



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA – UESB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA E CIÊNCIA DE ALIMENTOS



Área de Concentração: Engenharia de Alimentos e Ciência de Alimentos

DIONEIRE AMPARO DOS ANJOS

FILMES E REVESTIMENTOS A BASE DE AMIDO DE BANANA-DA-TERRA (*MUSA PARADISIACA* L.) VERDE COM ÓLEO ESSENCIAL DE CAPIM-CIDREIRA (*CYMBOPOGON CITRATUS*) PARA APLICAÇÃO EM UMBU GIGANTE (*SPONDIAS TUBEROSA* ARR. CÂMARA)

ITAPETINGA
BAHIA - BRASIL
2024

DIONEIRE AMPARO DOS ANJOS

FILMES E REVESTIMENTOS A BASE DE AMIDO DE BANANA-DATERRA (*MUSA PARADISIACA* L.) VERDE COM ÓLEO ESSENCIAL DE CAPIM-CIDREIRA (*CYMBOPOGON CITRATUS*) PARA APLICAÇÃO EM UMBU GIGANTE (*SPONDIAS TUBEROSA* ARR. CÂMARA)

Tese apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como requisito para obtenção do título de Doutora em Ciência de Alimentos, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cristiane Martins Veloso

Co-orientadores:

Prof.^a Dr.^a Renata Cristina Ferreira Bonomo

Prof. Dr. Leandro Soares Santos

Prof.^a Dr.^a Márcia Elena Zanuto

**ITAPETINGA
BAHIA - BRASIL
2024**

668.43 Anjos, Dioneire Amparo dos.
A619f Filmes e revestimentos a base de amido de banana-da-terra (musa paradisíaca l.) verde com óleo essencial de capim-cidreira (*cymbopogon citratus*) para aplicação em umbu gigante (*spondias tuberosa* arr. câmara). / Dioneire Amparo dos Anjos. – Itapetinga-BA: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 2024.
105 p.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos. Sob a orientação da Prof^a. D.Sc. Cristiane Martins Veloso e coorientação dos Profs. D.Sc. Renata Cristina Ferreira Bonomo; D.Sc. Leandro Soares Santos; D.Sc. Márcia Elena Zanuto.

1. Embalagens ativas – Alimentos – Filme antioxidante. 2. Biopolímeros – Produção industrial – Embalagens. 3. Produção de bioplástico – Amido de banana-da-terra verde – Óleo essencial de capim-cidreira. 4. Umbu-gigante – Embalagem sustentável – Qualidade dos frutos. I. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - Programa de Pós-Graduação de Doutorado em Engenharia e Ciências de Alimentos, *Campus* de Itapetinga. II. Veloso, Cristiane Martins. III. Bonomo, Renata Cristina Ferreira. IV. Santos, Leandro Soares. V. Zanuto, Márcia Elena. VI. Título.

CDD(21): 668.43

Catálogo na Fonte:

Cláudia Aparecida de Souza – CRB 1014-5ª Região
Bibliotecária – UESB – Campus de Itapetinga-BA

Índice Sistemático para desdobramentos por Assunto:

1. Embalagens ativas
2. Filme antioxidante
3. Biopolímeros
4. Produção de bioplástico
5. Amido de banana-da-terra verde
6. Óleo essencial de capim-cidreira
7. Umbu-gigante

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO


Título: “DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES E REVESTIMENTOS A BASE DE AMIDO DE BANANA-DA-TERRA (*MUSA PARADISIACA* L.) VERDE COM ÓLEO ESSENCIAL DE CAPIM-CIDREIRA (*CYMBOPOGON CITRATUS*) PARA APLICAÇÃO EM UMBU GIGANTE (*SPONDIAS TUBEROSA* ARR. CÂMARA.”

Autor (a): DIONEIRE AMPARO DOS ANJOS


Orientador (a): Prof.^a Dr.^a Cristiane Martins Veloso

Coorientador (a):


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de **DOUTORA EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE ALIMENTOS, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CIÊNCIA DE ALIMENTOS**, pela Banca Examinadora.

Documento assinado digitalmente
 **ELIA KARINA DE CARVALHO COSTA MOREIRA**
Data: 19/12/2024 17:06:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof.^a Dr.^a Elia Karina de Carvalho
Costa Moreira
(IFBAIANO)

Documento assinado digitalmente
 **NORMANE MIRELE CHAVES DA SILVA**
Data: 19/12/2024 17:58:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Normane Mirele Chaves da
Silva
(IFBAIANO)

Documento assinado digitalmente
 **LEANDRO SOARES SANTOS**
Data: 01/01/2025 22:10:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leandro Soares Santos
(UESB)

Documento assinado digitalmente
 **CASSIARA CAMELO ELOI DE SOUZA**
Data: 23/12/2024 07:18:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Cassiara Camelo Eloi de Souza
(UFBA)

Documento assinado digitalmente
 **CRISTIANE MARTINS VELOSO**
Data: 06/01/2025 15:04:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Cristiane Martins Veloso
Orientadora - UESB
Presidente da Banca

Itapetinga-BA, 18 de dezembro de 2024.

Aos meus pais,
Aroaldo e Dulcy (*in memoriam*),
que me aceitaram e me presentaram com a vida!

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, pelo dom da vida, pela força e resiliência que me permitiram chegar ao final desta etapa.

Aos meus pais (*in memoriam*), por tudo que sou e por todos os valores que me guiaram até aqui. A saudade e o amor são a força que me impulsiona.

Aos meus filhos, aqueles que vieram de mim (Pedro, Ana Luisa e João), aqueles que me fizeram mãe antes mesmo de eu o ser (Morena e Filipe) e aqueles que vieram se achegando (Thamyres e Igor), que entenderam minha ausência e souberam transmitir muito amor, carinho e paciência.

Aos meus netos, Arthur Miro, Miguel, Bento e Caetano, o futuro que já é presente. Vocês vieram para me ensinar uma nova dimensão do amor.

À minhas irmãs e irmãos, pelo carinho, incentivo e por sempre torcerem pela realização deste trabalho.

A Miro, pelo incentivo e apoio para que eu concluísse mais essa etapa.

A Dido, por sempre ter sido mais que uma sogra, minha segunda mãe.

Às minhas norinhas (Ru e Nanda), por estarem sempre desejando o meu bem e sucesso.

Aos amigos e demais familiares que, cada qual na sua torcida e carinho foram, essenciais para essa caminhada.

À minha querida orientadora, professora Cristiane Martins Veloso, exemplo de profissional e pessoa que admiro muito. Sou grata pela orientação, ensinamentos, paciência, compreensão e amizade durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Obrigada por não ter desistido de mim!

Aos meus coorientadores, professores Renata Bonomo, Leandro Soares e Márcia Zanuto pelas contribuições que enriqueceram o trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos (PPGECAL), pelos ensinamentos e conhecimentos compartilhados.

Ao professor Alcebiades Rebouças São José (Bide), por disponibilizar a estrutura e equipamentos da Biofábrica (UESB) para a realização de parte da pesquisa.

Aos membros da Banca de Qualificação e de Defesa, professores Cassiara Camelo Eloi de Souza, Leandro Soares Santos, Normane Mirele Chaves da Silva, Renata Cristina Ferreira Bonomo e Elia Karina de Carvalho Costa Moreira pela disponibilidade em avaliar o trabalho e pelas valiosas sugestões.

Aos amigos do Laboratório de Química III, Matheus, Jaqueline, Gabriela, Maiara, Maria José, Sara, Gabriel, Emilly, Carlos e Leonardo, pelo convívio, trabalho pesado compartilhado, momentos de descontração, disponibilidade e por toda parceria. Levarei a amizade e as lições de cada um para a vida toda!

À amiga Bruna, pela parceria, cumplicidade, carinho e cuidado. Sua amizade e incentivo constante foram fundamentais nesse processo. Não teria conseguido sem você!

Às amigas Márcia e Cassiara, que me acolheram no grupo de pesquisa e me incentivaram a fazer esse curso. Obrigada pela força, apoio, carinho e conselhos. A amizade de vocês me encorajou a seguir.

À Eduardo Bruno, pela amizade e parceria que começou antes do curso e por toda disponibilidade em me ajudar durante todo o processo e, principalmente, quando meu tempo já era crítico.

À Tayse, por me apresentar a rotina do Laboratório de Microbiologia (IMS/UFBA), ajudar nas análises de última hora, e ainda me fazer encantar por esse tipo de análise.

À Juliano Amaral e Paulinne Lima (Laboratório de Inovação em Bioativos e Desenvolvimento Tecnológico – LIBiTec, IMS/UFBA) pela assistência nas análises de caracterização das emulsões.

Ao produtor rural Abmário Ribas (Zé de Lé), pela disponibilização do seu tempo e dos frutos de umbu gigante utilizados nesta pesquisa.

À Universidade Federal da Bahia (UFBA), por meio do Instituto Multidisciplinar em Saúde (IMS), pela concessão do meu afastamento que permitiu dedicação exclusiva ao doutorado. Em especial à amiga Tiana Baqueiro, Coordenadora Acadêmica e Vice-Diretora, cuja compreensão e cooperação foram essenciais para a continuidade e bom andamento da minha pesquisa.

Aos amigos da UFBA, em especial ao CULUNDRIA, por todo apoio e torcida sempre.

À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), pela oportunidade e disponibilização de estrutura para a realização deste doutorado.

À Jamile, secretária do PPGEAL, pela disponibilidade e prontidão em sempre resolver as demandas administrativas.

O caminho que conduziu a esta Tese só foi possível de ser percorrido com a ajuda de muitos que se fizeram essenciais nessa jornada. Meu sincero agradecimento a todos que, direta ou indiretamente fizeram parte desta conquista.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	
1	INTRODUÇÃO 16
2	OBJETIVOS 18
2.1	Objetivo Geral 18
2.2	Objetivos específicos 18
3	REVISÃO DE LITERATURA 19
3.1	Bioplásticos 19
3.1.1	Filmes e revestimentos 21
3.2	Bioplásticos à base de amido 22
3.3	Processo de formação dos bioplásticos 26
3.4	Embalagens ativas para alimentos 28
3.4.1	Óleos essenciais 28
3.4.1.1	<i>Óleo essencial de capim-cidreira (Cymbopogon citratus)</i> 30
3.5	Umbu gigante (<i>Spondias tuberosa</i> Arruda Câmara) 34
3.5.1	Perdas pós-colheita do Umbu gigante 37
3.5.1.1	<i>Aplicação de revestimentos comestíveis para conservação de frutas</i> 38
	REFERÊNCIAS 39
 CAPÍTULO 2	
	ARTIGO 1 - Development of biodegradable and active films based on green plantain starch using an emulsion of lemongrass essential oil 54
	ABSTRACT 54
1	INTRODUCTION 55
2	MATERIALS AND METHODS 57
2.1	Materials 57
2.2	Starch extraction 58
2.3	Preparation and characterization of emulsions 58
2.4	Film production 58
2.5	Film characterization 59
2.5.1	Thickness 59
2.5.2	Water vapour solubility (WVP) 59
2.5.3	Water solubility (S) 60
2.5.4	Mechanical properties 60
2.5.5	Biodegradability analysis 60
2.5.6	Morphological analysis 60
2.5.7	Antioxidant capacity 61

2.6	Statistical analysis	61
3	RESULTS AND DISCUSSION	61
3.1	Barrier properties of film	61
3.2	Mechanical properties	64
3.3	Biodegradability	66
3.4	Scanning electron microscopy (SEM) analysis	67
3.5	Antioxidant capacity of films	69
4	CONCLUSION	71
	REFERENCES	72

CAPÍTULO 3

	ARTIGO 2 - Edible coatings based on green plantain starch with lemon grass essential oil improved postharvest preservation of giant umbu	79
	Abstract	79
1	Introduction	79
2	Materials and methods	82
2.1	<i>Materials</i>	82
2.2	<i>Starch extraction</i>	83
2.3	<i>Preparation of lemongrass essential oil emulsion</i>	83
2.4	<i>Production of edible coatings</i>	84
2.4.1	<i>Coating of giant umbu fruits</i>	84
2.5	<i>Determination of post-harvest quality parameters</i>	85
2.6	<i>Statistical analysis</i>	87
3	Results and discussion	88
3.1	<i>Loss of mass and firmness</i>	88
3.2	<i>Color of peel and pulp</i>	91
3.3	<i>Hydrogen ion activity (pH), soluble solids (SS) and titrable acidity (AT)</i>	93
3.4	<i>Ascorbic acid</i>	97
4	Conclusion	97
	References	98

LISTA DE FIGURAS

REVISÃO DE LITERATURA

Figura 1. Classificação dos biopolímeros.....	20
Figura 2. Estrutura da amilose (a) e da amilopectina (b).....	23
Figura 3. Efeitos da fonte de amido, origem botânica e condições ambientais nas características dos filmes à base de amido.....	23
Figura 4. Estádio verde de maturação verde da banana-da-terra (<i>Musa paradisiaca</i> L.)	25
Figura 5. Etapas do processamento térmico e retrogradação do amido.....	26
Figura 6. Mecanismo de atuação dos óleos essenciais nas células.....	29
Figura 7. Componentes bioativos presentes no óleo essencial de capim-cidreira.....	31
Figura 8. Umbuzeiro (<i>Spondias tuberosa</i> Arruda Câmara)	35
Figura 9. Proposta de classificação do tamanho de umbu para comercialização com base na massa de frutos do acesso de BRS-68 (EPAMIG-C01). Cinco classes (A); três classes (B.)	36

ARTIGO 1

Figure 1. Degradability residues of green plantain (<i>Musa Paradisiaca</i> L.) starch films with emulsions containing different concentrations of lemongrass essential oil	67
Figure 2. Micrographs of green plantain (<i>Musa Paradisiaca</i> L.) starch obtained by SEM at (a) 100x (100 µm scale), (b) 500x (50 µm scale), and (c) 2500x (10 µm scale) magnification	67
Figura 3. Micrographs of surfaces (S), at magnification of 1000x (10 µm scale), and fractures (F), at magnification of 3000x (5 µm scale), of green plantain (<i>Musa Paradisiaca</i> L.) starch films without emulsion (SE) and with different concentrations of essential oil (0%EO, 0.4%EO, 0.6%EO, 0.8%EO and 1.0%(EO) obtained by SEM	69
Figure 4. Free radical scavenging capacity of green plantain (<i>Musa Paradisiaca</i> L.) starch films with emulsions containing different concentrations of lemongrass essential oil	70

ARTIGO 2

Fig 1. Giant umbu in the “full” or “swollen” ripening stage.....	83
Fig 2. Coated Giant umbu fruits (<i>Spondias tuberosa</i> Arr. Cam.)	85

Fig. 3. Weight loss of giant umbu over the storage period under different treatments: NC – no coating; SE – without emulsion; EO0 – with emulsion and no essential oil; EO0.8 – with 0.8% essential oil 90

Fig. 4. Hue angle of the peel ($^{\circ}h_C$) of giant umbu fruits over storage time for the treatments: SR – without coating; OE0 – with emulsion and no essential oil; OE0.8 – with 0.8% essential oil..... 93

Fig. 5. Soluble solids content (SS) of giant umbu over storage time for the treatments: SR – without coating; SE – without emulsion; OE0.8 – with 0.8% essential oil96

LISTA DE TABELAS

REVISÃO DE LITERATURA

Tabela 1. Uso de óleo essencial de capim-cidreira (<i>Cymbopogon citratus</i>) como aditivos em matrizes poliméricas.....	31
--	----

ARTIGO 1

Table 1. Thickness, water vapor permeability (WVP), and solubility (S) of green plantain starch films incorporated with different concentrations of lemongrass essential oil (EO). SE – without emulsion; 0%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, and 1% EO – films with different essential oil concentrations.....	62
---	----

Table 2. Average diameter and size distribution of microcapsules of emulsions with 0%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% EO	62
--	----

Table 3. Tensile strength, elongation at break, and Young's modulus of green plantain starch films incorporated with different levels of lemongrass essential oil. SE – no emulsion; 0%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, and 1% EO – Films with different concentrations of essential oil.....	65
---	----

Table 4. Summary of analysis of variance and coefficient of variation (CV) of DPPH of green plantain (<i>Musa Paradisiaca</i> L.) starch films with emulsions containing different concentrations of lemongrass essential oil	70
---	----

ARTIGO 2

Table 1. Mean and standard deviation of weight loss (MSS), peel firmness (FIRC), and pulp firmness (FIRP) of giant umbu fruits during refrigerated storage under different treatments: NC – no coating; SE – without emulsion; EO0 – with emulsion and no essential oil; EO0.8 – with 0.8% essential oil	89
---	----

Table 2. Mean and standard deviation of peel chromaticity (CROC), peel hue angle ($^{\circ}$ hC), pulp chromaticity (CROP), and pulp hue angle ($^{\circ}$ hP) of giant umbu fruits over refrigerated storage time subjected to different treatments: SR – without coating; SE – without emulsion; OE0 – with emulsion and no essential oil; OE0.8 – with 0.8% essential oil	91
---	----

Table 3. Mean and standard deviation of pH (hydrogen ion activity), soluble solids content (SS), titratable acidity (AT), and ascorbic acid content of giant umbu fruits over refrigerated	
---	--

storage time subjected to different treatments: SR – no coating; SE – without emulsion; OE0 – with emulsion and no essential oil; OE0.8 – with 0.8% essential oil 94

RESUMO

ANJOS, Dioneire Amparo dos. **Filmes e revestimentos a base de amido de banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L.) verde com óleo essencial de capim-cidreira (*Cymbopogon citratus*) para aplicação em umbu gigante (*Spondias tuberosa* arr. Câmara).** Itapetinga, BA: UESB, 2025. 105p. Tese. (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de Concentração em Ciência de Alimentos). *

A crescente demanda por embalagens sustentáveis e a preocupação ambiental sobre o uso de polímeros sintéticos têm impulsionado o desenvolvimento de bioplásticos, especialmente na forma de filmes e revestimentos comestíveis, como alternativas promissoras na conservação de alimentos frescos. Neste contexto, o uso de filmes e revestimentos à base de amido desponta como uma solução sustentável devido à sua biodegradabilidade, abundância e propriedades favoráveis para formação de filmes. Neste estudo foi avaliado o efeito da incorporação de emulsão de óleo essencial de capim-cidreira (OEC) em filmes e revestimentos à base de amido de banana-da-terra verde, visando aprimorar suas propriedades funcionais para aplicações como embalagens ativas e sustentáveis e na preservação da qualidade pós-colheita de frutos de umbu gigante (*Spondias tuberosa* Arr. Câmara), um fruto tropical climatérico de alta perecibilidade. Para elaboração dos filmes e revestimentos foram preparadas formulações com diferentes concentrações de OEC (0; 0,4; 0,6; 0,8 e 1,0%) utilizando a técnica de casting. As análises empregadas para avaliar as propriedades físicas, de barreira e ativas dos filmes foram: espessura, permeabilidade ao vapor de água (PVA), solubilidade em água, ensaios mecânicos, morfologia, biodegradabilidade e atividade antioxidante. Os frutos foram revestidos com as soluções filmogênicas por imersão e armazenados em ambiente sob refrigeração à 12 ± 2 °C durante o período de 9 dias. Avaliou-se os parâmetros de qualidade: perda de massa, firmeza, cor, pH, teor de sólidos solúveis, acidez titulável e teor de ácido ascórbico, durante o período de armazenamento. Os resultados demonstraram que a adição de OEC aumentou o alongamento na ruptura dos filmes de 53,82% para 72,82% nas concentrações de 0 e 0,4%, respectivamente, indicando maior flexibilidade dos filmes. Não foi observado impacto significativo na permeabilidade ao vapor de água (variando de 0,30 a 0,34 g água.mm.dia⁻¹.m⁻².kPa⁻¹), solubilidade (entre 14,39% e 15,54%) ou espessura, embora tenha sido observado ligeira redução na PVA em comparação ao controle, juntamente com diminuição da resistência à tração. Os filmes foram completamente biodegradados em 15 dias, reforçando o potencial ecológico do material. Filmes com 0,8% e 1,0% de OEC apresentaram maior atividade antioxidante, atingindo valores próximos a 65% ao final do período de avaliação. Na aplicação como revestimentos comestíveis, a formulação com 0,8% de óleo essencial resultou na menor perda de peso (3,98%) e maior preservação da firmeza da polpa (redução de 27,99%) e cor da casca, além de níveis mais estáveis de pH e ácido ascórbico. A temperatura de 12°C apresentou efeitos negativos sobre a firmeza, indicando possível injúria pelo frio. Os resultados indicam que a incorporação de emulsões de óleo essencial de capim-cidreira conferiu propriedades bioativas sem afetar significativamente as propriedades mecânicas e de barreira dos filmes. Os revestimentos comestíveis enriquecidos com óleo essencial de capim-cidreira demonstraram potencial para manter a qualidade dos frutos, estender a vida útil do umbu gigante e oferecer uma abordagem sustentável e ecologicamente correta para o manejo pós-colheita, constituindo uma alternativa viável aos plásticos convencionais com aplicações promissoras na preservação de alimentos.

Palavras-chave: Biopolímero, Compostos bioativos, Embalagem biodegradável, Tecnologia pós-colheita, *Spondias tuberosa*

* Orientadora: Dr.^a Cristiane Martins Veloso, UESB

ABSTRACT

The growing demand for sustainable packaging and environmental concerns about the use of synthetic polymers have driven the development of bioplastics, especially in the form of edible films and coatings, as promising alternatives for fresh food preservation. In this context, the use of starch-based films and coatings emerges as a sustainable solution due to their biodegradability, abundance, and favorable properties for film formation. This study evaluated the effect of incorporating lemongrass essential oil (LEO) emulsion into green plantain starch-based films and coatings, aiming to enhance their functional properties for applications as active and sustainable packaging and in the preservation of the post-harvest quality of giant umbu fruits (*Spondias tuberosa* Arr. Câmara), a climacteric tropical fruit with high perishability. For film and coating preparation, formulations with different LEO concentrations (0, 0.4, 0.6, 0.8, and 1.0%) were prepared using the casting technique. The thickness, water vapor permeability (WVP), water solubility, mechanical properties, morphology, biodegradability, and antioxidant activity of the films were evaluated to determine their physical, barrier, and active properties. The fruits were coated with filmogenic solutions by immersion and stored under refrigeration at 12 ± 2 °C for 9 days. Quality parameters, including weight loss, firmness, color, pH, soluble solids content, titratable acidity, and ascorbic acid content, were evaluated during the storage period. The results demonstrated that the addition of LEO increased the elongation at break of the films from 53.82% to 72.82% at concentrations of 0 and 0.4%, respectively, indicating greater film flexibility. No significant impact was observed on water vapor permeability (0.30 - 0.34 g water.mm. day⁻¹.m⁻².kPa⁻¹), solubility (between 14.39% and 15.54%), or thickness, although a slight reduction in WVP was noted compared to the control, along with a decrease in tensile strength. The films were completely biodegraded within 15 d, reinforcing the ecological potential of this material. Films with 0.8% and 1.0% LEO exhibited higher antioxidant activity, reaching values close to 65% by the end of the evaluation period. In edible coating applications, the formulation with 0.8% essential oil resulted in the lowest weight loss (3.98%) and greater preservation of pulp firmness (27.99% reduction) and peel color, as well as more stable pH and ascorbic acid levels. The temperature of 12°C showed negative effects on firmness, indicating possible chilling injury. The results indicate that the incorporation of lemongrass essential oil emulsions conferred bioactive properties without significantly affecting the mechanical and barrier properties of the films. Edible coatings enriched with lemongrass essential oil demonstrated potential to maintain fruit quality, extend the shelf life of giant umbu, and offer a sustainable and environmentally friendly approach for post-harvest management, constituting a viable alternative to conventional plastics with promising applications in food preservation.

Key-words: Biopolymer, Bioactive compounds, Biodegradable packaging, Postharvest technology, *Spondias tuberosa*

CAPÍTULO 1

Introdução Geral

Objetivos

Revisão de Literatura

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional leva a um aumento considerável na geração de resíduos sólidos urbanos, sendo grande parte desses resíduos constituída por embalagens plásticas sintéticas. Isso resulta em grandes preocupações relacionadas ao descarte inadequado e aos sérios problemas ambientais ocasionados, resultando na poluição de ecossistemas terrestres e marinhos (Mazhandu *et al.*, 2020).

Por essa razão, nas últimas décadas houve um crescente interesse da comunidade científica no desenvolvimento de embalagens que sejam elaborados por processos sustentáveis, utilizando materiais de fontes biológicas, renováveis e comestíveis como polissacarídeos, lipídios e proteínas, que melhorem a qualidade dos alimentos e proporcionem segurança alimentar (Coppola *et al.*, 2021; Han, 2014).

O amido se destaca como um material potencial para esse uso, por ser uma matéria-prima abundante, comestível, biodegradável, não tóxica e de baixo custo de comercialização. A exploração de fontes não convencionais de amido tem ganhado atenção como estratégia para obtenção desse polissacarídeo, especialmente considerando produtos agrícolas que, embora estejam em boas condições para consumo não atendem aos padrões comerciais exigidos para comercialização. A utilização dessas fontes não apenas diversifica as matérias-primas disponíveis para a produção de bioplásticos, mas também contribui para a redução da pressão sobre as culturas convencionais, que frequentemente enfrentam desafios relacionados à demanda crescente e à competição por terras agrícolas (Gonçalves *et al.*, 2024).

Um exemplo nesse contexto é a banana-da-terra verde, que apresenta elevados teores de amido e pode ser aproveitada para a produção de bioplásticos, contribuindo para redução do desperdício alimentar (Moreno-Zaragoza; Rosell; Bello-Pérez, 2025). A espécie *Musa paradisiaca* L., conhecida popularmente como banana-da-terra, caracteriza-se por acumular grande quantidade de amido. No estágio de maturação verde, o conteúdo de amido é elevado, variando de 70 a 80% em peso seco, com teor de amilose em torno de 30 a 40%, dependendo da variedade. Outra fração importante é o amido resistente, que resiste à hidrólise enzimática e está presente em quantidade elevada, variando de 47 a 57%. A estrutura do amido resistente contribui para a formação de uma rede polimérica mais estável nos filmes, o que pode resultar em uma melhor resistência mecânica e flexibilidade (Orsuwan; Sothornvit, 2017; Li *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2022). Entretanto, o amido nativo possui algumas características que limitam sua utilização em algumas aplicações, a exemplo da natureza hidrofílica e fragilidade mecânica.

Para melhorar essas características, produtos como plastificantes, surfactantes ou outros materiais podem ser adicionados (Yaashikaa *et al.*, 2023).

A incorporação de óleos essenciais em matrizes de amido pode melhorar as propriedades de barreira e mecânicas dos materiais de embalagem. Além disso, quando são incorporados em revestimentos para conservação pós-colheita de frutas e vegetais, conferem propriedades antimicrobianas e antioxidantes (Devi *et al.*, 2024). Entre os óleos essenciais, o óleo de capim-cidreira (*Cymbopogon citratus*) destaca-se por sua composição rica em citral, um composto que tem comprovada eficácia antimicrobiana contra uma variedade de microrganismos, incluindo bactérias, leveduras e fungos (Faheem *et al.*, 2022; Valkova *et al.*, 2022). Devido à essas propriedades os filmes e revestimentos de amido com incorporação de óleo essencial podem colaborar com a manutenção da qualidade dos frutos e reduzir as perdas pós-colheitas (superior a 30%). Estas perdas são atribuídas a vários fatores, incluindo mudanças fisiológicas que ocorrem após a colheita, danos mecânicos durante o manuseio e transporte e condições climáticas desfavoráveis que afetam o armazenamento. Além disso, infestações por pragas podem contribuir significativamente para essas perdas (Al-Tayyar *et al.*, 2020; Janghu *et al.*, 2024).

Um destes frutos que demandam a aplicação de técnicas de conservação pós-colheita é o Umbu gigante, um fruto proveniente de acessos de umbuzeiros que produzem frutos maiores em comparação aos frutos nativos, com peso médio acima de 75 g (Donato *et al.*, 2024). O umbu apresenta rápido amadurecimento e deterioração após a colheita, completando o processo em 2-3 dias em temperatura ambiente, devido ao seu metabolismo fisiológico rápido e alta taxa respiratória, o que dificulta sua conservação e comercialização por períodos prolongados (Lima *et al.*, 2018; Moura *et al.*, 2013; Teodosio *et al.*, 2021). A variabilidade genética e a composição bioquímica da fruta, incluindo altos níveis de açúcares, acidez e compostos fenólicos, contribuem para sua rápida deterioração (Lima; Castricini, 2019).

Com base nesses achados, o desenvolvimento de bioplásticos naturais e funcionais, como os baseados em biopolímeros, se apresentam como uma alternativa inovadora e ecologicamente sustentável para promover a manutenção da qualidade pós-colheita de frutos frescos e prolongar sua vida útil de prateleira.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver e caracterizar bioplásticos à base de amido de banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L.) verde com diferentes concentrações de óleo essencial de capim cidreira (*Cymbopogon citratus*), avaliando sua aplicação como revestimento comestível e seus efeitos na conservação e qualidade pós-colheita do umbu gigante (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara).

