

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto
completo desta dissertação será
disponibilizado somente a partir de
23/02/2028

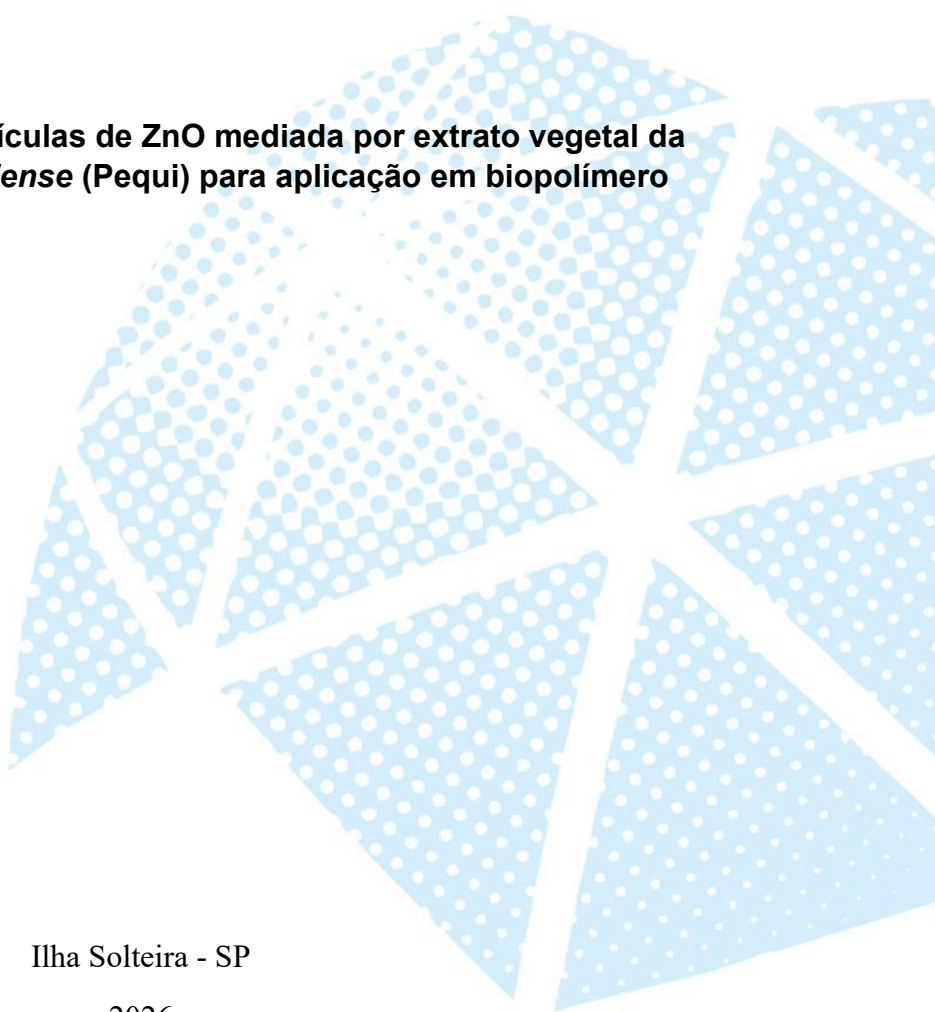
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GIOVANY EDUARDO RODRIGUES DE MORAES

**Síntese verde de nanopartículas de ZnO mediada por extrato vegetal da
casca de *Caryocar brasiliense* (Pequi) para aplicação em biopolímero**

Ilha Solteira - SP

2026



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAS

GIOVANY EDUARDO RODRIGUES DE MORAES

Síntese verde de nanopartículas de ZnO mediada por extrato vegetal da casca de *Caryocar brasiliense* (Pequi) para aplicação em biopolímero

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, para obtenção do título de Grau acadêmico Mestre em Ciência dos Materiais.

Orientadora: Prof. Dr. Marcia Regina de Moura Aouada

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Vinicius Lorevice

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M828s Moraes, Giovany Eduardo Rodrigues de.
Síntese verde de nanopartículas de ZnO mediada por extrato vegetal da casca de *Caryocar brasiliense* (pequi) para aplicação em biopolímero / Giovany Eduardo Rodrigues de Moraes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
88 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciência e Engenharia dos Materiais, 2026

Orientador: Marcia Regina de Moura Aouada
Coorientador: Marcos Vinicius Lorevice
Inclui bibliografia

1. Nanotecnologia. 2. Síntese verde. 3. Biofilme. 4. Pequi. 5. Nanopartículas de óxido de zinco.

Sandra.montibeller - CRB-8/060

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O presente estudo trata de uma síntese ecológica de nanopartículas de óxido de zinco, incluindo sua incorporação em um polímero biodegradável. Para a síntese ecológica, utiliza-se o extrato da casca do pequi (*Caryocar brasiliense*), um resíduo agroindustrial sem aplicação prática para o mercado. Essa abordagem fornece um destino para esse material, que de outra forma seria descartado sem uso aparente, representando um exemplo prático de Economia Circular. O filme biodegradável contendo as nanopartículas de óxido de zinco incorporadas apresenta propriedades de barreira UV, podendo ser utilizado em futuras aplicações na área alimentícia em produtos fotossensíveis, prevenindo perdas na vida útil, desperdício de alimentos e impacto financeiro para o mercado. Ademais, esse filme demonstra alta biodegradabilidade, sendo de origem natural (pectina obtida da casca da laranja).

