



FELIPE EDUARDO FERNANDES PACHECO

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE
FILMES POLIMÉRICOS DE PECTINA CONTENDO
EXTRATO BRUTO DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea* Mart.)**

São Luís-MA
2025



FELIPE EDUARDO FERNANDES PACHECO

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE
FILMES POLIMÉRICOS DE PECTINA CONTENDO
EXTRATO BRUTO DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea* Mart.)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Colegiado de Curso da Engenharia
Química do Centro de Ciências Exatas e
Tecnologia da Universidade Federal do
Maranhão, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Graduação em
Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Audirene Amorim
Santana

São Luís-MA
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Eduardo Fernandes Pacheco, Felipe.

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES POLIMÉRICOS DE
PECTINA CONTENDO EXTRATO BRUTO DE AÇAÍ *Euterpe oleracea* Mart / Felipe
Eduardo Fernandes Pacheco. - 2025.

78 f.

Orientador(a): Audirene Amorim Santana.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, Forma Remota
Utilizando O Google Meet, 2025.

1. Biopolímeros. 2. Açaí. 3. Pectina. 4. Mesocarpo de Coco Babaçu. 5.
Embalagem. I. Amorim Santana, Audirene. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. AUDIRENE AMORIM SANTANA
Orientadora – DEEQ/CCET/UFMA

Mestre GUSTAVO OLIVEIRA EVERTON
DEQUI/CCET/UFMA

Mestre CASI SANTOS DOS SANTOS
RENORBIO/CCBS/UFMA

26 de fevereiro de 2025

DADOS CURRICULARES

Felipe Eduardo Fernandes Pacheco

NASCIMENTO 03/08/1998 – SÃO LUIS / MA

FILIAÇÃO Antonia Silva Fernandes
Eldon Kern Neta Pacheco

2017/2025 Curso de Graduação
Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre acreditaram no poder transformador da educação.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e em primeiro lugar agradeço a Deus, razão de tudo e de todos nós.

A minha orientadora, Profa. Audirene Amorim Santana, pelo incentivo, orientação e auxílio no estudo.

A minha mãe, Antonia Silva Fernandes, por sempre estar presente e dando apoio na minha caminhada durante o curso.

A minha parceira de curso, Geysse Hellen Fontes Rocha, por sempre estar presente na minha vida acadêmica e pessoal.

Ao meu amigo da universidade, Lopes, que esteve presente nos momentos alegres e tristes, sendo fonte contínua de apoio e incentivo durante o curso.

À dona Elisangela, funcionária do LEPEQ, pelo sorriso, acolhimento e bons momentos.

PACHECO, F. E. F. **Desenvolvimento e caracterização de filmes poliméricos de pectina contendo extrato bruto de *Euterpe oleracea* Mart.** 2025. 78 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

RESUMO

Produtos biodegradáveis, que até recentemente tinham pouca importância, agora adquirem relevância. A comercialização de produtos envoltos por embalagens sustentáveis surge como estratégia de marketing, impulsionando a busca por polímeros biodegradáveis derivados de fontes renováveis. Assim, o açaí (*Euterpe oleracea* Mart.), uma fruta popular no Brasil, tem ganhado destaque por suas propriedades antioxidantes. O estudo teve como objetivo avaliar o efeito do extrato aquoso de *Euterpe oleracea* Mart. na composição dos biopolímeros de pectina e mesocarpo do coco babaçu para uso em embalagens alimentícias ativas. Os filmes biodegradáveis foram preparados pelo método casting analisando doze formulações diferentes. Esses filmes foram analisados em relação ao teor de umidade, solubilidade em água, permeabilidade ao vapor de água (PVA) e espessura. Em sua maioria, os filmes eram homogêneos, exibiam a coloração característica próxima a do açaí, demonstravam boa resistência e desprendiam facilmente das placas. O teor de umidade variou de 16,8% a 27,4% em base úmida. Já os valores de solubilidade oscilaram entre 9% e 19,5%. Para a resposta PVA, a variação foi de 9,77 a 22,10 g.mm/m².dia.kPa, com valor médio de 13,93 g.mm/m².dia.kPa. Os valores dos ensaios experimentais de espessura forneceram um valor médio de 0,39 mm variando de 0,19 a 0,53 mm. Já para os filmes otimizados, encontrou-se valores médios de 34,83% para umidade, 36,05% para solubilidade, 0,623 mm para espessura, 29,66 g.mm/m².dia.kPa para PVA e 24,139 µg/g para carotenoides totais, já para os ensaios mecânicos evidenciou-se a influência do açaí na resistência mecânica e na rigidez dos filmes, a polpa de açaí também, pareceu diluir a capacidade de intumescimento da pectina. Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que se pode gerar biopolímeros com propriedades ajustáveis para diversas aplicações.

Palavras-chave: Biopolímeros; Açaí; Pectina; Mesocarpo de coco babaçu; Embalagem.

PACHECO, F. E. F. **Development and characterization of pectin polymeric films containing crude extract of *Euterpe oleracea Mart.*** 2025. 78 pages. Undergraduate thesis in Chemical Engineering from the Center for Exact and Technological Sciences of the Federal University of Maranhão, São Luís, 2025.

ABSTRACT

Biodegradable products, which until recently held little importance, are now gaining relevance. The commercialization of products wrapped in sustainable packaging is emerging as a marketing strategy, driving the search for biodegradable polymers derived from renewable sources. Thus, açaí (*Euterpe oleracea Mart.*), a popular fruit in Brazil, has gained prominence for its antioxidant properties. The study aimed to evaluate the effect of the aqueous extract of *Euterpe oleracea Mart.* on the composition of biopolymers of pectin and babassu coconut mesocarp for use in active food packaging. Biodegradable films were prepared by the casting method, analyzing twelve different formulations. These films were analyzed for moisture content, water solubility, water vapor permeability (WVP), and thickness. For the most part, the films were homogeneous, exhibited the characteristic coloration close to that of açaí, demonstrated good resistance, and easily detached from the plates. The moisture content ranged from 16.8% to 27.4% on a wet basis. Solubility values ranged between 9% and 19.5%. For the WVP response, the variation was from 9.77 to 22.10 g.mm/m².day.kPa, with an average value of 13.93 g.mm/m².day.kPa. The values of the experimental thickness tests provided an average value of 0.39 mm, ranging from 0.19 to 0.53 mm. For the optimized films, average values of 34.83% for moisture, 36.05% for solubility, 0.623 mm for thickness, 29.66 g.mm/m².day.kPa for WVP, and 24.139 µg/g for total carotenoids were found. For the mechanical tests, the influence of açaí on the mechanical resistance and rigidity of the films was evident. The açaí pulp also appeared to dilute the swelling capacity of pectin. The results obtained in this study demonstrated that biopolymers with adjustable properties can be generated for various applications.

Keywords: Biopolymers; Açaí; Pectin; Babassu coconut mesocarp; Packaging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Embalagens ativas de alimentos	5
Figura 2 - Estrutura do glicerol.	7
Figura 3 - Mapa de registros de ocorrência no Brasil – <i>Euterpe oleracea</i> Mart.	8
Figura 4 - <i>Euterpe oleracea</i> Mart.	9
Figura 5 - Estrutura química da pectina.....	12
Figura 6 - As quatro partes do coco babaçu	13
Figura 7 - Esquema de permeação do vapor d'água através de filmes poliméricos.....	16
Figura 8 - Estufa de secagem (modelo PE14, PARDALTEC, Brasil).	19
Figura 9 - Chapa aquecedora (modelo C-MAG HP4, IKA, Brasil).	20
Figura 10 - Agitador mecânico (modelo Q250, QUIMIS, Brasil).....	20
Figura 11 - Micrômetro externo (modelo MDC-25S, CARBOGRAFITE, Japão).	20
Figura 12 - Mesa agitadora orbital (Tecnal, modelo TE-145, Brasil).	21
Figura 13 - Balança semi-analítica (Modelo UA420, URANO, Brasil).	21
Figura 14 - Aparato experimental para a determinação da PVA.....	25
Figura 15 - Máquina de ensaio universal.	27
Figura 16 - Espectrofotômetro.....	28
Figura 17 - Superfícies de resposta (à esquerda) e curva de contorno (à direita) para a umidade dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.....	36
Figura 18 - Superfícies de resposta (à esquerda) e curva de contorno (à direita) para a solubilidade dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.....	36
Figura 19 - Superfícies de resposta (à esquerda) e curva de contorno (à direita) para a espessura dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.....	41
Figura 20 - Superfícies de resposta (à esquerda) e curva de contorno (à direita) para a PVA dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.....	41
Figura 21 - Grau de intumescimento (GI) da formulação otimizada 1 (F1).....	45
Figura 22 - Grau de intumescimento (GI) da formulação otimizada 2 (F2).....	45
Figura 23 - Grau de intumescimento (GI) da formulação otimizada 3 (F3).....	46
Figura 24 - Grau de intumescimento (GI) da formulação otimizada 4 (F4).....	46
Figura 25 - Espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) das amostras de açaí, pectina e mesocarpo de coco babaçu.	50

Figura 26 - Espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) para as formulações otimizadas (F1, F2, F3 e F4). 51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de frutos do açaí (toneladas) por ano.	10
Tabela 2 - Teores de antocianinas e compostos fenólicos da polpa de açaí (<i>Euterpe oleracea</i> Mart.) por diferentes autores.	11
Tabela 3 - Composição centesimal da polpa de açaí (<i>Euterpe oleracea</i> Mart.) por diferentes autores.....	11
Tabela 4 - Planejamento experimental para os biopolímeros de pectina e polpa de açaí.....	22
Tabela 5 - Filmes obtidos na confecção dos biopolímeros.....	31
Tabela 6 - Conteúdo de umidade (ω) e solubilidade em água (S) de biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.....	32
Tabela 7 - Efeito estimado, erro puro, coeficiente t e grau de significância estatística, para a resposta conteúdo de umidade (%) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.....	33
Tabela 8 - Efeito estimado, erro puro, coeficiente t e grau de significância estatística, para a resposta solubilida-de em água (%) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.....	33
Tabela 9 - ANOVA do modelo ajustado para a resposta conteúdo de umidade (%) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.....	34
Tabela 10 - ANOVA do modelo ajustado para a resposta solubilidade em água (%) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.....	34
Tabela 11 - Espessura e permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.	37
Tabela 12 - Efeito estimado, erro puro, coeficiente t e grau de significância estatística, para a resposta espessura (mm) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.	38
Tabela 13 - Efeito estimado, erro puro, coeficiente t e grau de significância estatística, para a resposta permeabi-lidade ao vapor de água (g.mm/m ² .dia.kPa) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.....	39
Tabela 14 - ANOVA do modelo ajustado para a resposta espessura (mm) dos biopolímeros de pectina e mesocar-po de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.	39
Tabela 15 - ANOVA do modelo ajustado para a resposta PVA (g.mm/m ² .dia.kPa) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.....	40
Tabela 16 - Filmes otimizados obtidos na confecção dos biopolímeros.	43

Tabela 17 - Conteúdo de umidade, solubilidade em água, espessura e PVA para as formulações otimizadas (F1, F2, F3 e F4).	44
Tabela 18 - Carotenoides totais para as formulações otimizadas (F1, F2, F3 e F4).....	48
Tabela 19 - Ensaios mecânicos para as formulações otimizadas (F1, F2, F3 e F4).....	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	4
3.1 EMBALAGENS ATIVAS	4
3.2 FILMES BIODEGRADÁVEIS	5
3.3 PLASTIFICANTES	6
3.3.1 Glicerol.....	6
3.4 <i>EUTERPE OLERACEA MART.</i>	7
3.5 PECTINA.....	11
3.6 MESOCARPO DE COCO BABAÇU.....	12
3.7 RETICULANTE	14
3.7.1 Cloreto de cálcio	14
3.8 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPOLÍMEROS	14
3.8.1 Conteúdo de umidade.....	15
3.8.2 Solubilidade em água	15
3.8.3 Espessura.....	15
3.8.4 Permeabilidade ao vapor de água (PVA).....	16
3.8.5 Grau de Intumescimento	16
3.8.6 Infravermelho	17
3.8.7 Carotenoides totais	17
3.8.8 Propriedades Mecânicas	18
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
4.1 MATERIAIS.....	19
4.2 LOCAL DA PESQUISA	19
4.3 INSTRUMENTOS UTILIZADOS	19
4.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	21
4.4.1 Elaboração dos biopolímeros	21
4.4.2 Processo de confecção dos biopolímeros	22

4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPOLÍMERO	23
4.5.1 Aspecto visual e coloração	23
4.5.2 Conteúdo de umidade (ω)	23
4.5.3 Solubilidade em água (S)	23
4.5.4 Espessura (δ)	24
4.5.5 Permeabilidade ao vapor de água (PVA).....	24
4.5.6 Analise estatística	25
4.5.7 Seleção das melhores concentrações.....	26
4.5.8 Propriedades mecânicas	26
4.5.9 Carotenoides totais	27
4.5.10 Grau de intumescimento	28
4.5.11 Espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 ASPECTO VISUAL E TÁTIL	30
5.2 CONTEÚDO DE UMIDADE E SOLUBILIDADE EM ÁGUA	31
5.3 ESPESSURA E PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (PVA)	36
5.4 SELEÇÃO DAS MELHORES CONCENTRAÇÕES	41
5.4.1 Aspecto visual e tátil, conteúdo de umidade, solubilidade em água, espessura e PVA.	42
5.4.2 Grau de Intumescimento	44
5.4.3 Carotenoides totais	47
5.4.4 Propriedades Mecânicas.....	48
5.4.5 Espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	49
6 CONCLUSÃO	53
REFERENCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

O modo de vida contemporâneo, altamente consumista, impulsionado pelos avanços tecnológicos, está levando a um aumento na quantidade de resíduo sólido produzido. Muitos desses resíduos permanecem no meio ambiente por períodos extremamente longos, provocando não apenas uma crise ambiental, mas também desafios econômicos e sociais, o plástico por exemplo possui tempo de degradação de mais de 400 anos. O alto consumo de produtos industrializados, incluindo alimentos que requerem múltiplas camadas de embalagem (primária, secundária e terciária), está contribuindo para o aumento dos resíduos sólidos e, consequentemente, para o impacto negativo no meio ambiente (Landim *et al.*, 2016).

As embalagens de alimentos, em sua maioria, consistem em plástico fabricado a partir de polímeros sintéticos não decomponíveis, geralmente derivados do petróleo, que por sua vez é não renovável. Esses plásticos são utilizados para prolongar a durabilidade dos alimentos nas prateleiras, porém, muitos desses materiais de embalagem têm uma capacidade limitada de se decompor naturalmente, resultando em resíduos e contribuindo para a poluição ambiental (Luz, 2022).

Portanto, nas últimas décadas, tem havido um aumento significativo na busca por alternativas renováveis para substituir matérias-primas fósseis. Estes materiais, conhecidos como biopolímeros, são biodegradáveis e provenientes de fontes renováveis, proporcionando importantes vantagens ambientais, como a redução das emissões de dióxido de carbono. Além disso, a produção global desses materiais biodegradáveis está experimentando um crescimento dinâmico (Viégas, 2016).

O interesse pelo uso de biopolímeros ficou claro quando as propriedades de biodegradabilidade, biocompatibilidade e baixo custo das matérias-primas foram cientificamente comprovadas. Esses materiais passaram a ser vistos como uma alternativa inovadora para substituir os polímeros derivados do petróleo, devido aos impactos ambientais negativos que esses últimos causam (Elsabee; Abdou, 2013).

Nesse contexto, a indústria de embalagens está explorando o desenvolvimento de biofilmes como uma alternativa aos materiais sintéticos. Esses filmes biodegradáveis são atraentes devido ao uso de materiais biológicos, como polissacarídeos, proteínas, lipídios e seus derivados. No entanto, um dos maiores desafios é encontrar maneiras de substituir as embalagens tradicionais sem comprometer as características mecânicas e de barreira desses materiais (Viégas, 2016).

A utilização de filmes biodegradáveis como material de embalagem será determinada pelas suas características funcionais. Isso inclui propriedades como resistência mecânica, flexibilidade, capacidade de barreira contra a umidade, solubilidade em água e propriedades térmicas e estruturais. Esses filmes são frequentemente referidos como "embalagens ativas" (Luz, 2022).

Biopolímeros com uso de compostos bioativos do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.), da pectina e do coco-babaçu podem representar uma promissora alternativa aos polímeros sintéticos não biodegradáveis na indústria de embalagens. O açaí, fruto predominante no norte do Brasil, oferece materiais com potencialidades notáveis devido às suas propriedades físico-químicas e sustentabilidade ambiental. Enquanto a pectina, encontrada em diversas frutas, e o coco-babaçu, fruto abundante no estado do Maranhão, apresentam características de biodegradabilidade e biocompatibilidade, além de baixo custo de produção. A utilização sinérgica desses elementos busca não apenas criar embalagens sustentáveis, mas também explorar os recursos naturais da região, contribuindo para a preservação ambiental e o desenvolvimento econômico local.

Nesse contexto, os resultados desta pesquisa têm o potencial de oferecer contribuições significativas para a possível criação de embalagens ativas que possam preservar as propriedades dos alimentos e prolongar o seu tempo de armazenamento. Além disso, essa pesquisa busca explorar a aplicação de um bioproduto com grande potencial de mercado, que seja mais seguro, mais degradável e eficaz. Portanto, o objetivo deste estudo foi desenvolver e caracterizar filmes poliméricos à base de pectina e mesocarpo de coco babaçu enriquecidos com extrato bruto de *Euterpe oleracea* Mart..

2 OBJETIVOS

Levando em conta as inúmeras questões ambientais resultantes de uma gestão inadequada, descarte inapropriado e longo processo de decomposição de resíduos sólidos, este estudo buscou fomentar a adoção de abordagens alternativas para enfrentar esse problema, especialmente quando se trata de embalagens de plástico. Este estudo disponibilizou dados significativos sobre a fabricação de biopolímeros como uma opção às convencionais embalagens plásticas.

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver filmes biopoliméricos de pectina e mesocarpo de coco babaçu adicionados com extrato de *Euterpe oleracea* Mart. (açaí), para uso em embalagens alimentícias ativas, utilizando variação de formulações.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Elaborar filmes biopoliméricos a partir de pectina, extrato aquoso de *Euterpe oleracea* Mart. e mesocarpo de coco babaçu através de Planejamento Experimental;

Analizar físico-quimicamente os filmes biopoliméricos obtidos quanto ao seu conteúdo de umidade, solubilidade em água, espessura e permeabilidade ao vapor de água - PVA;

Otimizar os filmes biopoliméricos produzidos;

Determinar para os filmes biopoliméricos otimizados propriedades físico-químicas, mecânicas, bioativas e espectroscópicas.

3 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

3.1 EMBALAGENS ATIVAS

O avanço das embalagens ativas cresce mundialmente, incluindo no Brasil. No entanto, sua criação e aplicação encontram obstáculos devido a restrições legais, resistência dos consumidores e à necessidade de compreender melhor os impactos econômicos e ambientais que essas embalagens podem causar (Maniglia, 2017).

