

INSTITUTO FEDERAL
GOIANO
Câmpus Rio Verde

BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES
BIODEGRADÁVEIS DE AMIDO DE BATATA-DOCE COM
DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE NANOPARTÍCULAS
DE ÓXIDO DE ZINCO**

JULY MAENDRA LOPES VERAS

Rio Verde, GO

2022

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CÂMPUS RIO VERDE
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES
BIODEGRADÁVEIS DE AMIDO DE BATATA-DOCE COM
DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE NANOPARTÍCULAS
DE ÓXIDO DE ZINCO**

JULY MAENDRA LOPES VERAS

Trabalho de Curso apresentado ao
Instituto Federal Goiano – Campus Rio
Verde, como requisito parcial para
obtenção do Grau de Bacharel em
Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr^a. Geovana Rocha Plácido

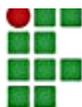
Rio Verde – GO
Abril, 2022

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

V476p Veras, July Maendra Lopes
Produção e caracterização de filmes biodegradáveis de amido de batata-doce com diferentes concentrações de nanopartículas de óxido de zinco / July Maendra Lopes Veras; orientadora Geovana Rocha Plácido. -- Rio Verde, 2022.
40 p.

TCC (Graduação em Bacharelado em Engenharia de Alimentos) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2022.

1. Biopolímeros. 2. Nanocompósitos. 3. Biodegradação. 4. Propriedades. I. Plácido, Geovana Rocha, orient. II. Título.



TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: July Maendra Lopes Veras

Matrícula: 2017102200340370

Título do Trabalho: Produção e caracterização de filmes biodegradáveis de amido de batata-doce com diferentes concentrações de nanopartículas de óxido de zinco.

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 05 / 05 / 2022

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, Goiás , 03 /05 /2022.

Local

Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

Geovana Rocha Plácido
Orientadora



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 15/2022 - GEPTNM-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos **25** dias do mês de abril de 2022, às 8:00 horas e 10 minutos, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: Geovana Rocha Plácido (orientadora), Raphaela Gabri Bitencourt (membro interno), Juliana Aparecida Célia (membro externo), para examinar o Trabalho de Curso intitulado "**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES BIODEGRADÁVEIS DE AMIDO DE BATATA-DOCE COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO**" da estudante July Maendra Lopes Veras Matrícula nº 2017102200340370 do Curso de Engenharia de Alimentos do IF Goiano – Campus Rio Verde. A palavra foi concedida a estudante para a apresentação oral do TC, houve arguição da candidata pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** da estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Geovana Rocha Plácido

Orientadora

Raphaela Gabri Bitencourt

Membro interno

Juliana Aparecida Célia

Membro externo

Documento assinado eletronicamente por:

- Juliana Aparecida Celia, 2019202320140073 - Discente, em 27/04/2022 09:53:50.
- Raphaela Gabri Bitencourt, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 26/04/2022 20:28:10.
- Geovana Rocha Plácido, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 26/04/2022 20:15:33.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 26/04/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 382275

Código de Autenticação: c05683d210



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3620-5600

Dedico este trabalho à Deus, a minha família e a mim!

“Nem tudo é sobre talento,
tem a dedicação que é mais importante ainda”.

-Amanda Fitas (2022).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me permitido chegar até aqui, por ter me sustentado quando cai e por ter cuidado de mim a cada momento.

Agradeço a minha mãe e pai pelas palavras de motivação e conforto, pelo financiamento dos lanches, almoços, bolos no pote, van escolar e muitos moto-táxis e ubers. E claro ao todo esforço que vocês fizeram durante esses anos para que eu não precisasse trancar ou sair da faculdade. Agradeço a minha irmã Mayres pela caminhada até aqui, por todos os risos, companhias e experiências, por ter aturado meus surtos diários na van do sr. Altair, e os choros com disciplinas. Agradeço a Edna pelas cantorias no laboratório e também pela companhia nas aulas e trabalhos acadêmicos. Agradeço a minha orientadora Geovana pela oportunidade que me deu em 2018 que fez com que eu entrasse no laboratório de frutas e hortaliças, aproveito para agradecer a todos as pessoas que passaram pelo lab e que contribuíram no meu conhecimento. Agradeço aos professores por cada aula, mentoria e visitas técnicas, as minhas amigas: Marina, Joyce e Yasmim, que passaram por toda essa jornada comigo, onde ofereceram muitos ombros amigos e ouvidos ativos e empáticos para os meus problemas. Agradeço a Geisa, Rithiely e Tainara por me socorrer sempre que preciso. A Pamella por ter me dado um estágio quando eu mais precisei.

Agradeço a mim, por nunca ter desistido mesmo quando estive no fundo do poço ou quando me encontrei em muitos túneis sem saídas, por ser esperta e autodidata e por nunca ter deixado o medo me paralisar (ele tentou muitas vezes, mas não conseguiu!).

Agradeço ao IF por ter me proporcionado tantas experiências e conhecimentos.

Meus sinceros agradecimentos a todos que fazem parte da minha vida.

RESUMO

Veras, July Maendra Lopes. **Produção e caracterização de filmes biodegradáveis de amido de batata-doce com diferentes concentrações de nanopartículas de óxido de zinco**. 2022. 40 p. Monografia - Curso de Engenharia de Alimentos, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, 2022.

O amido apresenta excelentes propriedades em comparação com outros materiais biodegradáveis, ele é barato, abundante e possui a capacidade de formação de filme, o uso de nanopartículas oferece excelente efeito de reforço, podendo melhorar as propriedades de barreira, mecânicas, térmicas e físicas dos filmes de amido. Recentemente, nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) têm recebido crescente interesse devido à sua fácil síntese, não toxicidade, boa proteção UV e funções antibacterianas. Diante disso, objetivou-se avaliar o uso em potencial do amido de batata-doce na produção de filmes e o efeito da incorporação de nanopartículas de ZnO nas propriedades físico-químicas dos filmes produzidos plastificados com glicerol. Foram utilizadas quatro amostras sendo um controle (apenas amido e glicerol) e outros três tratamentos variando a concentração de nanopartículas. Foi possível alcançar resultados satisfatórios utilizando o amido de batata-doce como matriz filmogênica, a adição de nanopartículas de ZnO diminuiu o teor de água dos filmes de amido, houve um aumento de espessura conforme aumento da concentração de nanopartículas de ZnO. A opacidade a luz visível foi aumentada e as propriedades mecânicas também foram influenciadas pela incorporação de nanopartículas de ZnO, aumentando a flexibilidade dos filmes. A partir dos resultados observados nesse trabalho conclui-se que as nanopartículas de óxido de zinco nas concentrações estudadas modificaram positivamente propriedades físicas, químicas e mecânicas do filme de amido de batata-doce.

Palavras-chave: Biopolímeros, nanocompósitos, biodegradação, propriedades.

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

A	Área
abs	Absorbância
ANOVA	Análise de variância
CIELab	Espaço de cor
EL	Elongação
h	Horas
M	Mols
m	Massa
ME	Módulo de elasticidade
mf	Massa final
MgO	Óxido de magnésio
mi	Massa inicial
mif	Massa seca final análise de solubilidade em água
mis	Massa seca inicial análise de solubilidade em água
Nps	Nanopartículas
NpsZnO	Nanopartículas de óxido de zinco
pH	Potencial Hidrogeniônico
PVA	Poliacetato de vinila
SiO ₂	Dióxido de Silício
TiO ₂	Dióxido de Titânio
TM	Tensão máxima
TR	Tensão de ruptura
UV	Radiação ultravioleta
ZnO	Óxido de zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetros
-	Menos
%	Porcentagem
%b.s.	Percentual de base seca
+	Mais
±	Mais ou menos
°C	Graus Celsius
C*	Chroma
cm ²	Centímetros quadrados
g	Gramas
g/cm ²	Gramas/centímetro quadrado
g ZnO/g	Gramas de nanopartículas de óxido de zinco por grama de amido
h°	Hue
L*	Luminosidade
m/v	Massa por volume
mL	Mililitros
mm	Milímetros
MPa	Mega pascal
nm	Nanômetro
p<0,05	Probabilidade menor que 0,05
S (%)	Porcentagem de solubilidade
X	Multiplicação
µm	Micrometro
x	Espessura
α	Alfa
β	Beta

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Cálculo de teor de água.....	22
Equação 2 - Cálculo de Solubilidade.....	23
Equação 3 - Cálculo de gramatura.....	24
Equação 4 - Cálculo para obter os valores de saturação ou chroma (C*).....	24
Equação 5 - Cálculo para obter os valores de tonalidade ou ângulo hue (°).....	24
Equação 6 - Cálculo para obter os valores de opacidade.....	24

