; CHEN, N.; SURYOPRABOWO, S.; SOETAREDJO, F. E.; ISMADJI, S.; HUA, X. Pectin extracted from red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) peel and its usage in edible film. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 276, 1 set. 2024.

URSACHI, V. F.; OROIAN, M.; SPINEI, M. Development and characterization of biodegradable films based on cellulose derivatives and citrus pectin: A comparative study. **Industrial Crops and Products**, v. 219, p. 119052, 1 nov. 2024.

WANG, N.; QIAN, D.; WANG, X.; LI, Y.; ZHENG, T.; WANG, Q. Research hot spots and development trends of biodegradable plastics. **Process Biochemistry**, v. 150, p. 80–93, 1 mar. 2025.

WANG, Q.; CHEN, T.; YAN, S.; LI, Y.; QI, B. Segregative phase separation of protein/polysaccharide mixed systems: Phase separation mechanisms, characterization technologies, influencing factors, and food applications—a review. **Food Research International**, v. 208, p. 116240, 1 maio 2025.

WELIGAMA THUPPAHIGE, V. T.; MOGHADDAM, L.; WELSH, Z. G.; WANG, T.; KARIM, A. Investigation of critical properties of Cassava (*Manihot esculenta*) peel and bagasse as starch-rich fibrous agro-industrial wastes for biodegradable food packaging. **Food Chemistry**, v. 422, p. 136200, 1 out. 2023.

XUE, W.; ZHU, J.; SUN, P.; YANG, F.; WU, H.; LI, W. Permeability of biodegradable film comprising biopolymers derived from marine origin for food packaging application: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 136, p. 295–307, 1 jun. 2023.

YADAV, P.; MAHAPATRA, U.; SHARMA, R.; RUSTAGI, S.; KATYAL, M.; SHARMA, M.; NAYAK, P. K.; NATH, P. C.; SRIDHAR, K. Recent advances in plant protein-based sustainable edible film and coatings for applications in the food-pharma industry – Opportunities and challenges: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 296, p. 139698, 1 mar. 2025.

YAO, G. Y.; CHEN, X. P.; LONG, Z. Y.; DU, X. B.; LIANG, J. Z.; WEI, X. J.; WANG, L. L. The non-enzymatic browning of pine bark during thermal treatment: Color and chemical changes, color kinetics and insights into mechanisms. **Industrial Crops and Products**, v. 204, p. 117289, 15 nov. 2023.

ZHANG, M.; WANG, O.; CAI, S.; ZHAO, LEI; ZHAO, LIANG. Composition, functional properties, health benefits and applications of oilseed proteins: A systematic review. **Food Research International**, v. 171, p. 113061, 1 set. 2023.

ZHOU, Y.; WU, X.; CHEN, J.; HE, J. Effects of cinnamon essential oil on the physical, mechanical, structural and thermal properties of cassava starch-based edible films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 184, p. 574–583, 1 ago. 2021.

ZHU, F. Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of cassava starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 122, p. 456–480, 20 maio 2015.

ANEXO A - Laudo de caracterização do óleo de buriti, realizado pelo cliente Industria e Comércio de Cosméticos Natura.



EMPRESA: INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE COSMÉTICOS NATURA
Rod. Augusto Meira Filho, KM 3, nº 3920 Fazenda Eldorado
68795.000 Paricatuba - Benevides - PA

TESTE DE ANÁLISE

MATERIAL: ÓLEO DE BURITI

FORNECEDOR: **GRANDE SERTÃO**

LOTE FORNECEDOR: **R15-23**

FABRICAÇÃO

RESULTADOS DE ANÁLISES TESTES

Análise Físico-Química	Resultado	Especificação
Aparência	NA	Líquido
Cor Visual	NA	Conforme Padrão
Cor Objetiva - Escala Lovibond - Parâmetro R	12,20	17,00 - 40,00
Cor Objetiva - Escala Lovibond - Parâmetro Y	70,00	45,00 - 75,00
Odor	NA	Conforme Padrão
Índice de Peróxido (meq/Kg)	3,17	0,00 - 10,00
Índice de Acidez (mg/KOHg)	8,70	0,00 - 15,00
Índice de Saponificação (mg/KOHg)	193,05	180,00 - 215,00
Ácido Palmítico (C16:0) (%)	17,43	15,00 - 22,00
Ácido Esteárico (C18:0) (%)	2,07	1,00 - 3,00
Ácido Oleico (C18:1) (%)	77,93	72,00 - 82,00
Ácido Linoléico (C18:2) (%)	1,53	1,00 - 3,00
Ácido Linolênico (C18:3) (%)	0,7	0,50 - 2,50
Carotenos	NA	400 - 1400

CONCLUSÃO: REPROVADO

OBSERVAÇÕES
NA para análise de cor, odor e aparência: Sem padrão de referência para esta cooperativa. Cor objetiva R abaixo da especificação.