Nos últimos anos, diversos tipos de revestimentos e filmes comestíveis, feitos a partir de uma ampla gama de biopolímeros e aditivos, têm sido estudados para prolongar a vida útil de alimentos perecíveis. Esses materiais ajudam a preservar a textura e o valor nutricional dos alimentos, além de reduzir as trocas de gases e umidade, podendo até prevenir a contaminação microbiana. Através da permeabilidade seletiva ao O_2 e CO_2 , esses filmes podem diminuir a taxa de respiração dos vegetais, o que reduz o metabolismo e contribui para o aumento da durabilidade do produto, mantendo sua qualidade por mais tempo (Silva *et al.*, 2022).

As técnicas principais usam substâncias para absorver oxigênio, etileno, umidade, odores e liberar dióxido de carbono, agentes antimicrobianos, antioxidantes e aromas. Elas se concentram em incluir ou fixar aditivos na embalagem, não diretamente no produto (Luz, 2022).

Esses materiais alimentares devem ter boas características sensoriais, resistência a impactos mecânicos, estabilidade bioquímica, físico-química e microbiana, serem não tóxicos, não poluentes e terem custo baixo para serem considerados como componentes alimentares (Cutter, 2006).

As embalagens ativas oferecem benefícios aos consumidores e são mais sustentáveis que as tradicionais. Enquanto plásticos, vidros e embalagens metálicas demoram anos para se decompor, as embalagens ativas são biodegradáveis e se degradam rapidamente. Projetadas para melhorar a vida útil e segurança dos alimentos, essas embalagens interagem positivamente com o produto, alterando as condições de armazenamento. Os filmes com aditivos liberam gradualmente compostos na superfície dos alimentos, onde ocorrem muitas reações químicas e microbiológicas (Luz, 2022).

As embalagens ativas são uma tecnologia promissora que preserva e melhora os alimentos, estendendo sua vida útil e garantindo maior segurança no consumo devido a melhorias sensoriais e de segurança (Belizón *et al.*, 2018).

Além das propriedades que protegem passivamente os alimentos, como barreira e resistência, outras propriedades ativas, como antimicrobianas ou antioxidantes, também são

cruciais para a estabilidade dos alimentos. Elas são adicionadas, por vezes, a filmes e revestimentos comestíveis usando aditivos (Figura 1) (Melo *et al.*, 2019).

Figura 1 - Embalagens ativas de alimentos



Fonte: Luz, 2022.

3.2 FILMES BIODEGRADÁVEIS

Os filmes e revestimentos biodegradáveis feitos de polímeros naturais, como polissacarídeos, lipídios e proteínas, se decompõem no ambiente em compostos simples que não prejudicam os ciclos naturais de carbono, nitrogênio e enxofre, mantendo o ecossistema intacto (Santana; Kieckbusch, 2013). Os polímeros biodegradáveis se decompoem por meio da ação enzimática de microrganismos, bactérias e vírus, e esse processo é acelerado de maneira que o tempo de permanência desses materiais no ambiente seja diminuído (Wielecosseles, 2019).

Os polímeros biodegradáveis têm origens diversas, podendo vir de fontes renováveis como milho, celulose, batata, cana-de-açúcar, ou serem produzidos por bactérias a partir de moléculas menores, gerando PHB e PHB-HV. Também podem ser derivados de fontes animais, como quitina, quitosana ou proteínas. Além disso, alguns podem ser obtidos de fontes fósseis,

como petróleo ou de uma mistura de biomassa com petróleo. Os polímeros biodegradáveis mais reconhecidos do petróleo incluem PCL, poliesteramidas, copoliésteres alifáticos e aromáticos (Lima, 2019).

Existem diversas técnicas para deposição de filmes, como dip-coating, spin-coating e casting. O método de casting é o mais utilizado em laboratório para produzir filmes biodegradáveis, sendo eficaz. Ele consiste na aplicação da solução sobre um substrato, geralmente de vidro, e a evaporação do solvente forma o filme, processo que pode ser acelerado por aquecimento (Viégas, 2016).

3.3 PLASTIFICANTES

Os plastificantes, com alta estabilidade e fusão, alteram propriedades de materiais ao serem adicionados. Geralmente hidrofílicos e de pequeno porte, se inserem nas cadeias poliméricas, diminuindo ligações de hidrogênio (Lima, 2019).

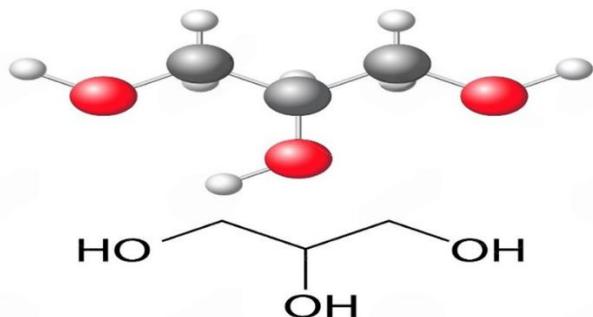
Os plastificantes são aditivos que melhoram as propriedades físico-químicas dos polímeros, aumentando sua flexibilidade e reduzindo dureza, rigidez e temperatura de transição vítreia. Eles também aumentam a tenacidade e o alongamento na ruptura. Para serem eficazes, devem ser compatíveis com o polímero utilizado. Sem esses aditivos, os filmes tendem a ser rígidos e quebradiços. Os plastificantes mais usados em filmes à base de amido são os polióis, como glicerol e sorbitol, sendo o glicerol mais eficaz (Schaeffer, 2020).

3.3.1 Glicerol

O glicerol (Figura 2), também conhecido como 1,2,3-propanotriol na química, é um álcool de três carbonos. Incolor, adocicado e altamente viscoso, pode ser obtido de fontes naturais ou petroquímicas. Derivado da palavra grega para "doce", é uma substância altamente valorizada na química e comercialmente chamada de glicerina (Beatriz; Araújo; Lima, 2011).

Figura 2 - Estrutura do glicerol.

Glycerol (glycerine)



Fonte: 123rf, 2023.

É um importante plastificante usado na produção de filmes e misturas. Suas propriedades, como baixo peso molecular e reforço da resistência termomecânica, são fundamentais. Ele é comumente empregado em soluções para formar filmes devido à sua estabilidade e compatibilidade com biopolímeros em biofilmes. No processo de fabricação, o glicerol reduz as pontes de hidrogênio entre as cadeias poliméricas, diminuindo os espaços entre as moléculas. Adicionar esse plastificante a filmes de amido melhora sua permeabilidade, que é naturalmente limitada (Luz, 2022).

O glicerol é naturalmente encontrado combinado com os glicerídeos, presentes em todas as gorduras animais e óleos vegetais. Além de ser um subproduto na fabricação de biodiesel, ele é gerado nos processos de produção de sabões e ácidos graxos. O glicerol possui diversas aplicações, sendo notável seu uso em tabaco, alimentos, bebidas e cosméticos (Lima, 2019).

3.4 *Euterpe oleracea* Mart.

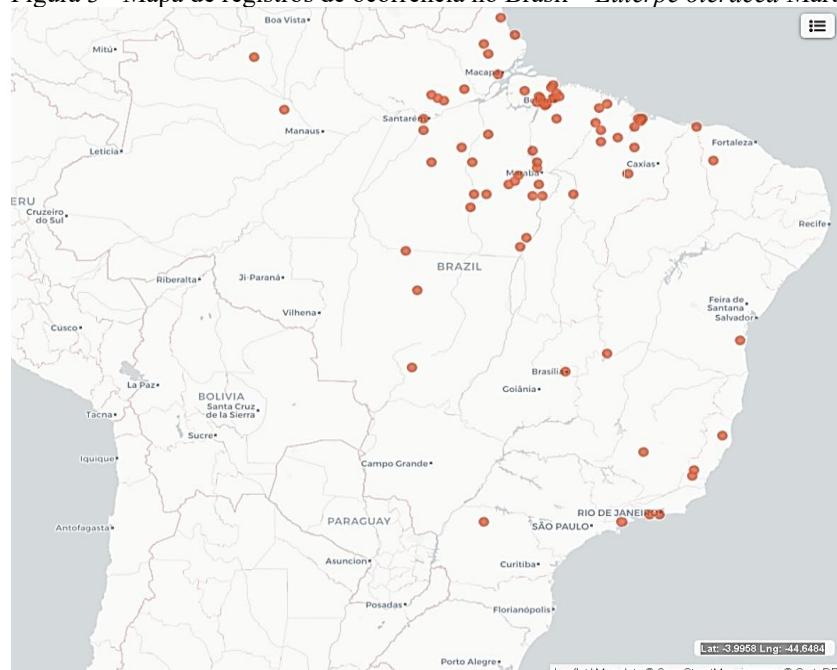
A Arecaceae é uma família botânica que abriga aproximadamente 2.450 variedades de plantas, encontradas em diversas partes do mundo nas zonas tropicais e subtropicais. Ela desempenha um papel significativo como uma fonte vital de sustento para várias comunidades (Zambrana *et al.*, 2007; Barfod; Hagen; Borchsenius, 2011).

Integrando a ordem *Arecales* e a família botânica *Arecaceae*, o gênero *Euterpe* possui uma ampla presença nas regiões da América Central e do Sul, onde se estabelece predominantemente em florestas de baixa altitude e densas além de florestas de montanha com

climas úmidos. No Brasil, identificam-se cinco espécies pertencentes ao gênero *Euterpe*: *E. edulis*, *E. catinga*, *E. oleracea*, *E. longibracteata* e *E. precatoria* (Henderson, 2000).

Euterpe oleracea Mart. é uma espécie nativa do Brasil, encontrada nas regiões Norte (Amapá, Pará e Tocantins) e Nordeste (Maranhão) (Figura 3), principalmente em áreas próximas aos rios do Estuário Amazônico. Ela cresce em climas tropicais chuvosos, em altitudes de 0 a 2000 metros, sendo predominante na Amazônia e no Cerrado. No Norte, ocorre em florestas de várzea, igapós e áreas de terra firme com boa pluviosidade. A espécie é conhecida por vários nomes, como açaí, açaizeiro e juçara (Coradin; Camillo; Vieira, 2022).

Figura 3 - Mapa de registros de ocorrência no Brasil – *Euterpe oleracea* Mart.



Fonte: SiBBr, 2024.

Euterpe oleracea (Figura 4) apresenta como principal característica a predominância de caules cespitosos, formando grandes touceiras, com até 35 estipes eretos ou inclinados e de base curta, medindo de 3 a 20 metros de altura. Geralmente possuem cor acinzentada, com palmito liso no topo. Apresentam entre 8 e 14 folhas; os frutos são globosos ou depresso-globosos, pesando de 0,5 a 2,8 g e com 1 a 2 cm de diâmetro, lisos, tendo o epicarpo negropurpúreo, negro ou verde quando maduros; as sementes são globosas, com endosperma ruminado, contendo um eixo embrionário diminuto e um tecido de reserva composto por sílica e lipídios (Oliveira *et al.*, 2022).

Figura 4 - *Euterpe oleracea* Mart.



Fonte: Rural Pecuária, 2023.

A exploração do açaí é bastante antiga, remontando à época pré-colombiana, quando os frutos eram utilizados pelos índios para preparar o vinho de açaí. Ao longo dos anos, esse hábito não apenas perdurou, mas também cresceu, pois a população consome diariamente o açaí (Oliveira *et al.*, 2017).

Atualmente, o açaí tem uma grande importância econômica, gerando receitas para os estados da região norte, além de garantir o sustento de muitas famílias por meio da venda dos frutos e da polpa processada. Tradicionalmente, essa polpa é comercializada por milhares de batedores artesanais, tanto na forma *in natura* quanto congelada, pasteurizada, em misturas, entre outras (Oliveira *et al.*, 2017).

Após a "açaimania" dos anos 90, a demanda por polpa e produtos do açaí cresceu muito no mercado brasileiro. O cultivo comercial do açaizeiro emprega mão de obra pouco qualificada, sustentando famílias extrativistas e gerando empregos diretos e indiretos. Isso beneficia a economia do açaí, envolvendo pequenos produtores rurais e microempresários urbanos (Vieira *et al.*, 2018).

Em 2016, a Região Norte foi responsável por 98,6% da produção de frutos de açaí no Brasil, totalizando 1,3 milhão de toneladas, considerando tanto os cultivos racional quanto extrativista (Vieira *et al.*, 2018). A Tabela 1 apresenta os dados de produção de açaí de 2015 a 2022.

Tabela 1 - Produção de frutos do açaí (toneladas) por ano.

Ano	Pará	Amazonas	Maranhão	Acre	Amapá	Rondônia	Outros estados	Total
2015	1.488.756	114.521	16.877	4.459	2.627	1.605	25.105	1.645.260
2016	1.550.000	120.000	18.000	4.500	2.700	1.700	27.000	1.715.000
2017	1.620.000	125.000	19.000	4.600	2.800	1.800	28.000	1.792.000
2018	1.690.000	130.000	20.000	4.700	2.900	1.900	29.000	1.870.000
2019	1.760.000	135.000	21.000	4.800	3.000	2.000	30.000	1.950.000
2020	1.830.000	140.000	22.000	4.900	3.100	2.100	31.000	2.030.000
2021	1.900.000	145.000	23.000	5.000	3.200	2.200	32.000	2.110.000
2022	1.762.380	144.520	21.340	4.459	2.627	1.605	24.310	1.952.550

Fonte: IBGE, 2025.

O açaizeiro representa uma planta de grande potencial econômico, especialmente pela utilização de seus frutos em bebidas exportadas globalmente, como energéticos. A procura pelo açaí tem ultrapassado a oferta, o que tem gerado um aumento nos preços e impulsionado tanto o mercado local quanto o internacional. Esse crescimento é resultado do potencial nutricional e dos benefícios para a saúde que o fruto apresenta, levando à criação de uma variedade de produtos, desde sabonetes e xampus até suplementos alimentares e corantes naturais. Esse crescimento tem estimulado o cultivo do açaizeiro em várias regiões para suprir as demandas dos mercados interno e externo (Moraes, 2022).

O açaí é uma fruta com alto valor nutricional e calórico devido aos altos níveis de lipídios, carboidratos e proteínas. Contém compostos bioativos, como os polifenóis, especialmente as antocianinas, que oferecem propriedades antioxidantes. Sua concentração desses polifenóis o coloca entre as cinco frutas com maior potencial antioxidante, com propriedades anti-inflamatórias e farmacológicas, combatendo doenças relacionadas aos radicais livres. Estudos indicam sua possível inclusão no grupo de alimentos funcionais (Cedrim; Barros; Nascimento, 2018).

A composição química do fruto do açaí varia bastante devido a múltiplos fatores abióticos: condições de cultivo, etapas prévias, processamento e manipulação, técnicas de análise e influência genética. Baixos níveis de pH e acidez indicam uma polpa com baixa acidez, aumentando a vulnerabilidade a microrganismos, inclusive patogênicos. Já baixos teores de sólidos solúveis sugerem menos açúcar, enquanto os sólidos totais variam conforme a água adicionada no processo de despolpamento (Oliveira, 2017).

Os níveis de antocianinas e compostos fenólicos na polpa do açaí também podem variar (Tabela 2). A existência dessas substâncias contribui para que o fruto seja reconhecido no mercado pelo seu grande potencial antioxidante. As antocianinas são bastante sensíveis à luz, ao calor e ao contato com o oxigênio. Portanto, as etapas prévias e o processo de produção são cruciais para preservar esses pigmentos na polpa do fruto (Oliveira, 2017).

Tabela 2 - Teores de antocianinas e compostos fenólicos da polpa de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) por diferentes autores.

Componente	Rufino <i>et al.</i> (2011) BU	Cruz <i>et al.</i> (2011) BU	Mattietto <i>et al.</i> (2012) BU	Batista (2016) BS
Antocianinas totais (mg/100g)	111 ± 30,4	58,0 ± 3,2	48,86 ± 0,09 a 177,63 ± 0,31	96,58 ± 0,11
Compostos fenólicos totais (mg GAE/100g)	454 ± 44,6	331,3 ± 19,5	197,52 ± 3,13 a 418,89 ± 5,82	-

BU: Base úmida, BS: Base seca. Fonte: Oliveira, 2017; Batista, 2016.

A fruta é rica em calorias devido à sua alta quantidade de gorduras. Por outro lado, na polpa, a quantidade de nutrientes varia consideravelmente, sendo mais influenciada pelas condições de cultivo e por fatores genéticos do que pelo processamento dos frutos (Tabela 3). No entanto, o método de processamento pode afetar os níveis de carboidratos e fibras, dependendo do tipo de peneira utilizada. A polpa contém uma quantidade significativa de fibras alimentares e proteínas (Oliveira, 2017).

Tabela 3 - Composição centesimal da polpa de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) por diferentes autores.

Componente	Gordon <i>et al.</i> (2012) BS	Batista (2016) BS	Mattietto <i>et al.</i> (2016)	Carvalho <i>et al.</i> (2017)
Cinzas (%)	4,0 ± 0,0	3,2 ± 0,03	3,04	4,61
Proteínas (%)	12,0 ± 0,0	8,93 ± 0,38	10,58	8,37
Lipídeos (%)	48,0 ± 4,0	45,37 ± 0,71	47,86	51,29
Fibras totais (%)	-	10,05 ± 0,22	17,53	7,69
Carboidratos (%)	36,0 ± 4,0	30,01 ± 0,16	35,17	-

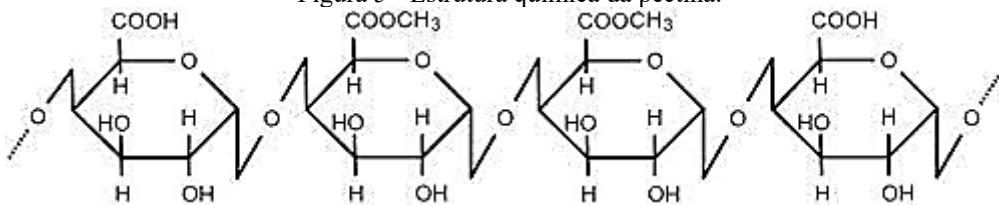
BS: Base seca. Fonte: Oliveira, 2017; Batista, 2016; Minighin, 2019.

3.5 Pectina

A pectina (Figura 5), presente na parede celular de plantas superiores, é complexa, composta por cadeias lineares de ácido galacturônico (Canteri *et al.*, 2012). É um polissacarídeo

altamente filmogênico, antioxidante e promotor de plasticidade. Trata-se de um polímero natural composto por monômeros de ácido D-galacturônico unidos por meio de ligações do tipo α (1→4). Monômeros como D-galactose e L-arabinose também podem estar presentes na cadeia. Sua estrutura e distribuição de grupos funcionais favorecem a interação com matrizes de base celulósica (Alexandrino; Tosi; Assis, 2017).

Figura 5 - Estrutura química da pectina.



Fonte: Alexandrino; Tosi; Assis, 2017.