2.2 Objetivos específicos

- Extrair e caracterizar o amido de banana-da-terra verde;
- Elaborar filmes e revestimentos à base de amido de banana-da-terra verde com diferentes concentrações de óleo essencial de capim-cidreira;
- Determinar as propriedades químicas, físicas e morfológicas dos filmes produzidos, suas atividades antioxidantes e sua biodegradabilidade;
- Aplicar os revestimentos comestíveis em frutos de umbu-gigante;
- Determinar os parâmetros de qualidade pós-colheita do umbu-gigante (perda de massa, firmeza de casca e polpa, cor da casca e polpa, pH, sólidos solúveis, acidez titulável e ácido ascórbico) durante o período de armazenamento sobre refrigeração.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Bioplásticos

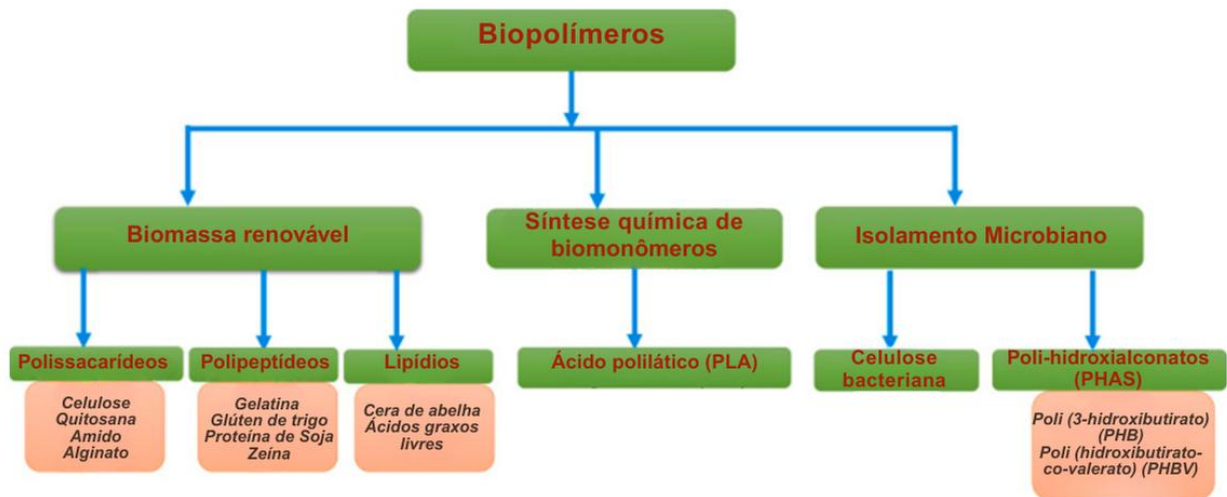
A produção de plástico sintético a base de polímeros derivados do petróleo é uma preocupação ambiental, visto que os microrganismos na natureza não conseguem degradar eficientemente esses polímeros, requerendo um tempo longo para a degradação, ou ainda se decompondo em pequenos fragmentos como microplásticos e nanoplásticos, poluindo oceanos, aterros sanitários e ecossistemas (Hossain *et al.*, 2024; Swetha *et al.*, 2024; Tsang *et al.*, 2019). Assim, os bioplásticos têm sido amplamente investigados ao longo das duas últimas décadas, sendo considerados como alternativa para o material plástico convencional, já que apresentam propriedades semelhantes, além de vantagens adicionais, como diferentes opções para a gestão do resíduo, podendo ser usados em compostagem, promovendo a ciclagem de carbono e enriquecendo o solo, representando assim um passo promissor para reduzir a poluição plástica e promover a sustentabilidade (Mitelut *et al.*, 2015; Mojica-Muñoz *et al.*, 2024).

O termo bioplástico tem sido bastante utilizado para definir os polímeros derivados de fontes naturais – biopolímeros, que se referem a moléculas cuja estrutura é constituída de unidades repetidas de monômeros de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N), obtidos a partir de diferentes fontes biológicas renováveis e, na maioria das vezes, biodegradáveis. Além disso, suas propriedades físico-químicas são determinadas pelo tipo de monômero, grau de polimerização e padrão/ordem de ligação (Diyana *et al.*, 2021; Kabir *et al.*, 2020; Sarma *et al.*, 2023). Os biopolímeros podem ser categorizados com base nos seus métodos de produção e fontes de origem (Figura 1), tais como: polissacarídeos (amido, celulose, pectina), proteínas (proteína isolada de soja, gelatina, queratina, caseína, glúten) e outras fontes de carbono, que podem ser processadas por meio de sacarificação enzimática, fermentação microbiana ou modificação (Coppola *et al.*, 2021; Diyana *et al.*, 2021; Gamage *et al.*, 2024; Jabeen; Majid; Nayik, 2015; Rangaraj *et al.*, 2021).

Os plásticos de base biológica podem apresentar ou não características biodegradáveis dependendo de sua estrutura química, mais especificamente, do tipo de ligação química presente nas moléculas (Lambert; Wagner, 2017). Alguns exemplos de bioplásticos biodegradáveis são: o ácido polilático (PLA), poliéster sintetizado por meio da polimerização de monômeros bioderivados como milho, cana-de-açúcar, beterraba, batata e outros; o polihidroxialcanoato (PHA), produzido por microrganismos a partir de açúcares e óleos vegetais; o polibutileno succinato (PBS), polímero termoplástico proveniente da síntese de

ácido succínico, geralmente derivado de biomassa, e butanodiol; e os biopolímeros, macromoléculas poliméricas de monômeros ligados covalentemente (Asgher *et al.*, 2020; Bilal; Iqbal, 2019; Jabeen; Majid; Nayik, 2015).

Figura 1. Classificação dos biopolímeros.



Fonte: Adaptado de Rangaraj *et al.* (2021)

Algumas das vantagens dos bioplásticos são a eficiência energética e biodegradabilidade, mas também possuem algumas limitações como fragilidade, alta absorção de água e baixa resistência térmica, o que pode restringir o seu uso (Costa *et al.*, 2023; Pei *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2024). Para superar estas limitações, podem ser adicionados material de reforço e plastificantes. Como agentes de reforço pode ser utilizado fibras naturais, celulose ou até mesmo realizar modificações químicas na matéria-prima, melhorando suas propriedades mecânicas e térmicas. Já os plastificantes, principalmente do grupo dos polióis como glicerol e sorbitol, são adicionados para facilitar o processamento, aumentando a flexibilidade dos bioplásticos, o que ajuda a reduzir a fragilidade (Costa *et al.*, 2023; Kong; Degraeve; Pui, 2022).

Além disso, a incorporação de componentes bioativos, como agentes antimicrobianos ou antioxidantes aos bioplásticos, podem aumentar a resistência à umidade e melhorar suas propriedades de barreira, fortalecendo as qualidades protetoras. Esses materiais oferecem uma ampla possibilidade de aplicações, especialmente como embalagens de alimentos para cobrir alimentos frescos ou processados com o objetivo de prolongar sua vida útil (Pei *et al.*, 2024; Tian *et al.*, 2023).

3.1.1 Filmes e revestimentos

Muitas vezes os termos filmes e revestimentos são utilizados sem distinção na área de alimentos, mas eles se diferenciam pelo método de fabricação e aplicação ao produto. Os filmes são folhas formadas pela secagem de uma solução de biopolímero, sendo produzidas separadamente e posteriormente aplicados nos produtos, geralmente como embalagem. Já os revestimentos são suspensões ou emulsões aplicadas diretamente na superfície do alimento por métodos como imersão ou aspersão, formando uma película após secagem (Matloob *et al.*, 2023; Suhag *et al.*, 2020). A escolha entre filmes e revestimentos depende das necessidades específicas de cada aplicação.

Filmes e revestimentos comestíveis representam um avanço como métodos naturais de preservação de alimentos. São compostos por biopolímeros comestíveis e biodegradáveis, como polissacarídeos, proteínas e lipídios (Kong; Degraeve; Pui, 2022; Paul, 2019; Shahidi; Hossain, 2020). Suas aplicações oferecem diversas vantagens, como o prolongamento da vida útil dos alimentos e redução do desperdício. Embora exista uma distinção nas técnicas de aplicação, ambos cumprem a função de proteger os alimentos, criando barreiras contra umidade, gases e ambiente circundante. Podem também ser utilizados para separar diferentes compartimentos do mesmo alimento (Anis *et al.*, 2021; Kong; Degraeve; Pui, 2022).

Uma característica importante dos revestimentos comestíveis é que podem ser consumidos junto com o alimento, os tornando práticos e convenientes. Além disso, podem atuar como transportadores de compostos bioativos, como antioxidantes e antimicrobianos. Isso melhora sua funcionalidade, retardando processos como oxidação e controlando ou prevenindo a deterioração microbiana. Ao impedir o crescimento microbiano durante o período de armazenamento, não apenas prolongam a vida útil do alimento, mas também mantêm sua qualidade, segurança e agregam valor ao produto (Anis *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2021; Matloob *et al.*, 2023; Petkoska *et al.*, 2021).

No contexto da segurança alimentar, os materiais utilizados nos filmes e revestimentos comestíveis devem ser considerados GRAS (*Generally Recognized as safe*), ou seja, serem atóxicos e seguros para o uso em alimentos (FDA, 2019). Além disso, devem ser processados seguindo as boas práticas de fabricação (BPF) para garantir a qualidade e segurança (Espitia *et al.*, 2018; Kong; Degraeve; Pui, 2022).

Dentre os polissacarídeos estudados para produção de filmes e revestimentos comestíveis, o amido é o mais empregado, devido ao seu fácil processamento, baixo custo, abundância, biodegradabilidade, comestibilidade e fácil manipulação. Sua utilização para estes

fins está alinhada aos princípios de sustentabilidade, promovendo circularidade, eficiência de recursos e responsabilidade ambiental ao longo do ciclo de vida do material (Cheng *et al.*, 2021; Raghav; Agarwal; Saini, 2016; Thakur *et al.*, 2019).

3.2 Bioplásticos à base de amido

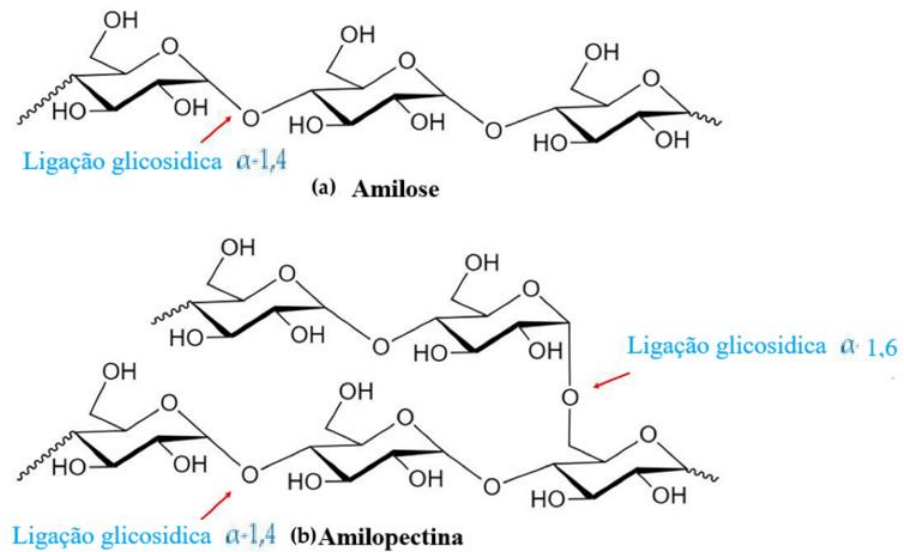
O amido é um dos polissacarídeos mais abundantes na natureza, sendo encontrado em diferentes fontes vegetais, como cereais, tubérculos e frutas, podendo ter sua produção realizada em grande escala, utilizando práticas agrícolas sustentáveis, se tornando umas das alternativas viáveis para obtenção de bioplásticos (Gonçalves *et al.*, 2024; Thakur *et al.*, 2019). Um dos seus principais benefícios como biopolímero é sua degradabilidade, que permite que os bioplásticos se decomponham sob condições ambientais adequadas. Os materiais à base de amido podem sofrer hidrólise enzimática por amilases, degradação microbiana por microrganismos do solo ou decomposição química por meio de processos de oxidação (Cheng *et al.*, 2021). Está armazenado nos vegetais na forma de grânulos, apresentando um certo grau de organização molecular, o que confere aos mesmos um caráter semicristalino, com graus de cristalinidade que variam de 20 a 45% (Gonçalves, 2024; Surendren *et al.*, 2022). Essa variação da cristalinidade influencia diretamente as propriedades físicas e químicas do amido, afetando seu comportamento durante o processamento (Jiang *et al.*, 2020).

Esse polissacarídeo é composto por dois tipos de polímeros da glicose: a amilose, formada por unidades de glicose unidas por ligações glicosídicas α -1,4, originando uma cadeia linear, e a amilopectina, que é formada por unidades de glicose unidas em α -1,4 e α -1,6, formando uma estrutura ramificada (Figura 2). As cadeias ramificadas da amilopectina contribuem significativamente para a cristalinidade do amido (Damodaran; Parkin, 2019; Jiang *et al.*, 2020).

A maioria dos amidos contêm entre 17 a 28% de amilose, sendo que a proporção de amilose e amilopectina varia conforme a fonte botânica, variedades dentro da mesma espécie e do estágio de maturação da planta (Figura 3). Essas variações influenciam características como viscosidade, poder de gelificação e organização da cadeia durante secagem e cristalização (Abe *et al.*, 2021; Damodaran; Parkin, 2019). O conteúdo de amilose é uma importante propriedade na elaboração de filmes e revestimentos, pois influencia suas propriedades mecânicas e de barreira, afetando a solubilidade, viscosidade e capacidade de formação de filmes. A amilopectina, devido à sua estrutura ramificada, promove a formação de complexos helicoidais de amilose-lipídio, e tende a formar géis mais viscosos (Cheng *et*

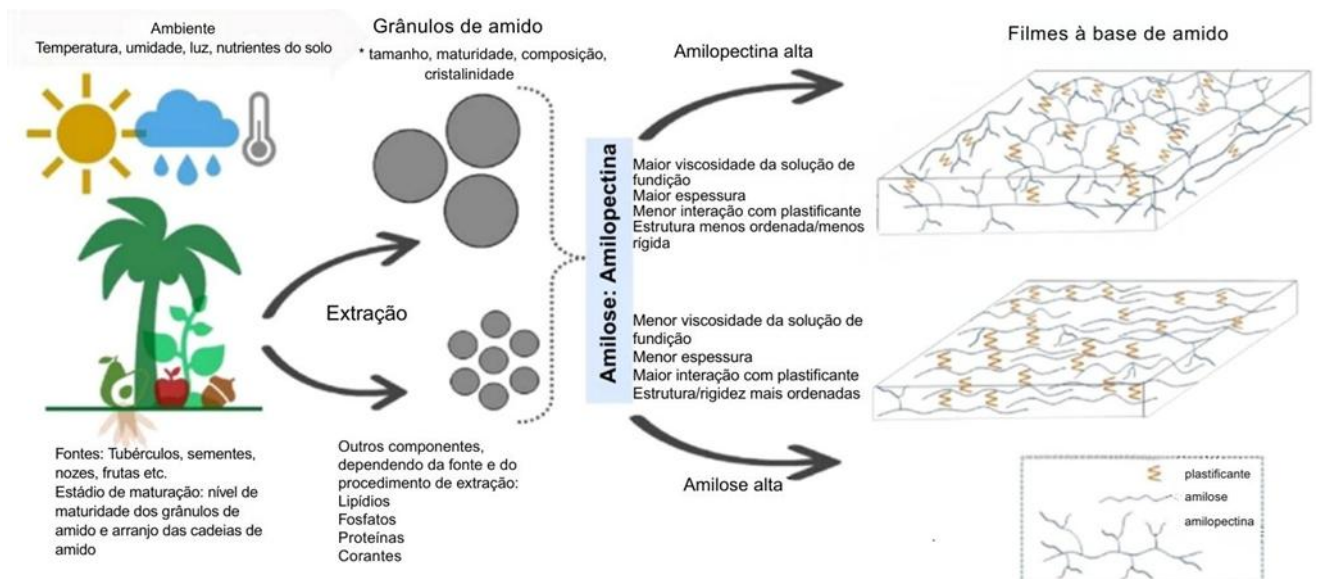
al., 2021; Henning *et al.*, 2021; Rashwan *et al.*, 2024; Shahidi; Hossain, 2020). Já a amilose, sendo linear, desempenha um papel fundamental na organização da amilopectina em estruturas cristalinas e na disposição dessas camadas dentro dos grânulos. Esse arranjo afeta as propriedades relacionadas à absorção de água, como inchaço e gelatinização, produzindo filmes mais resistentes, porém mais sensíveis à umidade (Basiak; Lenart; Debeaufort, 2017; Surendren *et al.*, 2022) (Figura 3).

Figura 2. Estrutura amilose (a) e da amilopectina (b)



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

Figura 3. Efeitos da fonte de amido, origem botânica e condições ambientais nas características dos filmes à base de amido.



Fonte: Adaptado de Henning *et al.* (2021)

A exploração de fontes não convencionais de amido tem ganhado atenção como estratégia para obtenção desse polissacarídeo, especialmente considerando produtos agrícolas que, embora estejam em boas condições para consumo não atendem aos padrões comerciais exigidos para comercialização. Tais produtos podem incluir frutas e vegetais que apresentem imperfeições visuais ou deformações, mais que ainda possuem propriedades nutricionais adequadas e são passíveis de utilização. A literatura cita algumas fontes de amido não convencionais que vêm sendo isolados e estudados, tais como: sagu (*Metroxylon sagu*) (Azmi; Malek; Puad, 2017), araruta (*Maranta arundinacea* Linn) (Nogueira; Fakhouri; Oliveira, 2018), caule de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) (Wei *et al.*, 2018), semente de jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam) (Zhang *et al.*, 2018), noz de ginkgo (*Ginkgo biloba*) (Kim *et al.*, 2021), banana-da-terra verde (*Musa paradisiaca*) (Viana *et al.*, 2021), inhame (*Dioscorea* spp.) (Behera; Mohanta; Thirugnanam, 2022), dentre outros.

A utilização dessas fontes não apenas diversifica as matérias-primas disponíveis para a produção de bioplásticos, mas também contribui para a redução da pressão sobre as culturas convencionais, que frequentemente enfrentam desafios relacionados à demanda crescente e à competição por terras agrícolas (Gonçalves *et al.*, 2024).

Um exemplo nesse contexto é a banana quando se encontra verde, que apresenta altos teores de amido e pode ser aproveitada para a produção de bioplásticos, contribuindo para redução do desperdício alimentar (Moreno-Zaragoza; Rosell; Bello-Pérez, 2025).

O termo banana é usado para espécies ou híbridos do gênero *Musa*, pertencente à família Musaceae. É uma cultura alimentícia amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais do mundo, desempenhando importante papel na economia dessas regiões, uma vez que representa uma importante fonte de renda para os habitantes locais (Moreno-Zaragoza; Rosell; Bello-Pérez, 2025). A espécie *Musa paradisiaca* L., conhecida popularmente como banana-da-terra, caracteriza-se por acumular grande quantidade de amido. Mesmo após atingir a maturação, continuam apresentando alto teor de amido, o que impacta no seu sabor e em propriedades físico-químicas que contribuem para a resistência mecânica e características de barreira dos filmes comestíveis, essenciais para manter a qualidade dos alimentos e prolongar a vida útil (Campos *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2022).

No estágio de maturação verde (Figura 4), o conteúdo de amido é ainda mais elevado, variando de 70 a 80% em peso seco, com teor de amilose em torno de 30 a 40%, dependendo da variedade. Outra fração importante é o amido resistente, que resiste à hidrólise enzimática e está presente em quantidade elevada, variando de 47 a 57%. A estrutura do amido resistente contribui para a formação de uma rede polimérica mais estável nos filmes, o que pode resultar

em uma melhor resistência mecânica e flexibilidade (Orsuwan; Sothornvit, 2017; Li *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2022).

Figura 4. Estádio verde de maturação verde da banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L.)



Fonte: Autoria própria (2024)

Estudos indicam que o amido extraído de bananas-da-terra verdes possui granulações maiores e densas, com estrutura que confere resistência à umidade e capacidade de barreira, características favoráveis para filmes e revestimentos utilizados na preservação de alimentos (Restrepo *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2022). O uso de amido de banana não apenas contribui para a redução do lixo plástico, mas também pode ser parte de uma economia circular, onde os resíduos agrícolas são transformados em novos produtos, tendo em vista que bananas verdes que apresentam injúrias ou imperfeições não atendem aos padrões de qualidade exigidos pelo consumidor (Rosenboom; Langer; Traverso, 2022).

O processo de extração do amido de banana-da-terra verde pode envolver o isolamento do amido tanto da polpa como da casca, que, segundo Li *et al.* (2018), possuem propriedades físicas e químicas distintas. Essa extração dupla aumenta o rendimento geral do amido, promovendo assim a sustentabilidade na produção de alimentos. Além disso, a integridade estrutural dos grânulos de amido de banana, que geralmente são lisos e densos, contribui para sua resistência à digestão e os torna adequados para várias aplicações alimentícias (Yang *et al.*, 2022).

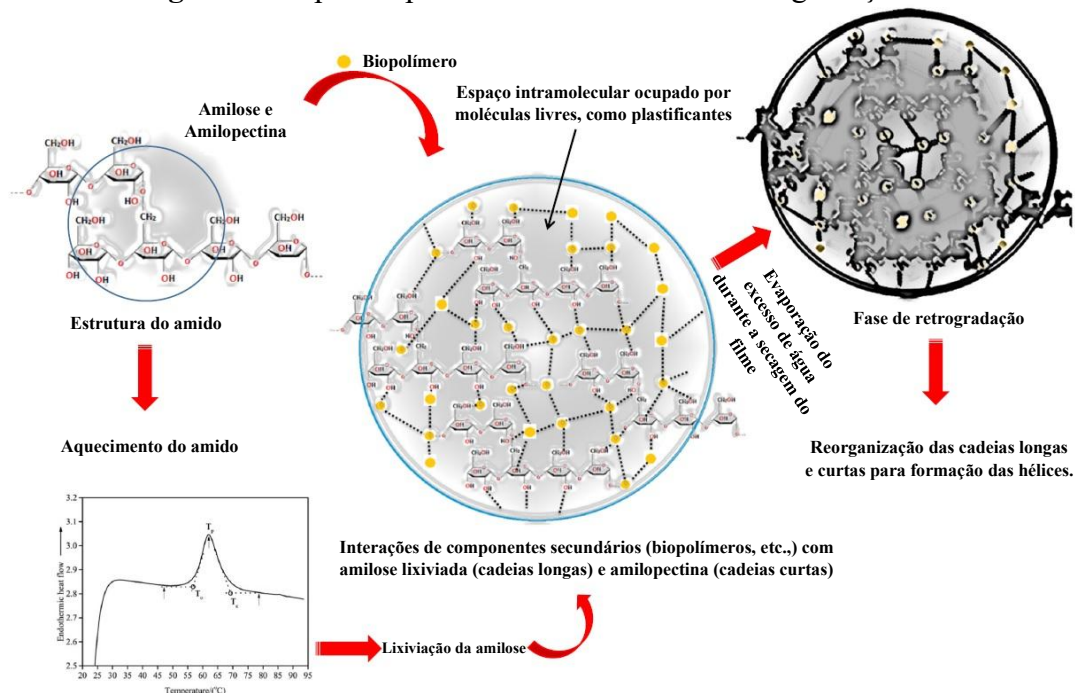
Outra característica importante desse amido é a degradabilidade. Estudos recentes demonstram que filmes fabricados a partir de amido ou farinha de banana (polpa ou casca), em conjunto ou não com outras substâncias naturais, apresentam propriedades biodegradáveis. Esses filmes sofrem uma decomposição eficiente ao longo do tempo, posicionando-os como alternativas ambientalmente sustentáveis para embalagens e aplicações diversas. A adição de

substâncias como glicerol, quitosana e fibras de banana pode aumentar os atributos mecânicos e a maleabilidade dos filmes sem comprometer a sua biodegradabilidade (Chandrasekar *et al.*, 2023; García-Ramón *et al.*, 2021; Irmayanti; Anwar, 2024; Restrepo *et al.*, 2018; Ramírez-Hernández *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2020; Venegas *et al.*, 2022; Verma *et al.*, 2023). Conseqüentemente, estes materiais são bastante promissores para várias utilizações, com especial destaque para as aplicações em embalagens alimentares.

3.3 Processo de formação dos bioplásticos

As propriedades dos bioplásticos à base de amido dependem da proporção de amilose e amilopectina dentro da matriz polimérica. Uma estratégia para melhorar essas propriedades é alterando a estrutura molecular, proporção e interações dessas moléculas. O método de produção mais comum envolve o aquecimento dos grânulos de amido em uma formulação com água, plastificantes e outros materiais (Figura 5) (Thakur *et al.*, 2019; Rahardiyan *et al.*, 2023; Surender *et al.*, 2022). Durante o aquecimento, ocorre quebra das ligações de hidrogênio entre amilose e amilopectina, resultando na lixiviação da amilose para o meio aquoso e rompimento da estrutura semicristalina, causando o inchaço, perda de biorrefringência e solubilização dos grânulos de amido até um estágio irreversível conhecido como gelatinização (Abe *et al.*, 2021; Damodaran; Parkin, 2019; Gonçalves *et al.*, 2024).

Figura 5. Etapas do processamento térmico e retrogradação do amido.



Fonte: Adaptado de Takhur *et al.* (2019)

A gelatinização, auxiliada pela água e plastificantes, transforma o amido em amido termoplástico, semelhante aos termoplásticos sintéticos, que serve como base para a formação dos bioplásticos. A partir do efeito plastificante da água e dos plastificantes adicionados, o amido perde sua conformação original e forma um gel fundido. O estado em que a estrutura cristalina do amido é rompida, durante o processo de gelatinização, permite que o amido se torne um fluido que pode ser moldado, método chamado de fundição (Chen, *et al.*, 2021; Rahardiyan *et al.*, 2023).

Para regular as propriedades mecânicas do bioplástico, como elasticidade e fragilidade, bem como a redução da retrogradação ao longo do tempo, são que são adicionados à formulação bioplástico substâncias orgânicas denominadas plastificantes (Gonçalves *et al.*, 2024; Yaashikaa *et al.*, 2023). A adição de um plastificante também influencia a transparência do plástico, durabilidade, tenacidade e propriedades térmicas, dependendo da concentração e do tipo de plastificante. Os plastificantes comuns usados na produção de bioplásticos de polímeros naturais são polióis (glicol, glicerol, sorbitol), frutose, sacarose, manose, ácidos graxos (palmitato e miristato), ou uma combinação deles. Devido à sua termoestabilidade, alto ponto de ebulição e não toxicidade, o glicerol é o mais usado (Abe *et al.*, 2021; Rahardiyan *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2021). Após a adição dos plastificantes e do processo de gelatinização, a produção dos bioplásticos pode seguir diferentes métodos, sendo que para a utilização como embalagens de alimentos, os filmes e revestimentos são os mais comuns.

Após a formação do gel fundido, a etapa de retrogradação é crucial para obtenção das propriedades finais desejadas nos filmes e revestimentos. A retrogradação é um processo de cristalização da amilose, mais acentuado em baixas temperaturas, que aumenta o grau de ordenação das ligações de hidrogênio (Abe *et al.*, 2021; Chen, *et al.*, 2021). A produção dos filmes é finalizada com a deposição da solução filmogênica gelatinizada sobre uma superfície não aderente. A solução é então desidratada (em um forno, por exemplo), facilitando a retrogradação devido ao aumento das interações intramoleculares entre os polímeros a partir da redução do volume na matriz polimérica, procedimento conhecido como técnica de *casting* (Petkoska *et al.*, 2020; Suhag *et al.*, 2020). No caso dos revestimentos, a solução filmogênica é aplicada sobre o produto por meio de imersão ou aspersão, formando uma película após secagem (Aguirre-Joya *et al.*, 2018; Matloob *et al.*, 2023; Pascall; Lin, 2013; Suhag *et al.*, 2020).

A natureza das matrizes poliméricas dos bioplásticos à base de amido facilita o aprisionamento de componentes funcionais, como agentes antibacterianos e antioxidantes. Essa capacidade de fortificar e revestir essas matrizes poliméricas com compostos antioxidantes e

antimicrobianos impulsiona o uso dos bioplásticos para produção das embalagens ativas (Khezerlou *et al.*, 2021; Lauer; Smith, 2020).

3.4 Embalagens ativas para alimentos

Embalagens ativas para alimentos referem-se a uma categoria de embalagens inovadoras que vão além da proteção do produto alimentício contra influência do ambiente externo. Por meio da incorporação de aditivos elas interagem com o alimento, visando melhorar suas características e desempenhando um papel ativo na preservação, segurança e qualidade do produto (Soltani Firouz; Mohi-Alden; Omid., 2021).