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Micrografia (x1000) de amido de batata-doce.....	18
Figura 2 - Nanopartículas de óxido de zinco.....	21
Figura 3 - Preparo de solução formadora de filme.....	22
Figura 4- Análise de espessura.....	23
Figura 5 - Análise de opacidade... ..	25
Figura 6 - a) Filme controle (0% de ZnO), b) Tratamento 1 (2% g ZnO/g de amido de batata).....	26
Figura 7 - a) Tratamento 2 (4 % g ZnO/g de amido de batata), b) Tratamento 3 (6 % g ZnO/g de amido de batata).....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Concentração de cada tratamento	22
Tabela 2 - Teor de água e solubilidade em água dos filmes biodegradáveis de amido de batata-doce, controle (0% de Nps ZnO), tratamento 1 (2%), tratamento 2 (4%) e tratamento 3 (6%) (g ZnO/g amido de batata-doce).....	27
Tabela 3 - Espessura e Gramatura dos filmes biodegradáveis de amido de batata-doce com 0 %, 2 %, 4 % e 6 % g ZnO/g amido de batata-doce.....	28
Tabela 4 - Parâmetros de cor dos filmes biodegradáveis de amido de batata-doce com 0 %, 2 %, 4 % e 6 % g ZnO/g amido de batata-doce.....	29
Tabela 5 - Opacidade dos filmes biodegradáveis de amido de batata-doce com 0 %, 2 %, 4 % e 6 % g ZnO/g amido de batata-doce.....	30
Tabela 6 - Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de alguns polímeros mais comuns utilizados em embalagens de alimentos.....	30
Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos filmes biodegradáveis de amido de batata-doce com 0 %, 2 %, 4 % e 6 % g ZnO/g amido de batata-doce.....	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 Biopolímeros.....	16
2.2 Batata-doce.....	17
2.3 Amido.....	18
2.4 Plastificante	19
2.5 Nanopartículas	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1 Local e material.....	20
3.2 Obtenção das nanopartículas de óxido de zinco (ZnO)	20
3.3 Elaboração dos Filmes.....	21
3.4 Caracterização dos Filmes	22
3.4.1 Teor de água.....	22
3.4.2 Solubilidade	23
3.4.3 Espessura	23
3.4.4 Gramatura	23
3.4.5 Análise de Cor e Opacidade.....	24
3.4.6 Propriedades mecânicas.....	25
3.5 Análise estatística.....	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 Produção dos filmes biodegradáveis.....	25
4.2 Caracterização dos filmes biodegradáveis.....	26
4.2.1 Teor de água e Solubilidade em água	26
4.2.2 Gramatura e Espessura.....	27
4.2.3 Cor e Opacidade.....	28
4.2.4 Propriedades mecânicas.....	30
5 CONCLUSÃO.....	32
6 REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

O primeiro registro da produção do plástico vem do século XIX, quando Alexandre Parkers iniciou seus estudos com um derivado da celulose, uma resina que foi denominada “Parkesina”. Anos mais tarde, com a descoberta do poliestireno, e o aumento do conhecimento dos mecanismos da polimerização, vários tipos de plásticos começaram a serem utilizados na produção industrial, os principais foram: o polietileno, o policloreto de vinila e os poliamidas (Guimarães, de Almeida & de Azevedo, 2021). A embalagem para alimentos feitas de filmes plásticos é um método econômico e robusto para proteger os alimentos da contaminação, no entanto, filmes feitos de polímeros sintéticos não se degradam por centenas ou milhares de anos, contribuindo para problemas ambientais decorrentes do acúmulo de grandes quantidades de resíduos sólidos (Lim et al., 2020).

Segundo Utari et al (2022) o aumento do uso de plástico promove sérios problemas ambientais, a quantidade de lixo plástico que é lançado nas águas é de cerca de 800 mil a 30 milhões de toneladas por ano. A resposta para tal problema é a utilização de materiais biodegradáveis, que se decompõem em compostos simples, sob a influência de leveduras, bactérias ou fungos. Por isso, cada vez mais atenção está sendo dada aos materiais à base de polissacarídeos e proteínas (Jamróz et al., 2022). A fabricação de filmes biodegradáveis como um potencial substituto para produtos químicos sintéticos e petroplásticos também é uma alternativa plausível devido à sua sustentabilidade e natureza ecologicamente correta (Oyom et al., 2022). A batata-doce é a sétima cultura alimentar mais importante do mundo, com ampla distribuição e produção abundante, o amido de batata-doce é o principal componente dos rizomas de batata-doce e desempenha um papel importante nas indústrias alimentícia, química e farmacêutica, como na fabricação de macarrão, confeitaria e filmes comestíveis (Chen et al., 2021).

O amido como material para embalagem apresenta excelentes propriedades em comparação com outros materiais biodegradáveis, pois eles são baratos, abundantes, possuem excelentes qualidades de formação de filme e produzem filmes finos que são transparentes, incolores e inodoros, e com excelentes propriedades de barreira ao gás como resultado de uma estrutura de rede de ligações de hidrogênio bem ordenada e compacta (Sarak et al., 2022).

No entanto, a resistência à água dos filmes de amido é baixa devido à sua natureza hidrofílica e suas propriedades mecânicas e térmicas são fracas. Para superar essas desvantagens e melhorar o desempenho do filme de amido, o uso de plastificante e

nanocompósitos oferecem excelente efeito de reforço podendo melhorar as propriedades de barreira, mecânicas, térmicas e físicas dos filmes de amido (Rammak, Boonsuk & Kaewtatip., 2021). A adição de plastificantes como o glicerol tem sido frequentemente utilizado para filmes de amido devido à sua compatibilidade com a amilose, promovendo melhores propriedades mecânicas ao interferir no empacotamento da amilose, diminuindo assim as forças intermoleculares entre as moléculas de amido. Por consequência, os filmes de amido plastificado se tornam mais flexíveis e viáveis para diversas aplicações em embalagens (Nordin et al., 2020).

Para Ahmad & Sarbon (2021) a incorporação de nanopartículas em filmes de biopolímeros resultam em mudanças significativas no aumento da estabilidade térmica e propriedades mecânicas aprimoradas, e isso se deve à proporção adequada de nanopartículas e da comunicação interfacial entre a rede polimérica e as nanopartículas espalhadas na matriz filmogênica. Recentemente, nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) têm recebido crescente interesse devido à sua fácil síntese, não toxicidade, boa proteção UV, funções antibacterianas, e grande potencial no desenvolvimento de materiais funcionais baseados em biopolímeros (Hu et al., 2022).

Sendo assim, este trabalho objetivou-se a avaliação do uso em potencial do amido de batata-doce na produção de filmes biodegradáveis e do efeito da incorporação de nanopartículas de ZnO nas propriedades físicas, mecânicas e no teor de água dos filmes produzidos plastificados com glicerol.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Biopolímeros

Os biopolímeros são materiais poliméricos classificados estruturalmente como polissacarídeos, poliésteres ou poliamidas. A matéria-prima para sua manufatura é uma fonte de carbono renovável, geralmente um carboidrato derivado de plantios comerciais de larga escala como cana-de-açúcar, milho, batata, trigo e beterraba; ou um óleo vegetal extraído de soja, girassol, palma ou outra planta oleaginosa (Araújo et al., 2021).

A crescente busca por polímeros ambientalmente amigáveis aliada à necessidade de aproveitar melhor os resíduos alimentares contribuem para o interesse no desenvolvimento de filmes biodegradáveis. A formação de filmes a partir de resíduos alimentares vegetais ocorre devido à presença desses polímeros naturais nessas matrizes, tais como amido, gelatina/proteína

e compostos lignocelulósicos, sendo o amido um dos biopolímeros mais representativos para o mercado de bioplásticos (Matheus et al., 2021).

Além dos bioplásticos, os biopolímeros naturais de polipeptídeos e polissacarídeos também têm sido amplamente utilizados em embalagens por sua sustentabilidade e biodegradabilidade (Wu, Misra & Mohanty, 2021). A biodegradação é a única rota de degradação que tem a capacidade de eliminar completamente os polímeros ou seus produtos de degradação do meio ambiente e ocorre por meio de quebra de ligações hidrolíticas ou enzimaticamente sensíveis no polímero, causando erosão do polímero (Al Sharabati et al., 2021).

No entanto, sabe-se que a maioria dos biopolímeros é caracterizada por algumas limitações, incluindo alta afinidade com a umidade, baixa estabilidade térmica e baixa barreira e propriedades mecânicas (Glicerina et al., 2021). O processo de mistura de polímeros (blending) ou incorporação de compósitos fazem mudanças marcantes nas propriedades físicas dos polímeros afim de melhorar seu uso em muitas aplicações de interesse (Menazea et al., 2021).

2.2 Batata-doce

A batata-doce (*Ipomoea batatas*) é a sexta cultura mais significativa em termos de consumo, depois do arroz, trigo, batata, milho e mandioca, ela é amplamente cultivada em muitos países tropicais e subtropicais da Ásia, África e América Latina (Tong et al., 2020).

Seu tubérculo radicular é rico em amido, fibra dietética, vitamina C, provitamina A, ferro e minerais, sendo normalmente utilizado como fonte de energia na dieta humana e como importante recurso de amido em indústrias alimentícias e não alimentícias (Guo et al., 2019). A batata-doce pode ser classificada como amarela, branca, roxa e laranja, sendo que as colorações amarelas e roxas das raízes são causadas pelo acúmulo de β -caroteno lipossolúvel e antocianinas solúveis em água, respectivamente (Sun et al., 2022). A batata-doce roxa é um tipo especial de batata-doce que contém nutrientes versáteis, como carboidratos, carotenóides, lipídios, proteínas de alta qualidade, vitaminas, fibras alimentares e minerais, e rica em antocianinas que contribui para seus diversos efeitos à saúde, como efeitos antioxidantes, antiobesidade, atividade imunomoduladora, antienvhecimento, anti-hiperglicêmico, hepatoprotetor e antimicrobiano (Ding et al., 2020).