A capacidade da pectina de formar géis está associada à quantidade de grupos polares livres, como hidroxilas, à sua estrutura tridimensional, ao pH, aos eletrólitos presentes na solução, à solubilidade e concentração da pectina na mistura, à sua massa molar, ao grau de metilação, à natureza e qualidade da fruta a ser utilizada na geleificação, à tecnologia empregada, incluindo procedimentos, materiais de cozimento e temperatura, à distribuição dos grupos ao longo da cadeia péctica e à composição das cadeias laterais (Canteri *et al.*, 2012).

A pectina é um ótimo ingrediente na fabricação de filmes biodegradáveis devido à sua habilidade para criar géis e ser altamente solúvel. Ela também oferece proteção contra o ar e o óleo. O interesse nesse composto específico é impulsionado pela sua baixa toxicidade, boa adaptação ao corpo, capacidade de se degradar naturalmente e pela facilidade de formar hidrocoloides (Lopes, 2022).

Na indústria, os polissacarídeos pécticos são responsáveis pelo aumento da viscosidade e atuam como coloides estabilizantes e protetores em alimentos e bebidas. Entre outras propriedades, destacam-se a prevenção de separação em preparações de frutas, a estabilidade de produtos de panificação, a estabilização de proteínas, a melhoria da maciez e textura, o aumento do volume e o controle da liberação de líquidos (Canteri *et al.*, 2012).

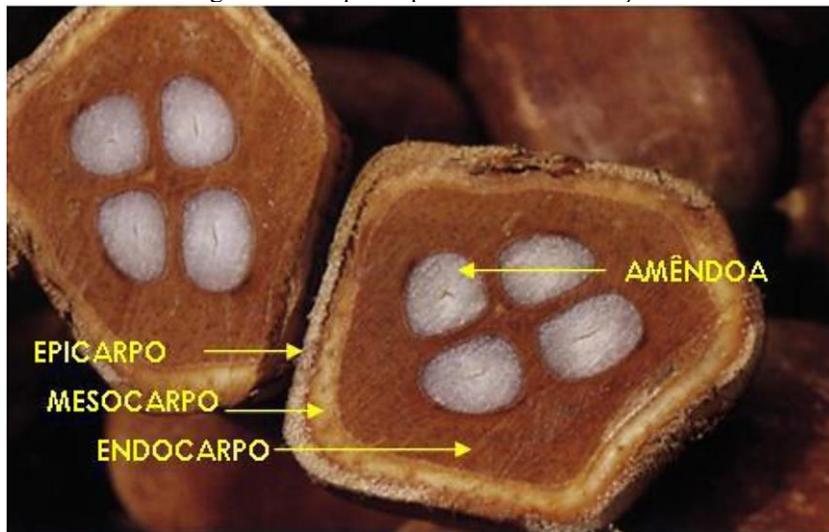
3.6 MESOCARPO DE COCO BABAÇU

O babaçu é uma palmeira de tronco único, alcançando até 20 metros de altura, com folhas pinadas de 5,6 a 12 metros e até 79 centímetros de bainha. Seu pecíolo tem entre 0,4 e

1,5 metro, com 170 a 224 pinas por lado. Apresenta inflorescência solitária, feminina, masculina ou mista, e frutos lisos de 11,3 por 6,3 centímetros, marrom na maturidade, com polpa fibrosa e 3 a 6 amêndoas brancas no interior (Lima, 2019).

O babaçu, especialmente cultivado no Brasil nas regiões norte e nordeste, é uma espécie de palmeira composta por quatro partes distintas (Figura 6): a casca externa (epicarpo) rica em fibras, a polpa (mesocarpo) rica em amido, o caroço interno (endocarpo) duro e lenhoso, e a amêndoa, rica em óleo. O amido presente na polpa do babaçu, após a extração do óleo do fruto, é transformado em farinha por meio de processos de secagem e moagem. Essa farinha, contendo cerca de 60% de amido e compostos fenólicos, possui propriedades antioxidantes (Silva, 2022).

Figura 6 - As quatro partes do coco babaçu.



Fonte: Silva, 2014.

De acordo com os estudos realizados por Silva *et al.* (2016), os biofilmes resultantes da combinação de pectina e mesocarpo de coco-babaçu demonstraram propriedades aprimoradas em comparação com aqueles feitos apenas com pectina. Esses filmes apresentaram variações na aparência e facilitaram a remoção dos moldes.

O óleo extraído da amêndoa do babaçu é o principal produto comercial no momento, acompanhado pela produção de subprodutos como carvão de alta qualidade, amido do mesocarpo e a torta de babaçu, um resíduo industrial. No contexto brasileiro, a amêndoa de babaçu é o segundo item mais valioso no extrativismo vegetal, ficando atrás apenas do açaí. Em 2011, a produção foi de 102.499 toneladas, refletindo uma diminuição de 3,4% em relação a 2010, indicando uma tendência de queda constante na oferta nos últimos anos (Silva, 2014).

3.7 RETICULANTE

O uso de polímeros naturais em filmes pode ser problemático devido à sua solubilidade em água, o que acelera sua degradação e limita sua aplicação. (Lima, 2019). Para contornar o referido problema, criar conexões entre as cadeias poliméricas, por meio da reticulação, impede a dissolução do material em água e altera suas propriedades, como resistência ao calor, força mecânica e solubilidade (Lima *et al.*, 2007).

A interação entre o agente reticulante e a base polimérica forma ligações covalentes entre cadeias, conhecidas como 'crosslinking'. Isso gera polímeros tridimensionais e maior rigidez na estrutura com mais reticulação. As propriedades de um filme biodegradável dependem do equilíbrio entre o grau de reticulação e o uso de plastificantes (Garavand *et al.*, 2017).

3.7.1 Cloreto de cálcio

Essa substância química, composta por cálcio e cloro, é altamente solúvel em água, tem propriedades deliquescentes e se comporta como um haleto iônico. Comumente utilizada em diversas áreas, como em sistemas de refrigeração, na fabricação de produtos poliméricos e no controle de gelo em estradas, também é empregada na produção de queijos e cimento. Obtida tanto da pedra calcária quanto pelo processo Solvay, exige armazenamento em recipientes bem fechados por causa de sua alta capacidade higroscópica (Júnior, 2015).

3.8 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPOLÍMEROS

A identificação e avaliação dos biopolímeros são cruciais para sua aplicação comercial, feitas por meio de parâmetros como espessura, cor, uniformidade, sabor, aroma, propriedades de bloqueio, solubilidade em água e teor de umidade. Os métodos de análise adaptam técnicas clássicas de materiais sintéticos para considerar particularidades dos biofilmes, como a sensibilidade à umidade e temperatura (Luz, 2022).

As propriedades dos filmes biodegradáveis, como óptica, térmica, mecânica e de bloqueio, são determinantes para sua eficiência. Essas características são conectadas à composição, processo de fabricação e aplicação nos alimentos (Pelissari, 2009).

3.8.1 Conteúdo de umidade

Rindlav-Westling *et al.* (1998) mostraram que os filmes secos sob maiores umidades relativas apresentam estruturas com maior grau de cristalinidade e maior teor de umidade residual, características que tornam os filmes mais suscetíveis a alterações durante o seu armazenamento e utilização. Normalmente, quanto maior a quantidade de amido presente, mais rígidos e menos capazes de resistir às mudanças de umidade esses filmes se tornam (Arvanitoyannis *et al.*, 1998).

3.8.2 Solubilidade em água

A solubilidade em água é crucial para os filmes biodegradáveis, sendo essencial que alguns sejam impermeáveis à água para manter a integridade do produto em certas aplicações. (Krochta, 2001).

Como apontaram Gontard *et al.* (1994), a solubilidade dos filmes em água serve de parâmetro no controle de qualidade dos alimentos em que a atividade de água é alta ou quando o alimento entra em contato com água durante a coação, ou mesmo, quando os filmes são ingeridos. Para Perez-Gag e Krochta (2001) existem casos onde a total solubilidade do filme em água é vantajosa. Monterrey-Quintero (1998) destacou que esse tipo de filme (alta solubilidade) é interessante para aplicações com alimentos desidratados, como por exemplo, sopas instantâneas, frutas desidratadas etc. Entretanto, para esses casos, os filmes devem ser necessariamente comestíveis.

3.8.3 Espessura

Oliveira (1996) classificou a espessura dos filmes como sendo a distância perpendicular entre as duas superfícies principais do material.

A espessura dos filmes é escolhida para embalagens com base nas especificidades do alimento, como sua natureza, quantidade e condições de armazenamento (Lima, 2019). Segundo Gennadios, Weller e Testin (1993), o controle da espessura dos filmes é importante para sua uniformidade, repetitividade das medidas de suas propriedades funcionais e validade das comparações entre as propriedades dos filmes.

Sobral e Ocuno (2000), em seu estudo, relatou que a espessura se relaciona diretamente com outra característica de filmes, a permeabilidade ao vapor de água. Destacou ainda que no

método *casting*, a espessura é um parâmetro de difícil controle quando aplicado em confecção de biofilmes.

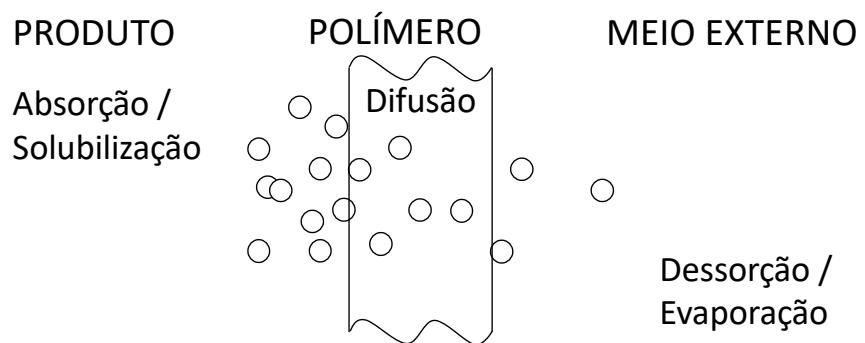
3.8.4 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

A permeabilidade ao vapor de água é uma propriedade chave dos materiais, crucial ao considerar o uso dos filmes em embalagens, porém não é uma restrição absoluta. Materiais altamente permeáveis são úteis para embalar vegetais frescos, enquanto filmes menos permeáveis são melhores para produtos desidratados (Sobral; Ocuno, 2000).

Segundo Tosati (2013), a permeabilidade é um processo no qual o vapor se difunde de um lado do filme para outro. Bertan (2003) completaram dizendo que essa permeabilidade se dá pela morfologia, densidade, estrutura química, cristalinidade e orientação polimérica.

A permeabilidade através de um filme mostra o quanto facilmente um soluto se move de uma superfície para outra. A norma ASTM E-96 define a permeabilidade como a taxa de transmissão de vapor de água por unidade de área em um filme específico, devido à diferença na umidade relativa. A transferência de água nos filmes poliméricos se dá por difusão molecular, conforme mostrado na Figura 7 (Horn, 2012).

Figura 7 - Esquema de permeação do vapor d'água através de filmes poliméricos.



Fonte: Horn, 2012.

3.8.5 Grau de Intumescimento

A expansão volumétrica de filmes, chamada intumescimento, ocorre quando as moléculas do solvente se inserem na estrutura do filme, ocupando espaços vazios e provocando

uma reorganização nas cadeias poliméricas, aumentando o volume do material. O grau de intumescimento depende da interação entre o polímero e o solvente, além do grau de reticulação do polímero. Grupos químicos de reticulação não afetam essa interação (Seixas, 2011).

3.8.6 Infravermelho

A espectroscopia no infravermelho é uma das técnicas de caracterização de materiais poliméricos mais empregadas. A análise vibracional de polímeros pode fornecer informações importantes sobre o aspecto estrutural, incluindo a composição e a estrutura configuracional (Rego, 2020).

Essa análise permite obter informações sobre as estruturas por meio de movimentos vibracionais ou rotacionais, que causam uma mudança no momento dipolar. A absorção no infravermelho ocorre quando há um acoplamento entre o campo elétrico oscilante da vibração molecular e o campo da radiação incidente. A faixa de radiação mais relevante para a espectroscopia está na região de 4000 a 400 cm^{-1} (infravermelho médio). Nos espectros, a intensidade das bandas de absorção é expressa em termos de transmitância ou absorbância, e a posição é dada em números de onda (cm^{-1}), que correspondem ao inverso do comprimento de onda (Almeida, 2010).

3.8.7 Carotenoides totais

Belitz e Grosh (1997) definiram os carotenoides como compostos naturais, com mais de 600 variantes, encontrados em bactérias, algas, fungos e plantas superiores. Esses pigmentos coloridos estão principalmente nos cloroplastos das plantas, associados às clorofitas, e são responsáveis pela alteração de cor nos frutos e vegetais durante o amadurecimento ou envelhecimento, quando as clorofitas desaparecem e revelam outras cores.

De acordo com Zaghdoudi *et al.* (2015), a coloração dos carotenoides, que varia do amarelo ao vermelho escuro, é determinada pelo sistema de ligações conjugadas na cadeia de hidrocarbonetos. Esse sistema, responsável pela absorção de luz visível, é utilizado na identificação e quantificação dos carotenoides.

3.8.8 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas filmes estão fortemente relacionadas ao tipo de material utilizado em sua fabricação, particularmente ao grau de coesão, que se refere à capacidade do polímero de formar ligações moleculares entre as cadeias poliméricas, as quais devem ser estáveis (Rojas, 2010).

Os testes mecânicos avaliam como os biopolímeros reagem a forças externas, sendo relacionados à capacidade de sofrer deformações reversíveis e irreversíveis, além de resistir à fratura. O teste mais comum para medir a força mecânica é o teste de tração, a partir do qual se obtêm propriedades como resistência à tração, elongação, força resultante e módulo de elasticidade (Chen, 1995).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Neste estudo, foram empregados os seguintes reagentes: pectina cítrica em pó (Isofar, Dinâmica Química Contemporânea, Brasil), cloreto de cálcio di-hidratado (Merck, Darmstadt, Alemanha) como um agente de reticulação, glicerol (Synth, São Paulo, Brasil) como um agente plastificante e o mesocarpo do coco babaçu em pó obtido de comércio local. A polpa do açaí foi obtida de uma cooperativa na região de São Luís, no estado do Maranhão, de maneira industrial de forma que se obtivesse uma concentração de aproximadamente 50% da fruta e 50% de água.

4.2 LOCAL DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Engenharia de Produtos e Processos em Biorrecursos (LEPPBio) localizado na Universidade Federal do Maranhão (UFMA), no campus do Bacanga, na cidade de São Luís - MA.

4.3 INSTRUMENTOS UTILIZADOS

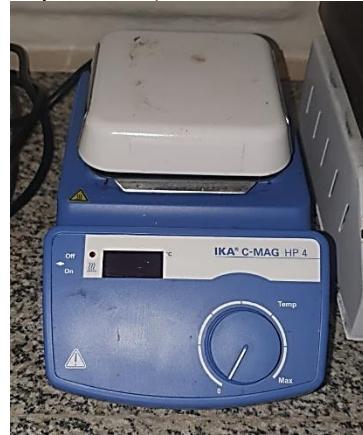
Para a produção dos biofilmes foram usados os seguintes equipamentos apresentados nas Figuras 8 a 13:

Figura 8 - Estufa de secagem (modelo PE14, PARDALTEC, Brasil).



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 9 - Chapa aquecedora (modelo C-MAG HP4, IKA, Brasil).



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 10 - Agitador mecânico (modelo Q250, QUIMIS, Brasil).



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 11 - Micrômetro externo (modelo MDC-25S, CARBOGRAFITE, Japão).



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 12 - Mesa agitadora orbital (Tecnal, modelo TE-145, Brasil).



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 13 - Balança semi-analítica (Modelo UA420, URANO, Brasil).



Fonte: Próprio autor, 2025.

4.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.4.1 Elaboração dos biopolímeros

Foi utilizado um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) com quatro pontos centrais (nível 0), quatro pontos fatoriais (níveis ± 1) e quatro pontos axiais (níveis $\pm \alpha$), totalizando 12 ensaios (Tabela 4), que foi utilizado para estudar os efeitos das variáveis concentração de pectina (g) e concentração de polpa de açaí (ml) sobre as respostas: aspecto visual, umidade (%), solubilidade em água (%), permeabilidade ao vapor de água (PVA) e espessura (δ).

Tabela 4 - Planejamento experimental para os biopolímeros de pectina e polpa de açaí.

Ensaios	Variáveis Independentes			
	Real		Codificado	
	Concentração pectina (g)	Concentração polpa de açaí (ml)	Concentração pectina (g)	Concentração polpa de açaí (ml)
1	8,6	15,8	-1	-1
2	11,4	15,8	1	-1
3	8,6	44,2	-1	1
4	11,4	44,2	1	1
5	8	30	-1,41	0
6	12	30	1,41	0
7	10	10	0	-1,41
8	10	50	0	1,41
9	10	30	0	0
10	10	30	0	0
11	10	30	0	0
12	10	30	0	0

Fonte: Próprio autor, 2025.

4.4.2 Processo de confecção dos biopolímeros

Os biopolímeros foram produzidos por meio de uma modificação do procedimento descrito por Santana e Kieckbusch (2013). Utilizando um agitador mecânico do tipo "Turrax" (Quimis, Modelo Q250-2, São Paulo, Brasil), as quantidades específicas de pectina, mesocarpo de coco-babaçu, extrato de açaí e glicerol foram dissolvidas por 30 min a 45°C em uma quantidade determinada de água, de acordo com as quantidades de açaí em cada formulação, de modo a resultar em uma solução final com 200 ml de água. Em seguida, adicionou-se gradualmente 30 mL de uma solução de 1% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ao longo da parede do recipiente e, depois disso, a solução foi agitada por mais dez minutos. Foram produzidos quatro filmes biodegradáveis, cada um pesando 50g, utilizando o método de "casting" em placas de *Petri* com 15 cm de diâmetro. Subsequentemente, esses filmes foram submetidos a secagem em uma estufa (Nova Técnica, modelo 400-1ND, Brasil) por um período de 24 horas.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPOLÍMEROS

Os filmes foram caracterizados quanto ao aspecto visual apresentado, conteúdo de umidade (ω), solubilidade (S), espessura (δ) e permeabilidade ao vapor de água (PVA).

4.5.1 Aspecto visual e coloração

Essa avaliação foi feita a partir das observações visuais e táteis do filme. O objetivo foi averiguar aspectos como uniformidade, coloração (predominância da cor lilás proveniente do açaí), presença ou não de partes quebradiças e ausência ou não de partículas insolúveis.

4.5.2 Conteúdo de umidade (ω)

O conteúdo de umidade dos biopolímeros em condições de equilíbrio a 52% de UR (umidade relativa) e 25°C foi determinado através de processo gravimétrico de amostras em triplicata de cada ensaio. As amostras dos biopolímeros foram inicialmente cortadas em formato de retângulos, pesadas e submetidas a secagem em estufa a 105°C por 24 horas. Após esse período foram novamente pesadas e determinou-se o conteúdo de umidade através da Equação 1.

$$\omega = \frac{m_i - m_s}{m_i} * 100 \quad (1)$$

onde:

ω = fração de massa de umidade do biopolímero;

m_i = massa total inicial da amostra em gramas;

m_s = massa seca da amostra em gramas.