As embalagens ativas podem ser classificadas em duas categorias principais, dependendo dos aditivos incorporados ao material: quimioativas e bioativas. Embalagens quimioativas utilizam aditivos sintéticos como agentes ativos, que afetam a composição química do alimento e a atmosfera gasosa dentro da embalagem. O uso desses materiais sintéticos tem gerado preocupações, pois podem causar efeitos adversos à saúde ou tornar a embalagem inapropriadas para reciclagem, ocasionando um aumento de resíduos sólidos (Sharma *et al.*, 2024).

Essas limitações incentivaram a busca por alternativas mais seguras e sustentáveis, levando a incorporação de compostos bioativos de fontes naturais como polifenóis, óleos essenciais e outros extratos vegetais. Além de atender à crescente demanda dos consumidores por produtos naturais, essas substâncias exercem importantes funções antioxidantes e antimicrobianas na embalagem ativa, prolongando a vida útil dos alimentos sem comprometer a saúde ou meio ambiente (Sharma *et al.*, 2024; Soltani Firouz; Mohi-Alden; Omid., 2021; Tian *et al.*, 2023).

3.4.1 Óleos essenciais

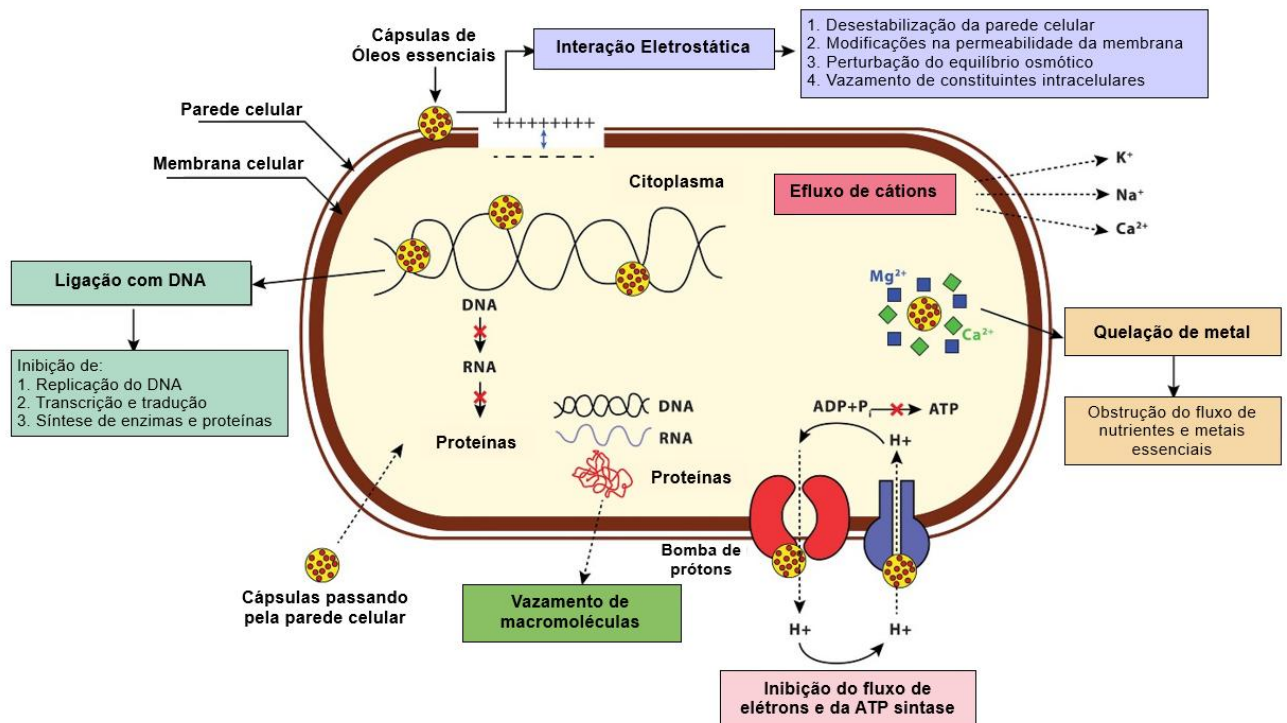
Os óleos essenciais (OEs) são líquidos aromáticos e voláteis extraídos de várias partes das plantas (folhas, flores, frutos e sementes). São metabólitos secundários formados pelas reações enzimáticas de metabólitos primários, compostos principalmente por terpenos e hidrocarbonetos (Devi *et al.*, 2024; Durczyńska; Żukowska, 2024; Raghuvanshi *et al.*, 2023). A extração dos óleos essenciais pode ser feita por vários métodos, a depender do material vegetal e das propriedades desejadas. As técnicas mais comuns incluem extração por solvente, prensagem a frio, maceração e destilação. A escolha do método de extração pode influenciar

significativamente na preservação das propriedades bioativas e, conseqüentemente, na sua qualidade e composição, afetando suas aplicações potenciais (Katekar; Rao; Sardeshpande, 2023).

Dentre as diversas atividades biológicas dos óleos essenciais, destacam-se as propriedades antimicrobianas e antioxidantes naturais, que tem sua eficácia dependente da composição química e das interações sinérgicas entre seus componentes (Pei *et al.*, 2024; Sharma *et al.*, 2024; Al-Refaie; Mehyar; Shahein, 2023).

As atividades antimicrobianas dos OEs ocorrem por mecanismos que afetam a estrutura e função celular dos microrganismos, como a ruptura da membrana por compostos fenólicos, como carvacrol, citral, limoneno e timol. Esses compostos desestabilizam a membrana lipídica, que formará um poro permeável causando vazamento do conteúdo intracelular, levando à morte celular (Figura 6). Além disso, os OEs inibem o metabolismo microbiano, interferindo em processos essenciais como respiração e síntese proteica (Mahmud; Khan, 2018; Souza *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2021; Yammine *et al.*, 2022).

Figura 6. Mecanismo de atuação dos óleos essenciais nas células.



Fonte: Adaptado de Yammine *et al.* (2022)

No aspecto antioxidante, os OEs atuam neutralizando radicais livres e espécies reativas de oxigênio, prevenindo o estresse oxidativo. Os compostos fenólicos presentes nos OEs doam

elétrons, estabilizando os radicais livres, e alguns OEs também realizam a quelação de metais, como ferro e cobre, inibindo reações oxidativas (Li *et al.*, 2023; González *et al.*, 2022).

Os OEs são insolúveis em água, mas solúveis em álcool e outros solventes, e são caracterizados por seu aroma intenso e alta volatilidade. Devido à característica lipofílica e pequeno tamanho molecular, seus componentes penetram facilmente nas membranas biológicas (Agrawal *et al.*, 2024; Durczyńska; Żukowska, 2024; Tiwari *et al.*, 2025).

O arranjo estrutural dos componentes do óleo essencial também pode melhorar a microestrutura dos materiais de embalagem, melhorando sua resistência à tração e propriedades de barreira, o que é particularmente benéfico em sistemas de embalagem de alimentos (Devi *et al.*, 2024).

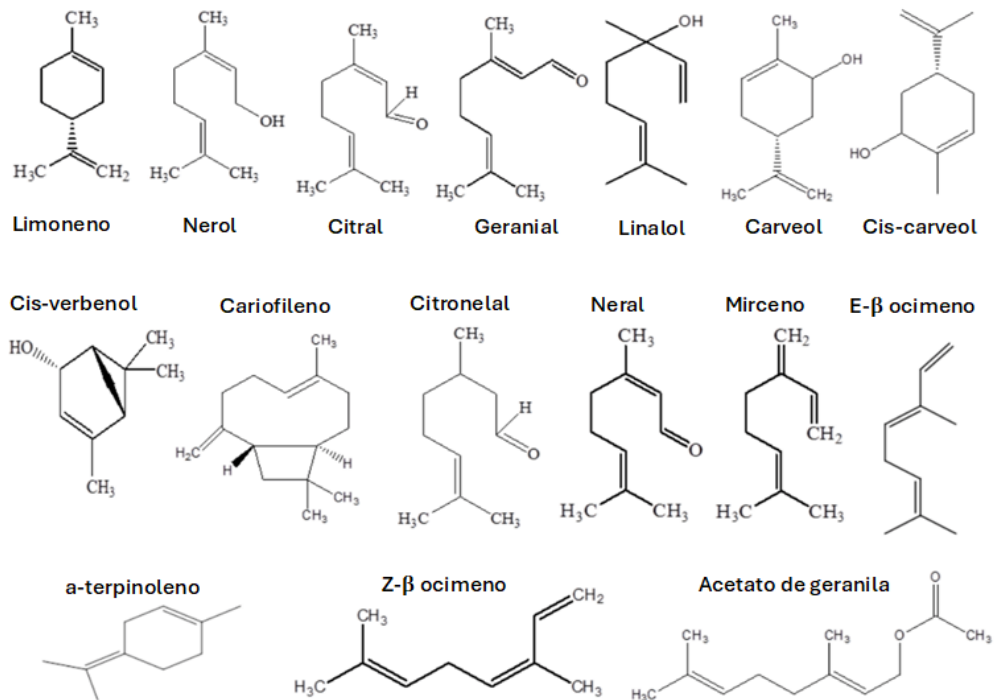
3.4.1.1 Óleo essencial de capim-cidreira (*Cymbopogon citratus*)

Cymbopogon é um gênero da família Poaceae (Gramineae) nativas das áreas tropicais e semitropicais da Ásia e cultivadas na América do Sul e outros países tropicais. Possui mais de 55 espécies, dentre elas, o *Cymbopogon citratus*, conhecido popularmente como capim-cidreira, capim-limão ou capim-santo (Abdulazeez; Abdullahi; James, 2016).

O óleo essencial de capim-cidreira é caracterizado por suas propriedades antimicrobianas e antioxidantes. Composto principalmente de terpenos, sendo o citral o principal componente, o que contribui para sua eficácia antimicrobiana contra uma variedade de microrganismos, incluindo bactérias, como *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* (Faheem *et al.*, 2022; Mukarram *et al.*, 2022; Valkova *et al.*, 2022). Apresenta também atividade antifúngica, inibindo o crescimento micelial e a formação de esporos de fungos como *Penicillium digitatum*, um importante patógeno pós-colheita em frutas cítricas (Duan *et al.*, 2023).

A composição de bioativos do OE de capim-cidreira inclui citral (61,5%), geraniol (6,6%) e 1,8-cineol (6,4%), responsáveis por sua forte atividade antioxidante ($84,0 \pm 0,1\%$) (Valkova *et al.*, 2022), entre outros (Figura 7). A atividade antioxidante do OE se deve às ações sinérgicas de seus componentes ativos α -citral, β -citral, mirceno e eugenol (Faheem *et al.*, 2022), que atuam como sequestradores de radicais livres devido à presença de ligações duplas conjugadas que podem doar seu átomo de hidrogênio alílico aos radicais livres. Isso resultará na formação de um radical estabilizado por ressonância e, assim, encerrará a reação em cadeia oxidativa (Gutiérrez-Pacheco *et al.*, 2023).

Figura 7. Componentes bioativos presentes no óleo essencial de capim-cidreira.



Fonte: Adaptado de Valkova *et al.* (2022)

Estudos têm demonstrado o potencial da adição do OE de *Cymbopogon citratus* em matrizes de biopolímeros, como conservante natural em embalagens para alimentos, principalmente no que se refere as propriedades antioxidantes e antimicrobiana (Tabela 1). Como pode ser observado na tabela citada, a aplicação de revestimentos e filmes com adição de óleo essencial tem sido objeto de estudo de vários autores. Entretanto, não são encontrados estudos relativos à aplicação de revestimentos ou filmes em frutos tropicais como o Umbu gigante, que tem ganhado o mercado nacional devido ao seu sabor exótico e alto rendimento em polpa.

Tabela 1. Uso de óleo essencial de capim-cidreira (*Cymbopogon citratus*) como aditivos em matrizes poliméricas

Produto	Material formador	Concentração OE	Principais resultados	Referência
Kinnow (<i>Citrus nobilis</i> × <i>C. deliciosa</i>)	Goma xantana	1%	A adição do OE minimizou a incidência de patógenos que causam a podridão e contribuiu para manter a atividade antioxidante, sendo eficaz na redução do estresse oxidativo	Bajaj <i>et al.</i> (2024)
Revestimento comestível aplicado em ameixa	Amido de trigo sarraceno e goma xantana	0,75; 1,0 e 1,25% (p/v)	A incorporação do OE melhorou as propriedades antimicrobianas contra <i>S. aureus</i> e <i>E. coli</i> . Houve aumento da atividade antioxidante a medida aumentou a concentração do OE (62,0, 62,9 e 73,3% respectivamente)	Bansal <i>et al.</i> (2024)
Filme	Amido de mandioca e alginato de sódio	0,5; 1,0 e 1,5% (p/p)	Exibiram propriedades antibacterianas efetivas contra bactérias <i>S. aureus</i> e <i>E. coli</i> e atividade antioxidante de 32,4% com liberação e retenção estáveis	Vargas <i>et al.</i> (2024)
Filmes ativos e revestimento em tomates	Quitosana e nanofibras de celulose	1 e 2%	Inibição do crescimento de <i>Botrytis cinerea</i> . nos tomates inoculados	Nkede <i>et al.</i> (2023)
Filmes comestíveis e revestimentos em tomates-cereja	Quitosana, gelatina e β -ciclodextrina (β -CD)	7% encapsulado com β -ciclodextrina	Inibição completa do crescimento de <i>Penicillium aurantiogriseum</i>	Ecerg <i>et al.</i> (2023)
Revestimentos comestíveis	Goma arábica e amido de milho	3%	Limitou a perda da capacidade antioxidante, sugerindo uma influência parcial nessa atividade a depender do biopolímero utilizado	Kawhena <i>et al.</i> (2021)

em Romã (cv. Wonderful)				
Revestimento em banana	Amido de mandioca	0,1 %	Os revestimentos combinados com OE de capim-limão ou tomilho, além desses óleos isolados, proporcionam redução no tamanho das lesões de antracnose.	Alves <i>et al.</i> (2020)
Filmes ativos	Amido e álcool polivinílico (PVA)	0,5; 1,0 e 1,5% encapsulado com β -ciclodextrina (β -CD)	Os filmes incorporados com OE/ β -CD apresentaram atividades antimicrobianas eficientes contra <i>S. putrefaciens</i> . A atividade antimicrobiana e antioxidante aumentou à medida que foi aumentado o teor de OE	Chen <i>et al.</i> (2020)
Revestimentos em melões amarelos (<i>Cucumis melo</i> L., variedade inodorus)	Quitosana	Emulsões com 0,08; 0,15; 0,3 ou 0,6 μ L/mL	A combinação de quitosana e OE foi eficaz na redução da severidade da podridão-de-cratera, independentemente do isolado inoculado de <i>Paramyothecium roridum</i> . A concentração de 0,6 μ L/mL do óleo essencial de <i>C. citratus</i> apresentou 100% de inibição do crescimento micelial frente a todos os isolados estudados.	Macedo <i>et al.</i> (2020)
Filmes comestíveis	Amido de sagu	1 e 5% (v/v)	Concentração de 5% de OE conferiu melhor atividade antimicrobiana	Santosa <i>et al.</i> (2019)
Filmes ativos	Alginato de sódio	0,5 % p/v	A maior inibição do crescimento microbiano observada a 4 °C, atingindo percentuais máximos após 15 dias de armazenamento, indicando uma liberação sustentada do componente ativo	Riquelme, Herrera e Matiacevich (2017)

3.5 Umbu gigante (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara)

O umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara), também conhecido como imbuzeiro, é uma árvore frutífera nativa da Caatinga, bioma característico do Nordeste brasileiro, pertence à família Anacardiaceae e gênero *Spondias*. Sua ocorrência se concentra principalmente nos estados da Bahia, Sergipe, Pernambuco, Piauí e norte de Minas Gerais. Adaptado à seca, o umbuzeiro é uma espécie de grande importância socioeconômica para as populações do Semiárido, sendo explorado de forma extrativista ou em pomares domésticos. Seu processo de domesticação teve início na década de 1990 (Lima; Silva; Oliveira, 2018; Saturnino *et al.*, 2019).

É uma cultura de muita importância para as comunidades locais e regionais, onde o fruto se destaca não apenas como alimento, mas também como uma fonte de renda e desenvolvimento econômico. O fruto é amplamente consumido e utilizado em diversas formas, como sucos, doces, polpas e conservas (Alves *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2020). Além disso, o umbu possui um grande potencial agroindustrial, sendo necessário o desenvolvimento de tecnologias que agreguem valor ao fruto, como a conservação pós-colheita e o processamento para a produção de derivados e aproveitamento de resíduos (Aderne *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2019). A implementação de práticas sustentáveis para a conservação do umbu é fundamental para economia circular das comunidades locais e regionais, garantindo a continuidade dessa fonte de renda e a preservação da biodiversidade local (Sales *et al.*, 2024; Mertens *et al.*, 2016).

O umbuzeiro é uma árvore de pequeno porte (4 a 8 m de altura), com copa arredondada (10 a 15 m diâmetro) (Figura 8). O sistema radicular é formado por raízes profundas que se concentram na projeção da copa, engrossam à medida que crescem e desenvolvem-se próximo ao tronco. São chamados xilopódios ou túberas, estruturas que armazenam água e nutrientes importantes para sobrevivência da planta no período seco, são comestíveis e apreciados por seu sabor adocicado (Donato *et al.*, 2019; Neves, 2023). A queda das folhas (caducifolia) permitem reduzir a perda de água e garantir recursos hídricos durante a seca. O período de floração e frutificação ocorre uma vez por ano, geralmente em períodos sem precipitações, viabilizado pelas reservas de água armazenadas nas raízes (Lima; Castricini, 2019; Neves, 2023).

Os frutos são do tipo drupa, semente envolvida por um endocarpo duro, ovóide, com casca lisa ou levemente pilosa, de coloração verde-amarelada e polpa branco-esverdeada, succulenta de sabor agridoce ou ácido. A combinação de açúcares, acidez e compostos fenólicos dão ao umbu o seu sabor exótico. Os frutos nativos possuem diâmetro entre 2,2 e 4,0 cm e a

massa de 10 a 40 g, com rendimento de polpa variando entre 65 e 93%, com um ciclo de desenvolvimento de aproximadamente 120 dias (Narain *et al.*, 1992; Batista *et al.*, 2015).

Figura 8. Umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara).



Fonte: Fonseca (2015)

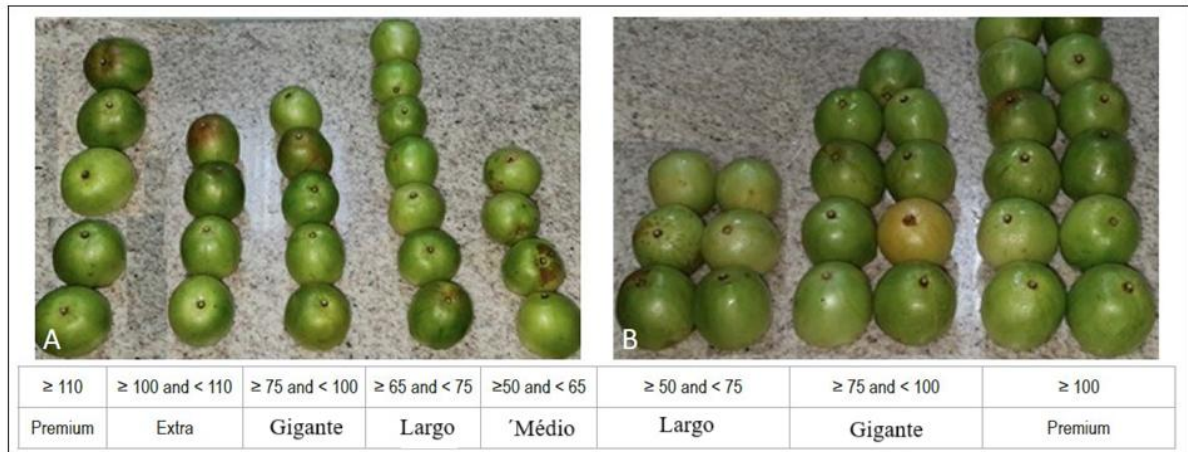
O Umbu gigante é o fruto proveniente de acessos de umbuzeiros que produzem frutos maiores em comparação aos frutos nativos, com peso médio acima de 70 g (Donato *et al.*, 2019; Santos, 2018; Saturnino *et al.*, 2019). Segundo Donato *et al.* (2024), o acesso EPAMIG-C01 originário de Lontra - MG, está registrado no Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) como cultivar BRS-68, e atualmente é o umbu gigante mais difundido. Com o objetivo de valorizar e organizar a comercialização desses frutos, os autores propuseram uma classificação conforme apresentado na Figura 9, onde enquadram como umbu gigante aqueles com massa de 75g até 100g.

A variabilidade genética entre as populações naturais influencia várias características do fruto, os ácidos orgânicos presentes no umbu, como o cítrico, podem alcançar até 7% em alguns genótipos (Dantas Júnior, 2008; Gondim, 2012), com sólidos solúveis variando de 10 a 15°Brix (Costa *et al.*, 2004; Lima *et al.*, 2010; Gondim, 2012).

Em relação ao teor de amido, frutos maduros podem conter de 0,45 a 2,58 g/100g (Dantas Júnior, 2008; Gondim, 2012), e o teor de ácido ascórbico (vitamina C) varia de 39 a 76

mg/100 mL de polpa, reduzindo durante a maturação para valores entre 8 e 14 mg/100 mL (Narain *et al.*, 1992; Campos, 2007).

Figura 9. Proposta de classificação do tamanho de umbu para comercialização com base na massa (g) de frutos do acesso de BRS-68 (EPAMIG-C01). Cinco classes (A); três classes (B.)



Fonte: Donato *et al.* (2024)

Outros componentes de qualidade incluem os compostos pécnicos, cuja solubilidade aumenta durante o amadurecimento, favorecendo o amaciamento dos frutos (Narain *et al.*, 1992; Campos, 2007; Dantas Júnior, 2008), e os compostos fenólicos, que podem atingir valores entre 8 e 58 mg de GAE/100g (Dantas Júnior, 2008; Gondim, 2012). Os flavonoides, por sua vez, variam entre 947 e 4022 mg/100g (Dantas Júnior, 2008).

A composição química do umbu inclui ainda uma variedade de compostos voláteis, como 1-heptanol, 2-nonanol e metil pirazina, que são significativos por seu perfil de aroma e sabor (Galvão *et al.*, 2011; Lima; Silva; Oliveira, 2018). Conforme a fruta amadurece, há um aumento notável nos compostos terpênicos, que são responsáveis pelo aroma característico dos frutos maduros. Além disso, o umbu contém antocianinas e polifenóis, com concentrações variáveis dependendo do genótipo e do estágio de maturidade, contribuindo para suas propriedades nutricionais (Galvão *et al.*, 2011).

Os frutos do umbuzeiro são particularmente notáveis por suas propriedades sensoriais e químicas. O sabor agridoce característico, o brilho e casca esverdeada são os atributos proeminentes que contribuem para seu apelo sensorial. A coloração, firmeza da casca, bem como a composição da polpa, são importantes indicadores de qualidade (Lima; Silva; Oliveira, 2018).

3.5.1 Perdas pós-colheita do Umbu gigante

As perdas pós-colheitas de produtos frescos podem ser atribuídas a vários fatores, incluindo mudanças fisiológicas que ocorrem após a colheita, danos mecânicos durante o manuseio e transporte e condições climáticas desfavoráveis que afetam o armazenamento. Além disso, infestações por pragas podem contribuir significativamente para essas perdas (Al-Tayyar *et al.*, 2020; Janghu *et al.*, 2024)

O umbu é um fruto altamente perecível, com rápido amadurecimento e deterioração após a colheita, completando o processo em 2-3 dias em temperatura ambiente, devido ao seu metabolismo fisiológico rápido e alta taxa respiratória, o que dificulta sua conservação e comercialização por períodos prolongados (Lima; Silva; Oliveira, 2018; Moura *et al.*, 2013; Teodosio *et al.*, 2021). Essa perecibilidade é exacerbada por mudanças fisiológicas, como perda de firmeza, mudanças na cor da casca e redução nos sólidos solúveis e na acidez titulável, que afetam a comercialização e a qualidade nutricional da fruta (Lima *et al.*, 2017; Teodosio *et al.*, 2021). A variabilidade genética e a composição bioquímica da fruta, incluindo altos níveis de açúcares, acidez e compostos fenólicos, contribuem para sua rápida deterioração (Lima *et al.*, 2017).

O clima Semiárido da região brasileira onde o umbu é cultivado apresenta desafios adicionais, pois temperaturas extremas e flutuações de umidade podem acelerar a deterioração das frutas. Dessa forma, os frutos devem ser colhidos manualmente em horários mais frescos do dia, evitando queda para não ocorrer rupturas da casca, o que pode levar à exsudação de suco, aumento das taxas respiratórias, aceleração do amadurecimento, perda de água e degradação de ácidos orgânicos e carboidratos (Lima; Castricini, 2019; Souza *et al.*, 2005).

A refrigeração pode interromper ou desacelerar o amadurecimento, inibindo mudanças de cor e textura, além de reduzir a perda de massa e manter a qualidade comercial dos frutos (Silva *et al.*, 2009; Campos, 2007). A aplicação de filmes e revestimentos comestíveis é uma técnica promissora para conservar a qualidade pós-colheita, reduzindo a respiração e a perda de água, formando uma atmosfera modificada que limita as taxas metabólicas e mantém os frutos frescos por mais tempo (Zhao, 2019). Os revestimentos comestíveis oferecem benefícios como biocompatibilidade, baixo custo e a possibilidade de incorporar ingredientes funcionais, como agentes antimicrobianos, antioxidantes e nutracêuticos, podendo ser uma alternativa para aumentar o tempo de vida útil, conservando a qualidade pós-colheita do umbu gigante (Zhao, 2019).

3.5.1.1 Aplicação de revestimentos comestíveis para conservação de frutas

O principal objetivo dos revestimentos comestíveis é aumentar a barreira natural de frutas e legumes. Da mesma forma, um fato muito importante dos revestimentos comestíveis é que estes podem ser consumidos com segurança como parte dos produtos e são ecologicamente corretos ao mesmo tempo em que prolongam a vida útil de produtos frescos (Coppola *et al.*, 2021; Pei *et al.*, 2024).

A manutenção da qualidade das frutas na cadeia de frio, muitas vezes se torna difícil, visto que as embalagens nem sempre são eficientes. Na intenção de amenizar essa falha, têm sido aplicadas coberturas comestíveis, considerados uma tecnologia com grande potencial, com o objetivo de constituir um revestimento coadjuvante, associado ou não à refrigeração, para prolongar a vida útil de frutas e hortaliças (Pei *et al.*, 2024).

A aplicação dos revestimentos comestíveis em frutas e legumes oferece um efeito protetor adicional, e tem o objetivo de permitir ou restringir a troca de gases resultantes da respiração, aromas voláteis e vapor de água, reduz a velocidade da maturação e a senescência pela redução da produção de etileno, conferir brilho e manter a qualidade do produto. Além disso, os revestimentos criam uma atmosfera modificada dentro do produto e o protegem contra patógenos e contaminantes. Eles devem ser imperceptíveis e ter aderência suficiente para não serem removidos no manuseio, além de não causarem alterações nas propriedades sensoriais do produto (Assis; Britto, 2014).

As seguintes características são desejáveis na elaboração e aplicação de revestimentos comestíveis: espalhamento uniforme, boa aderência, secagem rápida e não formação de espumas. Uma vez aplicado, não deve quebrar, descolorir, desprender, ser pegajoso ou aderir na embalagem, prejudicar a qualidade sensorial e reagir com o alimento de maneira negativa, durante o manuseio e armazenamento (Han, 2014).

Vários revestimentos comestíveis têm sido aplicados com sucesso para preservar frutas e legumes (Aguirre-Joya *et al.*, 2018; Tahir *et al.*, 2019; Thakur *et al.*, 2019). Os compostos mais utilizados na elaboração desses revestimentos comestíveis são as proteínas, os polissacarídeos e lipídios (Yousuf; Qadri; Srivastava, 2018; Paul, 2019). Entretanto, muitos pesquisadores têm se concentrado em filmes e revestimentos com bioativos para melhorar as características finais da embalagem, combinando suas vantagens individuais e minimizando suas desvantagens (Yousuf; Qadri; Srivastava, 2018; Zao, 2019).