A batata-doce é perecível durante o armazenamento, o que resulta em desperdício de recursos, seus abundantes recursos de amido podem ser aproveitados com a extensão de sua cadeia industrial (Wang et al., 2020).

2.3 Amido

O amido é um dos polímeros naturais mais abundantes na natureza e devido ao seu baixo custo, abundância, biodegradabilidade e comestibilidade, ele é amplamente utilizado na área de alimentos, sendo composto de amilopectina que possui ligações glicosídicas α -1,6 e α -1,4, e amilose que possui ligações glicosídicas α -1,4, essa por sua vez, tem excelentes propriedades de formação de filme (Cui et al., 2021). Além disso, o amido pode ser produzido a partir de várias fontes, como mandioca, batata, milho, aveia, arroz, sementes de plantas e outros, neste caso, os filmes de amido como embalagem alternativa destinam-se principalmente a prolongar a vida útil dos produtos alimentícios (Wigati et al., 2022).

Como a batata inglesa (*Solanum tuberosum*), cerca de 50-80 % da batata-doce (*Ipomoea batatas*) é composta de amido com base no peso seco (Song et al., 2021). O amido de batata-doce tem alto teor de amilose (24,1–35,55 %), semelhante aos amidos de milho (28–33 %) e trigo (30–32 %) e superior ao amido de mandioca (16–19 %). O teor de amilose é responsável pelas propriedades filmogênicas do amido, devido às cadeias lineares que tendem a interagir por ligações de hidrogênio, resultando em filmes rígidos e relativamente fortes (Ballesteros-Mártinez, Pérez-Cervera & Andrade-Pizarro., 2020).

O amido de batata-doce mostra heterogeneidade no tamanho dos grânulos, que cobre uma faixa de 0,5 a 60 μ m e em contraste com os amidos de trigo, cevada e milho, o amido de batata-doce é menos abordado do ponto de vista da dependência do tamanho dos grânulos de suas características moleculares e funcionalidade (Ye et al., 2020). Na figura 1 está a micrografia dos grânulos de amido de batata-doce, onde observa-se a maioria dos grânulos são esféricos com superfície lisa, e alguns com formato irregular (Chen et al., 2021).

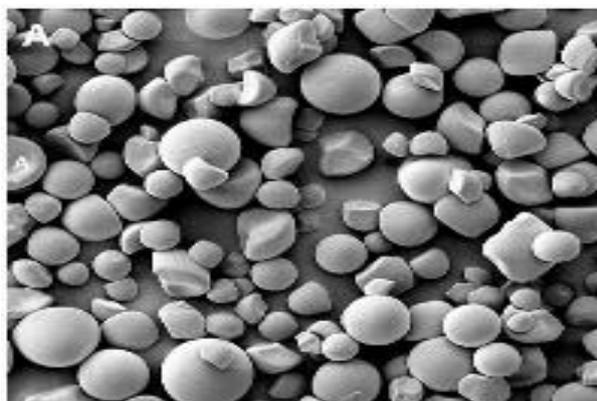


Figura 1- Micrografia (x1000) de amido de batata-doce.

Fonte: Chen et al. (2021).

As propriedades estruturais, físico-químicas e funcionais do amido estão intimamente relacionadas ao genótipo, condição de crescimento e variedades da batata-doce roxa (Yong et al., 2018).

2.4 Plastificante

O plastificante é um dos parâmetros mais importantes no desenvolvimento de plásticos à base de amido, pois proporciona flexibilidade aos materiais (Mustapha & Wan., 2022). Os plastificantes são moléculas de baixo peso molecular que se intercalam entre as cadeias poliméricas, quebram as ligações de hidrogênio, reduzem as forças intermoleculares, aumentam a mobilidade da rede polimérica, a flexibilidade, a temperatura de transição vítrea, a permeabilidade ao vapor de água e aos gases e facilitam seu processamento (Teixeira et al., 2021).

Segundo Amin et al (2021), diferentes plastificantes, como glicerol, sorbitol, polióis, poliaminas, glicose, etc. têm sido usados em pesquisas e considerados muito eficazes para melhorar a flexibilidade e transparência. O glicerol (glicerina) é o principal subproduto obtido a partir da produção de biodiesel, sendo responsável por aproximadamente 10% do volume total de biodiesel produzido, e considerado o melhor plastificante para a produção de amido termoplástico (Nobrega et al., 2012), pois é solúvel em água, polar e uma substância não volátil de baixo peso molecular, o que torna o glicerol um plastificante adequado para ser utilizado com um polímero solúvel em água compatível (Dick et al., 2015).

No entanto, este plastificante afeta negativamente as propriedades mecânicas e de barreira ao vapor de água dos bioplásticos, os filmes plastificados com glicerol são mais sensíveis à umidade, tanto na forma de vapor quanto de água líquida, devido ao seu caráter higroscópico e hidrofílico, respectivamente, assim, a aplicação de filmes de polissacarídeos plastificados com glicerol em alimentos com alto teor de umidade pode ser limitada (Pulla-Huillca et al., 2021), para solucionar esses problemas o uso de nanocompósitos é uma estratégia mais recente na área de embalagens visando melhorar as propriedades de filmes à base de biopolímeros. A utilização de glicerol como plastificante nestes filmes pode ser uma forma de ajudar a solucionar o excedente existente deste coproduto da produção de biodiesel (Cerqueira et al., 2012).

2.5 Nanopartículas

A nanotecnologia é um campo florescente e o desenvolvimento de nanocompósitos é considerado uma boa abordagem para superar as deficiências dos plásticos biodegradáveis. Os

nanocompósitos são sintetizados pela incorporação de nanomateriais bem dispersos (nanopartículas, nanofibras e nanoplaquetas) dentro da matriz polimérica (Alam et al., 2022).

As nanopartículas estudadas para aplicações em embalagens de alimentos são divididas em dois grandes grupos: nanopartículas orgânicas e inorgânicas. As nanopartículas orgânicas são produzidas a partir de proteínas alimentares, carboidratos, lipídios e outros compostos orgânicos, enquanto as nanopartículas inorgânicas são de metais ou óxidos metálicos amplamente utilizados em alimentos (Ahmad & Sarbon., 2021).

Nanopartículas de óxido de zinco (NPsZnO), apresentam grandes vantagens na melhoria do desempenho do filme devido à sua grande área superficial específica e forte atividade antimicrobiana (Zhai et al., 2022). Kim et al (2022) afirma que o ZnO é um nanomaterial seguro e multifuncional amplamente utilizado em diversas indústrias, como alimentos, biomedicina e cosméticos. Possui comportamento anfótero, insolúvel em água e álcool, dissolve-se em ácidos, como ácido nítrico, ácido sulfúrico e ácido clorídrico (Mahmood et al., 2022). Segundo Zhu et al. (2021), a incorporação de ZnO melhora substancialmente as propriedades de nanocompósitos biodegradáveis de amido visto que, em estudos recentes em filmes de amido valores de propriedades mecânicas obtiveram melhor performances e valores de permeabilidade ao oxigênio foram reduzidos em comparação a filmes de amido ou gelatina sozinhos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local e material

O amido de batata doce foi adquirido por meio de compra online no Empório Nilza Nunes Comercio de Produtos Naturais, situado em São Paulo (Brasil). O preparo das nanopartículas e as análises dos filmes foram realizadas no Laboratório de frutas e hortaliças do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde.

3.2 Obtenção das nanopartículas de óxido de zinco (ZnO)

Para obtenção das nanopartículas de ZnO foi utilizado o método de irradiação de micro-ondas de Sathiya et al. (2018), em que primeiramente, 0,3 M de solução foi preparado por dissolução de acetato de zinco desidratado em água destilada. O pH da solução foi ajustado para 10 por adição de solução NaOH 2 M. A solução ficou em descanso por 24 h até obter duas fases: uma fase de cor transparente e outra de cor branca. A fase de cor transparente foi descartada e a de cor branca foi irradiada, formando um precipitado. A fase branca foi irradiada

em intervalos de 10 minutos durante uma 1 h em forno micro-ondas, originando um produto branco (precipitado). Em seguida, a amostra foi triturada em cadinho obtendo, assim, as nanopartículas, que foram colocadas em um béquer (figura 2) e armazenadas em dessecador.

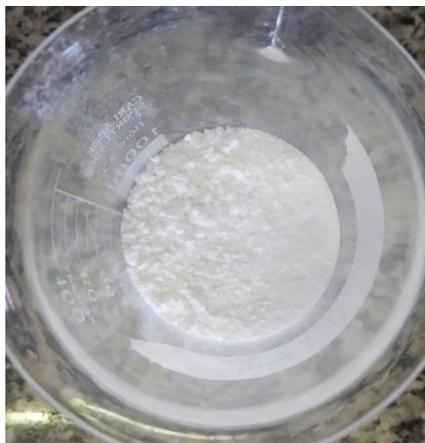


Figura 2 - Nanopartículas de óxido de zinco.

Fonte: Próprio autor.