4.5.3 Solubilidade em água (S)

O teor de solubilidade (S) dos biopolímeros foi determinado a partir da metodologia de Irissin-Mangata (2001), com adaptações de Lopes *et al.* (2021). A qual destaca que a massa (m_u) em triplicata de um biopolímero é quantificada sendo imersa em 50 ml de água destilada

sob agitação constante por 24 horas numa mesa agitadora (Figura 12). Feito isso, a amostra foi levada a uma estufa para a determinação da massa seca que não foi solubilizada (m_f). O teor de material solubilizado foi determinado como sendo função da massa seca inicial, como segue a Equação 2.

$$S = \left[\frac{m_u(1 - \omega) - m_f}{m_u(1 - \omega)} \right] * 100 \quad (2)$$

4.5.4 Espessura (δ)

A espessura foi mensurada a partir do auxílio de um micrômetro (Figura 11). A espessura final se deu pela média aritmética de nove medições aleatórias sobre o biofilme para ensaio de permeabilidade ao vapor de água (PVA).

4.5.5 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

A análise de permeabilidade ao vapor de água (PVA) foi determinada à temperatura ambiente 25°C seguindo as normas do método E95-96 (ASTM, 2016), na qual foi utilizado uma célula de acrílico com tampa que dispunha de uma abertura central afim de se fixar o biopolímero. O fundo da célula foi preenchido por cloreto de cálcio granulado (Isofar, Dinâmica Química Contemporânea, Brasil) para garantir 0% de UR. Essa célula foi depositada em outro ambiente de acrílico com característica de ser hermeticamente fechado (Figura 14). Esse recipiente continha uma solução saturada de NaCl (Isofar, Dinâmica Química Contemporânea, Brasil) afim de se manter o ambiente com 75% de UR, o que garantiu uma diferença de pressão de vapor de água, ΔP_ω . O aumento de massa total da célula, que foi monitorada ao longo do tempo (cerca de 72 horas), corresponde à taxa de água que permeou pelo biopolímero (G) e que foi usado na Equação (3) para calcular a PVA.

$$PVA = \left[\frac{24}{A_e * \Delta P_\omega * UR} \right] * G * \delta \quad (3)$$

onde:

PVA: permeabilidade de vapor de água do biopolímero [(g.mm)/(m².dia.kPa)];

δ : é a espessura do biopolímero (mm);
 A_e : é a área da superfície exposta do biopolímero (m^2);
 ΔP_ω : é a diferença de pressão parcial através do biopolímero (kPa);
 G : é o coeficiente angular da reta de ajuste aos pontos experimentais em um gráfico da massa *versus* tempo (g/dia);
UR: é a umidade relativa do segundo recipiente.

Figura 14 - Aparato experimental para a determinação da PVA.



Fonte: Próprio autor, 2025.

4.5.6 Analise estatística

Os resultados do Delineamento Composto Central Rotacional foram avaliados utilizando o *software Statistica* 9.0, com a finalidade de assegurar a validade dos coeficientes dos modelos obtidos dentro de um nível de confiança de 95%, através de análises estatísticas apropriadas. Após a análise estatística dos coeficientes, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), que consiste na avaliação do coeficiente de determinação (R^2) e do teste F, verificando se o modelo apresenta um ajuste adequado aos dados experimentais. Apenas variáveis com nível de confiança acima de 95% ($p \leq 0,05$) foram consideradas significativas, utilizando a Equação 8.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (8)$$

Onde:

Y é a resposta (variável dependente);
 β_0 é a constante de regressão;
 β_1 e β_2 são os coeficientes de regressão para os termos lineares;
 β_{11} e β_{22} são os coeficientes de regressão quadráticos; β_{12} é o coeficiente do termo de interação;

X_1 e X_2 representa os valores codificados das variáveis independentes (concentração de pectina e concentração de polpa de açaí, respectivamente).

Foi feito ainda uma comparação de médias entre os ensaios do planejamento e entre os dados selecionados pelo Teste de Tukey ao nível de 95% de confiança.

4.5.7 Seleção das melhores concentrações

Após a análise do planejamento experimental DCCR, foi possível selecionar as concentrações das variáveis independentes, de modo a obter menores valores de conteúdo de umidade, solubilidade em água, espessura e PVA.

Os filmes selecionados foram caracterizados através do aspecto visual e tátil, umidade, solubilidade, PVA, carotenoides totais, grau de intumescimento, propriedades mecânicas e infravermelho.

4.5.8 Propriedades mecânicas

A resistência à tração (RT, MPa), alongamento na ruptura (AL%) e o módulo de elasticidade (ME, MPa) foram determinados diretamente para ambas as formulações em uma máquina de ensaio universal (modelo STANDARD Biopdi, EUA) (Figura 15) em uma temperatura de 25°C (± 2 °C) e umidade relativa de 55% ($\pm 3\%$), conforme método padrão D-882 da ASTM International Methods. As espessuras de um mínimo de doze amostras de filme de 10 cm x 2,5 cm foram pré-determinadas a partir da média aritmética de dez medições feitas em pontos aleatórios nos filmes compostos. Um computador foi usado para registrar as curvas de tensão-deformação e as propriedades de tração foram calculadas usando o software da máquina de teste universal. Uma velocidade de 1 cm/s foi usada no teste de resistência à tração.

As Equações (4) e (5) foram utilizadas para o cálculo da resistência à tração e alongamento na ruptura, respectivamente:

$$RT = \frac{F_m}{A_0} \quad (4)$$

$$AL = \frac{l_m - l_0}{l_0} \quad (5)$$

Onde:

F_m (N) é a força máxima antes da quebra;

A_0 é a área transversal inicial do filme;

l_m é o comprimento máximo ativo;

l_0 é o comprimento inicial do filme.

Figura 15 - Máquina de ensaio universal.



Fonte: Próprio autor, 2025.

4.5.9 Carotenoides totais

O teor de carotenoides totais foi determinado pelo método originalmente proposto por Rodriguez-Amaya (1999), baseado na extração com acetona e separação com éter de petróleo. As leituras de cor foram realizadas por um espectrofotômetro (modelo DU-7-B340, Beckman, Krefeld, Alemanha) (Figura 16) em um comprimento de onda de 450 nm, β -caroteno.

Figura 16 - Espectrofotômetro.



Fonte: próprio autor, 2025.

Éter de petróleo puro foi usado como branco. A análise foi realizada usando açafrão e biopolímeros impregnados. O modelo matemático utilizado foi feito a partir da Equação 6.

$$\text{Carotenoides Totais} = \frac{Abs \cdot V \cdot 10^6}{A_{1cm}^{1\%} \cdot m \cdot 100} \quad (6)$$

Os Carotenoides Totais são expressos por (mg/g); V representa o volume da diluição (mL); Abs implica na máxima absorbância média; o $A_{1cm}^{1\%} = 2592$ significa absorvidade para o β -caroteno em éter de petróleo, por fim, m é a massa da amostra (g).

4.5.10 Grau de intumescimento

O grau de intumescimento foi determinado pelo peso da amostra imersa em água destilada à temperatura ambiente (25°C) e agitada com um agitador magnético. Inicialmente, os filmes foram pesados e colocados em água com agitação por cerca de 10 segundos. Em seguida, o excesso de água foi removido com pinças e papel toalha, a amostra foi pesada novamente e o procedimento de imersão e pesagem foi repetido a cada 5 segundos até a primeira decomposição. Os cálculos realizados resultaram na subtração da massa seca (W_i) da massa total (W_f), em comparação com a massa seca (W_i), conforme demonstrado na Equação 7.

$$G_I = \frac{W_f - W_i}{W_i} \quad (7)$$

4.5.11 Espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

As análises espectroscópicas das matérias primas e dos filmes otimizados foram conduzidas utilizando um espetrômetro (modelo IRPrestige-21, Shimadzu). A varredura espectroscópica foi efetuada na faixa de 4000 a 400 cm^{-1} , utilizando a técnica de reflectância total atenuada (ATR).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após os 12 ensaios, os biopolímeros confeccionados com pectina, mesocarpo de coco babaçu contendo açaí foram caracterizados quanto a umidade, solubilidade, espessura e permeabilidade ao vapor de água. Os biopolímeros também foram sujeitos a avaliações visuais, por exemplo, quanto a homogeneidade, cor, textura.

Com os dados obtidos através dos experimentos descritos na metodologia fez-se uso do *software* Statistica 9.0 (StatSoft, Inc., USA) para obtenção das superfícies de respostas e as curvas de contorno. Através de cálculos por Análise de Variância (ANOVA), foi possível determinar a equação que representa o modelo para cada parâmetro.

Os filmes ideais foram aqueles que apresentaram melhores aspectos visuais, que possuíam menores conteúdos de umidade, maior solubilidade em água, menor espessura e menor permeabilidade ao vapor de água.

5.1 ASPECTO VISUAL E TÁTIL

Os biopolímeros confeccionados apresentaram bom aspecto visual e táctil (Tabela 5), entretanto, a maioria apresentou más-formações nas bordas prejudicando a planificação dos mesmos. Esses parâmetros foram avaliados de forma subjetiva, visualmente. Apesar disso, todos os filmes apresentaram uma facilidade de remoção da placa de Petri utilizadas na moldura.

Os filmes também apresentaram uma coloração bem próxima à coloração do açaí, clareando um pouco sua cor devido a adição de pectina, ficando com uma cor próxima ao marrom avermelhado. Percebeu-se ainda que seu tom escurece à medida que a quantidade de açaí do filme aumentava, onde a formulação 8 é a mais escura e a 7 a mais clara.

Quanto ao cheiro, os filmes apresentaram um aroma bastante agradável, bem próximo ao da polpa de açaí *in natura*.

Tabela 5 - Filmes obtidos na confecção dos biopolímeros.

Formulações	Antes da secagem	Após a secagem(24h)	Formulações	Antes da secagem	Após a secagem(24h)
1			7		
2			8		
3			9		
4			10		
5			11		
6			12		

Fonte: Próprio autor, 2025.

5.2 CONTEÚDO DE UMIDADE E SOLUBILIDADE EM ÁGUA

Os resultados referentes ao conteúdo de umidade (ω) e solubilidade em água (S) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com as diferentes concentrações de polpa de açaí são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Conteúdo de umidade (ω) e solubilidade em água (S) de biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.

Ensaios	Umidade (%)*	Solubilidade (%)*
1	22,534±1,029 ^{bc}	13,300±0,010 ^d
2	20,051±0,679 ^b	13,006±0,005 ^c
3	27,427±0,604 ^d	15,715±0,012 ^e
4	16,843±0,049 ^a	16,529±0,045 ^f
5	22,800±0,679 ^{bc}	17,707±0,017 ^{gh}
6	20,430±0,145 ^b	11,291±0,007 ^b
7	24,849±1,027 ^d	12,798±0,015 ^b
8	18,945±1,798 ^b	9,045±0,029 ^a
9	20,142±0,142 ^b	17,133±0,024 ^g
10	22,562±0,133 ^{bc}	18,966±0,036 ^{hi}
11	23,767±0,177 ^c	17,217±0,009 ^{gh}
12	23,493±0,129 ^{bc}	19,534±0,036 ⁱ

*Média ± desvio médio das repetições. As mesmas letras na mesma coluna indicam não haver diferença significativa entre os valores das médias ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey. Fonte: Próprio autor, 2025.

De acordo com a Tabela 6, pode-se observar que o conteúdo de umidade dos filmes apresentou valores próximos para os 12 ensaios, porém os ensaios 4 e 8 foram os que houveram menor variação do teor de umidade. O teor de umidade médio foi de 21,98%, o que varia em torno de 16,84 a 27,42 % valor este próximo ao obtido por Paixão *et al.* (2019) que foi de 24% para biofilmes de pectina com adição de fibras do mesocarpo de coco da baía. Já Maniglia (2017) obteve uma variação de 7,33 a 11,82 % para filmes elaborados com farinha de amido e mesocarpo de coco babaçu, o que foi baixo em relação ao encontrado nesse estudo.

A solubilidade em água dos biopolímeros também apresentou bastante proximidade nos valores, o que pode ser observado na análise estatística, entretanto o ensaio 8 foi o que houve uma menor variação do teor de solubilidade em água. A solubilidade dos biopolímeros em média foi de 15,18%, que varia entre 9,04 a 19,53 %. Maniglia (2017), por outro lado, obteve valores variando entre 24,32 a 39,02 % para filmes com farinha de amido e mesocarpo de coco babaçu, assim como Paixão *et al.* (2019), que em seu estudo sobre biofilmes de pectina com adição de fibras do mesocarpo de coco da baía, encontrou média de valores de 27%, valores acima da faixa encontrada nesse estudo. Do Evangelho *et al.* (2019) explicam que a solubilidade dos filmes depende do tipo e concentração dos compostos, bem como de seus índices de hidrofilicidade e hidrofobicidade. Compostos hidrofóbicos, como por exemplo, o mesocarpo

de coco babaçu utilizados neste estudo, tendem a diminuir a solubilidade (Caetano *et al.*, 2017). Além do mais, a junção do mesocarpo de coco babaçu e as máximas concentrações de polpa de açaí, ajudou a diminuir a solubilização destes filmes.

Para a análise estatística, foram calculados os efeitos das variáveis independentes sobre as respostas estudadas, bem como o erro, o coeficiente *t* de *student* e a significância estatística (*p*). Após a eliminação dos fatores não-significativos, verificou-se a significância da regressão e da falta de ajuste a um nível de significância de 5%, através de uma Análise de Variância (ANOVA), utilizando o teste *F* para o planejamento experimental estudado.

Nas Tabelas 7 e 8 estão apresentadas as estimativas dos efeitos lineares (L), quadráticos (Q) e das interações, respectivamente, para a resposta conteúdo de umidade e solubilidade em água dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.

Tabela 7 - Efeito estimado, erro puro, coeficiente *t* e grau de significância estatística, para a resposta conteúdo de umidade (%) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.

Fatores	Efeito estimado	Erro padrão	<i>t</i> (6)	<i>p</i> - valor
Média	21,734	0,814	26,689	0,000*
Conc. Pectina (L)	-4,168	1,152	-3,619	0,036*
Conc. Pectina (Q)	0,890	1,288	0,691	0,539
Conc. Açaí (L)	-1,049	1,152	-0,911	0,029*
Conc. Açaí (Q)	0,210	1,288	0,163	0,881
Conc. Pectina x Conc. Açaí	-2,818	1,629	-1,730	0,182

* Significativo a *p* ≤ 0,05. Fonte: Próprio autor, 2025.

Tabela 8 - Efeito estimado, erro puro, coeficiente *t* e grau de significância estatística, para a resposta solubilidade em água (%) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.

Fatores	Efeito estimado	Erro padrão	<i>t</i> (6)	<i>p</i> - valor
Média	17,324	1,342	12,907	0,001*
Conc. Pectina (L)	-2,138	1,898	-1,126	0,042*
Conc. Pectina (Q)	-1,861	2,122	-0,877	0,045*
Conc. Açaí (L)	0,157	1,898	0,083	0,939
Conc. Açaí (Q)	-5,439	2,122	-2,563	0,013*
Conc. Pectina x Conc. Açaí	0,554	2,685	0,206	0,850

* Significativo a *p* ≤ 0,05. Fonte: Próprio autor, 2025.

De acordo com as Tabela 7 e 8, para o conteúdo de umidade e solubilidade em água dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu adicionado de polpa de açaí, os parâmetros estudados apresentaram significância ($p \leq 0,05$). A concentração de pectina e MCB linear influenciaram a resposta de conteúdo de umidade, com efeitos negativos, indicando que esta resposta diminui à medida que estas variáveis independentes aumentam suas concentrações. Entretanto, para a resposta solubilidade, os efeitos eram negativos, porém as influências foram tanto na concentração linear e quadrática para pectina e quadrática para concentração de polpa de açaí.

Com a eliminação dos fatores não-significativos, verificou-se a significância da regressão e da falta de ajuste em relação a 95% de confiança ($p \leq 0,05$), através do teste F, na Análise de Variância para as respostas umidade e solubilidade em água, respectivamente (Tabelas 9 e 10).

Tabela 9 - ANOVA do modelo ajustado para a resposta conteúdo de umidade (%) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F Calculado	F Tabelado
Regressão	3555,51	5	711,10		
Resíduos	30,07	6	5,01		
- Falta de ajuste	22,12	3	7,37		
- Erro puro	7,96	3	2,65	2,78	9,16
Total	3585,58	11	325,96		$R^2 = 99,16\%$

SQ: Soma quadrática; GL: Grau de liberdade; QM: Quadrado médio. Fonte: Próprio autor, 2025.

Tabela 10 - ANOVA do modelo ajustado para a resposta solubilidade em água (%) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F Calculado	F Tabelado
Regressão	5941,47	3	1980,49		
Resíduos	56,72	8	7,09		
- Falta de ajuste	35,10	5	7,02		
- Erro puro	21,62	3	7,21	0,97	9,24
Total	5998,19	11	545,29		$R^2 = 99,05\%$

SQ: Soma quadrática; GL: Grau de liberdade; QM: Quadrado médio. Fonte: Próprio autor, 2025.

O coeficiente de determinação (R^2) para o modelo ajustado para as respostas conteúdo de umidade e solubilidade em água, respectivamente, foram de aproximadamente 0,992 e 0,991, indicando que os modelos explicaram 99,16% e 99,05% da variação dos dados observados.

Estes R^2 s, segundo Rodrigues e Lemma (2014), são considerados aceitáveis, pois de acordo com estes autores, para produtos biológicos, como o pesquisado neste trabalho, são aceitáveis valores de R^2 s acima de 70%.

Analizando o $F_{calculado}$ e $F_{tabelado}$, pode-se observar que os modelos para ambas as respostas apresentaram regressão e falta de ajuste em relação ao erro puro significativa ao nível de 95% de confiança ($F_{calculado} > F_{tabelado}$). Portanto, os modelos ajustados para o conteúdo de umidade e solubilidade em água dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí foram considerados preditivos. Isso ocorreu devido ao fato da média quadrática (QM) do erro puro apresentar um valor muito inferior (para a umidade e levemente inferior para solubilidade) à QM da falta de ajuste (devido à boa repetibilidade dos ensaios nos pontos centrais). Isso faz com que a razão entre eles resulte num valor muito alto.

Os modelos codificados propostos para representarem a umidade e solubilidade em água dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí, estão descritos pelas Equações 9 e 10, respectivamente.