Pamela Matos

COORDENADOR DE QUALIDADE

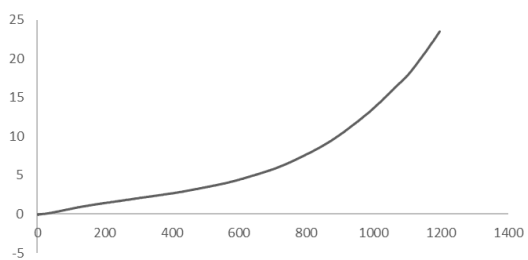
Paula Moia

RESPONSÁVEL PELO LAUDO

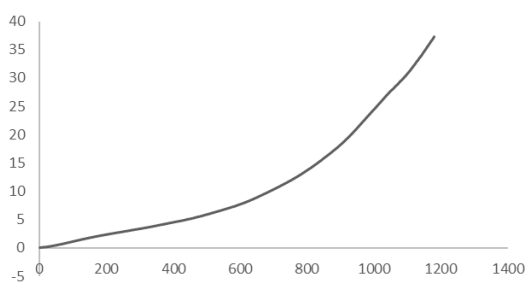
ANEXO B – Curvas típicas de tensão(MPa) por deformação(%), gerados a partir do ensaio mecânico de cada filme.

FILMES DE GOMA DE ALFARROBA (LBG)

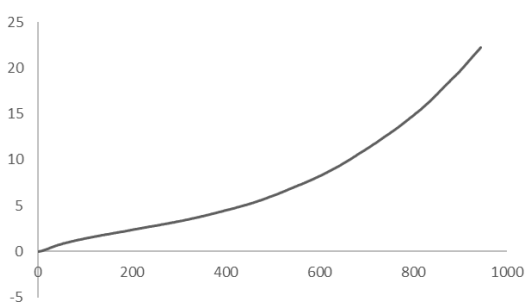
Amostra F1



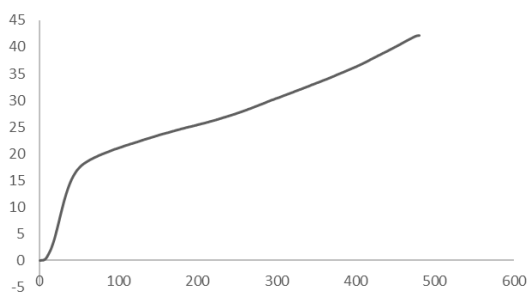
Amostra F2



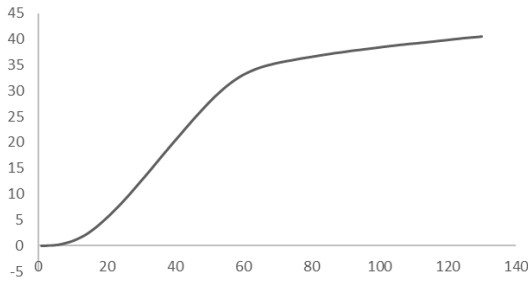
Amostra F3



Amostra F4

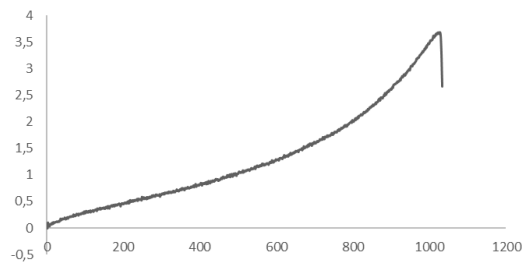


Amostras F5

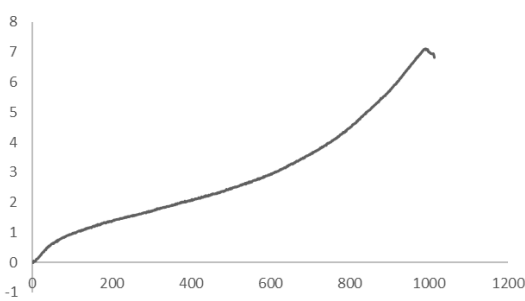


FILMES DE LBG/FÉCULA (25:75)