3.3 Elaboração dos Filmes

O preparo dos filmes e suas concentrações foram definidas seguindo metodologia de Ni et al (2018) com modificações. Para o preparo da solução formadora de filme (Figura 3), foi utilizado 1 litro de água destilada em cada batelada (produção de 10 filmes/batelada), onde foram diluídos com agitação mecânica utilizando um agitador magnético (Splabor, SP 10206/A), o amido de batata-doce 2 % (m/v), o plastificante glicerol 0,5 % (m/v) e as nanopartículas de óxido de zinco 2 %, 4 % e 6 % (g ZnO/g de amido de batata-doce), a composição de cada tratamento é descrita na tabela 1. A solução foi aquecida a 90 °C com agitação constante por 30 minutos. Em seguida, utilizando a técnica de casting (Larrauri et al., 2016), 100 mL de solução filmogênica foi depositada em placas de acrílico de 14 cm de diâmetro, que foram levadas para secagem em estufa com circulação de ar (Marconi, MA 035) por 24 h a 40 °C. Todos os filmes foram acondicionados à temperatura ambiente dentro de dessecadores com sílica em gel.

Tabela 1 – Concentração de cada tratamento.

Tratamentos	Concentração		
	Amido (%) (m/v)	Glicerol (%) (m/v)	NpsZnO (%) (g ZnO/g de amido)
Controle	2	0,5	-
Tratamento 1	2	0,5	2
Tratamento 2	2	0,5	4
Tratamento 3	2	0,5	6



Figura 3- Preparo de solução formadora de filme.

Fonte: Próprio autor.

3.4 Caracterização dos Filmes

3.4.1 Teor de água

Amostras dos filmes foram cortadas na dimensão de 4 cm² e pesadas em balança analítica (com precisão de 0,0001 g) (Aczet, CY 224C) antes e depois de secar em estufa (Quimis, Q-314) a 105 °C por 24 h. O conteúdo de água foi calculado utilizando a Equação 1:

$$\text{Teor de água (\%)} = \frac{(m_i - m_f)}{m_f} \times 100$$

Equação 1- Cálculo de teor de água

Em que: m_i foi a massa inicial do filme (g) e m_f foi a massa final após a secagem (g). O teor de água foi expresso em porcentagem (% b.s).

3.4.2 Solubilidade em água

A solubilidade em água foi feita em triplicata seguindo metodologia de Kavooosi et al. (2014) com modificações. As amostras foram cortadas com dimensão padronizada de 4 cm² e colocadas para secagem em estufa por 24 h a 105 °C e, em seguida, pesadas para obtenção do peso inicial. Após a secagem, as amostras foram imersas em 50 mL de água destilada e mantidas sob agitação constante e lenta a 25 °C por 24 h em agitador magnético (Splabor, SP 10206/A). Ao final do tempo de agitação, as amostras foram filtradas e o material restante retido foi seco em estufa a 105 °C, por 24 h, para determinar a quantidade de matéria seca não solubilizada. A porcentagem de solubilidade foi calculada seguindo Rocha et al (2014), através da equação 2:

$$S (\%) = \frac{mis - mfs}{mis} \times 100$$

Equação 2- Cálculo de Solubilidade em água.

Em que: S (%) é a porcentagem de material seco solubilizado; mis é o peso inicial do material seco; mfs é o peso final do material seco não solubilizado.

3.4.3 Espessura

A espessura foi determinada por meio da média dos valores de 5 pontos aleatórios em diferentes segmentos dos filmes. As medidas foram feitas em 3 filmes de cada tratamento, utilizando micrômetro digital (Mitutoyo, MDC-25PX, Japão) com capacidade 0-25 mm e resolução (precisão) de 0,001 mm (Figura 4).



Figura 4 – Análise de espessura

Fonte: Próprio autor.

3.4.4 Gramatura

Amostras de filmes de 4 cm² de área, foram pesadas em balança analítica (Aczet, CY 224C) e então calculadas suas gramaturas conforme equação (3):

$$\text{Gramatura (g/cm}^2\text{)} = \frac{m}{A} \times 100$$

Equação 3 – Cálculo de gramatura.

Em que: m é a massa do filme e A é a área do filme em cm².

3.4.5 Análise de Cor e Opacidade

Para análise de cor das amostras de filme foi empregado um medidor de colorimetria (Konica Minolta, CR-400), onde determinou-se os valores dos parâmetros de cor CIELab: L* (luminosidade), a* ((+) vermelho, (-) verde) e b*((+) amarelo, (-) azul). Os filmes foram colocados em fundo branco seguindo metodologia de Liu et al. (2022) com adaptações, e feitas dez leituras em cada lado do filme com o colorímetro. Com os valores de a* e b* foram calculados o índice de saturação cromática (C*) representado pela Equação 4 e o ângulo hue (h*) em graus, representado pela Equação 5.

$$C^* = \left[(a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}} \right]$$

Equação 4 - Cálculo para obter os valores de saturação ou chroma (C*).

$$H^\circ = \left[\arctang \left(\frac{b}{a} \right) \right]$$

Equação 5 - Cálculo para obter os valores de tonalidade ou ângulo hue (°).

A opacidade dos filmes (Figura 5) foi determinada utilizando um espectrofotômetro (Metash, UV-Vis 5100), seguindo metodologia adaptada de Lupina et al (2022). Os filmes foram recortados em 44 por 10 mm e acondicionados em cubeta de quartzo para realização das leituras. Os valores para opacidade foram calculados como a razão entre a leitura feita em comprimento de onda de luz visível em 500 nm pela espessura dos filmes, de acordo com equação 6.

$$\text{Opacidade} = \frac{\text{abs}_{500}}{x}$$

Equação 6 - Cálculo para obter os valores de opacidade.

Onde abs₅₀₀ é o valor de absorvância lido no espectrofotômetro e x é a espessura do filme.

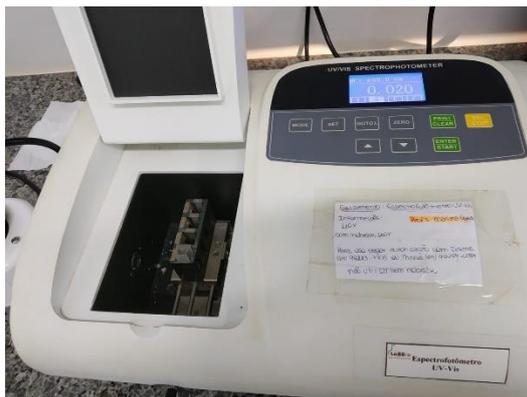


Figura 5- Análise de opacidade.

Fonte: Próprio autor.

3.4.6 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas de tensão máxima (TM), tensão de ruptura (TR), alongação (EL) e o módulo de elasticidade (ME) foram determinadas segundo o método ASTM D882-10 (2010) com algumas modificações. As análises foram encaminhadas ao Labmulti da Universidade Federal de Goiás (UFG) – Campus Samambaia (Goiânia, Brasil), utilizando uma máquina universal de ensaios Instron (modelo 3367, Grove City) e Texturômetro (Texture Analyser, TA-XT Plus, Surrey, England) em ambiente climatizado a 25 ± 1 °C. As amostras foram cortadas com dimensão de 2 cm por 10 cm. As amostras foram pré-condicionadas em dessecadores contendo cloreto de magnésio com umidade de 55 % e temperatura entre 25 °C por 48 horas. As tiras foram ajustadas ao equipamento com espaço entre os ganchos de 100 mm e foram tracionadas com velocidade de 12 mm por min e carga de 500 N.

3.5 Análise estatística

As análises deste estudo foram feitas em triplicata utilizando 4 tratamentos como amostragem (filme controle, tratamento 1, 2 e 3 com diferentes concentrações de nanopartícula de óxido de zinco conforme mostrado na tabela 1) e os dados foram avaliados utilizando a análise de variância (ANOVA) e teste de médias de Tukey por meio do pacote estatístico SISVAR 5.8 adotando o nível de 5 % de significância ($p < 0,05$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Produção dos filmes biodegradáveis

Todos os filmes (Figura 6 e 7) com ou sem incorporação de nanopartícula de ZnO apresentaram qualidades visuais consideráveis sem presença de bolhas de ar, boa uniformidade

da solução filmogênica e facilidade de desprendimento da placa, além de uma boa manuseabilidade.

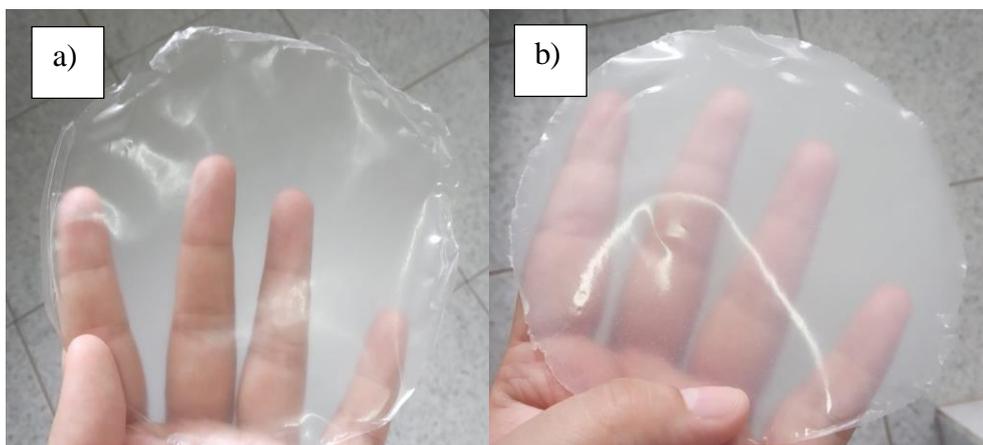


Figura 6 - **a)** Filme controle (0% de ZnO), **b)** Tratamento 1 (2% g ZnO/g de amido de batata). Fonte: Próprio autor.