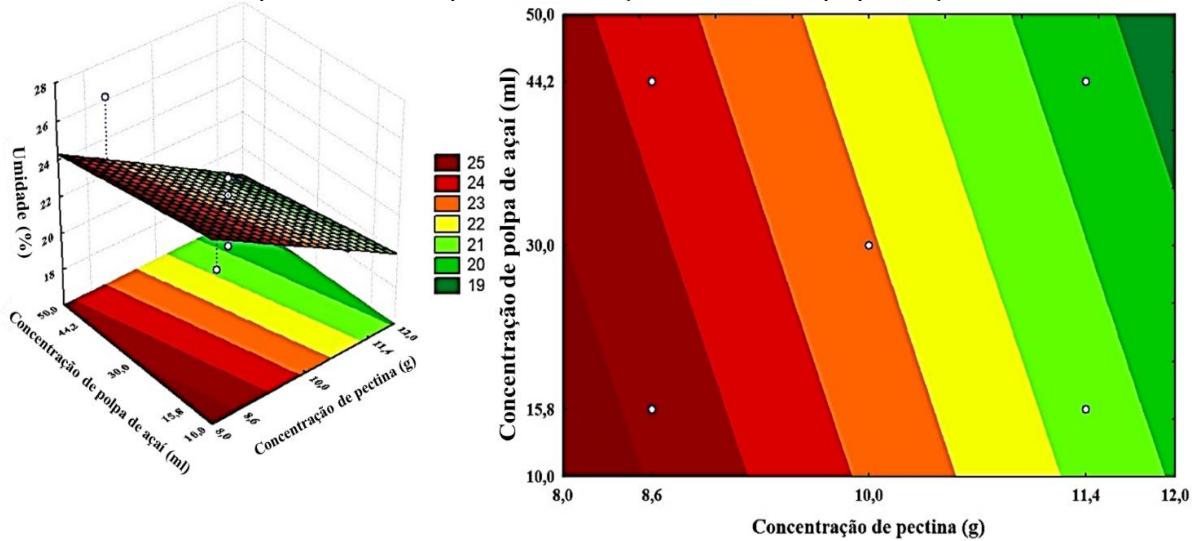
$$Umidade[\%] = 21,734 - 2,084CP - 0,525CPJ \quad (9)$$

$$Solubilidade[\%] = 17,324 - 1,069CP - 0,931CP^2 - 2,719CPJ^2 \quad (10)$$

Onde: CP representa a variável concentração de pectina e CPJ representa a variável concentração de polpa de açaí.

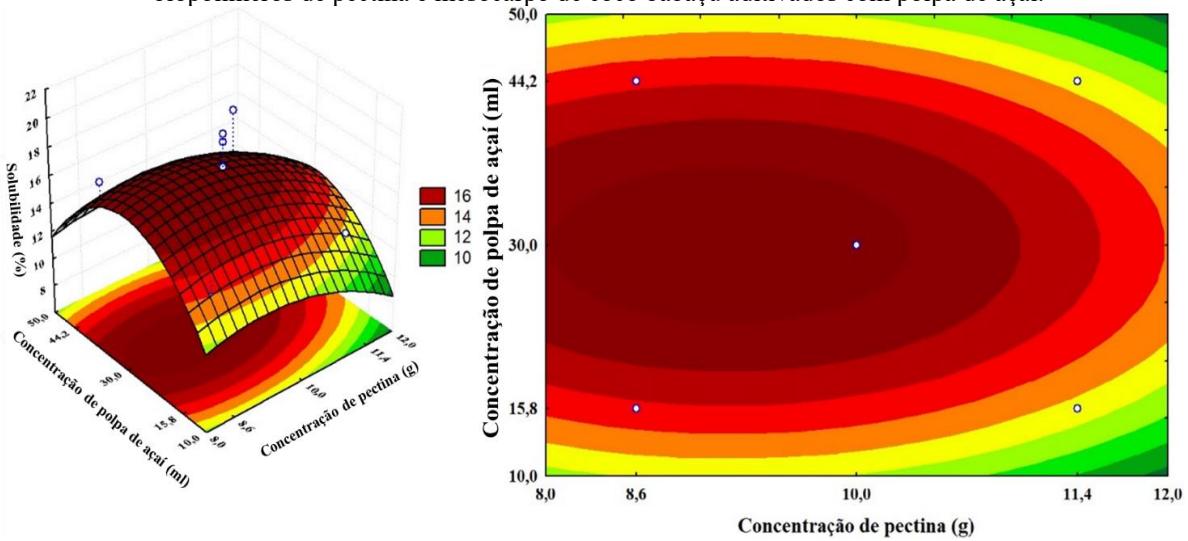
Nas Figuras 17 e 18, encontram-se as superfícies de respostas e curvas de contorno para as respostas umidade e solubilidade dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí. Os valores mais baixos de umidade foram encontrados nas maiores concentrações de pectina e polpa de açaí. No entanto, para solubilidade, valores baixos podem ser obtidos nas menores e maiores concentrações de pectina e de polpa de açaí, obtendo valores menores, nas maiores concentrações das duas variáveis independentes, respectivamente.

Figura 17 - Superfícies de resposta (à esquerda) e curva de contorno (à direita) para a umidade dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 18 - Superfícies de resposta (à esquerda) e curva de contorno (à direita) para a solubilidade dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.



Fonte: Próprio autor, 2025.

5.3 ESPESSURA E PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (PVA)

Os resultados de espessura e permeabilidade ao vapor de água dos biopolímeros de pectina e MCB aditivados com polpa de açaí com as diferentes concentrações de pectina e polpa de açaí são apresentados na Tabela 11. Os valores dos ensaios experimentais de espessura forneceram um valor médio de 0,394 mm variando de 0,188 a 0,529 mm, valores pouco mais altos que os encontrados por Silva *et al.* (2016), que teve variação de 0,11 a 0,20 mm, estudando filmes biodegradáveis de pectina e mesocarpo de coco babaçu. Entretanto, valores próximos

foram encontrados no estudo de Paixão *et al.* (2019) que foram de 0,22 a 0,52 mm na obtenção de biofilmes de pectina com adição de fibras do mesocarpo de coco da baía. Por outro lado, podemos verificar que os valores de espessura desse trabalho apresentam valores próximos, logo, Bierhalz *et al.* (2014) defende que valores de espessura próximos são importantes para fins de comparação de propriedades dos filmes, como por exemplo a PVA, pois estão diretamente atrelados.

Segundo Sobral e Ocuno (2000), a permeabilidade ao vapor de água, ao oxigênio e ao gás carbônico aumenta conforme a espessura dos filmes aumenta. Em contrapartida, Paixão *et al.* (2019) e Santana e Kieckbusch (2013) afirmam que esse processo ocorre de forma contrária, na qual a permeabilidade ao vapor de água aumenta com a diminuição da espessura.

Tabela 11 - Espessura e permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.

Ensaios	Espessura (mm)*	PVA (g.mm/m ² .dia.kPa)*
1	0,529 ± 0,099 ^g	20,089 ± 0,164 ^d
2	0,474 ± 0,047 ^f	22,098 ± 1,741 ^e
3	0,355 ± 0,049 ^b	13,038 ± 2,771 ^{bc}
4	0,357 ± 0,010 ^b	11,780 ± 0,092 ^{ab}
5	0,345 ± 0,049 ^b	10,212 ± 1,969 ^a
6	0,445 ± 0,021 ^e	13,517 ± 0,152 ^{bc}
7	0,373 ± 0,033 ^d	13,738 ± 0,323 ^{bc}
8	0,188 ± 0,032 ^a	9,770 ± 1,601 ^a
9	0,476 ± 0,060 ^f	12,903 ± 0,397 ^b
10	0,365 ± 0,013 ^c	14,083 ± 0,070 ^c
11	0,479 ± 0,063 ^f	13,970 ± 0,338 ^{bc}
12	0,345 ± 0,011 ^b	11,785 ± 1,908 ^{ab}

*Média ± desvio médio das repetições. As mesmas letras na mesma coluna indicam não haver diferença significativa entre os valores das médias ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey. Fonte: Próprio autor, 2025.

Para a resposta PVA, a variação foi de 9,770 a 22,098 g.mm/m².dia.kPa, com valor médio de 13,925 g.mm/m².dia.kPa. De acordo com Krochta e Mulder-Jonhston (1997), valores de PVA entre 10-100 são considerados pobres, de 0,10-10 moderados e boas de 0,01-0,10 g.mm/(m².dia.kPa). A partir dessa análise, os valores de PVA obtidos nesse estudo se apresentaram na faixa pobre. Valores de PVA obtidos por Silva *et al.* (2016) para biofilmes à base de pectina e mesocarpo de coco babaçu reticulado com cloreto de cálcio dihidratado foi

de 3,93 a 9,58 g.mm/(m².dia.kPa), o que apresenta valores abaixos aos encontrados nesse estudo.

Paixão *et al.* (2019), em seu estudo sobre bioplásticos de pectina com adição de fibras do mesocarpo de coco da baía, encontraram valores de PVA entre 7,75 e 56,21 g.mm/(m².dia.kPa), e para os bioplásticos otimizados, encontraram valores entre 10,4 e 17,91 g.mm/m².dia.kPa, valores próximos encontrados nesse trabalho. Jost *et al.* (2014) afirmaram que a permeabilidade ao vapor de água é um processo de difusão e dissolução, ou seja, é regida pela concentração e pela estrutura dos componentes que formam a matriz, assim como são dependentes da cinética de formação, grau de reticulação, cristalinidade e forças de ligação entre as cadeias.

A análise estatística foi feita através de cálculos para os efeitos das variáveis independentes sobre as respostas estudadas, assim como o erro, o coeficiente t de *student* e a significância estatística (p). Após a eliminação dos fatores não-significativos, verificou-se a significância da regressão e da falta de ajuste a um nível de confiança de 95% ($p \leq 0,05$), através de uma Análise de Variância (ANOVA), utilizando o teste F para o planejamento experimental estudado.

Nas Tabelas 12 e 13 estão apresentadas as estimativas dos efeitos lineares, quadráticos e das interações, respectivamente, para as respostas espessura e permeabilidade ao vapor de água dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.

Tabela 12 - Efeito estimado, erro puro, coeficiente t e grau de significância estatística, para a resposta espessura (mm) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.

Fatores	Efeito estimado	Erro padrão	t (6)	p – valor
Média	0,416	0,036	11,717	0,001*
Conc. Pectina (L)	0,022	0,050	0,439	0,690
Conc. Pectina (Q)	0,024	0,056	0,432	0,695
Conc. Açaí (L)	-0,007	0,050	-0,143	0,035*
Conc. Açaí (Q)	-0,090	0,056	-1,604	0,207
Conc. Pectina x Conc. Açaí	0,029	0,071	0,406	0,712

* Significativo a $p \leq 0,05$. Fonte: Próprio autor, 2025.

Tabela 13 - Efeito estimado, erro puro, coeficiente t e grau de significância estatística, para a resposta permeabilidade ao vapor de água (g.mm/m².dia.kPa) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.

Fatores	Efeito estimado	Erro padrão	t (6)	p – valor
Média	13,185	0,537	24,553	0,000*
Conc. Pectina (L)	1,356	0,759	1,786	0,172
Conc. Pectina (Q)	1,150	0,849	1,355	0,269
Conc. Açaí (L)	-2,940	0,759	-3,870	0,031*
Conc. Açaí (Q)	1,040	0,849	1,224	0,308
Conc. Pectina x Conc. Açaí	-1,634	1,074	-1,521	0,226

* Significativo a $p \leq 0,05$. Fonte: Próprio autor, 2025.

De acordo com as Tabelas 12 e 13, para a espessura e PVA, respectivamente, dos biopolímeros de pectina e MCB adicionado de polpa de açaí, os efeitos dos parâmetros concentração de pectina linear e quadrática e a interação pectina x polpa de açaí não foram significantes ao nível de 95% de confiança ($p \leq 0,05$). Entretanto, a concentração de polpa de açaí (linear) foi significativa para estas respostas, apresentando efeitos negativos, indicando que em concentrações maiores de polpa de açaí, obtém-se os menores valores de espessura e PVA.

Com a eliminação dos fatores não-significativos, verificou-se a significância da regressão e da falta de ajuste em relação a 5% de significância ($p \leq 0,05$), através do teste F, na Análise de Variância para as respostas espessura e PVA, respectivamente (Tabela 14 e 15).

Tabela 14 - ANOVA do modelo ajustado para a resposta espessura (mm) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F _{Calculado}	F _{Tabelado}
Ressagem	0,13	2	0,06		
Resíduos	0,03	9	0,00	22,84	3,07
- Falta de ajuste	0,02	6	0,00		
- Erro puro	0,01	3	0,00	1,95	9,29
Total	0,15	11	0,01	$R^2 = 83,54\%$	

SQ: Soma quadrática; GL: Grau de liberdade; QM: Quadrado médio. Fonte: Próprio autor, 2025.

Tabela 15 - ANOVA do modelo ajustado para a resposta PVA (g.mm/m².dia.kPa) dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F _{Calculado}	F _{Tabelado}
Regressão	2044,46	1	2034,02		
Resíduos	116,24	9	12,92		
- Falta de ajuste	97,72	6	16,29		
- Erro puro	18,52	3	6,17	2,64	9,29
Total	2160,70	10	216,07	$R^2 = 94,62\%$	

SQ: Soma quadrática; GL: Grau de liberdade; QM: Quadrado médio. Fonte: Próprio autor, 2025.

O R^2 s para os modelos ajustados para as respostas espessura e PVA foram de 83,54% e 94,62%, respectivamente. Estes R^2 s foram considerados muito bons e com isto foi possível obter modelos e superfícies de respostas (Rodrigues; Lemma, 2014).

Os modelos apresentaram regressão significativa ao nível de 95% de confiança ($F_{Calculado} > F_{Tabelado}$) para as respostas espessura e PVA. Portanto, os modelos ajustados para a espessura e PVA dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí foram considerados preditivos. Entretanto, analisando em função da falta de ajuste em relação ao erro puro, os modelos ajustados foram considerados não preditivos, mas com falta de ajuste em relação ao erro puro ($F_{calculado}$ inferior ao $F_{tabelado}$).

Os modelos codificados propostos para representarem a espessura e PVA dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí, estão descritos pelas Equações 11 e 12, respectivamente.

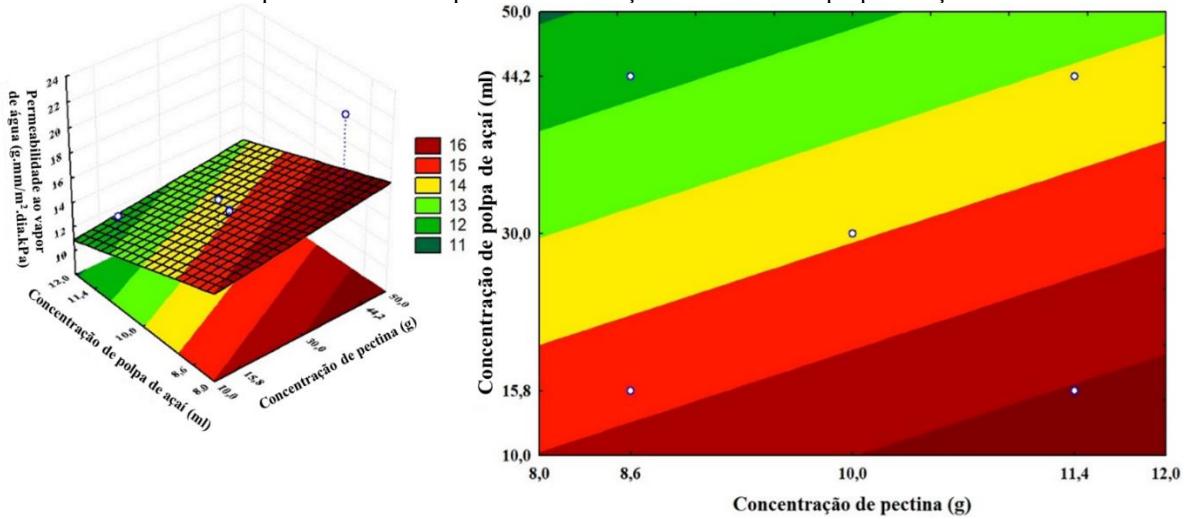
$$\text{Espessura}[mm] = 0,416 - 0,004CPJ \quad (11)$$

$$PVA[g \cdot mm/m^2 \cdot dia \cdot kPa] = 13,185 - 1,470CPJ \quad (12)$$

Onde: CPJ representa a variável concentração de polpa de açaí.

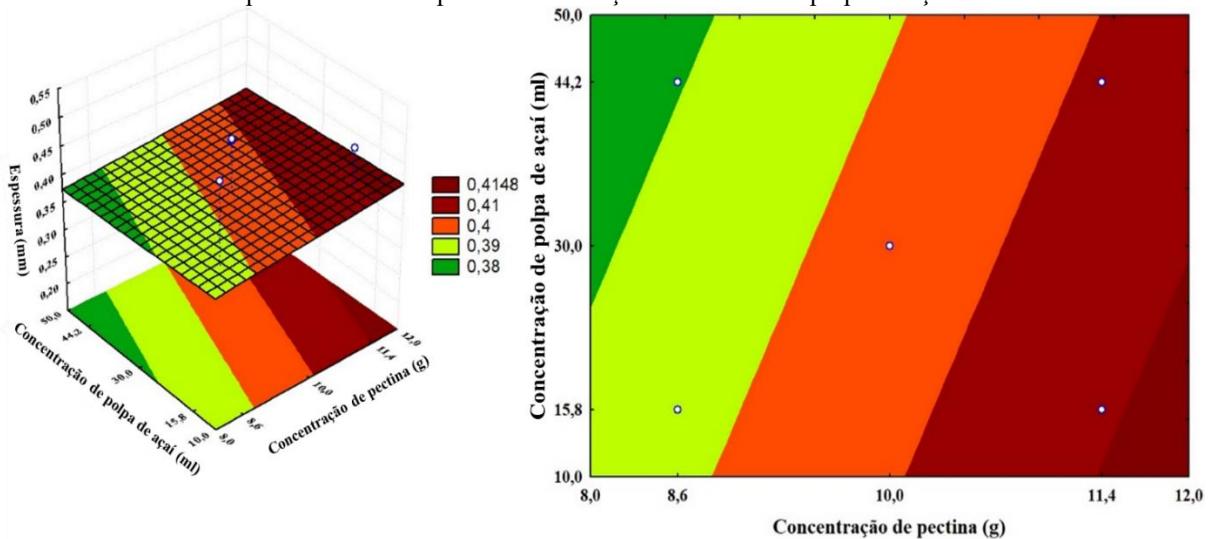
Nas Figuras 19 e 20, encontram-se as superfícies de respostas e curvas de contorno para as respostas espessura e PVA dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí. Os valores mais baixos de espessura e PVA foram encontrados nas maiores concentrações de polpa de açaí e em qualquer faixa de concentração de pectina.

Figura 19 - Superfícies de resposta (à esquerda) e curva de contorno (à direita) para a espessura dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 20 - Superfícies de resposta (à esquerda) e curva de contorno (à direita) para a PVA dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.



Fonte: Próprio autor, 2025.