REFERÊNCIAS

- ABE, M. M.; HALLEY, P.; BRIENZO, M.; MARTINS, J. R.; MACEDO, J. V.; BRANCIFORTI, M. C.; BOTARO, V. R.; SANVEZZO, P. B. Advantages and disadvantages of bioplastic production from starch and lignocellulosic components. **Polymers**, v. 13, n. 15, p. 2484, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13152484>. Acesso em: 13 out. 2024.
- ABDULAZEEZ, M. A.; ABDULLAHI, A. S.; JAMES, B. D. Lemongrass (*Cymbopogon* spp.) Oils. In: PREEDY, V. R. (ed.). **Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety**. USA: Elsevier, 2016. p. 509–516. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416641-7.00058-4>. Acesso em: 24 out. 2024.
- ADERNE, I.; RIBEIRO, J. S.; ZANUTO, M. E.; ANJOS, D. A.; SOUZA, C. C. E. Potencial nutricional e funcional da farinha da casca de umbu (*Spondias tuberosa* Arruda Cam.). **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, v. 11, n. 2, p. 964–974, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.18378/rebagro.v12i2.8883>. Acesso em: 11 dez. 2024.
- AGUIRRE-JOYA, J. A.; VENTURA-SOBREVILLA, J. M.; DE LEON-ZAPATA, M. A.; RAMOS-AGUIÑAGA, M. E.; TORRES-LEÓN, C.; AGUILAR, M. A.; RUELAS-CHACÓN, X.; AGUILAR, C. N.; ROJAS, R.; ALVAREZ-PEREZ, O. B.; NIETO-OROPEZA, D. E. Basic and Applied Concepts of Edible Packaging for Foods. [S. l.]: Elsevier, 2018. p. 1–61. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811516-9.00001-4>. Acesso em: 12 out. 2024.
- AL-REFAIE, D.; MEHYAR, G. F.; SHAHEIN, M. Functional Role of Essential Oils as Antimicrobial and Antioxidat Agents in Food Industry: A Review. **Jordan Journal of Agricultural Sciences**, v. 19, n. 1, p. 70–88, 2023. DOI: 10.35516/jjas.v19i1.1237. Disponível em: <https://jjournals.ju.edu.jo/index.php/jjas/article/view/1237>. Acesso em: 5 out. 2024.
- AL-TAYYAR, N. A.; YOUSSEF, A. M.; AL-HINDI, R. Antimicrobial food packaging based on sustainable Bio-based materials for reducing foodborne Pathogens: A review. **Food Chemistry**, v. 310, p. 125915, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125915>. Acesso em: 20 out. 2024.
- ALVES, T. P.; SILVA, R. A. C.; SANTOS, N. S.; SILVA, J. C. S.; DANTAS, F. A. L. Qualidade pós-colheita de frutos do umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda) armazenada sob atmosfera modificada. **Revista Diversitas**, v. 3, p. 1523–1535, 2020. DOI: 10.17648/diversitas-journal-v5i3-1193. Disponível em: https://www.diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/1193. Acesso em: 11 dez. 2024.
- ANIS, A.; AL-ZAHRANI, S. M.; PAL, K. Essential Oil-Containing Polysaccharide-Based Edible Films and Coatings for Food Security Applications. **Polymers**, v. 13, n. 4, p. 575, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13040575>. Acesso em: 24 out. 2024.
- ASGHER, M.; QAMAR, S. A.; BILAL, M.; IQBAL, H. M. N. Bio-based active food packaging materials: Sustainable alternative to conventional petrochemical-based packaging

materials. **Food Research International**, v. 137, p. 109625, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109625>. Acesso em: 10 dez. 2024.

AZMI, A. S.; MALEK, M. I. A.; PUAD, NI Mohamad. A review on acid and enzymatic hydrolyses of sago starch. **International Food Research Journal**, v. 24, 2017. Acesso em: 12 dez. 2024.

BAJAJ, K.; KUMAR, A.; GILL, P. P. S.; JAWANDHA, S. K.; KAUR, N. Xanthan gum coatings augmented with lemongrass oil preserve postharvest quality and antioxidant defence system of Kinnow fruit under low-temperature storage. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 262, n. Pt 1, p. 129776, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129776>. Acesso em: 12 dez 2024.

BANSAL, H.; SINGH, H. P.; SINGH, S.; SHARMA, A.; SINGH, J.; KAUR, K.; MEHTA, S. K. Preserving plum perfection: Buckwheat starch edible coating with xanthan gum and lemongrass essential oil. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 274, n. Pt 2, p. 133239, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133239>. Acesso em: 12 dez 2024.

BASIAK, E.; LENART, A.; DEBEAUFORT, F. Effect of starch type on the physico-chemical properties of edible films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 98, p. 348–356, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.122>. Acesso em: 11 out. 2024.

BATISTA, F. R. C.; SILVA, S. M.; SANTANA, M. F. S.; CAVALCANTE, A. R. **O umbuzeiro e o semiárido brasileiro**. Campina Grande: INSA, 2015. 72p.

BEHERA, L.; MOHANTA, M.; THIRUGNANAM, A. Intensification of yam-starch based biodegradable bioplastic film with bentonite for food packaging application. **Environmental Technology & Innovation**, v. 25, p. 102180, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102180>. Acesso em: 10 dez. 2024.

BILAL, M.; IQBAL, H. M. N. Naturally-derived biopolymers: Potential platforms for enzyme immobilization. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 130, p. 462–482, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.02.152>. Acesso em: 14 out. 2024.

CAMPOS, C. O. **Frutos de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda): características físico-químicas durante seu desenvolvimento e na pós-colheita**. 2007. 133 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/faf63d46-0f79-44d3-b9e6-4b098caa7793>. Acesso em: 15 set. 2024.

CAMPOS, N. A.; GIBON, Y.; CASSAN, C.; CARPENTIER, S. C.; SWENNEN, R.; AMAH, D.; MOING, A.; COLOMBIÉ, S. From fruit growth to ripening in plantain: a careful balance between carbohydrate synthesis and breakdown. **Journal of Experimental Botany**, v. 73, n. 14, p. 4832–4849, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erac187>. Acesso em: 17 out. 2024.

CHANDRASEKAR, C. M.; KRISHNAMACHARI, H.; FARRIS, S.; ROMANO, D. Development and characterization of starch-based bioactive thermoplastic packaging films derived from banana peels. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 5, p. 100328, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100328>. Acesso em: 11 dez. 2024.

CHENG, H.; CHEN, L.; MCCLEMENTS, D. J.; YANG, T.; ZHANG, Z.; REN, F.; MIAO, M.; TIAN, Y.; JIN, Z. Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry. **Trends in Food Science & Technology**, v. 114, p. 70–82, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.017>. Acesso em: 19 out. 2024.

CHEN, W.; MA, S.; WANG, Q.; MCCLEMENTS, D. J.; LIU, X.; NGAI, T.; LIU, F. Fortification of edible films with bioactive agents: a review of their formation, properties, and application in food preservation. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 62, n. 18, p. 5029–5055, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1881435>. Acesso em: 24 out. 2024.

CHEN, Z.; ZONG, L.; CHEN, C.; XIE, J. Development and characterization of PVA-Starch active films incorporated with β -cyclodextrin inclusion complex embedding lemongrass (*Cymbopogon citratus*) oil. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 26, p. 100565, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100565>. Acesso em: 10 dez. 2024.

COPPOLA, G.; CALABRO, V.; LOPRESTO, C. G.; CHAKRABORTY, S.; GAUDIO, M. T.; CURCIO, S. Bioplastic from renewable biomass: a facile solution for a greener environment. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 2, p. 231–251, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00208-7>. Acesso em: 13 out. 2024.

COSTA, A.; ENCARNAÇÃO, T.; TAVARES, R.; TODO BOM, T.; MATEUS, A. Bioplastics: innovation for green transition. **Polymers**, v. 15, n. 3, p. 517, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15030517>. Acesso em: 13 out. 2024.

COSTA, N. P.; LUZ, T. L. B.; GONÇALVES, E. P.; BRUNO, R. L. A., Caracterização físico-química de frutos de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Câm.), colhidos em quatro estádios de maturação. **Bioscience Journal**, v. 20, n. 2, p. 65-71, May/Aug. 2004. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/6515/4249>. Acesso em: 20 set. 2024.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. 2019. **Química de Alimentos de Fennema**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed.

DANTAS JÚNIOR, O. R.; **Qualidade e capacidade antioxidante total de frutos de genótipos de umbuzeiro oriundos do semi-árido nordestino**. 106 f. Tese (Doutorado em Agronomia com Área de Concentração em Agricultura Tropical – Fisiologia Pós-colheita de Frutos e Hortaliças Tropicais) Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2008.

DEVI, L. S.; DAS, B.; DUTTA, D.; KUMAR, S. Essential oils as functional agents in biopolymer-based sustainable food packaging system: A review. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 39, p. 101563, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101563>. Acesso em: 5 out. 2024.

DIYANA, Z. N.; HUDA, N.; ILYAS, R. A.; SELAMAT, M. Z.; JUMAIDIN, R.; JULMOHAMMAD, N.; GHAZALI, I. Physical properties of thermoplastic starch derived from natural resources and its blends: a review. **Polymers**, v. 13, n. 9, p. 1396, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13091396>. Acesso em: 4 out. 2024.

DONATO, S. L. R.; ARANTES, A. M.; GONGALVES, N. P.; MATOS, F. S.; RODRIGUES, M. G. V.; SATURNINO, H. M. Aspectos ecofisiológicos, morfológicos, fenológicos e de produção do umbuzeiro e da umbucajazeira. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte, v. 40, n. 307, p. 22-38, 2019.

DONATO, S. L. R.; CASTRICINI, A.; ARANTES, A. de M.; RODRIGUES, M. G. V.; DEUS, J. S.; PIRES, E. Proposta de classes para comercialização de umbu. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 46, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0100-29452024516>. Acesso em: 13 dez. 2024.

DUAN, B.; REYMICK, O. O.; LIU, Z.; ZHOU, Y.; WANG, X.; FENG, Z.; TAO, N. Citral enhances disease resistance in postharvest citrus fruit through inducing jasmonic acid pathway and accumulating phenylpropanoid compounds. **Postharvest Biology and Technology**, v. 207, p. 112633, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112633>. Acesso em: 12 dez. 2024.

DURCZYŃSKA, Z.; ŻUKOWSKA, G. Properties and applications of essential oils: a review. **Journal of Ecological Engineering**, v. 25, n. 2, p. 333–340, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.12911/22998993/177404>. Acesso em: 15 out. 2024.

ERCEG, T.; ŠOVLJANSKI, O.; STUPAR, A.; UGARKOVIĆ, J.; AĆIMOVIĆ, M.; PEZO, L.; TOMIĆ, A.; TODOSIJEVIĆ, M. A comprehensive approach to chitosan-gelatine edible coating with β -cyclodextrin/lemongrass essential oil inclusion complex — Characterization and food application. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 228, p. 400-410, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.132>. Acesso em: 10 dez. 2024.

ESPITIA, P. J. P.; OTONI, C. G. Nanotechnology and Edible Films for Food Packaging Applications. *In: [S. l.]*: Springer Singapore, 2018. p. 125–145. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-13-1909-9_6. Acesso em: 1 out. 2024.

FAHEEM, F.; DIN, A.; AADIL, R. M.; ROSZKO, M.; HAQ, I.-U.; LIU, Z. W.; BRYŁA, M.; KIELISZEK, M.; GUL, M.; RABAIL, R. Uncovering the Industrial Potentials of Lemongrass Essential Oil as a Food Preservative: A Review. **Antioxidants (Basel, Switzerland)**, v. 11, n. 4, p. 720, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/antiox11040720>. Acesso em: 16 out. 2024.

FONSECA, N. **Propagação e plantio do umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam) para a agricultura familiar do Semiárido Baiano**. Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2015. 23 p.; il.; 21 cm.

GALVÃO, M. S.; NARAIN, N.; DO SOCORRO PORTO DOS SANTOS, M.; NUNES, M. L. Volatile compounds and descriptive odor attributes in umbu (*Spondias tuberosa*) fruits

during maturation. **Food Research International**, v. 44, n. 7, p. 1919–1926, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.01.020>. Acesso em: 24 out. 2024.

GAMAGE, A.; MERAH, O.; THIVIYA, P.; MANAMPERI, A.; DASSANAYAKE, R. S.; JAYAKODI, Y.; MADHUIJITH, T.; BANDARA, A.; LIYANAPATHIRANAGE, A.; WASANA, M. L. D.; EVON, P. Polysaccharide-Based Bioplastics: Eco-Friendly and Sustainable Solutions for Packaging. **Journal of Composites Science**, v. 8, n. 10, p. 413, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jcs8100413>. Acesso em: 9 dez. 2024.

GARCÍA-RAMÓN, J. A.; CARMONA-GARCÍA, R.; VALERA-ZARAGOZA, M.; APARICIO-SAGUILÁN, A.; BELLO-PÉREZ, L. A.; AGUIRRE-CRUZ, A.; ALVAREZ-RAMIREZ, J. Morphological, barrier, and mechanical properties of banana starch films reinforced with cellulose nanoparticles from plantain rachis. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 187, p. 35–42, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.112>. Acesso em: 11 dez. 2024.

GONÇALVES, E. M.; SILVA, M.; ANDRADE, L.; PINHEIRO, J. From fields to films: exploring starch from agriculture raw materials for biopolymers in sustainable food packaging. **Agriculture**, v. 14, n. 3, p. 453, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture14030453>. Acesso em: 11 out. 2024.

GONDIM, P. J. **Identificação de carotenoides e quantificação de compostos bioativos e atividade antioxidante em frutos do gênero *Spondias***. 2012. 119 f. Tese (Doutorado em agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia.

GUTIÉRREZ-PACHECO, M. M.; TORRES-MORENO, H.; FLORES-LOPEZ, M. L.; AYALA-ZAVALA, J. F.; VELÁZQUEZ GUADARRAMA, N.; ORTEGA-RAMÍREZ, L. A.; LÓPEZ-ROMERO, J. C. Mechanisms and applications of citral's antimicrobial properties in food preservation and pharmaceuticals formulations. **Antibiotics**, v. 12, n. 11, p. 1608, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/antibiotics12111608>. Acesso em: 13 dez. 2024.

HAN, J. H. Chapter 9 - Edible Films and Coatings: A Review. In: **Innovations in Food Packaging**. [S. l.]: Elsevier, 2014. p. 213–255. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-394601-0.00009-6>. Acesso em: 20 out. 2024.

HENNING, F. G.; ITO, V. C.; DEMIATE, I. M.; LACERDA, L. G. Non-conventional starches for biodegradable films: A review focussing on characterisation and recent applications in food packaging. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 4, p. 100157, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100157>. Acesso em: 9 dez. 2024.

HOSSAIN, M. T.; SHAHID, M. A.; AKTER, S.; FERDOUS, J.; AFROZ, K.; REFAT, K. R. I.; FARUK, O.; JAMAL, M. S. I.; UDDIN, M. N.; SAMAD, M. A. B. Cellulose and starch-based bioplastics: a review of advances and challenges for sustainability. **Polymer-Plastics Technology and Materials**, v. 63, n. 10, p. 1329–1349, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2329980>. Acesso em: 12 out. 2024.

IRMAYANTI, I.; ANWAR, C. Synthesis of biodegradable plastic from banana peel with glycerol as plasticizer. **Food Processing: Techniques and Technology**, v. 54, n. 3, p. 546–

557, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2527>. Acesso em: 11 dez. 2024.

JABEEN, N.; MAJID, I; NAYIK, G. A. Bioplastics and food packaging: A review. **Cogent Food & Agriculture**, v. 1, n. 1, p. 1117749, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1117749>. Acesso em: 13 out. 2024.

JANGHU, S.; KUMAR, V.; YADAV, A. K. Post-Harvest Management of Fruits and Vegetables. In: IRITI, M. **Current Perspectives in Agriculture and Food Science**. [S. l.]: BP Internacional, 2024. v. 7, cap. 9, p. 125–148. DOI: 10.9734/bpi/cpafs/v7/7984E. Disponível em: <https://stm.bookpi.org/CPAFS-V7/article/view/13751>. Acesso em: 20 out. 2024.

JIANG, T.; ZHU, J.; DUAN, Q.; LIU, H.; YU, L. Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, v. 3, n. 1, p. 8–18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.003>. Acesso em: 18 out. 2024.

KABIR, E.; KAUR, R.; LEE, J.; KIM, K.-H.; KWON, E. E. Prospects of biopolymer technology as an alternative option for non-degradable plastics and sustainable management of plastic wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120536, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120536>. Acesso em: 8 dez. 2024.

KATEKAR, V. P.; RAO, A. B.; SARDESHPANDE, V. R. A hydrodistillation-based essential oils extraction: A quest for the most effective and cleaner technology. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 36, p. 101270, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101270>. Acesso em: 10 nov. 2024.

KAWHENA, T. G.; FAWOLE, O. A.; OPARA, U. L. Optimization of gum arabic and starch-based edible coatings with lemongrass oil using response surface methodology for improving postharvest quality of whole “Wonderful” pomegranate fruit. **Coatings**, v. 11, n. 4, p. 442, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings11040442>. Acesso em: 11 dez. 2024.

KHEZERLOU, A.; ALIZADEH SANI, M.; TAVASSOLI, M.; EHSANI, A.; MCCLEMENTS, D. J.; MOHAMMADI, K. Application of Nanotechnology to Improve the Performance of Biodegradable Biopolymer-Based Packaging Materials. **Polymers**, v. 13, n. 24, p. 4399, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13244399>. Acesso em: 22 out. 2024.

KIM, B.-K.; YANG, H.-S.; LEE, H.-S.; SONG, K.-B. Development of Ginkgo (*Ginkgo biloba*) Nut Starch Films Containing Cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) Leaf Essential Oil. **Molecules**, v. 26, n. 20, p. 6114, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules26206114>. Acesso em: 10 dez. 2024.

KONG, I.; DEGRAEVE, P.; PUI, L. P. Polysaccharide-Based Edible Films Incorporated with Essential Oil Nanoemulsions: Physico-Chemical, Mechanical Properties and Its Application in Food Preservation-A Review. **Foods (Basel, Switzerland)**, v. 11, n. 4, p. 555, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods11040555>. Acesso em: 3 out. 2024.

LAUER, M. K.; SMITH, R. C. Recent advances in starch-based films toward food packaging applications: Physicochemical, mechanical, and functional properties. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 19, n. 6, p. 3031–3083, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12627>. Acesso em: 22 out. 2024.

LAMBERT, S.; WAGNER, M. Environmental performance of bio-based and biodegradable plastics: the road ahead. **Chemical Society Reviews**, v. 46, n. 22, p. 6855–6871, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/c7cs00149e>. Acesso em: 8 out. 2024.

LI, J.; YE, F.; LEI, L.; ZHAO, G. Combined effects of octenylsuccination and oregano essential oil on sweet potato starch films with an emphasis on water resistance. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 115, p. 547–553, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.093>. Acesso em: 24 out. 2024.

LI, L.; SUN, J.; GAO, H.; SHEN, Y.; LI, C.; YI, P.; HE, X.; LING, D.; SHENG, J.; LI, J.; LIU, G.; ZHENG, F.; XIN, M.; LI, Z.; TANG, Y. Effects of Polysaccharide-Based Edible Coatings on Quality and Antioxidant Enzyme System of Strawberry during Cold Storage. **International Journal of Polymer Science**, v. 2017, p. 1–8, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2017/9746174>. Acesso em: 24 out. 2024.

LIMA, M. A. C.; CASTRICINI, A. Qualidade e pós-colheita do umbu. **Informe Agropecuário**. v. 40, n. 307, p. 80-90, 2019.

LIMA, M. A. C.; OLIVEIRA, A. B.; ROSATTI, S. R.; SANTOS, A. C. N.; ARAÚJO, A. A.; SILVA, R. P. Armazenamento refrigerado de umbu sob atmosfera modificada com uso de filme de cloreto de polivinila In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 21, 2010, Natal. **Anais [...]**. Natal: Emparn/UFERSA/Embrapa/SBF, 2010.

LIMA, M. A. C.; SILVA, S. D. M.; OLIVEIRA, V. R. Umbu-Spondias tuberosa. In: **Exotic Fruits Reference Guide**. [S. l.]: Elsevier, 2018. p. 427–433. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803138-4.00057-5>. Acesso em: 24 out. 2024.

MACEDO, S. A.; CÂMARA, M. P. S.; DE SOUZA, E. L.; LUNDGREN, G. A.; DOS PASSOS BRAGA, S. Combined chitosan and *Cympobogon citratus* (D.C. ex Nees) Stapf. essential oil to inhibit the fungal phytopathogen *Paramyothecium roridum* and control crater rot in melon (*Cucumis melo* L.). **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 51, n. 4, p. 2057–2065, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42770-020-00378-y>. Acesso em: 05 dez. 2024.

MAHMUD, J.; KHAN, R. (2018) Characterization of natural antimicrobials in food system. **Advances in Microbiology**, v. 8, p. 894-916, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/aim.2018.811060>. Acesso em: 27 out. 2024.

MATLOOB, A.; KHALID, W.; RAHIM, M. A.; RAMNIWAS, S.; AMBREEN, S.; ERCISLI, S.; KHAN, F. A.; ORANAB, S.; AYUB, H.; MOHSIN, M.; NAYIK, G. A. A Review on edible coatings and films: advances, composition, production methods, and safety concerns. **ACS Omega**, v. 8, n. 32, p. 28932–28944, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03459>. Acesso em: 24 out. 2024.

MAZHANDU, Z. S.; BELAID, M.; NHUBU, T.; MAMVURA, T. A.; MUZENDA, E. Integrated and consolidated review of plastic waste management and bio-based biodegradable plastics: challenges and opportunities. **Sustainability**, v. 12, n. 20, p. 8360, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12208360>. Acesso em: 20 out. 2024.

MERTENS, J.; SIQUEIRA FILHO, J. A.; GERMER, J.; SAUERBORN, J. *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae), a threatened tree of the Brazilian Caatinga? **Brazilian Journal of Biology**, v. 77, n. 3, p. 542–552, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.18715>. Acesso em: 20 out. 2024.

MITELUT, A.; TANASE, E. E.; POPA, V. I.; POPA, M. E. Sustainable alternative for food packaging: chitosan biopolymer - a Review. **AgroLife Scientific Journal**, v. 4, n. 2, p. 52–61, 2015. Disponível em: <https://agrolifejournal.usamv.ro/index.php/agrolife/article/view/90/90>. Acesso em: 11 out. 2024.

MUKARRAM, M.; MUKARRAM, M.; KHAN, M. A.; KURJAK, D.; POLTRONIERI, P.; SHAHID, M.; KHAN, M. A.; ALI, J.; CHOUDHARY, S.; KHAN, M. M. A.; POLTRONIERI, P. Lemongrass essential oil components with antimicrobial and anticancer activities. **Antioxidants**, v. 11, n. 1, p. 20, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/antiox11010020>. Acesso em: 12 dez. 2024.

MOJICA-MUÑOZ, D. M.; MACÍAS-SÁNCHEZ, K. L.; JUÁREZ-HERNÁNDEZ, E. O.; RODRÍGUEZ-ÁLVAREZ, A.; GRÉVY, J.-M.; DÍAZ-VALLE, A.; CARRILLO-TRIPP, M.; FALCÓN-GONZÁLEZ, J. M. Optimizing biodegradable plastics: molecular dynamics insights into starch plasticization with glycerol and oleic acid. **Journal of Molecular Graphics and Modelling**, v. 126, p. 108674, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2023.108674>. Acesso em: 12 out. 2024.

MORENO-ZARAGOZA, J.; ROSELL, C. M.; BELLO-PÉREZ, L. A. The multiscale structure of banana starch related to the physicochemical, thermal, functional and digestibility characteristics: a review. **Food Hydrocolloids**, v. 159, p. 110646, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110646>. Acesso em: 27 out. 2024.

MOURA, F. T. de; MARTINS, L. P.; SCHUNEMANN, A. P. P.; SILVA, S. de M. Frutos do umbuzeiro armazenados sob atmosfera modificada e ambiente em diferentes estádios de maturação. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 4, p. 764–772, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1806-66902013000400013>. Acesso em: 21 out. 2024.

NARAIN, N.; BORA, P. S.; HOLSCHUH, H. J.; VASCONCELOS, M. A. S. Variation in physical and chemical composition during maturation of umbu (*Spondias tuberosa*) fruits. **Food Chemistry**, v. 44, p. 255-259, 1992.

NKEDE, F. N.; WARDANA, A. A.; PHUONG, N. T. H.; WARDAK, M. H.; TANAKA, F.; TAKAHASHI, M.; FANZE, M.; KOGA, A.; TANAKA, F. Preparation and characterization of chitosan/lemongrass oil/cellulose nanofiber pickering emulsions active packaging and its application on tomato preservation. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 31, n. 11, p. 4930–4945, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02885-z>. Acesso em: 10 dez. 2024.

NOGUEIRA, G. F.; FAKHOURI, F. M.; DE OLIVEIRA, R. A. Extraction and characterization of arrowroot (*Maranta arundinaceae* L.) starch and its application in edible films. **Carbohydrate Polymers**, v. 186, p. 64–72, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.024>. Acesso em: 10 dez. 2024.

ORSUWAN, A.; SOTHORNVIT, R. Effect of banana and plasticizer types on mechanical, water barrier, and heat sealability of plasticized banana-based films. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 1, p. e13380, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jfpp.13380>. Acesso em: 10 dez. 2024.

PASCALL, M. A.; LIN, S. J. The Application of edible polymeric films and coatings in the food industry. **Journal of Food Processing & Technology**. v. 4, n. 2, p. e116, 2013. Disponível em: <https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/the-application-of-edible-polymeric-films-and-coatings-in-the-food-industry-2157-7110.1000e116.pdf>. Acesso em: 24 out. 2024.

PAUL, S. K. Edible Films and Coatings for Fruits and Vegetables. *In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 363–376. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11509-7>. Acesso em: 16 out. 2024.

PEI, J.; PALANISAMY, C. P.; SRINIVASAN, G. P.; PANAGAL, M.; KUMAR, S. S. D.; MIRONESCU, M. A comprehensive review on starch-based sustainable edible films loaded with bioactive components for food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 274, n. Pt 1, p. 133332, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133332>. Acesso em: 7 out. 2024.

PETKOSKA, A., T.; DANILOSKI, D.; D’CUNHA, N. M.; NAUMOVSKI, N.; BROACH, A. T. Edible packaging: Sustainable solutions and novel trends in food packaging. **Food Research International**, v. 140, p. 109981, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109981>. Acesso em: 13 out. 2024.

RAGHAV, P.; AGARWAL, N.; SAINI, M. Herbal edible coatings of fruits and vegetables: a newer concept. **International Journal of Advanced Research**, v. 4, n. 6, p. 1452–1458, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.21474/ijar01/660>. Acesso em: 17 out. 2024.

RAGHUVANSHI, T. S.; KOHAR, N.; SINGH, P. P.; PRAKASH, B. Essential oils: from traditional to modern-day applications with special reference to medicinal and aromatic plants in India. *In: PRAKASH, B.; DUBEY, N. K.; FREITAS BRILHANTE DE SÃO JOSÉ, J.* (eds.). **Plant Essential Oils**. Singapore: Springer Nature, 2023. p. 1–26. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4370-8_1. Acesso em: 7 out. 2024.

RAHARDIYAN, D.; MOKO, E. M.; TAN, J. S.; LEE, C. K. Thermoplastic starch (TPS) bioplastic, the green solution for single-use petroleum plastic food packaging – A review. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 168, p. 110260, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2023.110260>. Acesso em: Acesso em: 13 out. 2024.

RAMÍREZ-HERNÁNDEZ, A.; APARICIO-SAGUILÁN, A.; REYNOSO-MEZA, G.; CARRILLO-AHUMADA, J. Multi-objective optimization of process conditions in the manufacturing of banana (*Musa paradisiaca* L.) starch/natural rubber films. **Carbohydrate**

Polymers, v. 157, p. 1125–1133, 2016. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.10.083>. Acesso em: 11 dez. 2024.

RANGARAJ, V. M.; RAMBABU, K.; BANAT, F.; MITTAL, V. Natural antioxidants-based edible active food packaging: an overview of current advancements. **Food Bioscience**, v. 43, p. 101251, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101251>. Acesso em: 9 dez. 2024.

RASHWAN, A. K.; YOUNIS, H. A.; ABDELSHAFY, A. M.; OSMAN, A. I.; ELETMANY, M. R.; HAFOUDA, M. A.; CHEN, W. Plant starch extraction, modification, and green applications: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 22, n. 5, p. 2483–2530, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01753-z>. Acesso em: 10 dez. 2024.

RESTREPO, A. E.; VILLA, C. C.; ROJAS, J. D.; PINZÓN, M. I.; GARCÍA, O. R.; SÁNCHEZ, L. T. Mechanical, barrier, and color properties of banana starch edible films incorporated with nanoemulsions of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) and rosemary (*Rosmarinus officinalis*) essential oils. **Food Science and Technology International**, v. 24, n. 8, p. 705–712, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1082013218792133>. Acesso em: 17 out. 2024.

RIQUELME, N.; HERRERA, M. L.; MATIACEVICH, S. Active films based on alginate containing lemongrass essential oil encapsulated: effect of process and storage conditions. **Food and Bioproducts Processing**, v. 104, p. 94–103, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.05.005>. Acesso em: 6 dez. 2024.

ROSENBOOM, J.-G.; LANGER, R.; TRAVERSO, G. Bioplastics for a circular economy. **Nature reviews. Materials**, v. 7, n. 2, p. 117–137, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>. Acesso em: 9 dez. 2024.