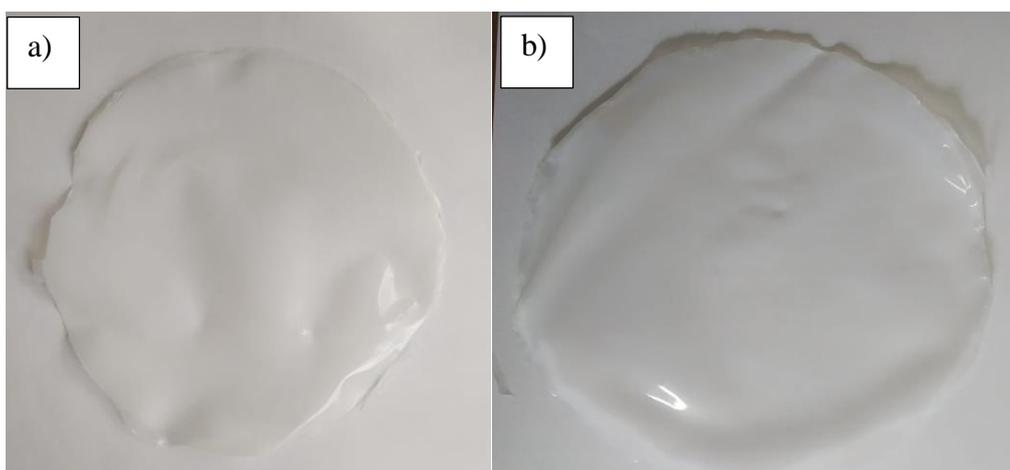


Figura 7 - **a)** Tratamento 2 (4 % g ZnO/g de amido de batata), **b)** Tratamento 3 (6 % g ZnO/g de amido de batata). Fonte: Próprio autor.

4.2 Caracterização dos filmes biodegradáveis

4.2.1 Teor de água e Solubilidade em água

O efeito das diferentes concentrações de nanopartículas de ZnO no teor de água e na solubilidade em água dos filmes de amido de batata-doce é apresentado na tabela 2. Os resultados indicam que ao adicionar nanopartículas de ZnO à matriz do filme, seu teor de água foi significativamente reduzido ($p < 0,05$), variando de 6,32 % no filme controle sem nanopartículas para 5,04 % em filmes contendo 6 % (g ZnO/g de amido de batata) de nanopartículas de ZnO. Hosseini, Pirsa & Farzi (2021) relataram comportamento semelhante ao caracterizarem filme de amido e albumina incorporado com nanopartículas de MgO, obtendo

uma redução de cerca de 40 % do teor de água em filmes sem nanopartículas para 25 % em filmes contendo 5 % de nanopartículas de óxido de magnésio. A incorporação de nanopartículas de ZnO nos filmes biodegradáveis e sua interação com a matriz do filme diminuem o teor de água livre e, conseqüentemente, reduzem a acessibilidade da água para a reação enzimática e química e também aumentam a vida útil dos alimentos (Vaezi, Asadpour & Sharifi, 2019).

Os valores de solubilidade em água foram de 58,1, 58,8, 53,1 e 53,8 % respectivamente, e não foram observadas diferenças ($p < 0,05$) entre os tratamentos, portanto, a solubilidade em água dos filmes de amido de batata-doce não foi modificada pela incorporação de nanopartículas de ZnO. Muitos pesquisadores descobriram que a solubilidade em água de vários filmes com matriz de amido (Peighambaroust et al., 2019), gelatina (Mousazadeh et al., 2021) e amido-PVA (Jayakumar et al., 2019) foi muito afetada pelo teor de nanopartículas de ZnO.

Tabela 2 – Teor de água e solubilidade em água dos filmes biodegradáveis de amido de batata-doce, controle (0% de Nps ZnO), tratamento 1 (2%), tratamento 2 (4%) e tratamento 3 (6%) (g ZnO/g amido de batata-doce)

Tratamento	Teor de água (%)	Solubilidade (%)
Controle	$6,32 \pm 0,25^a$	$58,12 \pm 1,93^a$
Tratamento 1	$6,04 \pm 0,51^{ab}$	$58,83 \pm 5,95^a$
Tratamento 2	$5,81 \pm 0,52^{ab}$	$53,15 \pm 13,52^a$
Tratamento 3	$5,04 \pm 0,42^b$	$53,84 \pm 9,51^a$

Letras minúsculas iguais na coluna, não diferem segundo Tukey $p < 0,05$.

4.2.2 Gramatura e Espessura

A espessura do filme é uma propriedade importante para avaliar a uniformidade dos filmes, alterações de espessura causam problemas no desempenho mecânico do filme e alterações nas propriedades de permeabilidade (Hosseini, Pirsá & Farzi, 2021). A espessura e gramatura dos filmes estão expressas na tabela 3 e não diferiram ($p < 0,05$) entre os tratamentos. Os valores de espessura aumentaram de 0,13 a 0,15 mm com a incorporação das nanopartículas de ZnO. Valores semelhantes foram encontrados por Jayakumar et al. (2021) em seu estudo, onde a espessura de filmes de álcool polivinílico com nanopartículas de ZnO variaram de 0,1 a 0,16 mm. Segundo Ahmad & Sarbon (2021), a diferença no valor de espessura para as formulações de filmes é possivelmente devido ao efeito das nanopartículas que ocupam vazios na matriz do filme e interagem com o amido, levando ao aumento da espessura dos filmes, em

seu estudo os valores de espessura variaram de 0,19 a 0,24 mm. Os valores de gramatura variaram em 1,8 a 2,9 g/cm² e também não houve diferença entre os tratamentos.

A gramatura de filmes, definida como o peso de uma determinada área do material, está diretamente relacionada à resistência mecânica e de barreira dos filmes, sendo que maiores gramaturas oferecem maiores resistências mecânicas. A resistência mecânica é desejável em filmes quando utilizado como embalagens em alimentos sensíveis a manipulação, podendo reduzir esses efeitos (Almeida et al., 2013).

Tabela 3 - Espessura e Gramatura dos filmes biodegradáveis de amido de batata-doce com 0 %, 2 %, 4 % e 6 % g ZnO/g amido de batata-doce.

Tratamento	Espessura (mm)	Gramatura (g/cm ²)
Controle	0,13 ± 0,01 ^a	2,0 ± 0,21 ^a
Tratamento 1	0,13 ± 0,01 ^a	1,9 ± 0,22 ^a
Tratamento 2	0,14 ± 0,008 ^a	2,9 ± 0,91 ^a
Tratamento 3	0,15 ± 0,01 ^a	2,3 ± 0,10 ^a

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem segundo Tukey p<0,05.

4.2.3 Cor e Opacidade

A Tabela 4 mostra os valores de luminosidade (L*), a*, b*, C* e h° (média ± desvio padrão) para cada um dos tratamentos de filmes produzidos, com diferentes concentrações de nanopartículas de ZnO. Para a luminosidade, quanto mais próximo o valor estiver de 100, mais branca é a amostra. Em relação a esse parâmetro os tratamentos não apresentaram diferença e os valores encontrados foram 91,0, 90,9, 91,0, 91,7. Resultados semelhantes encontrados por Kim, Roy & Rhim (2022) que ao estudarem filmes de gelatina/ágar incorporado com nanopartículas de ZnO encontraram valores de luminosidade maiores de 90, sendo que, esses valores também não alteraram significativamente (p<0,05) o brilho dos filmes.

Para os parâmetros a*, b*, C* e h° houve diferença entre o filme controle e os demais filmes com presença de nanopartícula de ZnO. Para croma a* os valores aumentaram de 4,1 a 4,3 e croma b* variou de -0,71 a 1,07, notavelmente a presença das NPs aumentou os tons avermelhados (valores de a* positivos) e amarelados (valores de b* positivos). Para Hoque, Sarkar & Ahmed (2022) os valores encontrados para filmes de nanopartículas de pó de tamarindo com ZnO referentes ao parâmetro croma a* foi de 0,21 a 1,11 e b* de 11,35 a 15,52, o aumento desses dois parâmetros também diferiram entre os tratamentos estudados pelos autores. A maior intensidade de cor dos filmes pode ser uma vantagem na proteção contra a deterioração dos alimentos por reações de foto-oxidação (Silva et al., 2020) e essa ação foto-

protetora pode ocorrer com os filmes do tratamento 1, 2 e 3 devido seus valores de Cromo C* mais elevado, pois quanto maior o valor de Cromo maior a intensidade da cor dos filmes avaliados, indicando que os filmes apresentam cores mais vívidas com a incorporação de nanopartículas de ZnO. Shahvalizadeh et al. (2021) também observaram aumento da intensidade da cor ao incorporarem NpsZnO a filmes de gelatina e goma tragacanto, onde os valores aumentaram de 2,30 a 3,49 para esse parâmetro.