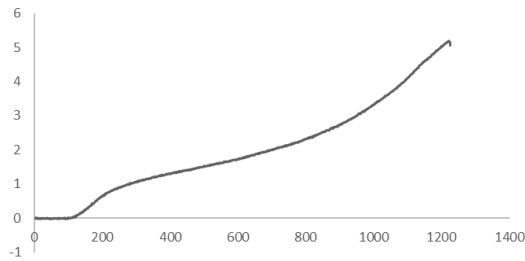
Amostra F1



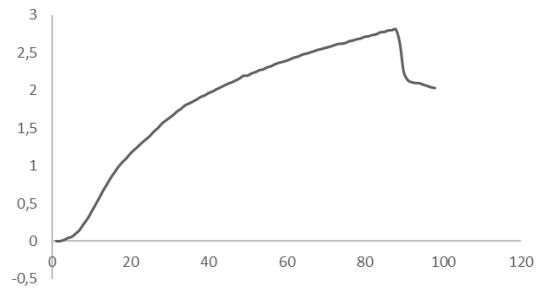
Amostra F2



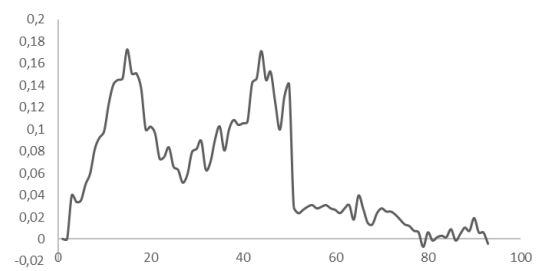
Amostra F3



Amostra F4

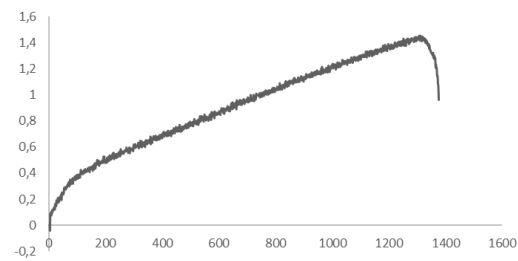


Amostra F5

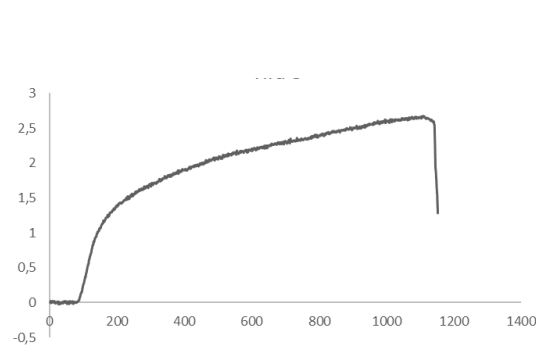


FILMES DE FÉCULA DE MANDIOCA

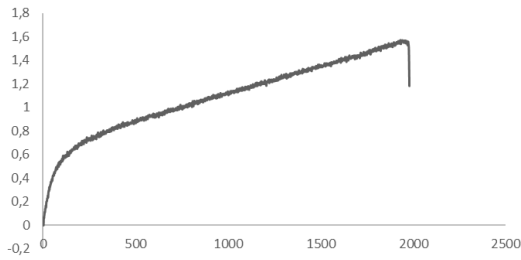
Amostra F1



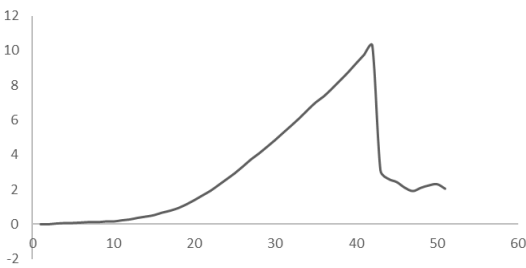
Amostra F2



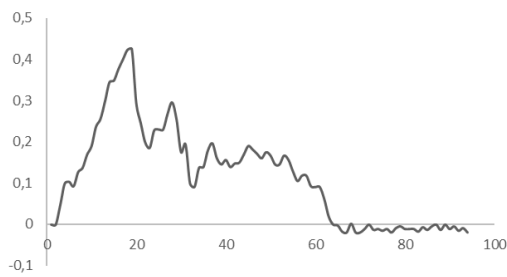
Amostra F3



Amostra F4

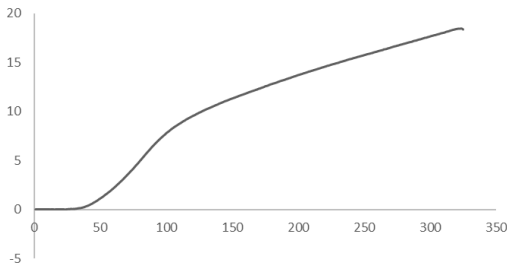


Amostra F5