5.4 SELEÇÃO DAS MELHORES CONCENTRAÇÕES

Após a análise do planejamento experimental DCCR, foi possível selecionar as seguintes concentrações das variáveis independentes, de modo a obter menores valores de conteúdo de umidade, solubilidade em água, espessura e PVA:

F1) 12g de pectina + 50 ml de polpa de açaí

- F2) 8g de pectina + 50 ml de polpa de açaí**
- F3) 12g de pectina + 70 ml de polpa de açaí**
- F4) 8g de pectina + 70 ml de polpa de açaí**

Os filmes selecionados foram caracterizados através do aspecto visual e tátil, umidade, solubilidade, PVA, carotenoides totais, grau de intumescimento, propriedades mecânicas e infravermelho.

5.4.1 Aspecto visual e tátil, conteúdo de umidade, solubilidade em água, espessura e PVA.

Os biopolímeros confeccionados foram avaliados de forma subjetiva, visualmente e apresentaram bom aspecto visual e táctil (Tabela 16), entretanto, a maioria apresentou ondulações, prejudicando a planificação dos mesmos. Apesar disso, todos os filmes apresentaram uma facilidade de remoção da placa. Eles também apresentaram uma coloração bem próxima à coloração do açaí. Quanto ao cheiro, apresentaram um aroma bastante agradável, porém pouco próximo ao da polpa de açaí *in natura*.

Os resultados de conteúdo de umidade, solubilidade em água, espessura e PVA dos biopolímeros selecionados de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí são mostrados na Tabela 17. Observou-se valores mais altos que o esperado para essas variáveis. Os desvios em relação a valores esperados podem ter ocorrido por variações na matéria-prima, principalmente a polpa de açaí, uma vez que a composição da polpa pode variar dependendo da origem, safra e método de processamento da fruta, influenciando a interação com a matriz polimérica, além das condições de preparo do biopolímero no que diz respeito a homogeneização da mistura, uma vez que houve um aumento na quantidade de pectina e açaí nessas formulações fazendo com que a mistura se tornasse mais densa, dificultando a homogeneização adequada da mistura.

Os resultados de umidade variaram de 31,897% (F3) a 36,861% (F2) (Tabela 17). A formulação F3, com maior concentração de pectina e polpa de açaí (12g de pectina + 70ml de polpa de açaí), apresentou a menor umidade, indicando uma menor interação com a água. Estatisticamente ($p \leq 0,05$) todas as formulações diferenciaram em si, porém, é visível a influência da maior concentração de polpa de açaí na diminuição desta variável. Segundo Brasil et al. (2022), filmes com teor de umidade $\geq 21\%$ também apresentam boa flexibilidade, o que foi corroborado nesta pesquisa.

Tabela 16 - Filmes otimizados obtidos na confecção dos biopolímeros.

Ensaios	Antes da secagem	Após a secagem (24h)
F1		
F2		
F3		
F4		

Fonte: Próprio autor, 2025.

A solubilidade em água teve uma 33,675% (F3) a 37,774% (F4) (Tabela 17). A formulação F4, com 8g de pectina e 70ml de polpa de açaí, apresentou a maior solubilidade, sugerindo uma maior capacidade de se dissolver em água. A formulação F3, novamente, apresentou a menor solubilidade, corroborando o resultado de umidade. Geralmente, espera-se que materiais com maior umidade também apresentem maior solubilidade em água, pois a água absorvida pode facilitar a dissolução do material. A relação entre umidade e solubilidade se mantém em todas as amostras.

Analizando a espessura dos biopolímeros de pectina e mesocarpo de coco babaçu adicionados com polpa de açaí das membranas selecionadas (Tabela 17), observou-se valores mais altos do que os obtidos na literatura para filmes contendo pectina como 0,13 a 0,18 mm (Sood; Saini, 2022), 0,34 mm (Gouveia *et al.*, 2019). A formulação F1, com 12g de pectina e

50ml de polpa de açaí, apresentou a maior espessura, enquanto a F4, com a menor quantidade de pectina e a maior de polpa de açaí, apresentou a menor espessura.

Tabela 17 - Conteúdo de umidade, solubilidade em água, espessura e PVA para as formulações otimizadas (F1, F2, F3 e F4).

Ensaios	Umidade	Solubilidade	Espessura	PVA
	(%)*	(%)*	(mm)*	(g.mm/m ² .dia.kPa)*
F1	35,962 ± 0,020 ^c	35,914 ± 0,005 ^b	0,725 ± 0,099 ^c	37,231 ± 5,182 ^c
F2	36,861 ± 0,013 ^d	36,869 ± 0,008 ^c	0,657 ± 0,047 ^b	28,421 ± 5,646 ^b
F3	31,897 ± 0,017 ^a	33,675 ± 0,007 ^a	0,624 ± 0,049 ^b	28,345 ± 0,230 ^b
F4	34,606 ± 0,030 ^b	37,774 ± 0,014 ^d	0,486 ± 0,010 ^a	24,652 ± 2,505 ^a

*Média ± desvio médio das repetições. As mesmas letras na mesma coluna indicam não haver diferença significativa entre os valores das médias ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey. Fonte: Próprio autor, 2025.

O PVA variou de 24,652 g.mm/m².dia.kPa (F4) a 37,231 g.mm/m².dia.kPa (F1). A formulação F1, com maior espessura, apresentou o maior PVA, indicando uma menor capacidade de barreira à umidade. Entretanto, a formulação F4, apresentou uma maior capacidade de barreira. Quanto mais espesso o material, teoricamente, menor a permeabilidade, pois a barreira física é maior, logo, a relação inversa entre espessura e PVA se confirma, com a amostra mais espessa (F1) apresentando a maior permeabilidade e a amostra mais fina (F4) apresentando a menor permeabilidade (Brasil *et al.*, 2022). De acordo com Krochta e Mulder-Jonhston (1997), a classificação de valores de PVA entre 10-100 é considerada pobre, de 0,10-10 moderada e de 0,01-0,10 ((g.mm)/(m².dia.kPa)) boa. Os filmes selecionados nesta pesquisa apresentaram uma PVA pobre, porém, isto não desqualifica a pesquisa, dependendo da aplicação almejada.

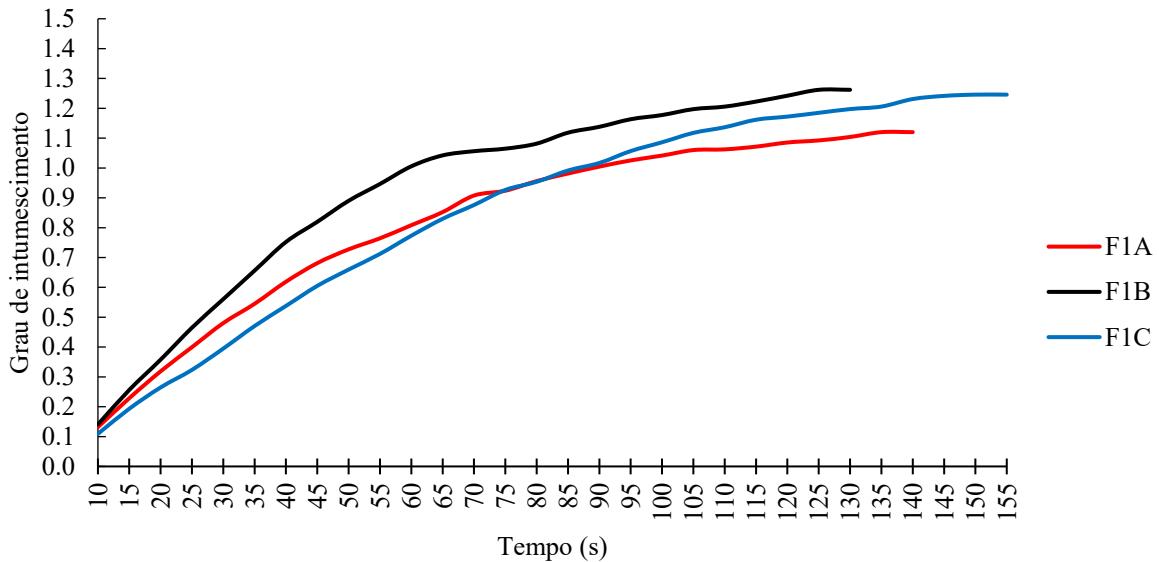
5.4.2 Grau de Intumescimento

As Figuras 21, 22, 23 e 24 mostram as cinéticas de intumescimento obtidos dos filmes selecionados (F1, F2, F3 e F4). Para cada formulação, foram utilizadas 3 amostras na determinação do grau de intumescimento.

A análise das curvas mostradas na Figura 21 evidencia um inchaço demorado durante o processo e um pico de intumescimento em torno de 29 minutos de contato das amostras de filme imersos em água, sendo que após este período a massa permaneceu praticamente constante. Os valores encontrados para o grau de intumescimento mantiveram-se entre 110 e 130%.

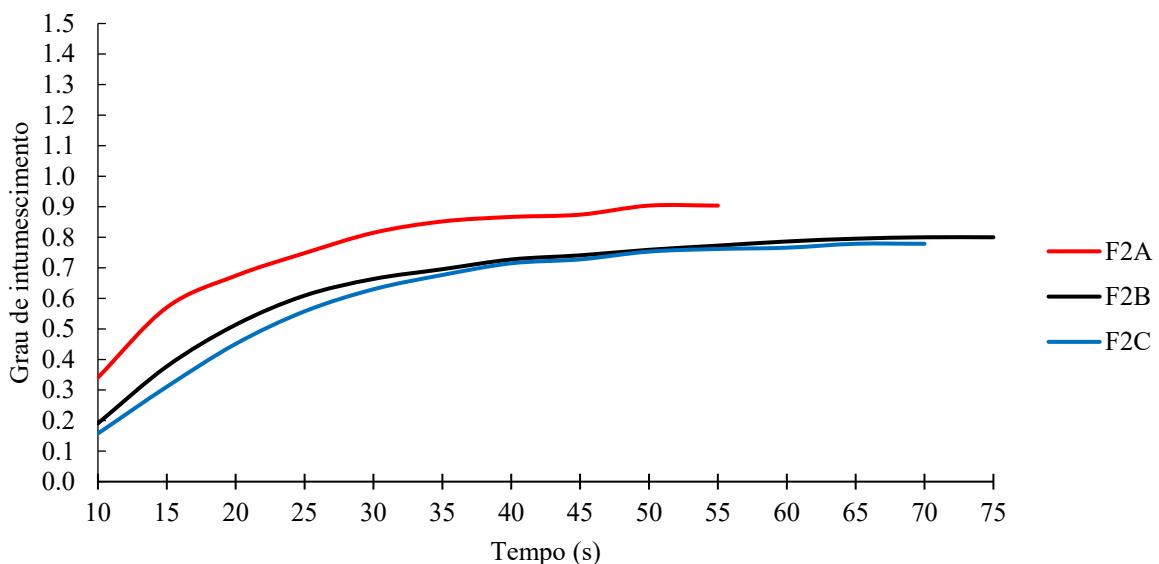
Na Figura 22, observou-se que o tratamento de equilíbrio foi atingindo após 5 minutos de imersão em água, na qual a massa permaneceu praticamente constante após esse período. Os valores encontrados para o grau de intumescimento mantiveram-se entre 70 e 90%.

Figura 21 - Grau de intumescimento (GI) da formulação otimizada 1 (F1).



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 22 - Grau de intumescimento (GI) da formulação otimizada 2 (F2).



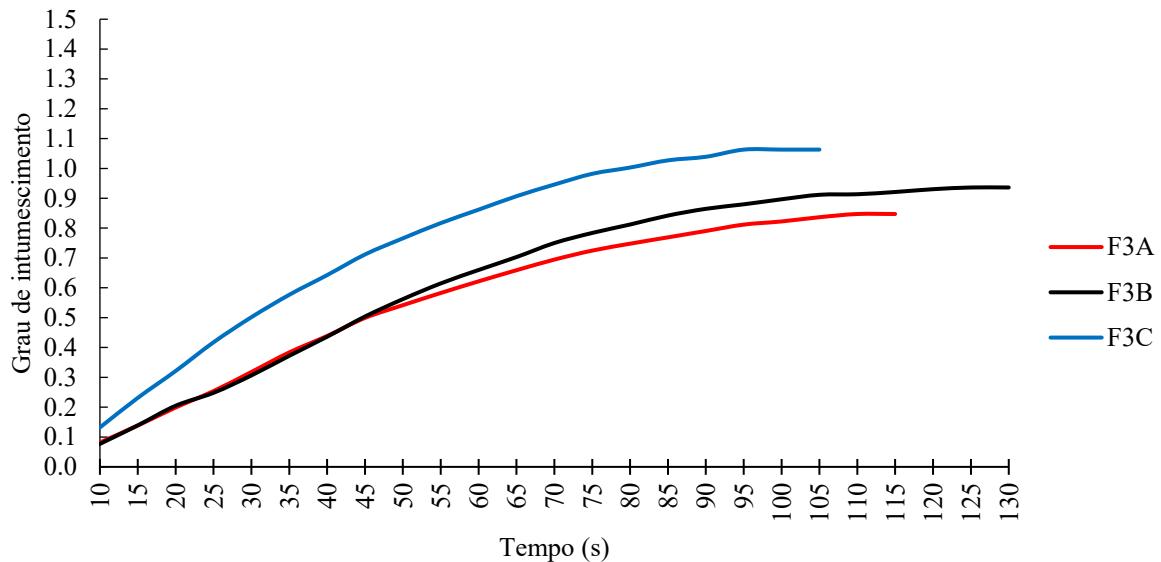
Fonte: Próprio autor, 2025.

Os resultados apresentados na Figura 23, mostra a evidencia um inchaço demorado durante o processo e um pico de intumescimento em torno de 21 minutos de contato das

amostras de filme com a água. Os valores encontrados para o grau de intumescimento mantiveram-se entre 80 e 110%.

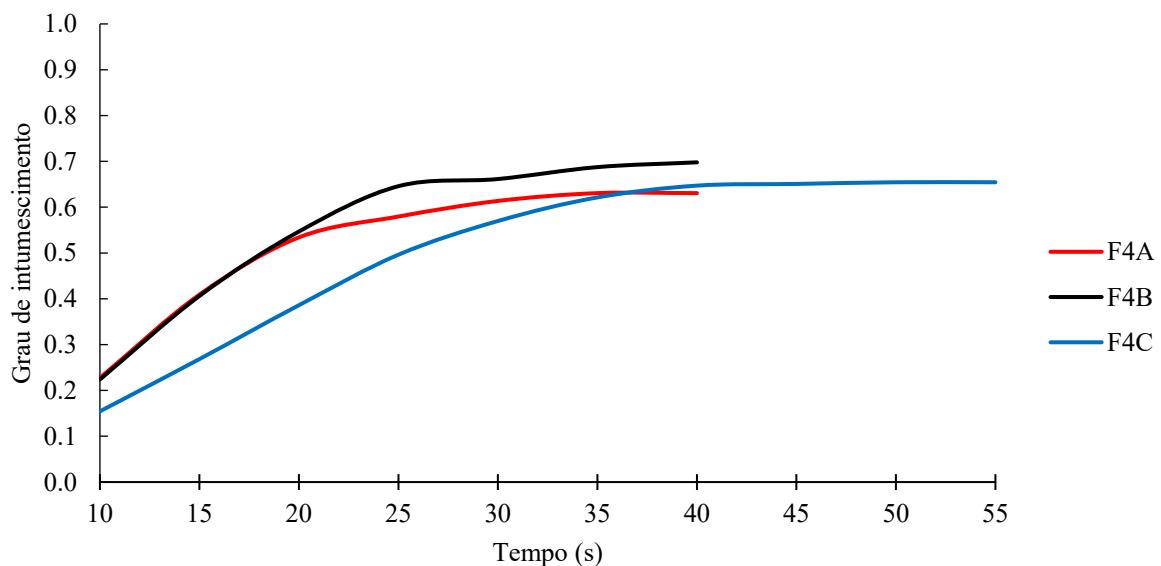
Na Figura 24, pode-se observar que o equilíbrio cinético ocorreu bem rápido, em torno e 3 minutos de contato dos filmes imergidos em água. Os valores encontrados para o grau de intumescimento mantiveram-se entre 60 e 70%.

Figura 23 - Grau de intumescimento (GI) da formulação otimizada 3 (F3).



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 24 - Grau de intumescimento (GI) da formulação otimizada 4 (F4).



Fonte: Próprio autor, 2025.

Influência da quantidade de pectina: Comparando as formulações F1 e F2 (50 ml de polpa de açaí), observa-se que o aumento da quantidade de pectina de 8g para 12g resulta em um maior tempo para atingir o equilíbrio (5 para 29 minutos) e um maior grau de intumescimento (70 a 90% para 110 a 130%). O mesmo padrão se repete ao comparar F3 e F4 (70 ml de polpa de açaí), na qual o aumento de 8g para 12g de pectina leva a um maior tempo para o equilíbrio (3 para 21 minutos) e maior intumescimento (60 a 70% para 80 a 110%). Isso sugere que a pectina é o principal componente responsável pela absorção de água nos biopolímeros.

Segundo Batista (2004), em seu estudo com filmes de pectina pura apresentaram equilíbrio na absorção de água após 20 minutos de imersão, valor próximo aos encontrados neste trabalho para maiores quantidades de pectina. Seixas (2011), em seu estudo sobre biofilmes a base de pectina de casca de maracujá encontrou valores de grau de intumescimento entre 111 e 217%, valores próximos aos encontrados neste trabalho para maiores quantidades de pectina.

Influência da quantidade de polpa de açaí: Comparando F1 e F3 (12g de pectina), o aumento da polpa de açaí de 50 ml para 70 ml diminui o tempo para o equilíbrio (29 para 21 minutos) e diminui o grau de intumescimento (110 a 130% para 80 a 110%). O mesmo padrão é observado em F2 e F4 (8g de pectina), na qual o aumento da polpa de açaí de 50 ml para 70 ml diminui o tempo para o equilíbrio (5 para 3 minutos) e diminui o intumescimento (70 a 90% para 60 a 70%). Isso indica que a polpa de açaí pode ter um efeito de "diluição" na capacidade de intumescimento da pectina.

Tempo para o equilíbrio: As formulações com menor quantidade de pectina (F2 e F4) atingiram o equilíbrio mais rapidamente do que as formulações com maior quantidade de pectina (F1 e F3). Isso pode ser explicado pela menor quantidade de pontos de ligação para a água na matriz do filme.

5.4.3 Carotenoides totais

Na Tabela 18 está apresentados os resultados de carotenoides totais dos biopolímeros selecionados de pectina e mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí.

Como pode-se observar na Tabela 18, o conteúdo de carotenoides totais analisados nos ensaios, apresentaram valores bem próximos, com média de 24,139 µg/g, valores menores do que os encontrados por Silva (2022), em seu estudo sobre biopolímeros de alginato e mesocarpo de coco babaçu aditivado com cúrcuma (35,92 µg/g a 57,69 µg/g). Comparando F1 com F2 e

F3 com F4, pode-se observar que a quantidade de pectina (12g versus 8g) não parece ter um efeito significativo na concentração de carotenoides totais. Porém, a quantidade de polpa de açaí (50ml versus 70ml) parece ter um impacto maior na concentração dos carotenoides. Os ensaios com 70ml de polpa de açaí (F3 e F4) apresentam as maiores médias de carotenoides totais.