Tabela 4 - Parâmetros de cor dos filmes biodegradáveis de amido de batata-doce com 0 %, 2 %, 4 % e 6 % g ZnO/g amido de batata-doce.

	Controle	Tratamento 1	Tratamento 2	Tratamento 3
L*	91,0 ± 1,0 ^a	90,9 ± 0,9 ^a	91,0 ± 1,4 ^a	91,7 ± 0,5 ^a
a*	4,1 ± 0,08 ^b	4,3 ± 0,13 ^a	4,3 ± 0,16 ^a	4,3 ± 0,16 ^a
b*	-0,71 ± 0,28 ^b	1,07 ± 1,0 ^a	0,91 ± 0,87 ^a	0,90 ± 0,52 ^a
C*				
(Chroma)	4,20 ± 0,09 ^b	4,56 ± 0,18 ^a	4,52 ± 0,22 ^a	4,45 ± 0,26 ^a
H° (Hue)	350,3 ± 3,6 ^a	15,3 ± 12,7 ^b	11,9 ± 10,5 ^b	13,8 ± 8,2 ^b

Letras minúsculas iguais na linha, não diferem segundo Tukey p<0,05.

A opacidade de luz visível na faixa de comprimento de onda de 500 nm dos filmes de amido de batata-doce com incorporação de nanopartículas de ZnO são mostrados na tabela 5. Em relação a opacidade no comprimento de onda de 500 nm, todos os tratamentos diferiram entre si (p<0,05), sendo que a opacidade aumentou proporcionalmente (3,2 a 14,7) com o aumento da concentração de nanopartícula. Esse resultado demonstra que a opacidade dos filmes está diretamente ligada à quantidade de nanopartícula de ZnO incorporada, onde o aumento de NPsZnO na matriz polimérica diminui a transparência dos filmes de amido.

Resultados parecidos foram constatados em filmes de amido acrescentados de nanopartícula de ZnO e prata (Zhai et al., 2022) e em filmes a base de álcool polivinílico/amido usando nanopartículas de óxido de zinco (Hu et al., 2022). Para Vaezi, Asadpour & Sharifi (2019), a presença de ZnO na estrutura do filme atua como agente clareador que diminui a transparência dos nanocompósitos e aumenta a brancura, em seu estudo o maior valor de opacidade foi de 8,41 correspondente a incorporação de 1 % de NpsZnO em filmes de amido termoplástico. A propriedade de barreira para luz visível tornou-se mais pronunciada com a incorporação das NPs, isso é suportado por Arfat et al., 2014 que afirma ser devido ao impedimento da passagem de luz ou espalhamento de luz pelas nanopartículas dispersas na matriz do filme.

Tabela 5 - Opacidade dos filmes biodegradáveis de amido de batata-doce com 0 %, 2 %, 4 % e 6 % g ZnO/g amido de batata-doce.

Tratamentos	Opacidade (500 nm)
Controle	3,26 ± 0,22 ^d
Tratamento 1	4,64 ± 0,09 ^c
Tratamento 2	10,7 ± 0,01 ^b
Tratamento 3	14,7 ± 0,58 ^a

Letras minúsculas iguais na coluna, não diferem segundo Tukey $p < 0,05$.

4.2.4 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos filmes muitas vezes revelam sua adequação como potenciais materiais de embalagem (Indumathi, Sarojini & Rajarajeswari, 2019), na tabela 6 temos as propriedades mecânicas à temperatura ambiente de alguns polímeros mais comuns utilizados em embalagens de alimentos. Dentre as características importantes desses polímeros para embalagem de alimentos incluem baixa densidade, alto grau de flexibilidade, elevados limites de resistência a tração e ruptura.

Tabela 6- Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de alguns polímeros mais comuns utilizados em embalagens de alimentos.

Material	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Elongação (%)
Polietileno (baixa densidade)	170 a 280	8,3 a 31,4	100 a 650
Poliestireno	2280 a 3280	35,9 a 51,7	1,2 a 2,5
Polipropileno	1140 a 1550	31 a 41,4	100 a 600

Fonte: Callister (2000) Ciência de Engenharia de Materiais: uma Introdução. 5. ed.

Os valores medidos de Tensão máxima (TM), Tensão de ruptura (TR), Elongação (EL) e Módulo de elasticidade (ME) estão na tabela 7. Os parâmetros das propriedades mecânicas são definidos por Callister (2000) em que: TM corresponde à máxima tensão que pode ser sustentada por um material que se encontra sob tração, sendo que se essa tração for mantida o resultado será uma ruptura, TR é a energia necessária para rasgar ou romper uma amostra cortada que possua uma geometria padrão, EL é a verificação da máxima variação de comprimento que os filmes terão antes da ruptura, O ME pode ser considerado como sendo

uma rigidez, ou uma resistência do material a uma deformação elástica, quanto maior esse módulo mais rígido será o material.

Os valores de tensão máxima obtidos não diferiram ($p < 0,05$) para os 4 tratamentos estudados. A TR foi afetada pela incorporação de nanopartículas, onde o tratamento 2 e 3 que possuíam maiores concentrações de NPsZnO apresentaram menores valores de TR, variando de 20,012 a 11,075 MPa. Comportamento oposto encontrado para filmes de amido incorporados com nanopartículas de ZnO e nanopartículas de SiO₂ (Zhu et al., 2021), em que a melhora significativa da tensão de ruptura foi observado com adição das nanopartículas, os valores de TR foram de 11,30 a 17,44 MPa.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos filmes biodegradáveis de amido de batata-doce com 0 %, 2 %, 4 % e 6 % g ZnO/g amido de batata-doce.

Propriedades mecânicas	Controle	Tratamento 1	Tratamento 2	Tratamento 3
Tensão Máxima (MPa)	18,75 ± 5,34 ^a	19,20 ± 4,70 ^a	15,27 ± 2,59 ^a	14,71 ± 2,72 ^a
Tensão de Ruptura (MPa)	15,507 ± 4,03 ^a	20,012 ± 3,53 ^a	12,685 ± 2,83 ^b	11,075 ± 3,05 ^b
Elongação (%)	2,664 ± 0,76 ^b	1,97 ± 0,51 ^b	5,711 ± 2,49 ^a	5,515 ± 1,68 ^a
Módulo de elasticidade (MPa)	1448,9 ± 308 ^a	1324,7 ± 189,4 ^a	957,6 ± 44,8 ^b	822,1 ± 147,9 ^b

Letras minúsculas iguais na linha, não diferem segundo Tukey $p < 0,05$.

Para a elongação dos filmes os valores variaram de 1,97 a 5,7 %, houve diferença entre os filmes controle e tratamento 1 com os filmes referentes ao tratamento 2 e 3. Para o tratamento 2 e 3 os maiores valores de elongação foram obtidos, indicando que a incorporação de NPsZnO com concentrações acima de 4% g ZnO/g amido de batata-doce aumentou a flexibilidade dos filmes de amido de batata-doce. Resultados semelhantes encontrados por Rong et al. (2021) que estudaram filmes de amido com nanopartículas de TiO₂ e observaram que o alongamento foi aumentado com o incremento das nanopartículas na matriz dos filmes, formando uma estrutura mais flexível e estável no interior do filme. Ao comparar os valores de EL obtidos nesse estudo com os dados apresentados na tabela 6 com os polímeros mais utilizados em embalagens de plástico sintético (polietileno de baixa densidade e polipropileno), nota-se que os filmes de amido de batata-doce com incorporação de NpsZnO obtiveram valores baixos de EL em relação a esses polímeros sintéticos.

Em relação ao módulo de elasticidade, nota-se uma redução nesta propriedade com a incorporação das NpsZnO (1448 a 822 MPa). Para Shankar et al (2015) o mesmo comportamento foi observado, onde o módulo de elasticidade foi reduzido de 1451,2 a 458,0 MPa, quando se incorporou nanopartículas de ZnO em filmes de gelatina, o que pode ser devido à fraca interação interfacial entre as NPs de ZnO e a matriz de gelatina. Para filmes com potencial utilização em embalagem de alimentos a redução desse parâmetro é positiva indicando que o material apresenta baixa rigidez.

De acordo com os resultados do presente estudo existem diferenças entre o filme de amido/glicerol e os filmes incorporados com maiores concentrações de NPsZnO correspondentes aos tratamentos 2 e 3, entretanto não há diferenças nas propriedades mecânicas dos filmes quando a adição de nanopartículas de ZnO é de cerca de 4 % (tratamento 2) a 6 % (g ZnO/g de amido batata-doce) (tratamento 3).