SALES, R. P.; SILVA, L. C.; NEVES, A. G. D. S.; FAJARDO, C. G.; PINHEIRO, L. G.; VIEIRA, F. D. A. Addressing conservation needs: genetic diversity and population ecology of the endemic tree *Spondias tuberosa* Arruda. **Scientifica**, v. 2024, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2024/5023974>. Acesso em: 11 dez. 2024.

SANTOSA, H.; DJAENI, M.; ROKHATI, N.; RATNAWATI, R.; AFRIYANTI, A.; SETIATUN, A. P. Effect of sago starch concentrations, stirring speeds, and lemongrass oil concentration for edible film production using solvent casting method. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1295, n. 1, p. 012020, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1295/1/012020>. Acesso em: 5 dez. 2024.

SANTOS, E. F.; ARAÚJO, R. R.; LEMOS, E. E. P.; ENDRES, L. Quantificação de compostos bioativos em frutos de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Câm.) e cajá (*Spondias mombin* L.) nativos de Alagoas. **Revista Ciência Agrícola**, v. 16, n. 1, p. 21–29, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.28998/rca.v16i1.3484>. Acesso em: 22 abr. 2025.

SANTOS, H. S. N.; MIZOBUTSI, G. P.; PINHEIRO, J. M. S.; SANTOS NETO, J. A.; CASTRICINI, A.; ASPIAZÚ, I.; CRUZ, C. G.; SOUSA, I. P. S.; JESUS, M. O. AGUIAR, F. Physical and chemical characterization of fruits of different Umbu (*Spondias tuberosa*) accesses. **Journal of Agricultural Science**; v. 11, n. 16, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5539/jas.v11n16p124>. Acesso em: 14 set. 2024.

SANTOS, N. S.; SILVA, J. C. S.; ARAÚJO, C. A.; LIMA, K. F.; SILVA, F. G. A. Caracterização da conservação refrigerada do umbu (*Spondias Tuberosa* Arruda Câmara) sob atmosfera modificada. **Diversitas Journal**, v. 5, n. 2, p. 693–704, 2020. DOI: 10.17648/diversitas-journal-v5i2-931. Disponível em: https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/931. Acesso em: 11 dez. 2024.

SARMA, M.; CHAKRABORTY, S.; NAYAK, P. K.; DASH, K. K.; KESAVAN, R. Starch-Based Biodegradable Film from Fruit and Vegetable Waste and Its Standardization Modules Based on Neural Networks and Response Surface Methodology. **Starch - Stärke**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/star.202300082>. Acesso em: 9 dez. 2024.

SATURNINO, H. M.; GONÇALVES, N. P.; CASTRICINI, A.; CARDOSO, M. M.; SOUZA, I. Características botânicas do umbuzeiro e outras Spondias. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte, v. 40, n. 307, p. 7-21, 2019.

SILVA, V. D. M.; COUTINHO MACEDO, M. C.; RODRIGUES, C. G.; NERIS DOS SANTOS, A.; DE FREITAS E LOYOLA, A. C.; FANTE, C. A. Biodegradable edible films of ripe banana peel and starch enriched with extract of *Eriobotrya japonica* leaves. **Food Bioscience**, v. 38, p. 100750, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100750>. Acesso em: 11 dez. 2024.

SHAHIDI, F.; HOSSAIN, A. Preservation of aquatic food using edible films and coatings containing essential oils: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 62, n. 1, p. 66–105, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1812048>. Acesso em: 4 out. 2024.

SHARMA, R.; NATH, P. C.; DAS, P.; RUSTAGI, S.; SHARMA, M.; SRIDHAR, N.; HAZARIKA, T. K.; RANA, P.; NAYAK, P. K.; SRIDHAR, K. Essential oil-nanoemulsion based edible coating: Innovative sustainable preservation method for fresh/fresh-cut fruits and vegetables. **Food Chemistry**, v. 460, n. Pt 1, p. 140545, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140545>. Acesso em: 11 out. 2024.

SOLTANI FIROUZ, M.; MOHI-ALDEN, K.; OMID, M. A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development. **Food Research International**, v. 141, p. 110113, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110113>. Acesso em: 2 out. 2024.

SUHAG, R.; KUMAR, N.; PETKOSKA, A. T.; UPADHYAY, A. Film formation and deposition methods of edible coating on food products: A review. **Food Research International**, v. 136, p. 109582, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109582>. Acesso em: 11 out. 2024.

SURENDREN, A.; MISRA, M.; MOHANTY, A. K.; LIU, Q. A review of biodegradable thermoplastic starches, their blends and composites: recent developments and opportunities for single-use plastic packaging alternatives. **Green Chemistry**, v. 24, n. 22, p. 8606–8636, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d2gc02169b>. Acesso em: 12 out. 2024.

SWETHA, T. A.; PONNUCHAMY, K.; BORA, A.; MUTHUSAMY, G.; ANANTHY, V.; ARUN, A. A review of bioplastics as an alternative to petrochemical plastics: Its types,

structure, characteristics, degradation, standards, and feedstocks. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 35, n. 6, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pat.6482>. Acesso em: 08 dez. 2024.

TEODOSIO, A. E. M. M.; CARLOS ROCHA ARAÚJO, R. H.; FIGUEIREDO LIMA SANTOS, B. G.; LINNÉ, J. A.; DA SILVA MEDEIROS, M. L.; ALVES ONIAS, E.; ALVES DE MORAIS, F.; DE MELO SILVA, S.; DE LIMA, J. F. Effects of edible coatings of *Chlorella* sp. containing pomegranate seed oil on quality of *Spondias tuberosa* fruit during cold storage. **Food Chemistry**, v. 338, p. 127916, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127916>. Acesso em: 21 out. 2024.

TIAN, B.; LIU, J.; YANG, W.; WAN, J.-B. Biopolymer Food Packaging Films Incorporated with Essential Oils. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 71, n. 3, p. 1325–1347, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c07409>. Acesso em: 19 out. 2024.

TIWARI, G.; TUTEJA, G.; JADHAV, Y.; SELVARAJAN, S. Performance of Biodegradable Packaging Films Containing Essential Oils for Food Quality Maintenance. **Natural and Engineering Sciences**, v. 10, n. 1, p. 468–478, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.28978/nesciences.1660349>. Acesso em: 29 nov. 2024.

THAKUR, R.; PRISTIJONO, P.; SCARLETT, C. J.; BOWYER, M.; VUONG, Q. V.; SINGH, S. P. Starch-based films: Major factors affecting their properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 132, p. 1079–1089, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190>. Acesso em: 29 out. 2024.

TSANG, Y. F.; KUMAR, V.; SAMADAR, P.; YANG, Y.; LEE, J.; OK, Y. S.; SONG, H.; KIM, K.-H.; KWON, E. E.; JEON, Y. J. Production of bioplastic through food waste valorization. **Environment International**, v. 127, p. 625–644, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.076>. Acesso em: 08 out. 2024.

VALKOVÁ, V.; KAČÁNIOVÁ, M.; VUKIC, M.; ĎÚRANOVÁ, H.; BOROTOVÁ, P.; VUKOVIC, N. L.; GALOVIČOVÁ, L. *Cymbopogon citratus* essential oil: its application as an antimicrobial agent in food preservation. **Agronomy**, v. 12, n. 1, p. 155, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12010155>. Acesso em: 22 out. 2024.

VARGAS, O. L. T.; LOAIZA, Y. V. G.; AGREDO, I. A. R. Development and characterisation of starch/alginate active films incorporated with lemongrass essential oil (*Cymbopogon citratus*). **Materials Advances**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d4ma00608a>. Acesso em: 10 dez. 2024.

VENEGAS, R.; RUEDA, A. M.; PORRAS, A.; MORALES, M. A.; TORRES, A.; ARIAS, M. J. Development and characterization of plantain (*Musa paradisiaca*) flour-based biopolymer films reinforced with plantain fibers. **Polymers**, v. 14, n. 4, p. 748, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14040748>. Acesso em: 11 dez. 2024.

VERMA, P.; RANI, R.; DAS, D.; RAI, K. K.; GOGOI, P.; BADWAIK, L. S. Transformation of banana peel into biodegradable film added with starch and carboxymethyl cellulose and its characterization. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 37, p. 101356, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101356>. Acesso em: 11 dez. 2024.

VIANA, E. B. M.; OLIVEIRA, N. L.; RIBEIRO, J. S.; ALMEIDA, M. F.; SOUZA, C. C. E.; RESENDE, J. V.; SANTOS, L. S.; VELOSO, C. M. Development of starch-based bioplastics of green plantain banana (*Musa paradisiaca* L.) modified with heat-moisture treatment (HMT). **Food Packaging and Shelf Life**, v. 31, p. 100776, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100776>. Acesso em: 10 dez. 2024.

WANG, B.; SUI, J.; YU, B.; YUAN, C.; GUO, L.; ABD EL-ATY, A. M.; CUI, B. Physicochemical properties and antibacterial activity of corn starch-based films incorporated with *Zanthoxylum bungeanum* essential oil. **Carbohydrate Polymers**, v. 254, p. 117314, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117314>. Acesso em: 22 out. 2024.

WANG, B.; YAN, S.; GAO, W.; KANG, X.; YU, B.; LIU, P.; GUO, L.; CUI, B.; ABD EL-ATY, A. M. (2021). Antibacterial activity, optical, and functional properties of corn starch-based films impregnated with bamboo leaf volatile oil. **Food Chemistry**, 357, 129743, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129743>. Acesso em: 25 out. 2024.

WEI, M.; SALEHI, S.; XIONG, S.; XIE, G.; BOSTRÖM, D.; ANDERSSON, R. Properties of cassava stem starch being a new starch resource. **Starch - Stärke**, v. 70, n. 5–6, p. 1700125, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/star.201700125>. Acesso em: 10 dez. 2024.

YAASHIKAA, P. R.; KAMALESH, R.; SENTHIL KUMAR, P.; SARAVANAN, A.; VIJAYASRI, K.; RANGASAMY, G. Recent advances in edible coatings and their application in food packaging. **Food Research International**, v. 173, n. Pt 2, p. 113366, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113366>. Acesso em: 20 out. 2024.

YAMMINE, J.; CHIHIB, N.-E.; GHARSALLAOUI, A.; DUMAS, E.; ISMAIL, A.; KARAM, L. Essential oils and their active components applied as: free, encapsulated and in hurdle technology to fight microbial contaminations. A review. **Heliyon**, v. 8, n. 12, p. e12472, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12472>. Acesso em: 22 nov. 2024.

YANG, M.; SIMBO, J.; ZHAO, N.; YU, X.; CHANG, L.; ZHENG, P.; JIANG, F.; DU, S.-K. Structural, physicochemical and rheological properties of starches isolated from banana varieties (*Musa* spp.). **Food Chemistry: X**, v. 16, n. 3–4, p. 100473, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100473>. Acesso em: 17 out. 2024.

ZHAO, X.; CHEN, T.; LIU, J.; WANG, X.; WENG, Y. Development of antifouling antibacterial polylactic acid (PLA) -based packaging and application for chicken meat preservation. **Food Chemistry**, v. 463, n. Pt 1, p. 141116, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141116>. Acesso em: 29 set. 2024.

ZHANG, B.; LIU, Y.; WANG, H.; LIU, W.; CHEONG, K.-L.; TENG, B. Characterization of seaweed polysaccharide-based bilayer films containing essential oils with antibacterial activity. **LWT**, v. 150, p. 111961, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111961>. Acesso em: 27 out. 2024.

ZHANG, Y.; HU, M.; ZHU, K.; WU, G.; TAN, L. Functional properties and utilization of *Artocarpus heterophyllus* Lam seed starch from new species in China. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 107, n. Pt B, p. 1395–1405, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.001>. Acesso em: 20 nov. 2024.

CAPÍTULO 2

ARTIGO 1

Development of biodegradable and active films based on green plantain starch using an emulsion of lemongrass essential oil*

Desenvolvimento de filmes biodegradáveis e ativos à base de amido de banana-da-terra verde utilizando uma emulsão de óleo essencial de capim-limão

* Artigo submetido à revista Biomacromolecule (INSS: 1525-7797), Classificação A1 (Qualis-Capes 2017-2020), Fator de impacto: 5.8

DEVELOPMENT OF BIODEGRADABLE AND ACTIVE FILMS BASED ON GREEN PLANTAIN STARCH USING AN EMULSION OF LEMONGRASS ESSENTIAL OIL

ABSTRACT

The growing demand for sustainable packaging has encouraged research on the development of starch-based biodegradable films. This study evaluated the effect of incorporating lemongrass essential oil (LEO) emulsions into green plantain starch-based films to enhance their functional properties for application in active and sustainable packaging. Films containing different concentrations of LEO (0, 0.4, 0.6, 0.8, and 1.0% w/w) were prepared using the casting technique and characterized in terms of their barrier, physical, biodegradability, and antioxidant properties. The results showed that the addition of LEO increased the elongation at break from 53.82% to 72.82% for 0 and 0.4% concentrations, respectively; however, the 0.4% value was statistically similar to that of the control film, indicating a plasticizing effect and improved film flexibility. No significant impact was observed on water vapor permeability (ranging from 0.30 to 0.34 g water·mm·dia⁻¹·m⁻²·kPa⁻¹), solubility (between 14.39% and 15.54%), or thickness, although a slight reduction in WVP was noted compared to the control (0.36 g·mm·day⁻¹·m⁻²·kPa⁻¹), along with a decrease in tensile strength (from 3.81 MPa to approximately 2.35 MPa). The films were fully biodegraded within 15 d, reinforcing the environmental potential of the material. Moreover, films with 0.8% and 1.0% LEO exhibited higher free radical scavenging activity, reaching values close to 65% at the end of the evaluation period. These results indicate that the incorporation of LEO emulsions imparted bioactive properties without significantly affecting the mechanical and barrier properties of the films, demonstrating their potential for use in active and biodegradable packaging and offering a viable alternative to conventional plastics with potential applications in food preservation.

KEYWORDS: Biopolymer; Bioactive compounds; Food packaging; Eco-friendly.

1. INTRODUCTION

The growing demand for sustainable packaging and environmental pressure regarding the use of polymers derived from fossil sources have driven the development of biopolymers, especially in the form of edible films, as promising alternatives for the preservation of fresh foods. Among the biodegradable polymers used, starch stands out due to its availability, edibility, non-toxicity, low cost, and renewable nature. Its application for such purposes aligns with sustainability principles, promoting circularity, resource efficiency, and environmental management throughout its life cycle.^{1,2}

The exploration of non-conventional starch sources has gained attention as a strategy for obtaining this polysaccharide, especially when considering agricultural products that, although still suitable for consumption, do not meet the commercial standards required for market sales. The use of such sources not only diversifies the raw materials available for bioplastic production but also helps reduce the pressure on conventional crops, which often face challenges related to increasing demand and competition for agricultural land.³ One raw material that meets these requirements is unripe plantain (*Musa paradisiaca* L.).⁴

Green-stage plantains exhibit high starch content, ranging from 70 to 80% on a dry weight basis, with amylose levels between 30 and 40%, depending on the variety. Their rheological properties, such as retrogradation tendency and peak viscosity, make them suitable for bioplastics production.⁵ Another important fraction is resistant starch, which resists enzymatic hydrolysis and is present in high amounts, ranging from 47 to 57%. The structure of resistant starch contributes to the formation of a more stable polymer network in the films, potentially resulting in improved mechanical strength and flexibility.⁶⁻⁸

Studies have indicated that starch extracted from unripe plantains has larger and denser granules, with a structure that provides moisture resistance and barrier capacity—favorable

characteristics for films and coatings used in food preservation.^{8,9} The use of plantain starch not only contributes to reducing plastic waste but also aligns with circular economy principles, as agricultural by-products can be transformed into new materials, particularly in the case of green bananas with injuries or imperfections that do not meet consumer quality standards.¹⁰ Despite their potential, green plantain starch films have several limitations, such as high solubility and water vapor permeability, due to their strong hydrophilic nature, which compromises their effectiveness as moisture barriers.^{5,7,11} To improve these characteristics, additives such as plasticizers, surfactants, or other materials may be incorporated.¹²

The combination of green plantain starch and lemongrass essential oil represents a promising alternative for formulating edible coatings, as the oil can modify the barrier properties, reduce water vapor permeability, and provide adequate mechanical resistance to the material. In addition, it imparts antioxidant and antimicrobial activities.¹³ In this context, lemongrass essential oil (*Cymbopogon citratus*) has emerged as a natural additive of interest because of the presence of bioactive compounds such as citral (61.5%), geraniol (6.6%), and 1,8-cineole (6.4%), which are responsible for its strong antioxidant activity (84.0 ± 0.1), enhancing food protection and shelf-life extension.^{14,15} The antioxidant activity of lemongrass essential oil is attributed to the synergistic actions of its active components – α -citral, β -citral, myrcene, and eugenol,¹⁴ which act as free radical scavengers. This is due to the presence of conjugated double bonds that can donate an allylic hydrogen atom to free radicals, resulting in the formation of a resonance-stabilized radical, thus terminating the oxidative chain reaction.¹⁶ The incorporation of lemongrass essential oil (3% w/w) into edible coatings based on gum arabic and/or corn starch was shown to limit the loss of antioxidant capacity, suggesting a partial influence of the biopolymer type on this activity.¹⁷ Bajaj et al.¹⁸ evaluated the incorporation of lemongrass essential oil into xanthan gum-based films and found that the addition of oil

minimized the incidence of pathogens responsible for decay in Kinnow fruits and helped maintain antioxidant activity, effectively reducing oxidative stress.

Despite these promising results, the direct incorporation of essential oils into film formulations presents some drawbacks. Essential oils are highly volatile and have low water solubility, which limits their dispersion. Additionally, they may lose antioxidant and antimicrobial activity during the bioplastic processing steps, which involve heating the mixture.^{19,20} One way to overcome these limitations is by encapsulating the essential oil in an oil-in-water emulsion, improving its dispersion in water and stability during processing and application, without compromising its bioactivity. Encapsulation also enables controlled diffusion of bioactive compounds.²¹ In oxidized cassava starch-based coatings, the addition of emulsions containing different concentrations of essential oil delayed ripening and inhibited the onset of anthracnose in ‘Palmer’ mangoes.²⁰

Given the advances in the development of starch-based films (bioplastics), the present study investigated the effects of incorporating lemongrass essential oil emulsions at different concentrations on the barrier, mechanical, and morphological properties of green plantain starch films. The objective was to understand the relationship between essential oil incorporation and the functional performance of the bioplastic, thereby providing insights for the development of biodegradable and functional packaging materials with potential applications in the food industry.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

Plantains (*Musa paradisiaca* L.) were obtained from a producer in the Southwest region of Bahia, Brazil, at maturation stage 1 according to the Von Loeseck²² scale, characterized by green peel and no application of any ripening accelerators. Glycerol PA (ACS, Brazil), Tween

80 PA (Exodo Científica, Brazil), and lemongrass essential oil (*Cymbopogon citratus*) (Laszlo, Belo Horizonte-MG, Brazil) were also used. All other reagents employed were of at least analytical grade.

2.2. Starch extraction

Starch was extracted following the method described by Moorthy²³ with adaptations made by Cordeiro et al.²⁴

2.3. Preparation and characterization of emulsions

Emulsions were prepared according to the methodology described by Prakash et al.,²⁵ with modifications. The formulation consisted of 1.5 mL canola oil (*Brassica napus* L.), 1.8 mL Tween 80, distilled water, and lemongrass essential oil (*Cymbopogon citratus*) (EO) in quantities sufficient to reach concentrations of 0; 0.4; 0.6; 0.8; and 1% (w/w, relative to starch mass) in the emulsion (0; 0.3; 0.45; 0.6; and 0.75 mL, respectively). The component volumes were added to a 50 mL centrifuge tube and vortexed for 5 min. The mixture was then transferred to a beaker, and the tube was rinsed with distilled water, bringing the volume to 30 mL. The mixture was subsequently homogenized using a Turrax (IKA-T25, Campinas, SP, Brazil) at maximum speed (10,000 rpm) for 10 min to incorporate all components and form the emulsion. The emulsion was then subjected to ultrasonic bath treatment (Solidsteel, Piracicaba, SP) at 40 kHz for 30 min.

For emulsion characterization, droplet size and polydispersity index (PDI) were measured using a Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd, UK), based on dynamic light scattering (DLS) at 25 °C. Samples were previously diluted with Milli-Q water (1:200).

2.4. Film production

For the preparation of film-forming solutions, green plantain starch was added to 300 mL of distilled water (3% w/v) and gently stirred for 30 min for hydration. Glycerol (40% w/w) was then added as a plasticizer. The mixture was heated in a water bath (Solidsteel, SSDc 10L,

Piracicaba, SP, Brazil) at 85°C, under gentle manual stirring for 20 min, until complete gelatinization. After cooling to room temperature, 8.6 mL of the lemongrass essential oil emulsions at their respective concentrations were added. The suspension was then stirred with a Turrax (IKA T25, Campinas, SP, Brazil) for 10 min to promote component interaction. Film-forming solutions were poured onto glass plates (32.5 x 22.5 cm) and dried in a forced-air circulation oven (Tecnal, TE-394/3-MP, Piracicaba, SP, Brazil) at 40°C for approximately 24 h to ensure complete solvent evaporation and film formation, typical of the casting method. Finally, films were peeled from the glass plates and stored at room temperature and relative humidity of $50 \pm 5\%$, in a controlled atmosphere using a saturated NaBr solution inside hermetically sealed containers.

2.5. Film characterization

2.5.1. Thickness

Film thickness was measured using an electronic micrometer (Digimess, model 100.179D, China). Five random measurements were taken per film, and the average value was reported.

2.5.2. Water vapour solubility (WVP)

Water vapor permeability was determined according to method E96M-16²⁶ with adaptations. Test capsules containing silica gel were sealed with the film and placed inside desiccators containing distilled water at 24°C and 100% relative humidity, kept constant. The capsules were weighed on an analytical balance (Shimadzu, AY220, Japan) at 24-hour intervals over 8 days. WVP values were calculated according to Eq. 1.

$$WVP = \frac{TPVA \times e}{P_{sat} \times (RH_1 - RH_2)} \quad (1)$$

Where TPVA is the water vapor transmission rate (slope of water mass gain over time), e is film thickness, P_{sat} is saturation vapor pressure at test temperature (3.169 kPa), RH_1 is relative humidity outside the capsule (100%), and RH_2 is relative humidity inside the capsule.

2.5.3. Water solubility (S)

Water solubility was determined following Gontard et al.²⁷ with adaptations. Film samples (5 x 2 cm²) were dried in an oven (Tecnal, TE-394/3-MP, Piracicaba, SP, Brazil) at 105°C for 24 h to remove moisture and obtain the initial mass (M₁, g). Samples were then immersed in 50 mL distilled water in Falcon tubes and subjected to orbital shaking at 40 RPM, 24°C for 24 h. Subsequently, samples were removed and dried under the same conditions to obtain the final mass (M₂, g). Water solubility was expressed as the percentage of soluble material according to Eq. 2.

$$S = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (2)$$

2.5.4. Mechanical properties

Tensile strength (MPa), elongation at break (%), and Young's modulus (MPa) were determined using a texture analyzer (Stable Micro Systems, TA.XT Plus Texture Analyser, UK). Specimens of 100 mm x 20 mm (n=10 per replicate) were tested following the ASTM standardized method D882-18²⁸. Data were extracted via operational software (Exponent Connect Lite, version 8.1.3.0), analyzed according to ASTM D882-18_TG methodology, and Young's modulus was manually anchored using MACRO.

2.5.5. Biodegradability analysis

Film biodegradability was evaluated as per Martucci and Ruseckaite.²⁹ Samples (2 x 3 cm) were dried at 60°C until constant weight, weighed, and buried 4 cm deep in containers filled with dystrophic red-yellow latosol soil collected from 0-20 cm depth. Samples were exposed to sunlight and environmental conditions, excluding precipitation. Soil moisture was maintained at approximately 40% by adding water every 2 days over 15 days.

2.5.6. Morphological analysis

Surface and fractured film images were obtained using scanning electron microscopy (SEM) (JSM-6610, Jeol, Tokyo, Japan) equipped with EDS (Thermo Scientific NSS Spectral

Imaging) operating at 10 kV accelerating voltage. Samples were mounted on double-sided copper conductive tape and fixed onto a holder. A conductive gold coating was applied using a Gold Film Deposition System, Mesa V (Denton Vacuum LLC, Moorestown, NJ, USA).

2.5.7. Antioxidant capacity

The DPPH radical scavenging rate assessed antioxidant capacity. Film samples (30 x 30 mm) were immersed in 12 mL of 0.06 mM DPPH-ethanol solution. The mixture was kept in the dark for 30 min at room temperature. Absorbance was measured at 515 nm using a digital UV-visible spectrophotometer (Kasuki, IL-593-S, Japan). Readings were taken every 24 h for 5 days. DPPH radical scavenging rate was calculated by Eq. 3:

$$DPPH = \frac{A_0 - A_1}{A_0} * 100 \quad (3)$$

Where DPPH is the free radical scavenging rate (%), A_0 is the absorbance of the control sample, and A_1 is the absorbance of each sample.

2.6. Statistical analysis

Data were subjected to analysis of variance (ANOVA), followed by the F-test ($\alpha = 0.05$) to evaluate the effect of essential oil concentration. Analyses were performed using Statistical Analysis System (SAS) University OnDemand for Academics.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Barrier properties of films

The addition of essential oil did not significantly alter the thickness, water vapor permeability, or solubility of the films with emulsion, as shown in Table 1.

Table 1. Thickness, water vapor permeability (WVP), and solubility (S) of green plantain starch films incorporated with different concentrations of lemongrass essential oil (EO). SE – without emulsion; 0%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, and 1% EO – films with different essential oil concentrations.

Treatments	Thickness (mm)	WVP (g water.mm.dia ⁻¹ m ⁻² .kPa ⁻¹)	Solubility (%)
SE	0.10±0.02 ^a	0.32±0.06 ^a	15.31±0.66 ^a
0% OE	0.11±0.01 ^a	0.34±0.08 ^a	15.18±0.91 ^a
0.4% OE	0.11±0.02 ^a	0.30±0.03 ^a	15.54±0.91 ^a
0.6% OE	0.11±0.01 ^a	0.33±0.05 ^a	15.37±0.91 ^a
0.8% OE	0.10±0.01 ^a	0.30±0.05 ^a	14.39±0.75 ^a
1% OE	0.11±0.00 ^a	0.31±0.06 ^a	14.85±0.64 ^a

Same letters in the same column do not differ from each other by Tukey test ($p < 0.05$).

Film thickness is related to the microstructure and molecular orientation of the film components. Typically, a decrease in interaction and ordered alignment of starch polymer chains within the network leads to an increase in film thickness,^{11,30,31} which was not observed in this study. Therefore, it can be inferred that the emulsion was homogeneously dispersed in the film-forming matrix, not altering the interactions between the film components. It is important to determine thickness behavior, as it directly affects other film properties such as mechanical and barrier characteristics.

The addition of essential oil (EO) emulsion did not cause a significant change in water vapor permeability (WVP) among the treatments, suggesting that the tested concentrations were insufficient to induce modifications in the film microstructure. This can be explained by the characteristics of the emulsion, such as the small size of the microcapsules and their uniform

distribution, as shown in Table 2. Water vapor permeability is used to measure moisture transfer, which is one of the main factors influencing reactions that lead to food deterioration and microbial growth, and thus should be as low as possible.¹³ Essential oils can reduce permeability when well dispersed by forming a hydrophobic barrier that restricts water vapor passage. However, its effectiveness depends on good compatibility and dispersion of the oil within the polymer matrix,^{7,32} which are influenced by the chemical nature of both the polymer and the oil, also affecting solubility and intermolecular interactions.³³ Since the same volume of emulsion was used in the formulations, varying only the EO concentration, it can be inferred that encapsulation provided a homogeneous dispersion of EO in the polymer matrix. The use of plasticizer and emulsion may increase the solubility of components, while techniques such as ultrasonication help improve dispersion homogeneity by reducing droplet size.³⁴ Emulsion stability is influenced by factors such as temperature and pH, which can affect hydrogen bond formation,³⁵ and the oil concentration must be controlled to maintain the mechanical and barrier properties of the film unchanged. Proper selection of incorporation and stabilization techniques is essential to optimize dispersion within polymer matrices.

Table 2. Average diameter and size distribution of microcapsules of emulsions with 0%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% EO.

Treatment	Size (nm)	PDI (%)
0% OE	148.40±1.90 ^c	0.451±0.021 ^a
0.4% OE	238.37±2.80 ^a	0.326±0.034 ^{bc}
0.6% OE	229.10±1.90 ^b	0.277±0.023 ^c
0.8% OE	225.63±4.90 ^b	0.329±0.036 ^{bc}
1% OE	243.33±3.30 ^a	0.370±0.004 ^b

Same letters in the same column do not differ from each other by Tukey test ($p < 0.05$).