Tabela 18 - Carotenoides totais para as formulações otimizadas (F1, F2, F3 e F4).

Ensaios	Carotenoides ($\mu\text{g/g}$)*
F1	$24,003 \pm 0,002^{\text{b}}$
F2	$23,141 \pm 0,003^{\text{a}}$
F3	$25,018 \pm 0,001^{\text{d}}$
F4	$24,394 \pm 0,004^{\text{c}}$

*Média \pm desvio médio das repetições. As mesmas letras na mesma coluna indicam não haver diferença significativa entre os valores das médias ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey. Fonte: Próprio autor, 2025.

5.4.4 Propriedades Mecânicas

Os resultados de tensão na ruptura, elongação na ruptura e módulo de Young dos biopolímeros selecionados de pectina mesocarpo de coco babaçu aditivados com polpa de açaí são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 - Ensaios mecânicos para as formulações otimizadas (F1, F2, F3 e F4).

Ensaios	Tensão na ruptura	Elongação na ruptura	Módulo de Young
	(MPa)*	(%)*	(MPa)*
F1	$0,397 \pm 0,061^{\text{a}}$	$4,561 \pm 0,801^{\text{c}}$	$16,107 \pm 4,023^{\text{a}}$
F2	$0,397 \pm 0,033^{\text{a}}$	$3,102 \pm 0,400^{\text{b}}$	$14,350 \pm 2,354^{\text{a}}$
F3	$0,808 \pm 0,077^{\text{b}}$	$2,242 \pm 0,193^{\text{a}}$	$46,696 \pm 0,761^{\text{c}}$
F4	$0,885 \pm 0,243^{\text{b}}$	$3,539 \pm 0,899^{\text{b}}$	$34,972 \pm 2,100^{\text{b}}$

*Média \pm desvio médio das repetições. As mesmas letras na mesma coluna indicam não haver diferença significativa entre os valores das médias ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey. Fonte: Próprio autor, 2025.

A tensão na ruptura representa a força máxima que o material suporta antes de se romper. Os valores encontrados para essa resposta variaram de 0,397 a 0,885 MPa, valores menores que os encontrados por Luz (2022), em seu estudo de biofilmes a base de alginato e açaí que variaram de 1,662 a 4,133 MPa. Observou-se que os ensaios F3 e F4, com maior quantidade de polpa de açaí (70ml), apresentaram tensões na ruptura significativamente maiores

do que os ensaios F1 e F2, com 50ml de polpa de açaí. Isso indica que a adição de uma maior quantidade de polpa de açaí confere maior resistência mecânica aos biopolímeros.

A elongação na ruptura indica a capacidade do material de se deformar plasticamente antes de se romper. Os valores obtidos para essa resposta oscilaram de 2,242 a 4,561%, valores menores, porém ainda dentro da faixa, que os encontrados por Luz (2022) em seu estudo de biofilmes a base de alginato e açaí (4,245 a 9,374%). Os resultados mostraram que os ensaios F1 e F4 apresentaram as maiores elongações na ruptura, enquanto o ensaio F3 apresentou a menor elongação. Não havendo uma tendência clara nesse estudo relacionada à quantidade de pectina ou polpa de açaí para esse parâmetro.

O módulo de Young é uma medida da rigidez do material. Encontrou-se para esta resposta valores variando de 14,350 a 46,696 MPa. Esses valores foram menores que os encontrados por Luz (2022) (30,021 a 69,148 MPa), porém, ainda dentro da faixa. Os ensaios F3 e F4, com maior quantidade de polpa de açaí, apresentaram módulos de Young significativamente maiores do que os ensaios F1 (12g de pectina + 50 ml de polpa de açaí) e F2 (8g de pectina + 50 ml de polpa de açaí). Isso sugere que a adição de mais polpa de açaí torna os biopolímeros mais rígidos.

É interessante notar que os ensaios F3 e F4, que apresentaram maior tensão na ruptura e módulo de Young, também apresentaram menor elongação na ruptura. Isso sugere que esses biopolímeros são mais resistentes e rígidos, mas menos flexíveis. Segundo Mali, Grossmann e Yamashita (2010), os filmes devem ser resistentes à tração, de forma que protejam o alimento embalado durante o transporte e manuseio, garantindo a sua integridade.

A quantidade de pectina não parece ter um efeito significativo na tensão na ruptura e no módulo de Young, mas pode influenciar a elongação na ruptura. A quantidade de polpa de açaí, por sua vez, parece ter um impacto maior na resistência mecânica e na rigidez dos biopolímeros.

5.4.5 Espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Na Figuras 25, são apresentadas as espectroscopias dos componentes da matriz dos biopolímeros. Analisando essa figura, bandas largas e intensas foram exibidas entre 3.000 e 3.700 cm^{-1} , que são atribuídas ao estiramento OH de grupos hidroxila e água ligada. Isto se deve à umidade adsorvida e às ligações de hidrogênio inter e intramoleculares nas amostras de pectina.

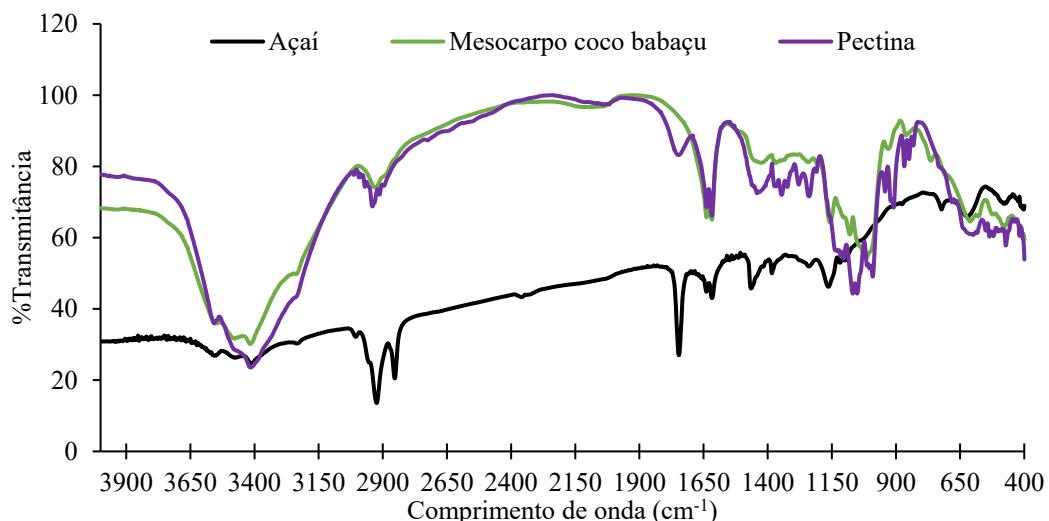
Bandas menores ao redor da região de 2900 cm^{-1} foram provenientes da absorção de CH e devido à vibração de estiramento do grupo metil (CH_3) de ésteres metílicos e acetílicos provavelmente presentes na estrutura da pectina (Synytsya *et al.*, 2003).

Conforme observado na figura, a região do espectro de infravermelho, entre $1800\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$, é característica na avaliação do grau de esterificação das pectinas, por ser a banda indicativa da presença de ácido carboxílico e grupos éster carboxílicos (Leão *et al.*, 2018).

A região característica de grupos carboxílicos ($1750\text{--}1350\text{ cm}^{-1}$) está evidenciada nas amostras da pectina do mesocarpo. Para pectinas, é muito importante observar a banda esterificada C=O (1750 cm^{-1}) e o grupo carboxilato COO^- ($1600\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$) que pode ser visto nos tratamentos), ambas relacionadas ao grau de metoxilação da pectina utilizada na produção do filme (Zanella; Taranto, 2015). Sousa *et al.* (2017) descreveram a presença desses grupamentos contribuindo para definir propriedades das pectinas, como a força e a velocidade de formação dos géis.

Faixas entre a região de $1500\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ referem-se a açúcares neutros. Bandas entre a região de $1200\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ são provenientes da absorção de éter (C O C) e carbono (C=C), ligados na estrutura do anel da molécula de pectina. As bandas de absorção em torno de $1300\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ são coletivamente chamadas de região da “impressão digital” (Zanella; Taranto, 2015). De acordo com Kacuráková *et al.* (2000), essa região fornece informações sobre os principais polissacarídeos presentes nos complicados sistemas de pectina, a forma geral dessa região é determinada pela composição do polissacarídeo principal e pode ser fortemente influenciada pelos constituintes da cadeia lateral.

Figura 25 - Espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) das amostras de açaí, pectina e mesocarpo coco babaçu.

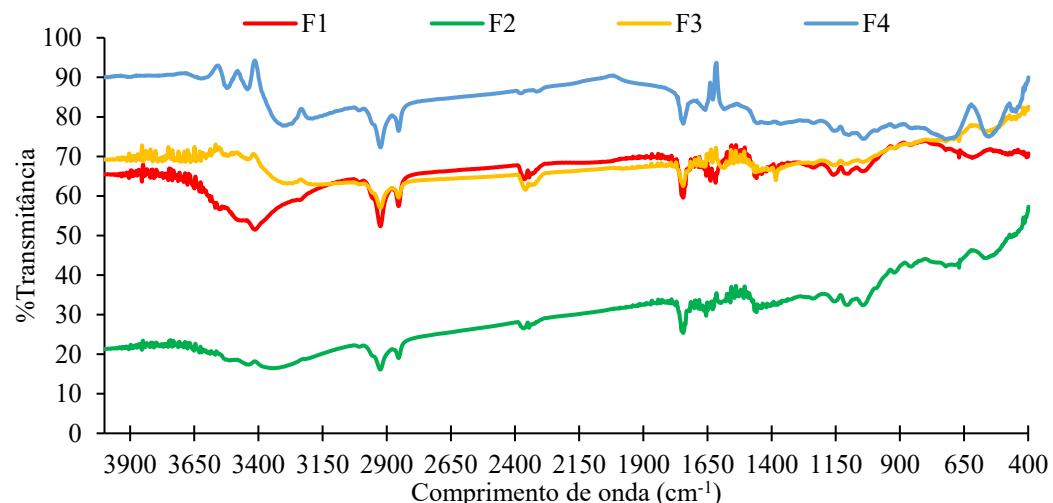


Fonte: Próprio autor, 2025.

A Figura 26 mostra os espectros das quatro formulações otimizadas (F1, F2, F3 e F4). Na região de 3650-3150 cm^{-1} (Alongamento O-H e N-H), todas as formulações apresentam bandas nessa região, indicando a presença de grupos hidroxila (O-H) típicos de ácidos carboxílicos (presentes na pectina e no açaí), álcoois e fenóis (também presentes no açaí) e água, além de grupos amino (N-H) de aminas e amidas.

Na região de 2900-2650 cm^{-1} (Alongamento C-H), há a presença de bandas de absorção de alongamento C-H de alcanos e ácidos carboxílicos em todas as formulações. A intensidade dessas bandas pode variar entre as formulações, indicando diferenças nas quantidades de grupos C-H presentes.

Figura 26 - Espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) para as formulações otimizadas (F1, F2, F3 e F4).



Fonte: Próprio autor, 2025.

Na região de 1750-1600 cm^{-1} (C=O de Carbonilas), bandas de absorção de carbonilas, bandas características de alongamentos C=O de ácidos carboxílicos (pectina) e ésteres (presentes em óleos e gorduras do coco babaçu e do açaí). presentes em todas as formulações. A intensidade e posição dessas bandas podem variar, sugerindo diferenças nos tipos e quantidades de carbonilas presentes.

Na região de 1600-1400 cm^{-1} (Deformação N-H e C=C), bandas de absorção de deformação angular N-H de aminas e amidas, e C=C de ligações duplas. A presença e intensidade dessas bandas podem indicar a presença de proteínas, aminoácidos e ligações insaturadas nos materiais.

Na região de 1200-1000 cm⁻¹ (C-O de éteres, álcoois e ácidos carboxílicos), bandas de absorção de C-O de éteres, álcoois e ácidos carboxílicos, características de ligações glicosídicas (pectina) e éteres (coco babaçu). A intensidade e posição dessas bandas podem variar entre as formulações, indicando diferenças nas quantidades de C-O presentes.

6 CONCLUSÃO

Este estudo desenvolveu filmes biopoliméricos utilizando pectina, mesocarpo de coco babaçu e extrato de açaí, explorando diferentes formulações. Os resultados demonstraram que a adição de açaí produz filmes com coloração, consistência, flexibilidade e aroma agradáveis.

As análises físico-químicas revelaram que as concentrações de pectina e polpa de açaí influenciam as propriedades dos biopolímeros, como umidade, solubilidade, espessura e permeabilidade. A concentração de pectina impactou principalmente o teor de umidade, enquanto a solubilidade em água foi influenciada pelas concentrações de pectina e polpa de açaí. A espessura e a permeabilidade ao vapor de água (PVA) foram mais influenciadas pela concentração de polpa de açaí.

Este estudo gerou modelos matemáticos para prever o comportamento de filmes biopoliméricos feitos de pectina, mesocarpo de coco babaçu e açaí, com base nas concentrações de seus componentes. Quatro formulações específicas foram selecionadas para análise detalhada, as análises desses filmes revelaram que a formulação F3 apresentou a menor umidade e solubilidade, a formulação F4 destacou-se pela menor espessura e permeabilidade ao vapor de água, e a maior quantidade de polpa de açaí aumentou a resistência mecânica e a rigidez dos filmes, além de ter um impacto maior nos carotenoides totais do que a pectina.

A pectina é o principal componente responsável pela absorção de água nos filmes, com o aumento da sua concentração resultando em maior tempo de equilíbrio e grau de intumescimento. A polpa de açaí, por sua vez, parece diluir a capacidade de intumescimento da pectina.

A análise de FTIR confirmou a presença e interação dos componentes (pectina, açaí e mesocarpo de coco babaçu) na estrutura dos filmes.

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que a combinação de pectina, mesocarpo de coco babaçu e polpa de açaí pode gerar biopolímeros com propriedades ajustáveis para diversas aplicações. As propriedades dos biopolímeros podem ser controladas através da variação das concentrações dos componentes, permitindo obter filmes com características específicas para diferentes finalidades.

REFERENCIAS

123RF. **Fórmula química estrutural e modelo de molécula de glicerol, ilustração 2d e 3d, isolado, vetor, eps 8.** 2023. Disponível em: <https://pt.123rf.com/photo_39711564_f%C3%B3rmula-qu%C3%A3o-ADMica-estrutural-e-modelo-de-mol%C3%A3o-cula-de-glicerol-ilustra%C3%A7%C3%A3o-2d-e-3d-isolado-vetor-eps.html>. Acesso em: 14/12/2023.

ALEXANDRINO, Taís Téo de Barros; TOSI, Milena Martelli; ASSIS, Odílio B. G. **Efeito da adição de pectina nas propriedades mecânicas e de permeação ao vapor de água de filmes a base de purê de mamão.** 2017. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/167985/1/P-Efeito-da-Adicao-de-Pectina-nas-Propriedades-....pdf>>. Acesso em: 29/11/2023.

ALMEIDA, Crislene Barbosa de. **Características estruturais e funcionais de biofilmes produzidos com zeína e óleos vegetais comestíveis.** 2010. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/3b87c9b2-1448-44f6-a204-ecd1aee46c24/content>>. Acesso em: 17/02/2025.

ARVANITOYANNIS, I.; BILIADERIA, C. G.; OGAWA, H.; KAWASAKI, N. **Biodegradable films made from low-density polyethylene (LDPE), rice starch and potato starch for food packaging applications: part. 1.** Carbohydrate Polymers, Barking, v. 36, n. 1, p. 89- 104, 1998.

BARFOD, Anders S.; HAGEN, Melanie; BORCHSENIUS, Finn. **Twenty-five years of progress in understanding pollination mechanisms in palms (Arecaceae).** 2011. Disponível em: <<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1093/aob/mcr192>>. Acesso em: 25/11/2023.

BATISTA, Camila de Cassia Rodrigues. **Obtenção de extratos da polpa de açaí.** 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/bitstream/2011/8800/1/Tese_ObtencaoExtratosPolpa.pdf>. Acesso em: 17/02/2025.

BATISTA, J. A. **Desenvolvimento, caracterização e aplicações de biofilmes a base de pectina, gelatina e ácidos graxos em bananas e sementes de brócolos.** Dissertação de Mestrado. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 137 p., 2004.

BEATRIZ, Adilson; ARAÚJO, Yara J. K.; LIMA, Dênis Pires de. **Glicerol: um breve histórico e aplicação em sínteses estereosseletivas.** 2011. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/qn/a/NqSy7HhrLpMWnMpcHHXR5Js/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 14/12/2023.

BELITZ, H. D.; GROSH, W. **Química de los Alimentos**. 2TM ed. Zaragoza: Acribia, 1997.

BELIZÓN, M. *et al. Supercritical impregnation of antioxidant mango polyphenols into a multilayer PET/PP food-grade film*. Journal of CO₂ Utilization, v. 25, p. 56–67, 2018.

BERTAN, L.C. **Desenvolvimento e caracterização de biofilmes ativos a base de polímeros de fontes renováveis e sua aplicação no acondicionamento de pães de forma**. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003, 188 p.

BRASIL, G. V.; RAPOSO, A. K.; RIBEIRO, G. A.; SANTOS, D. M.; FIRMO, W. D.; LOPES, I. A.; LUZ, D. A.; PAIXÃO, L. C.; SANTANA, A. A.; COSTA, M. C. (2022). **Incorporação de pólen de abelha Tubi (*Scaptotrigona* sp) em filmes biodegradáveis de alginato, pectina e amido**. *Research, Society and Development*.

CANTERI, Maria H. G.; MORENO, Lirian; WOSIACKI, Gilvan; SCHEER, Agnes de P. **Pectina: da Matéria-Prima ao Produto Final**. 2012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/po/a/xFQbJ6HR3QrCpL6dT9PbVrz/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 29/11/2023.

CEDRIM, Paula Cavalcante Amélio Silva; BARROS, Elenita Marinho Albuquerque; NASCIMENTO, Ticiano Gomes do. **Propriedades antioxidantes do açaí (*Euterpe oleracea*) na síndrome metabólica**. 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/bjft/a/3SgqmCfbZcVrvzKCkrqBq5n/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 29/11/2023.

CHEN, H. **Functional properties and application of edible films made of milk protein**. Journal of Dairy Science, vol.78, n. 11, p. 2.563-2583, 1995.

COMA, V.; MARTIAL GROS, A.; GARREAU, S.; COPINET, A.; SALIN, F.; DESCHAMPS, A. **Edible antimicrobial films based on chitosan matrix**. Journal of Food Science, vol. 67, n. 3, p. 1162-1169, 2002.