5 CONCLUSÃO

Foi possível alcançar resultados satisfatórios utilizando o amido de batata-doce como matriz filmogênica. A adição de nanopartículas de ZnO diminuiu o teor de água dos filmes de amido em uma relação de: maior concentração de NpsZnO menor o teor de água. A solubilidade e gramatura não foram influenciadas pela incorporação de Nps, a espessura não diferiu entre os tratamentos, entretanto houve um aumento de espessura conforme aumento da concentração de nanopartículas de ZnO. Em relação aos parâmetros de cor dos filmes, a luminosidade não foi afetada nos diferentes tratamentos, entretanto croma a^* , b^* , C^* e h° foram afetados pelas nanopartículas, sendo que a intensidade da cor (C^*) aumentou proporcionalmente com o aumento de NpsZnO. A opacidade para luz visível foi aumentada com a incorporação de nanopartículas de ZnO. E as propriedades mecânicas também foram influenciadas pelas NpsZnO em que os filmes apresentaram maior flexibilidade, entretanto valores reduzidos de TR com a incorporação. Conclui-se então que as NpsZnO influenciaram positivamente as características físicas e químicas estudadas, entretanto os resultados para propriedades mecânicas não foram relativamente positivos como o esperado. Para trabalhos futuros outras concentrações de nanopartículas de ZnO podem vir a serem testadas, bem como outras análises podem ser incluídas afim de investigar outras influências das Nps na estrutura dos filmes como por exemplo: atividade antimicrobiana dos filmes, permeabilidade ao vapor de água, microscopia de varredura, propriedades térmicas e de barreira UV.

6 REFERÊNCIAS

- Ahmad, A. A., & Sarbon, N. M. (2021). A comparative study: Physical, mechanical and antibacterial properties of bio-composite gelatin films as influenced by chitosan and zinc oxide nanoparticles incorporation. *Food Bioscience*, 43, 101250.
- Al Sharabati, M., Abokwiek, R., Al-Othman, A., Tawalbeh, M., Karaman, C., Orooji, Y., & Karimi, F. (2021). Polímeros biodegradáveis e seus nanocompósitos para a remoção de desreguladores endócrinos (EDCs) de águas residuais: uma revisão. *Pesquisa Ambiental*, 202 , 111694.
- Alam, A., Masood, F., Perveen, K., Yasin, T., & Hameed, A. (2022). Enhanced thermal properties of sepiolite/poly-3-hydroxyoctanoate nanocomposites as biodegradable packaging materials. *Materials Today Communications*, 31, 103290.
- Almeida, D. M., Woiciechowski, A. L., Wosiacki, G., Prestes, R. A., & Pinheiro, L. A. (2013). Propriedades físicas, químicas e de barreira em filme formados por blenda de celulose bacteriana e fécula de batata. *Polímeros*, 23(4), 538-546.
- Amin, U., Khan, M. U., Majeed, Y., Rebezov, M., Khayrullin, M., Bobkova, E & Thiruvengadam, M. (2021). Potentials of polysaccharides, lipids and proteins in biodegradable food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 2184-2198.
- Araújo, B. A., de Freitas, L. S., Sarmiento, K. K. F., Bezerra, V. R., de Lima, C. A. P., & de Medeiros, K. M. (2021). A aplicação de polímeros biodegradáveis como uma alternativa sustentável. *Research, Society and Development*, 10(9), e49010918248-e49010918248.
- Arfat, Y. A., Benjakul, S., Prodpran, T., Sumpavapol, P., & Songtipya, P. (2014). Properties and antimicrobial activity of fish protein isolate/fish skin gelatin film containing basil leaf essential oil and zinc oxide nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 41, 265-273.
- ASTM D882-10(2010). Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org.
- Balasubramanian, R., Kim, S. S., Lee, J., & Lee, J. (2019). Effect of TiO₂ on highly elastic, stretchable UV protective nanocomposite films formed by using a combination of k-Carrageenan, xanthan gum and gellan gum. *International journal of biological macromolecules*, 123, 1020-1027.
- Ballesteros-Mártinez, L., Pérez-Cervera, C., & Andrade-Pizarro, R. (2020). Effect of glycerol and sorbitol concentrations on mechanical, optical, and barrier properties of sweet potato starch film. *NFS Journal*, 20, 1-9.

- Callister, W. (2000). *Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5 ed. Grupo Gen-LTC.
- Cerqueira, M. A., Souza, B. W., Teixeira, J. A., & Vicente, A. A. (2012). Effect of glycerol and corn oil on physicochemical properties of polysaccharide films—A comparative study. *Food Hydrocolloids*, 27(1), 175-184.
- Chen, L., Dai, Y., Hou, H., Wang, W., Ding, X., Zhang, H & Dong, H. (2021). Effect of high pressure microfluidization on the morphology, structure and rheology of sweet potato starch. *Food Hydrocolloids*, 115, 106606.
- Chen, L., Dai, Y., Hou, H., Wang, W., Ding, X., Zhang, H., ... & Dong, H. (2021). Effect of high pressure microfluidization on the morphology, structure and rheology of sweet potato starch. *Food Hydrocolloids*, 115, 106606.
- Cui, C., Ji, N., Wang, Y., Xiong, L., & Sun, Q. (2021). Filmes à base de amido bioativos e inteligentes: uma revisão. *Trends in Food Science & Technology*, 116 , 854-869.
- Dick, M., Costa, T. M. H., Gomaa, A., Subirade, M., de Oliveira Rios, A., & Flôres, S. H. (2015). Edible film production from chia seed mucilage: Effect of glycerol concentration on its physicochemical and mechanical properties. *Carbohydrate Polymers*, 130, 198-205.
- Ding, Y., Shen, M., Wei, D., Xu, L., Sui, T., Cao, C., & Zhou, Y. (2020). Study on compatible characteristics of wheat and purple sweet potato starches. *Food Hydrocolloids*, 107, 105961.
- Glicerina, V., Siroli, L., Canali, G., Chinnici, F., Capelli, F., Lanciotti, R. & Romani, S. (2021). Eficácia de embalagens biodegradáveis e antimicrobianas na manutenção de parâmetros de segurança e qualidade de suco de pêra e smoothie à base de leite de arroz. *Food Control* , 128 , 108170.
- Guimarães, G. B., de Almeida, V. M., & de Azevedo, A. R. (2021). Síntese e caracterização de bioplásticos a partir de proteínas naturais. *Brazilian Applied Science Review*, 5(1), 174-189.
- Guo, K., Liu, T., Xu, A., Zhang, L., Bian, X., & Wei, C. (2019). Structural and functional properties of starches from root tubers of white, yellow, and purple sweet potatoes. *Food hydrocolloids*, 89, 829-836.
- Hoque, M., Sarkar, P., & Ahmed, J. (2022). Preparation and characterization of tamarind kernel powder/ZnO nanoparticle-based food packaging films. *Industrial Crops and Products*, 178, 114670.
- Hosseini, SN, Pirsá, S., & Farzi, J. (2021). Filme nanocompósito biodegradável à base de amido-albumina/MgO modificado; propriedades antibacterianas, antioxidantes e estruturais. *Teste de Polímero* , 97 , 107182.

- Hu, W., Zou, Z., Li, H., Zhang, Z., Yu, J., & Tang, Q. (2022). Fabrication of highly transparent and multifunctional polyvinyl alcohol/starch based nanocomposite films using zinc oxide nanoparticles as compatibilizers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 204, 284-292.
- Indumathi, M. P., Sarojini, K. S., & Rajarajeswari, G. R. (2019). Antimicrobial and biodegradable chitosan/cellulose acetate phthalate/ZnO nano composite films with optimal oxygen permeability and hydrophobicity for extending the shelf life of black grape fruits. *International journal of biological macromolecules*, 132, 1112-1120.
- Jamróz, E., Tkaczewska, J., Kopeć, M., & Cholewa-Wójcik, A. (2022). Shelf-life extension of salmon using active total biodegradable packaging with tea ground waste and furcellaran-CMC double-layered films. *Food Chemistry*, 383, 132425.
- Jayakumar, A., Heera, K. V., Sumi, T. S., Joseph, M., Mathew, S., Praveen, G. & Radhakrishnan, E. K. (2019). Starch-PVA composite films with zinc-oxide nanoparticles and phytochemicals as intelligent pH sensing wraps for food packaging application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 136, 395-403.
- Jayakumar, A., Radoor, S., Nair, IC, Siengchin, S., Parameswaranpillai, J., & Radhakrishnan, EK (2021). Nanopartículas de lipopeptídeos e óxido de zinco misturaram filmes nanocompósitos à base de álcool polivinílico como revestimento antimicrobiano para aplicações biomédicas. *Process Biochemistry*, 102, 220-228.
- Kavoosi, G., Rahmatollahi, A., Dadfar, S. M. M., & Purfard, A. M. (2014). Effects of essential oil on the water binding capacity, physico-mechanical properties, antioxidant and antibacterial activity of gelatin films. *LWT-Food Science and Technology*, 57(2), 556-561.
- Kim, H. J., Roy, S., & Rhim, J. W. (2022). Gelatin/agar-based color-indicator film integrated with *Clitoria ternatea* flower anthocyanin and zinc oxide nanoparticles for monitoring freshness of shrimp. *Food Hydrocolloids*, 124, 107294.
- LARRAURI, M. et al. Caracterização química e propriedades antioxidantes de frações separadas do extrato da pele de amendoim derivadas de diferentes processos industriais. *Culturas e Produtos Industriais*, v.94, p.964-971, 2016.
- Lim, W. S., Ock, S. Y., Park, G. D., Lee, I. W., Lee, M. H., & Park, H. J. (2020). Heat-sealing property of cassava starch film plasticized with glycerol and sorbitol. *Food Packaging and Shelf Life*, 26, 100556.