Although no significant difference was observed between the values, the average water vapor permeability (WVP) was lower than that reported by Sarhadi et al.¹³ ($> 5.63 \pm 0.229$ g water.mm.dia⁻¹m⁻².kPa⁻¹) who tested different concentrations of *Ferula gummosa* essential oil (0.5, 1, and 1.5%) and found that the addition of the essential oil decreased the WVP of starch films; however, this effect was only significant at the 1.5% concentration. This behavior can be explained by the composition of green plantain starch, which has an amylose content above 30% and contains resistant starch, contributing to the formation of a more cohesive matrix with better barrier properties.

Solubility values also did not show significant differences among the treatments. However, these values can be considered low when compared to cassava starch films, which exhibited a solubility of 53.83% in a study by Zhou et al.,³⁶ again demonstrating the effect of starch composition. Some authors³⁷⁻⁴⁰ found a tendency for solubility reduction with the addition of essential oils in films, since the lipid components created a hydrophobic barrier that decreased the film's interaction with water. However, the fact that the barrier property values presented here did not differ significantly suggests that the amount of EO at the tested concentrations was not sufficient to substantially alter the film matrix and the interaction between its components.

3.2. Mechanical properties

The addition of lemongrass essential oil (EO) did not significantly ($p < 0.05$) alter the Young's modulus and tensile strength of the films (Table 3). According to Ebrahimzadeh et al.,⁴¹ the mechanical resistance of films depends on the interaction between the polymer matrix and the active ingredient of the essential oil. The Young's modulus (elastic modulus) is related to the stiffness of the material in response to applied force. It describes the material's ability to deform and return to its original shape. The higher the Young's modulus, the stiffer the material and the harder it is to stretch.³⁹ Up to a certain concentration, the EO acts as a plasticizing agent,

improving flexibility and reducing the tensile strength of the film.^{42–44} These results are consistent with the previous findings, showing that the emulsion containing encapsulated essential oil disperses homogeneously in the film matrix without altering its microstructure. This is due to the characteristics of the emulsion, which presented uniform microcapsule size (Table 2). It is important to highlight that the use of the same volume of emulsion contributes to this behavior. A recent study by Vargas et al.⁴⁵ found the same result when incorporating *Cymbopogon citratus* essential oil into cassava starch and sodium alginate films.

Table 3. Tensile strength, elongation at break, and Young's modulus of green plantain starch films incorporated with different levels of lemongrass essential oil. SE – no emulsion; 0%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, and 1% EO – Films with different concentrations of essential oil.

Treatments	Young modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)
SE	36.44±2.61 ^a	76.32±1.56 ^a	3.81±0.10 ^a
0% OE	28.84±5.78 ^a	53.82±1.50 ^d	2.33±0.17 ^b
0.4% OE	25.80±1.28 ^a	72.82±2.61 ^{ab}	2.43±0.15 ^b
0.6% OE	28.50±7.08 ^a	65.40±1.65 ^c	2.60±0.22 ^b
0.8% OE	33.51±5.71 ^a	68.11±1.12 ^{bc}	2.44±0.10 ^b
1% OE	29.14±4.22 ^a	64.45±0.37 ^c	2.35±0.07 ^b

Same letters in the same column do not differ from each other by Tukey test ($p < 0.05$).

For elongation at break, it can be observed that the addition of emulsion without essential oil promoted a reduction in elongation at break compared to the control film (SE) and the other films ($p < 0.05$). An increase in elongation at break is considered a positive effect regarding the flexibility of films, especially for materials used as packaging. This phenomenon

occurs due to the presence of oils that act as plasticizers or lubricants in the polymer matrix.⁴⁴ A similar result was found by Lee et al.,⁴³ who evaluated the incorporation of oregano essential oil (0, 2.5, 5, and 7.5%) and observed an increase in elongation percentage as the oil concentration was increased up to 5%; however, further increases in EO concentration resulted in a decrease in elongation percentage. The highest isolated value for the control film demonstrates that green plantain starch promotes the formation of an ordered microstructure, providing greater flexibility to the films.

The reduction in tensile strength compared to the control film can be attributed to the incorporation of the emulsion, possibly due to the plasticizing effect of the oils and the formation of microbubbles during emulsion incorporation, moderately reducing stress distribution in the film.

The ability of active compounds to improve the structural and mechanical parameters of films depends on the chemical characteristics and concentration of the incorporated additive.⁴⁶ Understanding how this material influences film properties is essential to ensure the quality and proper use of these packaging materials. The results observed in this study demonstrate that the encapsulation of essential oil in emulsions is a promising alternative for the addition of active components into the polymer matrix, without compromising the film's microstructure.

3.3. Biodegradability

As shown in Figure 1, after 15 days from the start of the biodegradability analysis, the films were almost completely degraded. According to ISO⁴⁷ standards, to be considered biodegradable, approximately 90% of the film material must decompose within 180 days. Therefore, green plantain starch-based films, with or without emulsion addition, demonstrate strong potential for sustainable packaging applications, with high biodegradability in short periods.

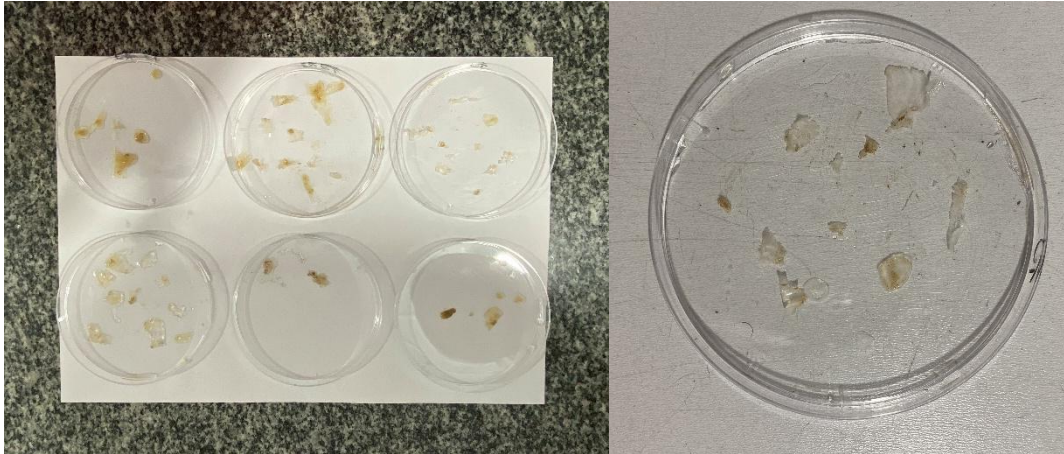


Figure 1. Degradability residues of green plantain (*Musa Paradisiaca* L.) starch films with emulsions containing different concentrations of lemongrass essential oil.

3.4. Scanning electron microscopy (SEM) analysis

Figure 2 presents the SEM images showing the surface morphology of the starch granules, which exhibit varied sizes and shapes, predominantly ellipsoidal forms with irregular diameters and smooth surfaces, indicating granule integrity, with occasional irregularities. No signs of cracks, fractures, or deformations were observed. The size of the starch granules influences the binding capacity of amylose and amylopectin molecules, gelation, crystallinity, and swelling power. Films produced with starches containing smaller granules may exhibit higher tensile strength with reduced thickness, reflecting improved film properties, as observed in this study.⁴⁸

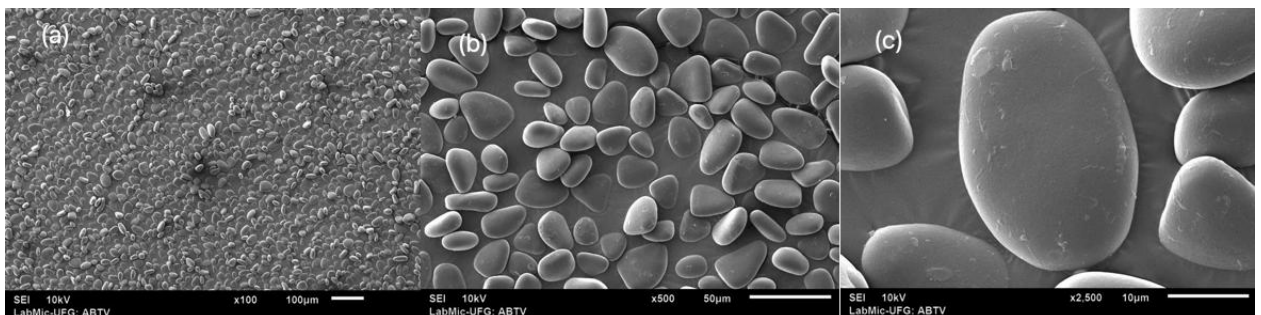


Figure 2. Micrographs of green plantain (*Musa Paradisiaca* L.) starch obtained by SEM at (a) 100x (100 μm scale), (b) 500x (50 μm scale), and (c) 2500x (10 μm scale) magnification.

For the treatment without emulsion (Figure 3), a rough surface with some agglomerates and starch granules can be observed, while the cross-section reveals a homogeneous and compact structure, which justifies the higher tensile strength value obtained for this film.

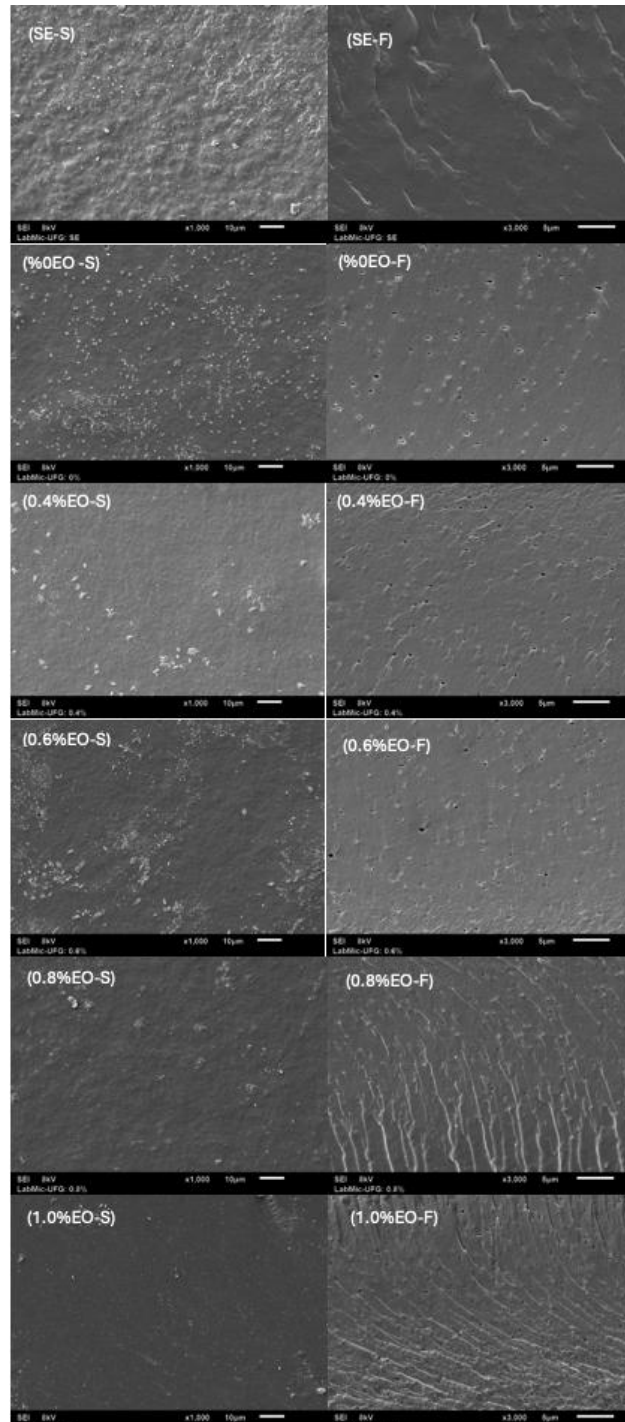


Figure 3. Micrographs of surfaces (S), at magnification of 1000x (10 μm scale), and fractures (F), at magnification of 3000x (5 μm scale), of green plantain (*Musa Paradisiaca* L.) starch

films without emulsion (SE) and with different concentrations of essential oil (0%EO, 0.4%EO, 0.6%EO, 0.8%EO and 1.0%(EO) obtained by SEM

After the inclusion of the emulsion, the surfaces became smoother as the concentration of lemongrass essential oil (LEO) increased. In the cross-sectional images, small pores are visible in the structure of the films containing emulsion, which may be attributed to the coalescence of droplets during the drying process, originating from the emulsion components incorporated into the film-forming solution.^{36,49} However, the formation of these small pores did not compromise the microstructure of the films, which explains the results obtained for WVP, solubility, elongation, and Young's modulus, although it did influence the elongation of some films. These results confirm the good compatibility between the emulsion and the film matrix, with high dispersion, forming a homogeneous film structure.

3.5. Antioxidant capacity of films

Films with antioxidant properties for packaging have become increasingly relevant in food preservation, as they can reduce food oxidation, thereby extending shelf life and maintaining quality.

Statistical analysis showed that time, treatment, and the interaction between treatment and time significantly influenced the antioxidant capacity of the films (Table 4 and Figure 4).

The antioxidant activity of the film without emulsion is attributed to the bioactive compounds in green plantain, which contains various classes of free and bound phenolic compounds classified as secondary metabolites in botanical species, including anthocyanins, although its antioxidant activity is considered moderate.⁵⁰ The emulsion also contributed to the antioxidant capacity of the film due to the bioactive compounds present in both the plantain and the canola oil, which contains tocopherols in its composition.⁵¹

Table 4. Summary of analysis of variance and coefficient of variation (CV) of DPPH of green plantain (*Musa Paradisiaca* L.) starch films with emulsions containing different concentrations of lemongrass essential oil.

Sources of variation	GL	Medium squares
		DPPH
Treatments	5	455,12*
Days	4	4600,50*
Treatments × Days	20	81,84*
Residue	30	6,71
CV (%)		7,24

*Significant ($p < 0.05$)

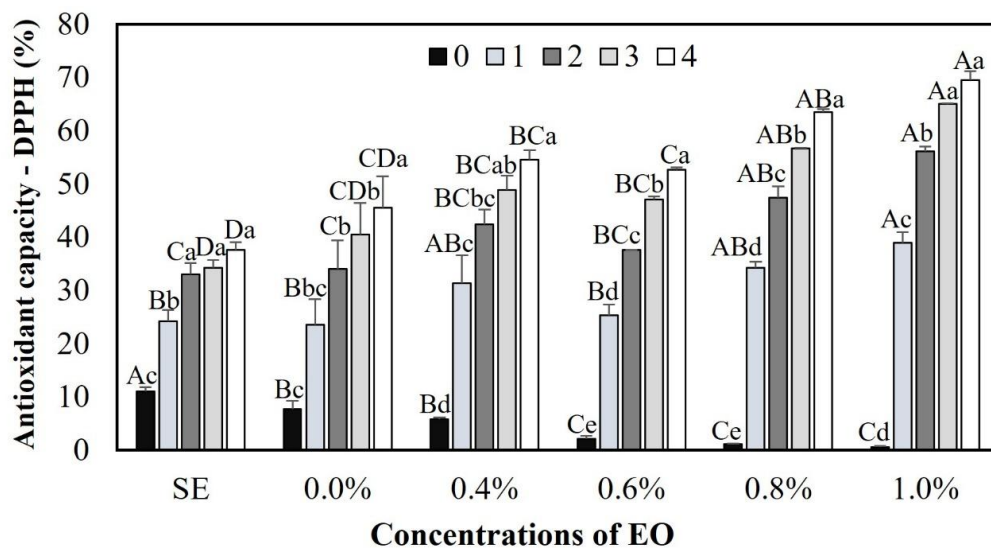


Figure 4. Free radical scavenging capacity of green plantain (*Musa Paradisiaca* L.) starch films with emulsions containing different concentrations of lemongrass essential oil.

Capital letters compare treatments at each time point, and lowercase letters compare times within each treatment.

An increase in the antioxidant activity of the films was observed over the days of analysis, indicating a progressive release of bioactive compounds from the films. Treatments with concentrations of 0.8% and 1.0% showed the best results, reaching antioxidant activity values close to 65% by the fourth day. This suggests that higher concentrations of essential oil provide greater availability of terpenes (citral, eugenol, and myrcene), which are known for their antioxidant activity – especially eugenol, which has notable radical scavenging properties.^{14,52} The observed release kinetics may be related to the migration process of lipophilic compounds through the starch-based hydrocolloid matrix during the analysis period. These results are consistent with previous studies,^{17,45,53–55} which have demonstrated the effectiveness of essential oils as antioxidant agents in active packaging systems.

These findings are important, as they confirm the effectiveness of essential oil encapsulation by emulsification in enabling the controlled release of bioactive compounds without compromising the film's microstructure. Moreover, the use of green plantain starch leads to the formation of films with enhanced barrier and mechanical properties while also imparting functional attributes.

4. CONCLUSION

The incorporation of emulsions containing lemongrass essential oil into green plantain starch films resulted in increased film flexibility, as evidenced by the higher elongation at break, which is a desirable feature for food packaging applications. The essential oil concentrations did not significantly alter the barrier properties of the films and enhanced their flexibility without compromising biodegradability, reinforcing their sustainable potential compared to synthetic polymers. Additionally, the green plantain starch and the emulsion containing canola oil contributed bioactive properties to the films, and the inclusion of the essential oil emulsion progressively enhanced antioxidant activity. The essential oil concentrations used in this study

did not compromise the film microstructure indicating that higher concentrations may be used, also keeping total emulsion volume constant as a strategy for incorporating active compounds into the film-forming matrix. Thus, the results contribute to the advancement of active and sustainable packaging development, demonstrating the positive impact of incorporating lemongrass essential oil emulsion on the functional performance of green plantain starch films.

Funding Sources

This work was supported financially by the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel—Brazil (CAPES)—Finance Code 001 and a research grant from UESB (PPGECAL).

Notes

The authors declare no known competing financial interests.

ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge Prof. Juliano Geraldo Amaral and Paulinne Moreira Lima (Laboratory of Innovation in Bioactives and Technological Development – LIBiTec, Multidisciplinary Institute in Health, Federal University of Bahia) for assistance in the characterization analyses of emulsion, and Labmic for SEM analyses.

REFERENCES

- (1) Chen, W.; Ma, S.; Wang, Q.; McClements, D. J.; Liu, X.; Ngai, T.; Liu, F. Fortification of edible films with bioactive agents: a review of their formation, properties, and application in food preservation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **2021**, *62* (18), 5029–5055. DOI: 10.1080/10408398.2021.1881435
- (2) Thakur, R.; Pristijono, P.; Vuong, Q. V.; Scarlett, C. J.; Singh, S. P.; Bowyer, M. Starch-based films: Major factors affecting their properties. *International Journal of Biological Macromolecules* **2019**, *132*, 1079–1089. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190

- (3) Gonçalves, E. M.; Andrade, L.; Pinheiro, J.; Silva, M. From fields to films: Exploring starch from agriculture raw materials for biopolymers in sustainable food packaging. *Agriculture* **2024**, *14* (3), 453. DOI: 10.3390/agriculture14030453
- (4) Moreno-Zaragoza, J.; Rosell, C. M.; Bello-Pérez, L. A. The multiscale structure of banana starch related to the physicochemical, thermal, functional and digestibility characteristics: A review. *Food Hydrocolloids* **2025**, *159*, 110646. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2024.110646
- (5) Viana, E. B. M.; Oliveira, N. L.; Ribeiro, J. S.; Almeida, M. F.; Souza, C. C. E.; Resende, J. V.; Santos, L. S.; Veloso, C. M. Development of starch-based bioplastics of green plantain banana (*Musa paradisiaca* L.) modified with heat-moisture treatment (HMT). *Food Packaging and Shelf Life* **2021**, *31*, 100776. DOI: 10.1016/j.fpsl.2021.100776
- (6) Orsuwan, A.; Sothornvit, R. Effect of banana and plasticizer types on mechanical, water barrier, and heat sealability of plasticized banana-based films. *Journal of Food Processing and Preservation* **2017**, *42* (1), e13380. DOI: 10.1111/jfpp.13380
- (7) Li, J.; Ye, F.; Lei, L.; Zhao, G. Combined effects of octenylsuccination and oregano essential oil on sweet potato starch films with an emphasis on water resistance. *International Journal of Biological Macromolecules* **2018**, *115*, 547–553. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.04.093
- (8) Yang, M.; Chang, L.; Yu, X.; Zhao, N.; Du, S.-K.; Zheng, P.; Simbo, J.; Jiang, F. Structural, physicochemical and rheological properties of starches isolated from banana varieties (*Musa* spp.). *Food Chemistry: X* **2022**, *16*, 100473. DOI: 10.1016/j.fochx.2022.100473
- (9) Restrepo, A. E.; Rojas, J. D.; García, O. R.; Sánchez, L. T.; Pinzón, M. I.; Villa, C. C. Mechanical, barrier, and color properties of banana starch edible films incorporated with nanoemulsions of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) and rosemary (*Rosmarinus officinalis*) essential oils. *Food Science and Technology International* **2018**, *24* (8), 705–712. DOI: 10.1177/1082013218792133
- (10) Rosenboom, J.-G.; Langer, R.; Traverso, G. Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials* **2022**, *7*, 117–137. DOI: 10.1038/s41578-021-00407-8
- (11) Zhang, B.; Liu, Y.; Wang, H.; Liu, W.; Cheong, K.-L.; Teng, B. Characterization of seaweed polysaccharide-based bilayer films containing essential oils with antibacterial activity. *LWT* **2021**, *150*, 111961. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111961
- (12) Yaashikaa, P. R.; Kamalesh, R.; Senthil Kumar, P.; Saravanan, A.; Vijayasri, K.; Rangasamy, G. Recent advances in edible coatings and their application in food packaging. *Food Research International* **2023**, *173* (Pt 2), 113366. DOI: 10.1016/j.foodres.2023.113366
- (13) Sarhadi, H.; Shahdadi, F.; Salehi Sardoei, A.; Hatami, M.; Ghorbanpour, M. Investigation of physio-mechanical, antioxidant and antimicrobial properties of starch–zinc oxide nanoparticles active films reinforced with *Ferula gummosa* Boiss essential oil. *Scientific Reports* **2024**, *14*, 5789. DOI: 10.1038/s41598-024-56062-w

- (14) Faheem, F.; Din, A.; Aadil, R. M.; Roszko, M.; Kieliszek, M.; Haq, I.-U.; Bryła, M.; Gul, M.; Rabail, R.; Liu, Z. W. Uncovering the industrial potentials of lemongrass essential oil as a food preservative: A review. *Antioxidants* **2022**, *11* (4), 720. DOI: 10.3390/antiox11040720
- (15) Valková, V.; Kačániová, M.; Borotová, P.; Galovičová, L.; Vukovic, N. L.; Vukic, M.; Ďúranová, H. *Cymbopogon citratus* essential oil: Its application as an antimicrobial agent in food preservation. *Agronomy* **2022**, *12* (1), 155. DOI: 10.3390/agronomy12010155
- (16) Gutiérrez-Pacheco, M. M.; Ortega-Ramírez, L. A.; Torres-Moreno, H.; Ayala-Zavala, J. F.; Flores-Lopez, M. L.; López-Romero, J. C.; Velázquez Guadarrama, N. Mechanisms and applications of citral's antimicrobial properties in food preservation and pharmaceuticals formulations. *Antibiotics* **2023**, *12* (11), 1608. DOI: 10.3390/antibiotics12111608.
- (17) Kawhena, T. G.; Opara, U. L.; Fawole, O. A. Optimization of gum arabic and starch-based edible coatings with lemongrass oil using response surface methodology for improving postharvest quality of whole “wonderful” pomegranate fruit. *Coatings* **2021**, *11* (4), 442. DOI: 10.3390/coatings11040442
- (18) Bajaj, K.; Kumar, A.; Gill, P. P. S.; Jawandha, S. K.; Kaur, N. Xanthan gum coatings augmented with lemongrass oil preserve postharvest quality and antioxidant defence system of Kinnow fruit under low-temperature storage. *International Journal of Biological Macromolecules* **2024**, *262* (Pt 1), 129776. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129776
- (19) Li, M.; Liu, P.; Zou, W.; Yu, L.; Xie, F.; Pu, H.; Liu, H.; Chen, L. Extrusion processing and characterization of edible starch films with different amylose contents. *Journal of Food Engineering* **2011**, *106* (1), 95–101. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2011.04.021
- (20) Almeida, M. F.; Silva, G. L.; Gondim, G. D.; Alves, C. E. F.; Silva, M. C.; Mendes, B. A. B.; Anjos, D. A.; São José, A. R.; Veloso, C. M. Maintenance of postharvest quality of ‘Palmer’ mango coated with biodegradable coatings based on cassava starch and emulsion of lemongrass essential oil. *International Journal of Biological Macromolecules* **2024**, *277* (Pt 4), 134323. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.134323
- (21) Giunti, G.; Palermo, D.; Laudani, F.; Algeri, G. M.; Campolo, O.; Palmeri, V. Repellence and acute toxicity of a nano-emulsion of sweet orange essential oil toward two major stored grain insect pests. *Industrial Crops and Products* **2019**, *142*, 111869. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111869
- (22) Von Loesecke, H. W. *Bananas: Chemistry, Physiology, Technology*, 2nd ed.; Interscience Publishers: New York, 1950
- (23) Moorthy, S. N. Extraction of starches from tuber crops using ammonia. *Carbohydrate Polymers* **1991**, *16* (4), 391–398. DOI: 10.1016/0144-8617(91)90057-j
- (24) Cordeiro, M. J. M.; Veloso, C. M.; Santos, L. S.; Bonomo, R. C. F.; Caliar, M.; Fontan, R. C. I. The impact of heat-moisture treatment on the properties of *Musa paradisiaca* L. starch and optimization of process variables. *Food Technology & Biotechnology* **2018**, *56* (4). DOI: 10.17113/ftb.56.04.18.5490

- (25) Prakash, A.; Baskaran, R.; Vadivel, V. Citral nanoemulsion incorporated edible coating to extend the shelf life of fresh cut pineapples. *LWT* **2020**, *118*, 108851. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.108851
- (26) ASTM International. *Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials*, ASTM E96/E96M-16; West Conshohocken, PA, 2016. DOI: 10.1520/e0096_e0096m-16
- (27) Gontard, N.; Duchez, C.; Cuq, J.; Guilbert, S. Edible composite films of wheat gluten and lipids: water vapour permeability and other physical properties. *International Journal of Food Science and Technology* **1994**, *29* (1), 39–50. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1994.tb02045.x
- (28) ASTM International. *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*, ASTM D882-12; West Conshohocken, PA, 2012. DOI:10.1520/d0882-12
- (29) Martucci, J. F.; Ruseckaite, R. A. Biodegradation of three-layer laminate films based on gelatin under indoor soil conditions. *Polymer Degradation and Stability* **2009**, *94* (8), 1307–1313. DOI: /10.1016/j.polymdegradstab.2009.03.018
- (30) Song, Z.; Wei, J.; Cao, Y.; Yu, Q.; Han, L. Development and characterization of tapioca starch/pectin composite films incorporated with broccoli leaf polyphenols and the improvement of quality during the chilled mutton storage. *Food Chemistry* **2023**, *418*, 135958. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.135958
- (31) Yu, H.; Zhou, Q.; He, D.; Yang, J.; Wu, K.; Chai, X.; Xiang, Y.; Duan, X.; Wu, X. Enhanced mechanical and functional properties of chitosan/polyvinyl alcohol/hydroxypropyl methylcellulose/alizarin composite film by incorporating cinnamon essential oil and tea polyphenols. *International Journal of Biological Macromolecules* **2023**, *253* (Pt 4), 126859. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126859
- (32) Cui, C.; Ji, N.; Wang, Y.; Xiong, L.; Sun, Q. Bioactive and intelligent starch-based films: A review. *Trends in Food Science & Technology* **2021**, *116*, 854–869. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.08.024
- (33) Meng, F.-B.; Gou, Z.-Z.; Li, Y.-C.; Zou, L.-H.; Chen, W.-J.; Liu, D.-Y. The efficiency of lemon essential oil-based nanoemulsions on the inhibition of *Phomopsis* sp. and reduction of postharvest decay of kiwifruit. *Foods* **2022**, *11* (10), 1510. DOI: 10.3390/foods11101510
- (34) Putra, P. S. U.; Adhika, D. R.; Genecya, G.; Al Madanie, M. S.; Asri, L. A. T. W. Evaluation of chitosan-encapsulated lemongrass (*Cymbopogon citratus*) essential oil nanoemulsion for fruit edible coating. *OpenNano* **2025**, *24*, 100246. DOI: 10.1016/j.onano.2025.100246
- (35) Hu, J.; Jiao, W.; Chen, Q.; Liu, B.; Fu, M. Preparation of a multilayer antibacterial film and its application for controlling postharvest disease in temperate fruit (including apple, pear, and peach) under ambient storage. *Food Science & Nutrition* **2023**, *11* (9), 5188–5198. DOI: 10.1002/fsn3.3477
- (36) Zhou, Y.; Wu, X.; Chen, J.; He, J. Effects of cinnamon essential oil on the physical, mechanical, structural and thermal properties of cassava starch-based edible films.