CORADIN, Lídio; CAMILLO, Julcélia; VIEIRA, Ima Célia Guimarães. **Especies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região Norte**.

2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade/manejo-euso-sustentavel/flora>>. Acesso em: 28/11/2024.

CUQ, Bernard; GONTARD, Nathalie; CUQ, Jean-Louis; GUILBERT, Stéphane. **Functional Properties of Myofibrillar Protein-based Biopackaging as Affected by Film Thickness.** 1996. Disponível em: <<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1996.tb13163.x>>. Acesso em: 14/12/2023.

CUTTER, C.N. Opportunities for bio-based packaging technologies to improve the quality and safety of fresh and further processed muscle foods. Meat Science, vol. 74, p. 131–142, 2006.

ELSABEE, Maher Z.; Abdou, Entsar S. **Chitosan based edible films and coatings: A review.** 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.01.010>>. Acesso em: 28/11/2024.

GALDEANO, M.C.; GROSSMANN, M.V.E.; MALI, S.; BELLO-PEREZ, L.A.; GARCIA, M.A.; ZAMUDIO-FLORES, P.B. **Effects of production process and plasticizers on stability of films and sheets of oat starch.** 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493108002269?via%3Dihub>>. Acesso em: 14/12/2023.

GARAVAND, F; MILAD, R; RAZAVI, S.H; ILARIA, C; MOHAMMADI, R. “ **Improving the integrity of natural biopolymer films used in food packaging by crosslinking approach: A review**”. International Journal of Biological Macromolecules, v. 104, p.687-707, 2017.

GENNADIOS, A.; WELLER, C.L.; TESTIN, R. F. **Modifications of physical and barrier properties of edible wheat gluten-based films.** Cereal Chemistry, v. 70, n. 4, p. 426-429, 1993

GNANASAMBANDAM, R.; PROCTOR, A. J. F. C. **Determination of pectin degree of esterification by diffuse reflectance Fourier transform infrared spectroscopy.** Food chemistry, v. 68, n. 3, p. 327-332, 2000.

GONTARD, N.; DUCHEZ, C.; CUQ, J-L.; GUILBERT, S. **Edible composite films of wheat and lipids: water vapour permeability and other physical properties.** International Journal of Food Science and Technology, v. 29, p. 39-50, 1994.

GONTARD, N.; MARCHESEAU, S.; CUQ, J-A.; GUILBERT, S. **Water vapor permeability of edible bilayer films of wheat gluten and lipids.** International Journal Food Science Technology, v. 30, p. 49-56, 1995.

GOUVEIA, T. I. A.; BIERNACKI, K.; CASTRO, M. C. R.; GONÇALVES, M. P.; SOUZA, H. K. S. (2019). **A new approach to develop biodegradable films based on thermoplastic pectin**. Food Hydrocolloids, 97, 105175.

HENDERSON, Andrew. **The genus *Euterpe* in Brazil**. In: *Euterpe edulis Martius – (Palmiteiro), Sellowia: Anais Botânicos do Herbário Barbosa Rodrigues*. 2000. Disponível em: <<https://npft.paginas.ufsc.br/files/2019/02/sellowia2000.pdf>>. Acesso em: 25/11/2023.

HORN, M. M. **Blendas e filmes de quitosana/amido: estudo da influência da adição de polióis, oxidação do amido e razão amilose/amilopectina nas suas propriedades**. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química de São Carlos – Universidade de São Paulo – São Carlos, 2012. 147 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2025. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/en/busca.html?searchword=A%C3%87A%C3%8D>>. Acesso em: 17/02/2025.

JOST, VERENA; KOBSIKA, KARIN; SCHMIDA, MARKUS; NOLLER, KLAUS. **Influence of plasticiser on the barrier, mechanical and grease resistance properties of alginate cast films**. 2014. Disponível em: <<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.096>>. Acesso em: 07/12/2023.

JÚNIOR, J. S. **Obtenção e caracterização do pó de mesocarpo de coco babaçu e de filmes de pectina adicionado de isolado proteico de soro de leite e pó de mesocarpo de coco babaçu**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Maranhão-UFMA, São Luís, 2015.

KACURAKOVA, M. et al. **FT-IR study of plant cell wall model compounds: pectic polysaccharides and hemicelluloses**. Carbohydrate polymers, v. 43, n. 2, p. 195-203, 2000.

KROCHTA, J. M. **Denaturation time and temperature affects on solubility, tensile properties, and oxygen permeability of whey protein edible films**. Journal of Food Science, v. 66, n. 5, p. 705-710, 2001.

KROCHTA, J. M.; MULDER-JOHNSTON, C. D. **Filmes de polímeros comestíveis e biodegradáveis: desafios e oportunidades**, Tecnologia de Alimentos, 51 (2). 61-74, 1997.

LANDIM, Ana Paula Miguel; BERNARDO, Cristiany Oliveira; MARTINS, Inayara Beatriz Araujo; FRANCISCO, Michele Rodrigues; SANTOS, Monique Barreto; MELO, Nathália

Ramos de. **Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil.** 2016. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/po/a/Mnh695j5cVys99xsSSx54WM/?lang=pt#>>. Acesso em: 12/09/2023.

LEÃO, D. P. et al. **Potential of pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) peels as sources of highly esterified pectins obtained by microwave assisted extraction.** Lwt, v. 87, p. 575-580, 2018.

LIMA, A. M. F.; ANDREANI, L.; SOLDI, V. **Influence of the addition of plasticizer and the crosslinking process on the morphology, water absorption and mechanical properties of sodium alginate films.** Química Nova, v. 30, p. 832-837, 2007.

LIMA, Meyrelle Figueiredo. **Estudo do comportamento do mesocarpo de coco babaçu na formação de biofilmes aditivados com compostos antioxidantes – cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*).** 2019. Disponível em: <<https://monografias.ufma.br/jspui/handle/123456789/4354>>. Acesso em: 14/12/2023.

LOPES, João Pedro Krauspenhar. **EXTRAÇÃO DE PECTINA DO LIMÃO TAHITI (*Citrus latifolia* Tanaka) PARA FORMAÇÃO DE BIOFILMES.** 2022. Disponível em: <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/30801/1/extracaopectinalimaotahiti%20.pdf>>. Acesso em: 29/11/2023.

LUZ, Glauberth Costa. **Desenvolvimento e Caracterização de Filmes Poliméricos de Alginato Contendo Extrato Bruto de Euterpe OLERACEA Martius.** 2022. Universidade Federal do Maranhão.

MALI, S.; GROSSMANN, E.; VICTÓRIA, M.; YAMASHITA, F. **Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização.** Semina: Ciências Agrárias [en línea]. 2010, 31(1), 137-155[fecha de Consulta 13 de Diciembre de 2022]. ISSN: 1676-546X. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445744095013>>. Acesso em: 17/02/2025.

MANIGLIA, B. C. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais para preparação de filmes biodegradáveis.** 2017. 323 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2017.

MELO, Pedro E.F.; SILVA, Ana Priscila M.; MARQUES, Francisco P.; RIBEIRO, Paulo R.V.; FILHO, Men de sá M. Souza; BRITO, Edy S.; LIMA, Janice R.; AZEREDO, Henriette M.C. **Antioxidant films from mango kernel components.** 2019. Disponível em: <<https://scihub.se/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.061>>. Acesso em: 14/12/2023.

MINIGHIN, Elaine Carvalho. **Composição centesimal, perfil de ácidos graxos e efeitos da digestão *in vitro* sobre o teor de minerais, compostos fenólicos e atividade antioxidant de polpas comerciais de açaí (*Euterpe oleracea Mart.*) Roxo e branco.** 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/33807/1/DissertacaoMESTRADO_ElaineCarvalhoMinighin.pdf>. Acesso em: 17/02/2025.

MOHANTY, A. K.; Misra, M.; Drzal, L. T.; Selke, S. E.; Harte, B. R.; Hinrichsen, G. **Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites: An Introduction. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites.** Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.

MONSOOR, M. A.; KALAPATHY, U.; PROCTOR, A. **Determination of polygalacturonic acid content in pectin extracts by diffuse reflectance Fourier transform infrared spectroscopy.** Food Chemistry, v. 74, n. 2, p. 233-238, 2001.

MONTERREY-QUITERO, E. S. **Caracterização físico-química de proteínas miofibrilares e elaboração de biofilmes.** 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, 1998.

MORAIS, Sângela Cruz. **PRODUÇÃO DE MUDAS DO AÇAÍEIRO CV. BRS PAI D'ÉGUA (*Euterpe oleracea Martius*) EM DIFERENTES SUBSTRATOS E DESENVOLVIMENTO INICIAL EM TERRA FIRME.** 2022. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/bitstream/handle/1884/81438/R%20-%20D%20-%20SANGELA%20CRUZ%20MORAIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 29/11/2023.

OLIVEIRA, L. M. **Ensaios para avaliação de embalagens plásticas flexíveis.** Campinas: Centro de Tecnologia de Embalagem, CETEA, p. 219, 1996.

OLIVEIRA, Maria do Socorro Padilha de; NETO, João Tomé de Farias; MATTIETTO, Rafaella de Andrade; MOCHIUTTI, Silas; CARVALHO, Ana Vânia. **AÇAÍ *Euterpe oleracea*.** 2017. Disponível em: <www.procisur.org.uy/adjuntos/procisur_acai_073.pdf>. Acesso em: 29/11/2023.

OLIVEIRA, Maria do Socorro Padilha de; OLIVEIRA, Natália Padilha de; DOMINGUES, Alessandra Ferraiolo Nogueira; MATTIETTO, Rafaella de Andrade; TEIXEIRA, davi Henrique Lima; NETO, João Tomé de Farias. ***Euterpe oleracea* e *E. precatoria*: açaí.** 2022. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1144332>>. Acesso em: 25/11/2023.

PAIXÃO, Louryval Coelho; RAPOSO, Ana Karoliny da Silva; ROCHA, Adones Almeida; BRITO, Halina Loos; LOPES, Ilmar Alves; SANTOS, Denilson Moreira; FILHO, Allan Kardec D. Barros; SANTANA, Audirene Amorim. **Biopolímeros sintetizados com mesocarpo de**

Attalea Speciosa Mart. ex Spreng e fibras. 2019. vegetais Disponível em: <<https://tedebc.ufma.br/jspui/handle/tede/3011>>. Acesso em: 07/12/2023.

PELISSARI, F. M. Produção e caracterização de filmes de amido de mandioca, quitosana e glicerol com incorporação de óleo essencial de orégano. 2009. Disponível em: <<https://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-137212/producao-e-caracterizacao-de-filmes-de-amido-de-mandioca-quitosana-e-glicerol-com-incorporacao-de-oleo-essencial-de-oregano>>. Acesso em: 14/12/2023.

PÉREZ-GAG; KROCHTA, J. M. Denaturation time and temperature affects on solubility, tensile properties, and oxygen permeability of whey protein edible films. Journal of Food Science, v. 66, n. 5, p. 705-710, 2001.

RÊGO, Thalles Rafael Silva. Obtenção e desenvolvimento de biofilmes de PHB visando aplicação em tratamento de queimaduras. 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/47484/1/TCC_THALLES-R-S-R%c3%8aGO.pdf>. Acesso em: 17/02/2025.

RINDLAV-WESTLING, A.; STADING, M.; HERMANSSON, A.; GATENHOLM, P. Structure, mechanical and barrier properties of amylose and amylopectin films. 1998. Disponível em: <[https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(98\)00025-3](https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/S0144-8617(98)00025-3)>. Acesso em: 14/12/2023.

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. Planejamento de experimentos e otimização de processos. 3º ed. Campinas – SP: Casa do espirito amigo fraternidade fé e amor. 2014.

ROJAS, I.M. Efecto del tipo y contenido de aceites esenciales sobre las propiedades mecánicas y barrera de películas comestibles basadas em zeína. Trabajo Fin de Carrera (Ingeniero Agrícola en Industrias Agrarias y Alimentarias) – Departamento de Química Aplicada – Universidad Publica de Navarra, 2010. 171 p.

Rural Pecuária. Embrapa disponibiliza Sistema de Produção do Açaizeiro para Amazônia Ocidental. Disponível em: <<https://ruralpecuaria.com.br/tecnologia-e-manejo/livros-e-informativos/embrapa-disponibiliza-sistema-de-producao-do-acaizeiro-para-amazonia-ocidental.html>>. Acesso em: 29/11/2023.

SANTANA, A. A.; KIECKBUSCH, T. G. Physical evaluation of biodegradable films of calcium alginate plasticized with polyols, Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 30, p. 835 – 845, 2013.

SCHAFFER, Daiane. **Obtenção e caracterização de biopolímeros a partir de fécula de mandioca e amido de milho.** 2020. Disponível em: <[>. Acesso em: 28/11/2024.](https://www.univates.br/bduserver/api/core/bitstreams/3535dae1-0b36-47cc-882f-6041c86f4a8c/content#:~:text=Os%20biopol%C3%ADmeros%20%C3%A0%20base%20de,et%20al.%2C%202015))

SEIXAS, Fernanda Lini. **Extração de pectina das cascas de maracujá amarelo (passiflora edulis f. Flavicarpa) e aplicação na confecção de biofilmes compostos.** 2011. Disponível em: <[>. Acesso em: 17/02/2025.](http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/3764/1/000185047.pdf)

SiBBr. **Catálogo Taxonômico da Fauna do Brasil e Lista da Flora do Brasil 2020.** Disponível em: <[>. Acesso em: 25/11/2023.](https://ala-hub.sibbr.gov.br/ala-hub/occurrences/search?q=lsid:195655#tab_mapView)

SILVA, D.C.; SILVA, L.J.S.; SANTANA, A.A.; LOPES, I.A. **FILMES DE PECTINA INCORPORADO DE MESOCARPO DE COCO BABAÇU.** 2016. Disponível em: <[>. Acesso em: 07/12/2023.](https://proceedings.science/proceedings/44/_papers/38413/download/fulltext_file3)

SILVA, João Gabriel Moreira da. **Elaboração e caracterização de biopolímeros de alginato e mesocarpo de coco babaçu contendo Curcuma longa L.** 2022. Disponível em: <[>. Acesso em: 14/12/2023.](https://monografias.ufma.br/jspui/handle/123456789/5173)

SILVA, Nohana de Carvalho. **Avaliação sensorial de biscoito tipo cookie contendo farinha do mesocarpo de babaçu.** 2014. Disponível em: <[>. Acesso em: 14/12/2023.](https://monografias.ufma.br/jspui/bitstream/123456789/164/1/TCC%20de%20Nohana%20de%20Carvalho%20Silva.pdf)

SILVA, Viviane Dias Medeiros; OLIVEIRA, Gabriella Roberta Silva; REIS, Milene da Costa; CORREIA, Vinícius Tadeus da Veiga; RAMOS, Ana Luiza Coeli Cruz; NUNES, Bruna Vieira; MELO, Angelita Cristine de; MELO, Júlio Onésio Ferreira. **Filmes e revestimentos comestíveis: Conceito, biopolímeros, métodos de preparo e aplicações em alimentos.** 2022. Disponível em: <[>. Acesso em: 28/11/2024.](https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/221211395.pdf)

SOBRAL, P. J. do A.; OCUNO, D. **Permeabilidade ao vapor de água de biofilmes à base de proteínas miofibrilares de carne.** Brazilian Journal of Food Technology, vol. 3, n. 3, p. 11-16, 2000.

SOOD, A.; SAINI, C. S. **Red pomelo peel pectin based edible composite films: effect of pectin incorporation on mechanical, structural, morphological and thermal properties of composite films.** Food Hydrocolloids, 123, 107135, 2022.

SOUSA, A. L. N. et al. **Modificação química da pectina do melão caipira (*Cucumis melo var. Acidulus*).** Química Nova, v. 40, p. 554-560, 2017.

STEVENS, Malcolm P. **Polymer Additives.** 1993. Disponível em: <<https://scihub.se/https://doi.org/10.1021/ed070p444>>. Acesso em: 14/12/2023.

SYNYTSYA, A. et al. **Fourier transform Raman and infrared spectroscopy of pectins.** Carbohydrate polymers, v. 54, n. 1, p. 97-106, 2003.

TOSATI J. V. **Determinação da taxa de respiração de tomate cereja e da permeabilidade à gás de filme comestível a base de hidroxipropilmelcelulose (HPMC).** Dissertação de Mestrado. 2013.

VIÉGAS, Larissa Paiva. **Preparação e Caracterização de Filmes Biodegradáveis a Partir de Amido com Quitosana para Aplicação em Embalagens de Alimentos.** 2016. Disponível em: <<https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Disserta%C3%A7%C3%A3o-Vers%C3%A3o-Press%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 12/09/2023.

VIEIRA, Abadio Hermes; RAMALHO, André Rostand; NETO, Calixto Rosa; CARARO, Denis Cesar; COSTA, José Nilton Medeiros; JÚNIOR, José Roberto Vieira; WADT, Paulo Guilherme Salvador; SOUZA, Victor Ferreira de. **Cultivo do Açaizeiro (*Euterpe oleracea Martius*) no Noroeste do Brasil.** 2018. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/189148/1/Sistema-de-producao-Acai-2018.pdf>>. Acesso em: 29/11/2023.

WEBER, Claus. J. **Biobased Packaging Materials for the Food Industry: Status And Perspectives.** 2000. Disponível em: <[http://www.biodeg.net/fichiers/Book%20on%20biopolymers%20\(Eng\).pdf](http://www.biodeg.net/fichiers/Book%20on%20biopolymers%20(Eng).pdf)>. Acesso em: 12/09/2023.

WIELECOSELES, Rodrigo. **Biopolímeros e biodegradabilidade de embalagens.** 2019. Disponível em: <<https://bioquimicabrasil.com/2019/07/14/biopolimeros-e-biodegradabilidade-de-embalagens/>>. Acesso em: 28/11/2024.

ZAGHDOUDI, K.; PONTVIANNE, S.; FRAMBOISIER, X.; ACHARD, M.; KUDAIBERGENOVA, R.; AYADI-TRABELSI, M.; KALTHOUM-CHERIF, J.; VANDERESSE, R.; FROCHOT, C.; GUIAVARC'H, Y. **Accelerated solvent extraction of carotenoids from: Tunisian Kaki (*Diospyros kaki* L.), peach (*Prunus persica* L.) and apricot (*Prunus armeniaca* L.).** Food Chemistry, v. 184, p. 131-139, 2015.

ZAMBRANA, Narel Y. Paniagua; BYG, Anja; SVENNING, Jens-Christian; MORAES, Monica; GRANDEZ, Cesar; BALSLEV, Henrik. **Diversity of palm uses in the western Amazon.** 2007. Disponível em: <<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1007/s10531-007-9218-y>>. Acesso em: 25/11/2023.

ZANELLA, K.; TARANTO, O. P. **Influence of the drying operating conditions on the chemical characteristics of the citric acid extracted pectins from 'pera'sweet orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) albedo and flavedo.** Journal of Food Engineering, v.166, p.111-118, 2015.