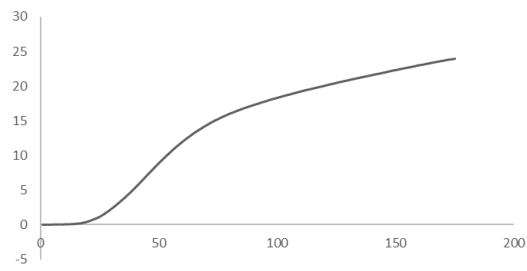


FILMES DE PECTINA

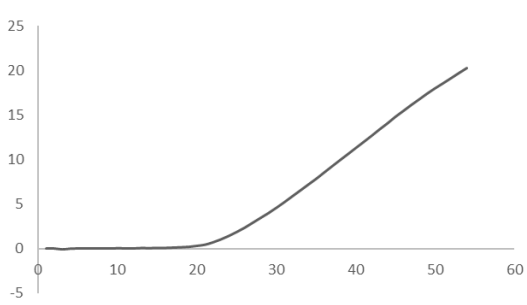
Amostras F1



Amostras F2

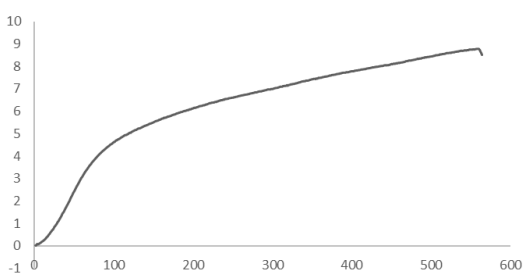


Amostras F3

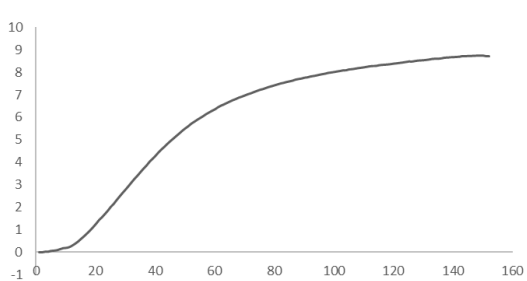


FILMES DE PECTINA/PISG (25:75)

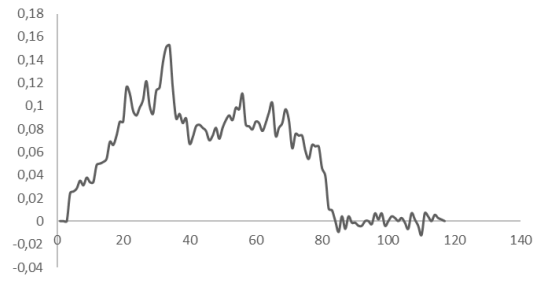
Amostras F1



Amostras F2

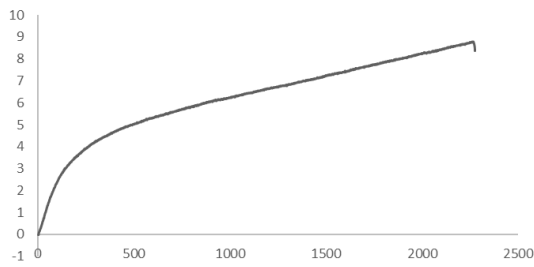


Amostras F3

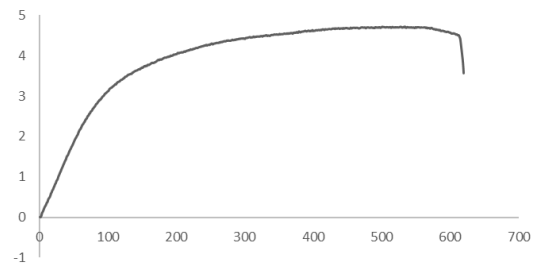


FILMES DE PROTEÍNA ISOLADA DE SEMENTE DE GIRASSOL (PISG)

Amostras F1



Amostras F2



Amostras F3