International Journal of Biological Macromolecules **2021**, *184*, 574–583. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.06.067

- (37) Do Evangelho, J. A.; Silva Dannenberg, G.; Biduski, B.; El Halal, S. L. M.; Kringel, D. H.; Gularte, M. A.; Fiorentini, A. M.; Rosa Zavareze, E. Antibacterial activity, optical, mechanical, and barrier properties of corn starch films containing orange essential oil. *Carbohydrate Polymers* **2019**, *222*, 114981. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.114981
- (38) Shi, C.; Jia, L.; Tao, H.; Hu, W.; Li, C.; Aziz, T.; Al-Asmari, F.; Sameeh, M. Y.; Cui, H.; Lin, L. Fortification of cassava starch edible films with *Litsea cubeba* essential oil for chicken meat preservation. *International Journal of Biological Macromolecules* **2024**, *276* (Pt 2), 133920. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.133920
- (39) Wang, B.; Sui, J.; Yu, B.; Yuan, C.; Guo, L.; Abd El-Aty, A. M.; Cui, B. Physicochemical properties and antibacterial activity of corn starch-based films incorporated with *Zanthoxylum bungeanum* essential oil. *Carbohydrate Polymers* **2021**, *254*, 117314. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117314
- (40) Wang, B.; Yan, S.; Gao, W.; Kang, X.; Yu, B.; Liu, P.; Guo, L.; Cui, B.; Abd El-Aty, A. M. Antibacterial activity, optical, and functional properties of corn starch-based films impregnated with bamboo leaf volatile oil. *Food Chemistry* **2021**, *357*, 129743. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129743
- (41) Ebrahimzadeh, S.; Biswas, D.; Roy, S.; McClements, D. J. Incorporation of essential oils in edible seaweed-based films: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology* **2023**, *135*, 43–56. DOI:10.1016/j.tifs.2023.03.015
- (42) Abdullah, U. H.; Mohd Yusof, M. J.; Hamzah, A.; Ahmad, I. Starch Film Incorporated with Cinnamon Oils Optimally Prepared by Using Response Surface Methodology. *JSM* **2022**, *51* (9), 2925–2935. DOI: 10.17576/jsm-2022-5109-15
- (43) Lee, J. Y.; Garcia, C. V.; Shin, G. H.; Kim, J. T. Antibacterial and antioxidant properties of hydroxypropyl methylcellulose-based active composite films incorporating oregano essential oil nanoemulsions. *LWT* **2019**, *106*, 164–171. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.02.061
- (44) Othman, Kahar, N. S.; S. H.; Nordin, N.; Alyas, N. D.; Hasnan, N. Z. N.; Talib, R. A.; Karyadi, J. N. W. Tapioca starch-based films containing oregano, Vietnamese mint, and curry leaf essential oils for food packaging applications. *International Food Research Journal* **2023**, *30* (2), 497–513. DOI: 10.47836/ifrj.30.2.19
- (45) Vargas, O. L. T.; Loaiza, Y. V. G.; Agredo, I. A. R. Development and characterisation of starch/alginate active films incorporated with lemongrass essential oil (*Cymbopogon citratus*). *Materials Advances* **2024**, *5*, 9417–9427. DOI: 10.1039/d4ma00608a
- (46) Hernández, M. S.; Ludueña, L. N.; Flores, S. K. Citric acid, chitosan and oregano essential oil impact on physical and antimicrobial properties of cassava starch films. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* **2023**, *5*, 100307. DOI: 10.1016/j.carpta.2023.100307

- (47) ISO (the International Organization for Standardization). *Plastics — Soil Biodegradable Materials for Mulch Films for Use in Agriculture and Horticulture — Requirements and Test Methods Regarding Biodegradation, Ecotoxicity and Control of Constituents*, ISO 23517:2021; Switzerland, 2021, <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:23517:ed-1:v1:en>
- (48) Ando, H.; Tang, H.; Watanabe, K.; Mitsunaga, T. Some physiochemical properties of large, medium and small granule starches in fractions of wheat grain. *Food Science and Technology Research* **2002**, *8* (1), 24–27. DOI: 10.3136/fstr.8.24
- (49) Zhang, W.; Shu, C.; Chen, Q.; Cao, J.; Jiang, W. The multi-layer film system improved the release and retention properties of cinnamon essential oil and its application as coating in inhibition to *penicillium* expansion of apple fruit. *Food Chemistry* **2019**, *299*, 125109. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125109
- (50) Sarawong, C.; Schoenlechner, R.; Sekiguchi, K.; Berghofer, E.; Ng, P. K. W. Effect of extrusion cooking on the physicochemical properties, resistant starch, phenolic content and antioxidant capacities of green banana flour. *Food Chemistry* **2014**, *143*, 33–39. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.07.081
- (51) Shen, J.; Liu, Y.; Wang, X.; Bai, J.; Lin, L.; Luo, F.; Zhong, H. A comprehensive review of health-benefiting components in rapeseed oil. *Nutrients* **2023**, *15* (4), 999. DOI: 10.3390/nu15040999
- (52) Ashaq, B.; Rasool, K.; Habib, S.; Bashir, I.; Nisar, N.; Mustafa, S.; Ayaz, Q.; Nayik, G. A.; Uddin, J.; Ramniwas, S.; Mugabi, R.; Wani, S. M. Insights into chemistry, extraction and industrial application of lemon grass essential oil -A review of recent advances. *Food Chemistry: X* **2024**, *22*, 101521. DOI: 10.1016/j.fochx.2024.101521
- (53) Bansal, H.; Singh, H. P.; Singh, S.; Sharma, A.; Singh, J.; Kaur, K.; Mehta, S. K. Preserving plum perfection: Buckwheat starch edible coating with xanthan gum and lemongrass essential oil. *International Journal of Biological Macromolecules* **2024**, *274* (Pt 2), 133239. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.133239
- (54) Dos Santos Caetano, K.; Lopes, N. A.; Costa, T. M. H.; Brandelli, A.; Rodrigues, E.; Flôres, S. H.; Cladera-Olivera, F. Characterization of active biodegradable films based on cassava starch and natural compounds. *Food Packaging and Shelf Life* **2018**, *16*, 138–147. DOI: 10.1016/j.fpsl.2018.03.006
- (55) Chen, Z.; Zong, L.; Chen, C.; Xie, J. Development and characterization of PVA-Starch active films incorporated with β -cyclodextrin inclusion complex embedding lemongrass (*Cymbopogon citratus*) oil. *Food Packaging and Shelf Life* **2020**, *26*, 100565. DOI: 10.1016/j.fpsl.2020.100565

CAPÍTULO 3

ARTIGO 2

Edible coatings based on green plantain starch with lemongrass essential oil improved postharvest preservation of giant umbu*

Revestimentos comestíveis à base de amido de banana-da-terra verde com óleo essencial de capim-limão melhoraram a preservação pós-colheita do umbu gigante

* Artigo submetido à revista Food Chemistry (INSS: 0308-8146), Classificação A1 (Qualis-Capes 2017-2020), Fator de impacto: 9.8

Edible coatings based on green plantain starch with lemongrass essential oil improved postharvest preservation of giant umbu

Abstract

Climacteric tropical fruits such as giant umbu have high perishability, which limits their commercialization and increases post-harvest losses. This study evaluated the influence of edible coatings based on green plantain starch, incorporated with lemongrass essential oil, on the quality preservation of giant umbu fruits stored at 12 ± 2 °C for 9 days. The coatings were applied by immersion, and the fruits were evaluated for weight loss, firmness, color, pH, soluble solids, titratable acidity, and ascorbic acid content. The formulation with 0.8% essential oil resulted in the lowest weight loss (3.98%) and greater preservation of pulp firmness (27.99% reduction) and peel color, as well as more stable pH and ascorbic acid levels. The temperature of 12 °C had negative effects on firmness, indicating possible chilling injury. The edible coatings showed potential to maintain fruit quality and extend shelf life.

Keywords: *Spondias tuberosa*; Modified atmosphere; biodegradable packaging; post-harvesting technology; natural bioactive compounds.

1. Introduction

The preservation of post-harvest fruit quality represents a major challenge today, particularly for highly perishable fruits such as umbu (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara), which ripens quickly and has a shelf life of only 2 to 3 days at room temperature, making it difficult for preservation and long-term commercialization (Moura et al., 2013; Teodosio et al., 2021). These post-harvest losses reduce the amount of fruit available for sale, directly impacting the income of smallholder farmers who depend on this crop as their main source of income.

Native to the Brazilian semi-arid region, the fruits are rich in vitamins C, B1, B2, and B3, essential minerals, and bioactive compounds such as carotenoids, flavonoids, and other phenolic compounds, which contribute to their antioxidant potential (Zeraik et al., 2016; Ribeiro et al., 2019). Additionally, the fruit is highly appreciated by consumers for its characteristic bitter sweet flavor and pleasant aroma (Lima et al., 2018; Zeraik et al., 2016). However, its consumption as a fresh fruit is limited in regions far from the production centers due to its high perishability, resulting from rapid physiological metabolism, high respiration rate, and advanced ripening (Lima et al., 2018).

Umbu is a fruit originating from extractive systems, and its sensory and chemical characteristics are influenced by environmental factors and specific genetic traits. Due to its high genetic variability, native fruits range in weight from 10 to 25 g (Santos et al., 1999). In light of this variability and the growing potential for increased consumption, leading to greater production, varieties popularly known as 'giant umbu' have been selected. These produce larger fruits, with an average weight between 75 and 100 g, through the genetic improvement of native accessions (Donato et al., 2024). However, even with genetic improvement, as a tropical fruit, its harvest is limited to a few months of the year, usually between January and March, which may vary depending on climatic conditions and the specific characteristics of the microregions where it is grown (Lima and Castricini, 2019). Due to its seasonality and perishability, it is necessary to develop effective post-harvest conservation strategies that address the physicochemical and physiological characteristics of giant umbu. Furthermore, the technologies to be developed should be low-cost and easy to apply. One alternative would be the use of edible coatings and cold storage. The use of biodegradable packaging and edible coatings has been widely explored as an alternative to minimize the use of conventional plastics and extend the shelf life of fruits, with or without the support of refrigerated storage. These coatings act as protective barriers by reducing moisture loss, delaying ripening, and inhibiting

microbial growth (Coppola et al., 2021; Pei et al., 2024). The protective properties of the coatings and their adhesion to the fruit surface depend on their composition, which may include lipids, proteins, and polysaccharides. In addition, the coating thickness and the application method – whether by dipping, spraying, or brushing – are essential to ensure a uniform and functional coverage.

Refrigerated storage can be combined with the use of coatings to increase fruit shelf life, durability, and coating effectiveness. Some studies have reported the use of low temperatures during storage to preserve fruit quality, such as in bananas (Facundo et al., 2012; Lo'ay and EL-Khateeb, 2018), papayas (Gomes et al., 2016; Pan et al., 2017), and mangoes (Zhang et al., 2017). However, there is still no data in the literature demonstrating the use of low temperatures for the preservation of umbu fruits. The effectiveness of coatings can also be optimized by incorporating bioactive compounds into the polymer matrix (Moradinezhad et al., 2025; Yaashikaa et al., 2023). In this context, starch stands out as a sustainable solution for the development of coatings due to its biodegradability, abundance, and film-forming ability (Chauhan et al., 2024; Dutta and Sit, 2024; Hossain et al., 2024; Yaashikaa et al., 2023). In addition to conventional starches, such as corn, rice, and cassava, recent research has explored the potential of starches from non-conventional sources as a strategy to utilize products that, although suitable for consumption, does not meet the commercial standards required for commercialization. One example of such a source is plantain (*Musa paradisiaca* L.), which, in its green maturation stage, contains 70 to 80% starch on a dry weight basis, making it a promising alternative for biopolymer production and contributing to food waste reduction (Moreno-Zaragoza et al., 2025).

In addition to using starch from non-conventional sources, the incorporation of essential oils into starch matrices has been studied as a strategy to incorporate bioactive properties, particularly antioxidant activity, to films and coatings, helping to delay oxidative processes and

maintain fruit quality (Devi et al., 2024). Among essential oils, lemongrass oil (*Cymbopogon citratus*) stands out for its high content of phenolic compounds and strong antioxidant activity, mainly attributed to the presence of citral and geraniol in its composition (Faheem et al., 2022; Valkova et al., 2022). Based on these advances, the present study investigated the potential of coatings made from green plantain starch (*Musa paradisiaca* L.) with different concentrations of lemongrass essential oil (*Cymbopogon citratus*), combined with refrigerated storage, in maintaining the post-harvest quality of giant umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Camara).

2. Materials and methods

2.1. Materials

Giant umbu fruits (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara), weighing over 75 g, were obtained directly from a producer in the municipality of Anagé, located in the southwest of Bahia state, Brazil. Harvesting was carried out in the morning, with pre-selection based on the ripening stage known as 'full' or 'swollen' (Fig. 1), and without any signs of disease or pathogens. Plantains (*Musa paradisiaca* L.) were also acquired from a producer in the southwest region of Bahia, at ripening stage 1, defined by the Von Loesecke scale (1950), characterized by a fully green peel, without the addition of any substance to accelerate ripening. Also used were glycerol PA (ACS, Brazil), Tween 80 PA (Exodo Científica, Brazil), commercial canola oil (*Brassica napus* L.), and lemongrass essential oil (*Cymbopogon citratus*) (Laszlo, Belo Horizonte-MG, Brazil).



Fig 1. Giant umbu in the “full” or “swollen” ripening stage.

2.2. Starch extraction

Starch was extracted by adapting the method of Moorthy (1991). The green plantains were washed, sanitized, peeled, cut into slices approximately 3 mm thick, and immersed in a 0.03 mol L⁻¹ ammonium hydroxide solution at a ratio of 1:7 (w/v) to prevent enzymatic browning. Next, they were blended using an industrial blender (Metal Ferreira, MFLBR-4, Itajobi, SP, Brazil). The resulting mass was filtered through 50 and 200 mesh sieves, allowed to settle, and the supernatant was discarded. The mass was repeatedly washed with distilled water to separate the starch until the supernatant became clear. Subsequently, the starch was dried at 40°C for approximately 24 hours in a forced-air circulation oven (Tecnal, TE-394/3-MP, Piracicaba, SP, Brazil). Finally, the starch was ground, sieved through a 65-mesh sieve, labeled, and stored in hermetically sealed containers.

2.3. Preparation of lemongrass essential oil emulsion

The emulsion was prepared based on the methodology described by Prakash et al. (2020), with modifications. A total of 1.5 mL of canola oil (*Brassica napus* L.), 1.8 mL of Tween 80, and 0.6 mL of lemongrass essential oil (*Cymbopogon citratus*) were used. The volumes of the components were added to a 50 mL Falcon tube and homogenized using a vortex

mixer for 5 minutes. Then, the mixture was transferred to a beaker, and the tube was rinsed with distilled water to complete the volume to 30 mL. The emulsion was then stirred using a Turrax (Tecnal, TE-102, Piracicaba, SP, Brazil) at 10,000 rpm for 10 minutes to incorporate all components. Subsequently, it was subjected to an ultrasonic bath (Ultronic, USC 1600A, Indaiatuba, SP, Brazil) at a frequency of 40 kHz for 30 minutes. Another emulsion without lemongrass essential oil, containing only canola oil and Tween 80 surfactant, was also prepared following the same procedure.

2.4. Production of edible coatings

For the preparation of the coating formulations, green plantain starch (3% w/v) was added to 600 mL of distilled water and subjected to gentle stirring for 30 minutes on a magnetic stirrer (Novatecnica, NT137, Piracicaba, SP, Brazil) for hydration. Then, glycerol (40% w/w relative to the starch mass) was added as a plasticizer. The mixture was heated in a water bath at 85°C (Solidsteel, SSDc 10L, Piracicaba, SP, Brazil), with gentle manual stirring for 20 minutes until complete gelatinization. After cooling to room temperature, the emulsions corresponding to the treatments (0% EO and 0.8% EO) were added, and the formulations were stirred in a Turrax (IKA T25, Campinas, SP, Brazil) for 10 minutes to promote component interaction. Subsequently, they were subjected to an ultrasonic bath (40 kHz) for 15 minutes. The edible coating solutions were then left to rest overnight for later fruit immersion. A coating formulation without emulsion addition (starch + glycerol) was also prepared following the described methodology.

2.4.1. Coating of giant umbu fruits

Fruits were selected for uniformity in weight and color, discarding those with any injuries or damage caused by transport. They were then immersed in a 100-ppm sodium

hypochlorite solution for 15 minutes. After drying, the fruits were immersed in their respective edible coating solutions for 20 minutes. Subsequently, they were placed on racks for drying and formation of the edible film in a controlled environment (17 ± 2 °C) for 24 hours (Figure 2). After the drying process, the fruits were stored in a refrigerated environment (12 ± 2 °C and 72% RH) in a BOD incubator (Ethik INC.411, Vargem Grande Paulista, SP, Brazil). This temperature was chosen based on studies recommending temperatures above 12 °C for the storage of tropical fruits, such as mango (Zhang et al., 2017).



Fig 2. Coated Giant umbu fruits (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.).

2.5. Determination of post-harvest quality parameters

The post-harvest quality parameters of giant umbu fruits were evaluated at 0, 3, 6, and 9 days after the start of the experiment.

Weight loss was determined by calculating the difference between the initial fruit weight (M_i) and the weight measured on each evaluation day (M_f), using a semi-analytical balance (Shimadzu, BL320H, Barueri, SP, Brazil) with a precision of ± 0.0001 g. The results were expressed as percentage loss (Eq. 1)

$$MSS(\%) = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (1)$$

Firmness was determined according to the methodology proposed by Li et al. (2017), with adaptations, using a penetrometer equipped with a 5 mm diameter probe (Impact, model IP-90DI, Brazil). The measurement was taken at two different points on the fruits, and the results were expressed in Newtons (N).

For instrumental color determination of the peel and pulp, a colorimeter (Konica Minolta, CR-400, Osaka, Japan) was used, with a standard D65 illuminant, 0° viewing angle, and calibrated with a standard white color, using the CIELab system. Lightness (L; 0 = black; 100 = white), a* (positive = red; negative = green), and b* (positive = yellow; negative = blue) were determined. Readings were taken at three points on the peel and in the central region of the pulp. For evaluation of chromaticity (C) and Hue angle (°h), the a* and b* coordinates were used (Eq. 2 and 3).

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

$$^{\circ}h = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (3)$$

pH, soluble solids content, and titratable acidity were measured from the fruit extract, obtained by blending the pulp using a portable food processor (Philco, PMX700, Brazil). The methods used for determining these parameters followed the recommendations of the AOAC (2016).

pH was measured with a digital potentiometer (Tecnoyon – mPA-210, Piracicaba, SP, Brazil), according to method n° 981.12. Soluble solids content was determined according to method n° 932.12, using a portable digital refractometer (Atago Brasil, PAL-1, Ribeirão Preto, SP, Brazil), and the results were expressed in °Brix at 25°C. Titratable acidity was determined following method n° 942.15, and the results were expressed as g of citric acid/100 g of pulp.

The determination of ascorbic acid content was carried out using the methodology proposed by Oliveira (2010), through the reaction of ascorbic acid with 2,6-dichlorophenolindophenol sodium salt (DCPIP), with detection in a spectrophotometer at 520 nm. The method is based on the reduction of DCPIP, which changes from blue (oxidized form)

to a pinkish-purple color (reduced form). The DCPIP solution was prepared at a concentration of 0.03 mg mL^{-1} using analytical-grade reagent and distilled water heated to $60 \text{ }^\circ\text{C}$, followed by filtration. Seven grams of processed pulp were diluted in 100 mL of 0.4% (w/v) oxalic acid solution. The solutions were then filtered using quantitative filter paper and stored until analysis. For the assay, 1 mL aliquots of the filtrate were added to two test tubes. In one tube, 9 mL of distilled water was added (sample blank), and in the other, 9 mL of DCPIP solution was added to each sample. The tubes were shaken in a vortex mixer, and absorbance readings were taken at 520 nm. The general blank was prepared using 1 mL of 4% oxalic acid and 9 mL of distilled water in one tube, and two additional tubes with 1 mL of 4% oxalic acid and 9 mL of DCPIP solution. The general blank was used to zero the spectrophotometer, followed by readings of the two samples with DCPIP. After this step, a small amount of pure ascorbic acid (analytical grade) was added until the samples became colorless, and readings were repeated. An ascorbic acid calibration curve was prepared to quantify vitamin C. The results were expressed in mg of ascorbic acid/100 g of pulp.

2.6. Statistical analysis

The experimental design followed a 4×4 factorial scheme, with 3 coatings (SE: coating without emulsion, 0% EO: coating with emulsion and no essential oil, 0.8% EO: coating with emulsion containing 0.8% essential oil) and NC (no coating), evaluated at four storage times (0, 3, 6, and 9 days). Each experimental unit consisted of 24 fruits per treatment, with three replicates per treatment, totaling 288 fruits. Data were subjected to ANOVA to evaluate the interaction between coating types and storage time, followed by Tukey's test ($\alpha = 0.05$) for mean comparisons. For parameters showing significant temporal behavior, linear regression models were fitted, considering only those with $R^2 > 0.65$. All statistical analyses were performed using the Statistical Analysis System (SAS) University OnDemand for Academics.

3. Results and discussion

3.1. Loss of mass and firmness

Table 1 presents the data on weight loss and peel and pulp firmness of giant umbu fruits stored for a period of 9 days. A significant interaction was observed between coatings and storage time for weight loss (Eq. 4 to 7). Weight loss increased over time for all fruits, whether coated or not (Figure 3). However, fruits coated with the treatment containing 0.8% essential oil (EO0.8) showed the lowest weight loss, differing significantly from the uncoated treatment (NC) throughout all evaluation times. The uncoated fruits, in turn, showed the highest average weight loss over the entire storage period. Fruits from the other coating treatments showed weight loss ranging from 4% to 5%, with no significant differences among them. The regression models fitted for weight loss showed R^2 values between 0.75 and 0.91, indicating that the weight loss behavior over time was well explained by the proposed equations for each treatment. Weight loss is a natural process that occurs in fruits during ripening, caused by various biochemical processes starting from the moment they are harvested. The main reason for the greater weight loss observed in the uncoated treatment is attributed to water evaporation. Without the protection of a coating, the fruit's surface is more exposed to the environment, facilitating water loss through transpiration. The edible coating acted as a barrier, reducing the transpiration rate and, consequently, weight loss.

Additionally, essential oils can modulate ethylene production – a key hormone in the ripening process – by interfering with its synthesis or action, thereby altering the ripening rate and fruit texture. Moreover, these bioactive compounds can modify the permeability of cell membranes, affecting gas and nutrient exchange, which directly influences the ripening process and the maintenance of firmness (Oyom et al., 2022; Pandey et al., 2022; Shiekh et al., 2022).

Table 1. Mean and standard deviation of weight loss (MSS), peel firmness (FIRC), and pulp firmness (FIRP) of giant umbu fruits during refrigerated storage under different treatments: NC – no coating; SE – without emulsion; EO0 – with emulsion and no essential oil; EO0.8 – with 0.8% essential oil.

Time (days)	SR	SE	OE0	OE0.8
MSS (%)				
0	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
3	2,81 ± 0,22 ^b	2,35 ± 0,42 ^{ab}	2,42 ± 0,15 ^{ab}	2,10 ± 0,18 ^a
6	5,39 ± 0,22 ^b	4,55 ± 0,66 ^{ab}	4,75 ± 0,37 ^{ab}	4,06 ± 0,30 ^a
9	5,19 ± 0,37 ^b	4,30 ± 0,55 ^{ab}	5,06 ± 0,22 ^b	3,98 ± 0,33 ^a
FIRC (N)				
0	147,65 ± 10,69 ^a	129,94 ± 5,26 ^a	127,79 ± 13,22 ^a	133,56 ± 4,47 ^a
3	133,17 ± 6,33 ^a	115,03 ± 12,27 ^a	137,47 ± 4,01 ^a	135,55 ± 12,18 ^a
6	129,94 ± 5,32 ^a	113,65 ± 10,35 ^a	120,46 ± 6,40 ^a	132,19 ± 27,37 ^a
9	110,43 ± 28,33 ^{ab}	105,26 ± 7,11 ^{ab}	133,60 ± 6,22 ^b	91,93 ± 6,46 ^a
FIRP (N)				
0	33,88 ± 2,89 ^b	26,72 ± 2,72 ^a	30,24 ± 1,17 ^{ab}	35,55 ± 1,69 ^b
3	34,20 ± 6,94 ^a	24,82 ± 0,97 ^a	31,04 ± 4,71 ^a	29,83 ± 5,77 ^a
6	26,91 ± 1,41 ^a	26,78 ± 4,24 ^a	23,13 ± 2,08 ^a	26,58 ± 1,72 ^a
9	32,91 ± 2,19 ^a	24,36 ± 0,32 ^a	29,85 ± 8,28 ^a	27,99 ± 2,60 ^a

The same letters in the same line do not differ from each other by the Tukey test ($p < 0,05$).

Regarding peel firmness, the EO0 treatment showed the least loss over the storage period compared to the other treatments. The EO0.8 treatment showed a greater reduction in

peel firmness; however, this difference was not statistically significant compared to the no-coating and no-emulsion treatments. It is important to note that this change in peel firmness did not compromise fruit preservation, as the EO0.8 treatment had the lowest weight loss and no other parameter was affected during the storage period.

All treatments maintained pulp firmness without significant differences over time (values ranging from 23.13 to 35.55 N). This suggests that the coatings did not substantially impact the internal texture of the fruits, possibly due to the reduced metabolism at the storage temperature of 12°C (Wang et al., 2025)

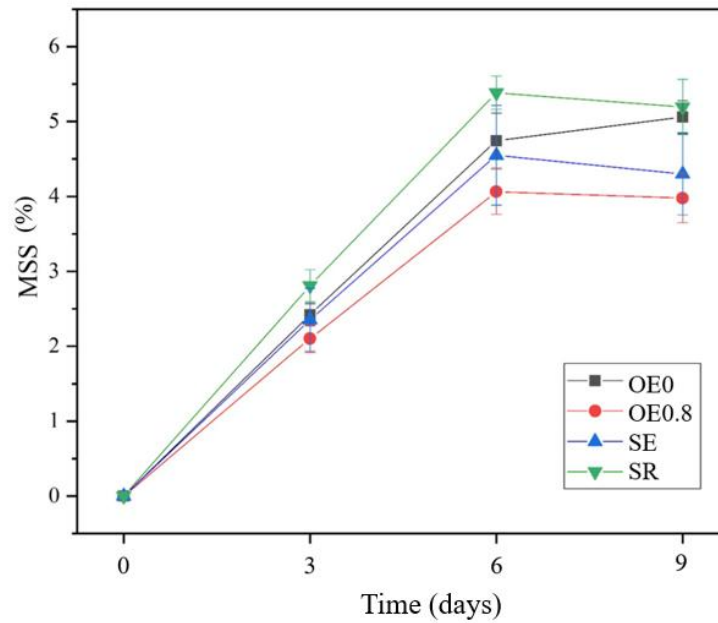


Fig. 3. Weight loss of giant umbu over the storage period under different treatments: NC – no coating; SE – without emulsion; EO0 – with emulsion and no essential oil; EO0.8 – with 0.8% essential oil.

$$MSS_{SR} = -4,941254 + 5,563997t \quad R^2 = 0,75 \quad (4)$$

$$MSS_{SE} = -4,227342 + 4,764205t \quad R^2 = 0,82 \quad (5)$$

$$MSS_{OE0} = -3,953450 + 0,541667t \quad R^2 = 0,91 \quad (6)$$

$$MSS_{OE0.8} = -3,669326 + 4,120061t \quad R^2 = 0,86 \quad (7)$$

Overall, edible coatings create a modified atmosphere around the fruits, reducing respiration rates and moisture loss. Studies with starch-based coatings incorporated with essential oils have also found a positive effect on preserving fruit quality (Cruz-Monterrosa et al., 2023; Nascimento et al., 2023; Machado et al., 2024).

3.2. Color of peel and pulp

The color of the peel is one of the most important quality attributes for fresh fruits, indicating the stage of ripeness and quality to the consumer. As umbu fruits ripen, biochemical changes occur, including the degradation of chlorophyll (loss of green) and the synthesis of carotenoids (gain of yellow), which influence the color parameters (Lima and Castricini, 2019). Regarding the chromaticity of the peel and pulp, there were no significant differences between the treatments nor interaction over the period, indicating that the fruits maintained color intensity (Table 2 and Fig. 4). For the hue angle of the peel ($^{\circ}\text{hC}$), there was a slight decrease over the days in all treatments; however, the regression equations (9 and 10) show a slower decline in this hue for the OE0.8 treatment (-0.106685) compared to the untreated (-0.185813), indicating a delay in chlorophyll degradation, which suggests a promising outlook for the commercialization of giant umbu. This effect may be due to the presence of antioxidant compounds, such as citral and geraniol from the lemongrass essential oil, which neutralized free radicals and reactive oxygen species (ROS) responsible for chlorophyll degradation via oxidative processes (Valková et al., 2022; Cortes-Torres et al., 2023). Studies conducted by Teodosio et al. (2021) and Santos et al. (2021) also showed that the addition of coatings delayed, but did not completely prevent, color changes in the umbu fruits evaluated.