- Liu, Y., Liu, M., Zhang, L., Cao, W., Wang, H., Chen, G., & Wang, S. (2022). Preparation and properties of biodegradable films made of cationic potato-peel starch and loaded with curcumin. *Food Hydrocolloids*, 107690.
- Łupina, K., Kowalczyk, D., Lis, M., Raszewska-Kaczor, A., & Drożdowska, E. (2022). Controlled release of water-soluble astaxanthin from carboxymethyl cellulose/gelatin and octenyl succinic anhydride starch/gelatin blend films. *Food Hydrocolloids*, 123, 107179.
- Mahmood, N. B., Saeed, F. R., Gbashi, K. R., & Mahmood, U. S. (2022). Synthesis and Characterization of Zinc Oxide Nanoparticles via Oxalate Co-Precipitation Method. *Materials Letters: X*, 100126.
- Matheus, JRV, Satoriva, JM, Barone, AS, de Andrade, CJ, & Fai, AEC (2021). Filmes biodegradáveis e agentes de reforço vegetais: Um enfoque em estudos brasileiros sob a ótica da economia circular. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, 10 (9), e49210918278-e49210918278.
- Menazea, AA, El-Newehy, MH, Thamer, BM e El-Naggar, ME (2021). Preparação de biopolímero à base de filme antibacteriano incorporado com nanopartículas de óxido de vanádio usando ablação a laser de um pote. *Journal of Molecular Structure*, 1225, 129163.
- Mousazadeh, S., Ehsani, A., Kia, E. M., & Ghasempour, Z. (2021). Zinc oxide nanoparticles and periodate oxidation in developing pH-sensitive packaging film based on modified gelatin. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100654.
- Mustapha, S. N. H., & Wan, J. S. (2022). Effect of hybridization composition and glycerin content on novel corn starch/nata de coco plastic film: Thermal, mechanical, and degradation study. *Food Chemistry*, 373, 131440.
- Ni, S., Zhang, H., Godwin, P. M., Dai, H., & Xiao, H. (2018). ZnO nanoparticles enhanced hydrophobicity for starch film and paper. *Materials Letters*, 230, 207-210.
- Nobrega, M. M., Olivato, J. B., Bilck, A. P., Grossmann, M. V. E., & Yamashita, F. (2012). Glycerol with different purity grades derived from biodiesel: Effect on the mechanical and viscoelastic properties of biodegradable strands and films. *Materials Science and Engineering: C*, 32(8), 2220-2222.
- Nordin, N., Othman, S. H., Rashid, S. A., & Basha, R. K. (2020). Effects of glycerol and thymol on physical, mechanical, and thermal properties of corn starch films. *Food Hydrocolloids*, 106, 105884.

- Oyom, W., Xu, H., Liu, Z., Long, H., Li, Y., Zhang, Z., ... & Prusky, D. (2022). Effects of modified sweet potato starch edible coating incorporated with cumin essential oil on storage quality of 'early crisp'. *LWT*, 153, 112475.
- Peighambardoust, SJ, Peighambardoust, SH, Pournasir, N., & Pakdel, PM (2019). Propriedades de filmes ativos à base de amido incorporando uma combinação de nanopartículas de Ag, ZnO e CuO para uso potencial em aplicações de embalagens de alimentos. *Embalagem de alimentos e vida útil*, 22, 100420.
- Pulla-Huillca, P. V., Gomes, A., Bittante, A. M. Q. B., Lourenço, R. V., & do Amaral Sobral, P. J. (2021). Wettability of gelatin-based films: The effects of hydrophilic or hydrophobic plasticizers and nanoparticle loads. *Journal of Food Engineering*, 297, 110480.
- Rammak, T., Boonsuk, P., & Kaewtatip, K. (2021). Mechanical and barrier properties of starch blend films enhanced with kaolin for application in food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 192, 1013-1020.
- Rocha, G. O., Farias, M. G., Carvalho, C. W. P. D., Ascheri, J. L. R., & Galdeano, M. C. (2014). Filmes compostos biodegradáveis a base de amido de mandioca e proteína de soja. *Polímeros*, 24, 587-595.
- Rong, L., Shen, M., Wen, H., Ren, Y., Xiao, W., & Xie, J. (2021). Preparation and characterization of hyacinth bean starch film incorporated with TiO₂ nanoparticles and Mesona chinensis Benth polysaccharide. *International Journal of Biological Macromolecules*, 190, 151-158.
- Sarak, S., Boonsuk, P., Kantachote, D., & Kaewtatip, K. (2022). Film coating based on native starch and cationic starch blend improved postharvest quality of mangoes. *International Journal of Biological Macromolecules*.
- SATHIYA, S.M. et al. Synergistic bactericidal effect of chitosan/zinc oxide based on nanocomposites against *Staphylococcus aureus*. *Advan. Sci. Lett.*, v.24, n.8, p.5537- 5542, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1166/asl.2018.12144>.
- Shahvalizadeh, R., Ahmadi, R., Davandeh, I., Pezeshki, A., Moslemi, S. A. S., Karimi, S., ... & Mohammadi, M. (2021). Antimicrobial bio-nanocomposite films based on gelatin, tragacanth, and zinc oxide nanoparticles—Microstructural, mechanical, thermo-physical, and barrier properties. *Food Chemistry*, 354, 129492.
- Shankar, S., Teng, X., Li, G., & Rhim, J. W. (2015). Preparation, characterization, and antimicrobial activity of gelatin/ZnO nanocomposite films. *Food Hydrocolloids*, 45, 264-271.

- Silva, V. D. M., Macedo, M. C. C., Rodrigues, C. G., dos Santos, A. N., e Loyola, A. C. D. F., & Fante, C. A. (2020). Biodegradable edible films of ripe banana peel and starch enriched with extract of *Eriobotrya japonica* leaves. *Food Bioscience*, 38, 100750.
- Song, H. G., Choi, I., Lee, J. S., Chung, M. N., Yoon, C. S., & Han, J. (2021). Comparative study on physicochemical properties of starch films prepared from five sweet potato (*Ipomoea batatas*) cultivars. *International Journal of Biological Macromolecules*, 189, 758-767.
- Sun, H., Fan, J., Tian, Z., Ma, L., Meng, Y., Yang, Z., ... & Nan, X. (2022). Effects of treatment methods on the formation of resistant starch in purple sweet potato. *Food Chemistry*, 367, 130580.
- Teixeira, S. C., Silva, R. R. A., de Oliveira, T. V., Stringheta, P. C., Pinto, M. R. M. R., & Soares, N. D. F. F. (2021). Glycerol and triethyl citrate plasticizer effects on molecular, thermal, mechanical, and barrier properties of cellulose acetate films. *Food Bioscience*, 42, 101202.
- Tong, C., Ru, W., Wu, L., Wu, W., & Bao, J. (2020). Fine structure and relationships with functional properties of pigmented sweet potato starches. *Food Chemistry*, 311, 126011.
- Utari, F. D., Djaeni, M., Purbasari, A., & Sihny, Z. D. (2022). Drying characteristics and kinetics of rice flour biodegradable film under different drying temperatures. *Materials Today: Proceedings*.
- Vaezi, K., Asadpour, G., & Sharifi, H. (2019). Effect of ZnO nanoparticles on the mechanical, barrier and optical properties of thermoplastic cationic starch/montmorillonite biodegradable films. *International journal of biological macromolecules*, 124, 519-529.
- Wang, H., Yang, Q., Ferdinand, U., Gong, X., Qu, Y., Gao, W, & Liu, M. (2020). Isolation and characterization of starch from light yellow, orange, and purple sweet potatoes. *International journal of biological macromolecules*, 160, 660-668.
- Wang, Y., Luo, J., Hou, X., Wu, H., Li, Q., Li, S., ... & Zhang, Z. (2022). Physicochemical, antibacterial, and biodegradability properties of green Sichuan pepper (*Zanthoxylum armatum* DC.) essential oil incorporated starch films. *LWT*, 113392.
- Wigati, L. P., Wardana, A. A., Tanaka, F., & Tanaka, F. (2022). Edible film of native jicama starch, agarwood *Aetoxylon Bouya* essential oil and calcium propionate: Processing, mechanical, thermal properties and structure. *International Journal of Biological Macromolecules*.
- Wu, F., Misra, M., & Mohanty, AK (2021). Desafios e novas oportunidades no desempenho de barreira de polímeros biodegradáveis para embalagens sustentáveis. *Progress in Polymer Science*, 117, 101395.

- Ye, F., Li, J., & Zhao, G. (2020). Physicochemical properties of different-sized fractions of sweet potato starch and their contributions to the quality of sweet potato starch. *Food Hydrocolloids*, 108, 106023.
- Yong, H., Wang, X., Sun, J., Fang, Y., Liu, J., & Jin, C. (2018). Comparison of the structural characterization and physicochemical properties of starches from seven purple sweet potato varieties cultivated in China. *International journal of biological macromolecules*, 120, 1632-1638.
- Zhai, X., Zhou, S., Zhang, R., Wang, W., & Hou, H. (2022). Antimicrobial starch/poly (butylene adipate-co-terephthalate) nanocomposite films loaded with a combination of silver and zinc oxide nanoparticles for food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 206, 298-305.
- Zhu, J., Gao, W., Wang, B., Kang, X., Liu, P., Cui, B., & Abd El-Aty, A. M. (2021). Preparation and evaluation of starch-based extrusion-blown nanocomposite films incorporated with nano-ZnO and nano-SiO₂. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 1371-1378.