Table 2. Mean and standard deviation of peel chromaticity (CROC), peel hue angle ($^{\circ}\text{hC}$), pulp chromaticity (CROP), and pulp hue angle ($^{\circ}\text{hP}$) of giant umbu fruits over refrigerated storage

time subjected to different treatments: SR – without coating; SE – without emulsion; OE0 – with emulsion and no essential oil; OE0.8 – with 0.8% essential oil.

Time (days)	SR	SE	OE0	OE0.8
CROC				
0	30,68 ± 0,47 ^a	30,74 ± 0,91 ^a	30,99 ± 0,87 ^a	31,07 ± 1,60 ^a
3	29,09 ± 0,25 ^a	29,61 ± 0,19 ^a	30,11 ± 0,33 ^a	30,28 ± 0,87 ^a
6	29,88 ± 0,47 ^b	29,43 ± 0,42 ^{ab}	28,08 ± 0,79 ^a	29,52 ± 0,47 ^{ab}
9	29,49 ± 0,63 ^a	29,13 ± 0,72 ^a	28,71 ± 0,85 ^a	29,37 ± 1,40 ^a
°h_C				
0	114,12 ± 0,82 ^a	114,16 ± 0,12 ^a	112,95 ± 0,91 ^a	112,73 ± 0,15 ^a
3	112,36 ± 0,44 ^a	111,65 ± 0,37 ^a	111,43 ± 0,92 ^a	112,37 ± 0,42 ^a
6	111,91 ± 1,28 ^a	111,63 ± 1,04 ^a	111,08 ± 0,77 ^a	111,61 ± 0,50 ^a
9	109,75 ± 0,57 ^a	112,12 ± 0,40 ^a	109,86 ± 0,90 ^a	110,58 ± 0,44 ^a
CROP				
0	22,07 ± 0,63 ^a	20,04 ± 2,71 ^a	21,84 ± 1,89 ^a	23,19 ± 1,87 ^a
3	21,19 ± 1,05 ^a	18,31 ± 1,82 ^a	20,88 ± 1,74 ^a	21,95 ± 0,80 ^a
6	18,35 ± 1,18 ^a	20,16 ± 0,86 ^a	19,32 ± 0,97 ^a	21,78 ± 2,03 ^a
9	18,82 ± 0,52 ^a	19,27 ± 1,11 ^b	20,62 ± 2,14 ^a	20,55 ± 1,23 ^a
°h_P				
0	111,46 ± 0,28 ^a	112,44 ± 1,23 ^a	113,03 ± 2,03 ^a	112,42 ± 1,07 ^a
3	114,33 ± 0,42 ^a	112,90 ± 2,34 ^a	113,18 ± 2,20 ^a	112,44 ± 0,76 ^a
6	114,34 ± 0,98 ^a	114,32 ± 0,53 ^a	112,53 ± 1,12 ^a	113,81 ± 0,36 ^a
9	114,31 ± 0,68 ^a	115,21 ± 0,98 ^a	114,21 ± 1,52 ^a	113,54 ± 0,72 ^a

The same letters in the same line do not differ from each other by the Tukey test ($p < 0,05$).

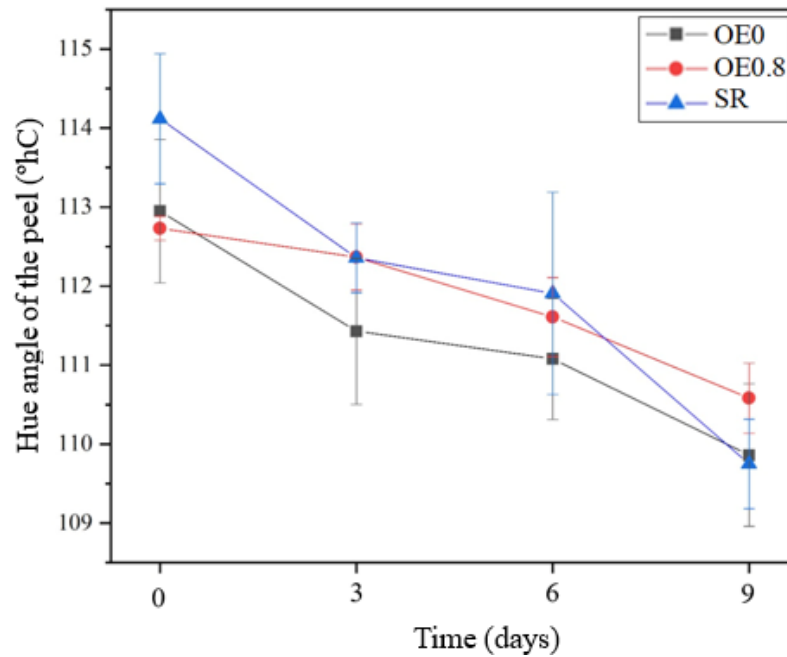


Fig. 4. Hue angle of the peel ($^{\circ}h_C$) of giant umbu fruits over storage time for the treatments: SR – without coating; OE0 – with emulsion and no essential oil; OE0.8 – with 0.8% essential oil.

$$^{\circ}h_{C0} = 114,102558 - 1,333801t \quad R^2 = 0,67 \quad (8)$$

$$^{\circ}h_{C0,8} = 112,796583 - 0,106685t \quad R^2 = 0,83 \quad (9)$$

$$^{\circ}h_{CSR} = 114,924480 - 0,185813t \quad R^2 = 0,79 \quad (10)$$

3.3. Hydrogen ion activity (pH), soluble solids content (SS) and titrable acidity (AT)

Table 3 shows that there was no significant difference in pH among the treatments throughout the evaluation period. The average pH values remained between 2.27 and 1.83, similar to those reported in the literature (Santos et al., 2021; Silva et al., 2024; Teodosio et al., 2021). The lack of variation in pH can be attributed to the controlled temperature conditions ($12 \pm 2^{\circ}C$) during storage, which likely limited enzymatic activity, maintaining the chemical and physical balance of the fruits without causing significant changes in pH (Khaliq et al., 2019).

Table 3. Mean and standard deviation of pH (hydrogen ion activity), soluble solids content (SS), titratable acidity (AT), and ascorbic acid content of giant umbu fruits over refrigerated storage time subjected to different treatments: SR – no coating; SE – without emulsion; OE0 – with emulsion and no essential oil; OE0.8 – with 0.8% essential oil.

Time (days)	SR	SE	OE0	OE0.8
pH				
0	2,02 ± 0,18 ^a	2,06 ± 0,26 ^a	1,98 ± 0,11 ^a	1,86 ± 0,06 ^a
3	2,20 ± 0,31 ^a	2,27 ± 0,29 ^a	2,25 ± 0,32 ^a	2,22 ± 0,26 ^a
6	2,03 ± 0,20 ^a	2,03 ± 0,29 ^a	2,02 ± 0,30 ^a	1,83 ± 0,15 ^a
9	1,85 ± 0,23 ^a	1,93 ± 0,21 ^a	2,05 ± 0,22 ^a	1,93 ± 0,19 ^a
SS (°Brix)				
0	8,67 ± 0,35 ^a	8,53 ± 0,06 ^a	9,00 ± 0,50 ^a	8,70 ± 0,10 ^a
3	9,43 ± 0,46 ^a	9,40 ± 0,26 ^a	9,77 ± 0,21 ^a	9,07 ± 0,35 ^a
6	10,80 ± 0,66 ^a	9,50 ± 0,00 ^b	9,50 ± 0,10 ^b	9,63 ± 0,25 ^b
9	10,77 ± 0,72 ^a	10,03 ± 0,40 ^a	10,37 ± 0,38 ^a	9,90 ± 0,46 ^a
AT (g de citric acid/100g de pulp)				
0	1,01 ± 0,21 ^a	0,68 ± 0,05 ^a	0,79 ± 0,08 ^a	0,82 ± 0,09 ^a
3	0,99 ± 0,07 ^a	0,71 ± 0,05 ^b	0,77 ± 0,09 ^b	0,80 ± 0,07 ^b
6	0,83 ± 0,02 ^a	0,79 ± 0,03 ^a	0,89 ± 0,17 ^a	0,74 ± 0,08 ^a
9	1,07 ± 0,02 ^b	0,96 ± 0,07 ^{ab}	0,77 ± 0,08 ^a	0,86 ± 0,11 ^a
SS/AT Ratio				
0	8,92 ± 2,18 ^a	12,53 ± 1,05 ^a	11,49 ± 0,59 ^a	10,67 ± 1,28 ^a
3	9,57 ± 0,70 ^a	13,22 ± 1,13 ^b	12,89 ± 1,84 ^b	11,42 ± 0,54 ^{ab}
6	13,01 ± 1,05 ^a	11,98 ± 0,50 ^a	11,01 ± 2,41 ^a	13,04 ± 1,06 ^a

9	10,07 ± 0,76 ^a	10,48 ± 0,76 ^a	13,58 ± 1,26 ^b	11,59 ± 1,33 ^{ab}
Ascorbic acid (mg.100g⁻¹)				
0	24,26 ± 7,69 ^a	24,03 ± 5,88 ^a	28,35 ± 4,03 ^a	27,35 ± 12,01 ^a
3	26,14 ± 2,52 ^{ab}	29,71 ± 5,37 ^b	20,59 ± 1,34 ^a	24,70 ± 2,63 ^{ab}
6	24,55 ± 5,20 ^a	26,28 ± 3,21 ^a	21,27 ± 2,62 ^a	21,13 ± 4,07 ^a
9	31,34 ± 1,36 ^a	33,43 ± 1,12 ^a	25,28 ± 2,94 ^b	30,77 ± 1,52 ^a

The same letters in the same line do not differ from each other by the Tukey test ($p < 0,05$).

The soluble solids content (SS), another parameter indicative of fruit ripening stage (Singh et al., 2023), showed a significant interaction for the treatments over the storage period, resulting in linear equations (Fig. 5 and Eqs. 11, 12, and 13), with the exception of the OE0 treatment (with emulsion and no essential oil). The untreated fruit showed an increase in SS content on the 6th day (Table 3), possibly due to the initial concentration effect of sugars and other solutes resulting from water loss (Xin et al., 2017), followed by biochemical changes that may have been more intense in fruits without coating, as this treatment also showed the greatest increase in titratable acidity by the end of the storage period. This behavior suggests a faster metabolism due to greater gas exchange and intense respiration, even at 12°C, a typical characteristic of climacteric fruit ripening, resulting from the hydrolysis of polysaccharides into simple sugars. The regression coefficients show a slower increase in SS in coated fruits (OE0.8: 0.54 °Brix/day; SE: 0.88 °Brix/day; SR: 1.77 °Brix/day), indicating that the coatings acted as a barrier to respiration and cold stress, delaying the conversion of starch into sugars and concentration due to water loss (Thakur et al., 2019; Md Nor & Ding, 2020; Oyom et al., 2022). The lower coefficient in the OE treatment indicates greater effectiveness in preserving SS. Similar data were found by Moura et al. (2013), who evaluated umbu fruits harvested at different maturation stages, without coatings, stored at room temperature and at 23 ± 1 °C, where

an increase in SS was observed up to the 5th day of storage and an increase in titratable acidity throughout the storage period.

Titratable acidity showed some variations, with the OE0 and OE0.8 treatments exhibiting lower values, while the SR treatment showed higher acidity, probably due to greater gas permeability and increased water availability on the fruit surface, which favored enzymatic reactions that accelerate the degradation of organic acids (Thakur et al., 2019).

The SS/TA ratio represents the balance between sweetness and acidity in the fruits, reflecting metabolic changes during ripening. Generally, its values increase as ripening progresses due to the rise in SS content and the reduction in TA. In this study, the OE0.8 treatment maintained the SS/TA ratio relatively stable, ranging from 11.42 to 13.04, indicating a delay in the hydrolysis of polysaccharides into sugars and in the consumption of organic acids, compared to the SR treatment, which showed a wider variation from 8.92 to 13. Other studies also indicate that starch-based coatings altered the sugar-acid ratio, reflecting changes in metabolism during ripening (Chettri et al., 2023; Machado et al., 2024).

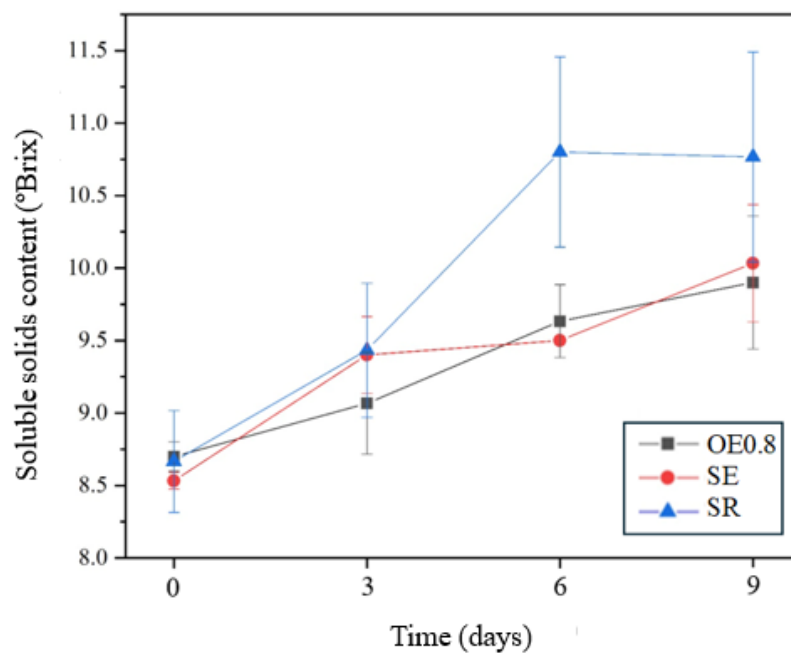


Fig. 5. Soluble solids content (SS) of giant umbu over storage time for the treatments: SR – without coating; SE – without emulsion; OE0.8 – with 0.8% essential oil.

$$SS_{OE0.8} = 8,158333 + 0,541667t \quad R^2 = 0,75 \quad (11)$$

$$SS_{SE} = 7,800000 + 0,876667t \quad R^2 = 0,80 \quad (12)$$

$$SS_{SR} = 7,000000 + 1,766667t \quad R^2 = 0,71 \quad (13)$$

3.4. Ascorbic acid

Ascorbic acid (vitamin C) is an important quality parameter for the fruits. For this parameter, no significant interaction was observed between treatment and storage time. Table 3 presents the data regarding ascorbic acid content, showing that only the OE0 treatment exhibited a significant difference from the others at the end of the storage period. For the other treatments, there was a significant variation on the third day, but this variation did not persist until the end. The average contents ranged from 21.05 to 33.43 mg/100g, and according to Lima et al. (2018), the ascorbic acid content in ripe umbu can vary from 10.0 to 40.0 mg.100g⁻¹. The stability of ascorbic acid is likely due to the maintenance of pH between 2.27 and 1.83 during storage. According to Giannakourou and Taoukis (2021), the main factors affecting ascorbic acid loss rates are pH, light, and temperature, with maximum stability observed at a pH range between 2 and 4.

4. Conclusion

Starch-based coatings made from unripe plantain combined with lemongrass essential oil (EO) have positive effects on the preservation of giant umbu. The results showed that the formulation with EO was more effective in reducing mass loss and maintaining pulp firmness, as well as delaying changes in color parameters and physicochemical composition during nine days of refrigerated storage. This work contributes by exploring an alternative and sustainable polymer matrix combined with bioactive compounds, expanding knowledge on tropical fruit preservation technologies. It offers a viable and low-cost solution for small producers, with the

potential to reduce postharvest losses and extend marketing time, promoting the valorization of local resources and strengthening family farming. Future studies should focus on the effect of temperature, using values higher than those applied in this work, as well as on the antimicrobial effects and sensory characteristics of fruits coated with essential oil-enriched coatings.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgments

The authors would like to thank Biofactory Laboratory (UESB) for the facilities used in the development of this study.

5. References

AOAC. (2016). *Official methods of analysis of AOAC International* (16th ed.). Association of Official Analytical Chemists.

Chauhan, K., Kaur, R., & Chauhan, I. (2024). Sustainable bioplastic: A comprehensive review on sources, methods, advantages, and applications of bioplastics. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63(8), 913–938.

<https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2307369>

- Chettri, S., Sharma, N., & Mohite, A. M. (2023). Utilization of lima bean starch as an edible coating base material for sapota fruit shelf-life enhancement. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, Article 100615. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100615>
- Coppola, G., Gaudio, M. T., Calabro, V., Lopresto, C. G., Chakraborty, S., & Curcio, S. (2021). Bioplastic from renewable biomass: A facile solution for a greener environment. *Earth Systems and Environment*, 5(2), 231–251. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00208-7>
- Cortes-Torres, A. G., Marín-Torres, J. L., Luna, F., Sandoval-Ramírez, J., Portillo-Reyes, R., López-Castillo, G. N., Baca, B. E., & Carrasco-Carballo, A. (2023). *Cymbopogon citratus* essential oil: Extraction, GC-MS, phytochemical analysis, antioxidant activity, and in silico molecular docking for protein targets related to CNS. *Current Issues in Molecular Biology*, 45(6), 51645179. <https://doi.org/10.3390/cimb45060328>
- Cruz-Monterrosa, R. G., Liceaga, A. M., Rayas-Amor, A. A., Aguilar-Toalá, J. E., Zambrano-Zaragoza, M. L., & González-Reza, R. M. (2023). Application of polysaccharide-based edible coatings on fruits and vegetables: Improvement of food quality and bioactivities. *Polysaccharides*, 4(2), 99–115. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides4020008>
- Devi, L. S., Das, B., Dutta, D., & Kumar, S. (2024). Essential oils as functional agents in biopolymer-based sustainable food packaging system: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 39, 101563. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101563>
- Donato, S. L. R., Castricini, A., Rodrigues, M. G. V., Deus, J. S. de ., Arantes, A. de M., & Pires, E. de S. (2024). Proposal of classes for umbu commercialization. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 46, e-516. <https://doi.org/10.1590/0100-29452024516>

- Dutta, D., & Sit, N. (2024). Comprehensive review on developments in starch-based films along with active ingredients for sustainable food packaging. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 39, Article 101534. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101534>
- Facundo, H. V. D. V., Garruti, D. D. S., Dias, C. T. D. S., Cordenunsi, B. R., & Lajolo, F. M. (2012). Influence of different banana cultivars on volatile compounds during ripening in cold storage. *Food Research International*, 49(2), 626–633. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.08.013>
- Faheem, F., Liu, Z. W., Aadil, R. M., Bryła, M., Roszko, M., Kieliszek, M., Din, A., Gul, M., Haq, I.-U., & Rabail, R. (2022). Uncovering the industrial potentials of lemongrass essential oil as a food preservative: A review. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 11(4), 720. <https://doi.org/10.3390/antiox11040720>
- Giannakourou, M. C., & Taoukis, P. S. (2021). Effect of Alternative Preservation Steps and Storage on Vitamin C Stability in Fruit and Vegetable Products: Critical Review and Kinetic Modelling Approaches. *Foods*, 10(11), 2630. <https://doi.org/10.3390/foods10112630>
- Gomes, B. L., Fabi, J. P., & Purgatto, E. (2016). Cold storage affects the volatile profile and expression of a putative linalool synthase of papaya fruit. *Food Research International*, 89 (Pt 1), 654–660. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.09.025>
- Hossain, M. T., Shahid, M. A., Akter, S., Ferdous, J., Afroz, K., Refat, K. R. I., Faruk, O., Jamal, M. S. I., Uddin, M. N., & Samad, M. A. B. (2024). Cellulose and starch-based bioplastics: a review of advances and challenges for sustainability. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63(10), 1329–1349. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2329980>
- Khaliq, G., Ramzan, M., & Baloch, A. H. (2019). Effect of Aloe vera gel coating enriched with *Fagonia indica* plant extract on physicochemical and antioxidant activity of

sapodilla fruit during postharvest storage. *Food Chemistry*, 286, 346–353.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.135>

Li, L., Zheng, F., Xin, M., Sheng, J., Tang, Y., Sun, J., Gao, H., Li, J., He, X., Ling, D., Yi, P., Li, Z., Liu, G., Shen, Y., & Li, C. (2017). Effects of polysaccharide-based edible coatings on quality and antioxidant enzyme system of strawberry during cold storage. *International Journal of Polymer Science*, 2017, 1–8.

<https://doi.org/10.1155/2017/9746174>

Lima M.A.C., Castricini, A. (2019) Qualidade e pós-colheita do umbu. Informe Agropecuário. 40(307): 80-90

Lima, M. A. C., Silva, S. D. M., & De Oliveira, V. R. (2018). Umbu-*Spondias tuberosa*. In *Exotic Fruits Reference Guide* (pp. 427–433). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803138-4.00057-5>

Lo’Ay, A. A., & El-Khateeb, A. Y. (2018). Antioxidant enzyme activities and exogenous ascorbic acid treatment of ‘Williams’ banana during long-term cold storage stress. *Scientia Horticulturae*, 234, 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.038>

Machado, V. S., Faria, R. C. D., Oliveira, A. R., Ascheri, D. P. R., Morgado, C. M. A., Campos, A. J. D., Rimoli, P. A. R., & Vespucci, I. L. (2024). Production and application of edible coatings using different starch bases in the postharvest preservation of cajá-manga. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 17(6), e7258.

<https://doi.org/10.55905/revconv.17n.6-018>

Md Nor, S., & Ding, P. (2020). Trends and advances in edible biopolymer coating for tropical fruit: A review. *Food Research International*, 134, 109208.

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109208>

Moorthy, S. N. (1991). Extraction of starches from tuber crops using ammonia. *Carbohydrate Polymers*, 16(4), 391–398. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(91\)90057-j](https://doi.org/10.1016/0144-8617(91)90057-j)

- Moradinezhad, F., Adiba, A., Ranjbar, A., & Dorostkar, M. (2025). Edible coatings to prolong the shelf life and improve the quality of subtropical fresh/fresh-cut fruits: A review. *Horticulturae*, 11(6), 577. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11060577>
- Moreno-Zaragoza, J., Rosell, C. M., & Bello-Pérez, L. A. (2024). The multiscale structure of banana starch related to the physicochemical, thermal, functional and digestibility characteristics: A review. *Food Hydrocolloids*, 159, 110646. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110646>
- Moura, F. T. de, Martins, L. P., Schunemann, A. P. P., & Silva, S. de M. (2013). Umbu tree fruit stored under modified and ambient atmospheric conditions at different maturity stages. *Revista Ciência Agronômica*, 44(4), 764–772. <https://doi.org/10.1590/s1806-66902013000400013>
- Nascimento, A., Faria-Silva, L., Lepaus, B. M., De São José, J. F. B., Valiati, B. S., & Toneto, L. C. (2023). Effect of edible coatings of cassava starch incorporated with clove and cinnamon essential oils on the shelf life of papaya. *Membranes*, 13(9), 772. <https://doi.org/10.3390/membranes13090772>
- Oyom, W., Yu, L., Dai, X., Li, Y.-C., Zhang, Z., Bi, Y., & Tahergorabi, R. (2022). Starch-based composite coatings modulate cell wall modification and softening in Zaosu pears. *Progress in Organic Coatings*, 171, 107014. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107014>
- Oliveira, L.A. (2010) *Manual de laboratório: Análises físico-químicas de frutas e mandioca*. Embrapa Mandioca e Fruticultura, Cruz das Almas.
- Pandey, V. K., Islam, R. U., Shams, R., & Dar, A. H. (2022). A comprehensive review on the application of essential oils as bioactive compounds in Nano-emulsion based edible coatings of fruits and vegetables. *Applied Food Research*, 2(1), 100042. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100042>

- Pan, Y.-G., Yuan, M.-Q., Zhang, W.-M., & Zhang, Z.-K. (2017). Effect of low temperatures on chilling injury in relation to energy status in papaya fruit during storage. *Postharvest Biology and Technology*, *125*, 181–187.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.11.016>
- Pei, J., Palanisamy, C. P., Srinivasan, G. P., Panagal, M., Kumar, S. S. D., & Mironescu, M. (2024). A comprehensive review on starch-based sustainable edible films loaded with bioactive components for food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, *274*(Pt 1), Article 133332.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133332>
- Prakash, A., Baskaran, R., & Vadivel, V. (2020). Citral nanoemulsion incorporated edible coating to extend the shelf life of fresh cut pineapples. *LWT*, *118*, 108851.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108851>
- Ribeiro, L. D. O., Freitas, S. C. D., Freitas, S. P., Matta, V. M. D., Viana, E. D. S., & Godoy, R. L. D. O. (2019). Nutrients and bioactive compounds of pulp, peel and seed from umbu fruit. *Ciência Rural*, *49*(4). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180806>
- Santos, C. A. F.; Nascimento, C. E. de S.; Campos, C. de O. (1999). Preservação da variabilidade genética e melhoramento do umbuzeiro. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Cruz das Almas, v. 21, n. 2, p. 104-109, ago. 1999.
- Santos, E. F., Pessoa, H. P., Souza Mendes, D., Cantuária Figueiredo, J., Almeida Paraízo, E., Barbosa Duarte, A., & Duarte Pereira, E. (2021). Extension of umbu (*Spondias tuberosa* Arruda) postharvest life using a cassava starch-based coating. *Agronomía Colombiana*, *39*(2), 293–299. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v39n2.94028>
- Shiekh, K. A., Ngiwngam, K., & Tongdeesoontorn, W. (2022). Polysaccharide-based active coatings incorporated with bioactive compounds for reducing postharvest losses of fresh fruits. *Coatings*, *12*(1), 8. <https://doi.org/10.3390/coatings12010008>

- Silva, V. P., Ferreira, M. A. R., Oliveira, V. R. de, & Tonetto de Freitas, S. (2024). Umbu physicochemical quality, diversity in the Caatinga biome and promising genotypes for consumption. *Comunicata Scientiae*, 15, e3721. <https://doi.org/10.14295/cs.v15.3721>
- Thakur, R., Golding, J. B., Bowyer, M., Singh, S. P., Scarlett, C. J., Pristijono, P., Stathopoulos, C. E., & Vuong, Q. V. (2017). Amylose-lipid complex as a measure of variations in physical, mechanical and barrier attributes of rice starch- κ -carrageenan biodegradable edible film. *Food Packaging and Shelf Life*, 14, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2017.10.002>
- Thakur, R., Pristijono, P., Bowyer, M., Singh, S. P., Scarlett, C. J., Stathopoulos, C. E., & Vuong, Q. V. (2019). A starch edible surface coating delays banana fruit ripening. *LWT*, 100, 341–347. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.055>
- Teodosio, A. E. M. M., Araújo, R. H. C. R., Santos, B. G. F. L., Linné, J. A., Medeiros, M. L. S., Onias, E. A., Morais, F. A., Silva, S. M., & Lima, J. F. (2021). Effects of edible coatings of *Chlorella* sp. containing pomegranate seed oil on quality of *Spondias tuberosa* fruit during cold storage. *Food Chemistry*, 338, 127916. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127916>
- Valková, V., Ďúranová, H., Kačániová, M., Vukic, M., Borotová, P., Vukovic, N. L., & Galovičová, L. (2022). *Cymbopogon citratus* essential oil: Its application as an antimicrobial agent in food preservation. *Agronomy*, 12(1), 155. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010155>
- Von Loesecke, H. (1950). *Bananas*. Inter Science Publishers, New York, 189.
- Wang, L., Shen, S., Huan, C., Zhou, H., Zhang, S., Ye, Z., & Zheng, X. (2025). The effects of chilling (4 °C) and non-chilling (12 °C) temperatures on storage quality and flavor development of yellow peach fruit. *Journal of Food Composition and Analysis*, 139, Article 107094. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.107094>

- Xin, Y., Chen, F., Lai, S., & Yang, H. (2017). Influence of chitosan-based coatings on the physicochemical properties and pectin nanostructure of Chinese cherry. *Postharvest Biology and Technology*, *133*, 64–71.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.06.010>
- Yaashikaa, P. R., Kamalesh, R., Senthil Kumar, P., Saravanan, A., Vijayasri, K., & Rangasamy, G. (2023). Recent advances in edible coatings and their application in food packaging. *Food Research International*, *173*(Pt 2), 113366.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113366>
- Zeraik, M. L., Queiroz, E. F., Marcourt, L., Ciolet, O., Castro-Gamboa, I., Silva, D. H. S., Cuendet, M., Da Silva Bolzani, V., & Wolfender, J.-L. (2016). Antioxidants, quinone reductase inducers and acetylcholinesterase inhibitors from *Spondias tuberosa* fruits. *Journal of Functional Foods*, *21*, 396-405. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.12.009>
- Zhang, Z., Zhu, Q., Hu, M., Jiang, Y., Gao, Z., An, F., & Li, M. (2017). Low-temperature conditioning induces chilling tolerance in stored mango fruit. *Food Chemistry*, *219*(219), 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.123>