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This study addresses the ecological synthesis of zinc oxide nanoparticles, including their incorporation into a biodegradable polymer. For the ecological synthesis, the extract of pequi peel (*Caryocar brasiliense*), an agro-industrial residue with no practical market application, is used. This approach provides a destination for this material, which would otherwise be discarded without apparent use, representing a practical example of Circular Economy. The biodegradable film containing the incorporated zinc oxide nanoparticles exhibits UV barrier properties and can be used in future applications in the food industry in photosensitive products, preventing shelf-life losses, food waste, and financial impact on the market. Furthermore, this film demonstrates high biodegradability, being of natural origin (pectin obtained from orange peel).

ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GIOVANY EDUARDO RODRIGUES DE MORAES

Síntese verde de nanopartículas de ZnO mediada por extrato vegetal da casca de *Caryocar brasiliense* (Pequi) para aplicação em biopolímero

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia – Câmpus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Grau acadêmico Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais.

Área de Concentração: Ciência e Engenharia dos Materiais

Data da defesa: 23/02/2026

Banca Examinadora:

gov.br

Documento assinado digitalmente:
MARCIA REGINA DE MOURA AOUADA
Data: 10/04/2026 08:14:30 -0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Profa. Dra. Marcia Regina de Moura Aouada
UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Departamento de Física e Química

Prof. Dr. Alex Otávio Sanches
UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Departamento de Física e Química

Profa. Dra. Daniella Lury Morgado
Université Grenoble Alpes – Laboratoire de génie des procédés pour la bioraffinerie

CONCEITO

(X) APROVADO

() REPROVADO

“...uma das virtudes mais necessárias para
a felicidade é a coragem.”

Luiz Felipe Pondé

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha mãe, ao meu pai, à minha futura esposa e à minha família por todo o apoio durante essa jornada. Vocês foram a base para que essa caminhada fosse possível.

Agradeço à minha orientadora Profa. Dra. Marcia Regina de Moura Aouada por todas as oportunidades e conhecimentos dispostos a mim para que eu chegasse aonde estou hoje. Ao meu coorientador Dr. Marcos Vinicius Lorevice por toda sua experiência transmitida. Aos meus colegas e amigos do GCNH, da BP2 e do DFQ-FEIS, pela ajuda ao longo desses 2 anos de aprendizado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Considerando as diversas metodologias de preparação das nanopartículas de óxido de zinco (ZnONPs), a síntese verde revelou-se uma alternativa promissora de baixo impacto ambiental, utilizando matérias-primas renováveis. As biomoléculas presentes nos extratos vegetais mostraram-se viáveis para a produção de ZnONPs de modo geral, sendo uma rota de síntese mais econômica, muitas vezes aproveitando subprodutos descartados pela indústria alimentícia, como a casca de frutas. As ZnONPs incorporadas a filmes de pectina resultam em um material com capacidade de fotoproteção, permitindo sua aplicação na área de embalagens alimentícias. O objetivo deste estudo foi desenvolver nanopartículas de óxido de zinco por síntese verde, empregando o extrato da casca de *Caryocar brasiliense* (Pequi), e avaliar sua incorporação em filmes biopoliméricos de pectina para aplicações em embalagens ativas e funcionais. A utilização de uma concentração de extrato de 1:5 mostrou-se a mais promissora em comparação a outras condições, apresentando tamanho hidrodinâmico, PDI e Zeta mais favoráveis. Quanto à temperatura, pH, quantidade de precursor e tempo de reação, foram estabelecidos os parâmetros de 90 °C, pH 10, 5 g de nitrato de zinco e 4 horas de síntese. Esses fatores foram definidos com base nas caracterizações realizadas ao longo do trabalho, como DLS, DRX, FTIR, MEV, MET e UV-Vis. O tamanho do cristalito para a amostra principal foi de 25,8 nm, com picos cristalinos correspondentes à fase hexagonal wurtzita de ZnO. A análise por FTIR revelou um pico bem definido (460 cm^{-1}), indicando a possível presença do material. As micrografias obtidas por MEV e MET, juntamente com seus histogramas de distribuição de partículas, demonstraram partículas de tamanho médio de 65,33 nm e morfologia predominantemente esférica. Os filmes de pectina com ZnONPs incorporados demonstraram potencial na fotoproteção contra radiação UV-B, apresentando um pico em 280 nm com absorção de 60,4%. Foi possível obter ZnONPs homogêneas e de tamanho controlado por esta rota, além de garantir uma excelente incorporação e atuação no filme de pectina, indicando seu potencial para futuras análises.

Palavras chaves: Nanotecnologia; síntese verde; biofilme; pequi; nanopartículas de óxido de zinco

Abstract

Considering the various methodologies for preparing zinc oxide nanoparticles (ZnONPs), green synthesis has proven to be a promising alternative with low environmental impact, using renewable raw materials. Biomolecules present in plant extracts have proven viable for the production of ZnONPs in general, representing a more economical synthesis route, often utilizing byproducts discarded by the food industry, such as fruit peels. ZnONPs incorporated into pectin films result in a material with photoprotective, enabling its application in food packaging. The objective of this study was to develop zinc oxide nanoparticles by green synthesis, using *Caryocar brasiliense* (Pequi) peel extract, and to evaluate their incorporation into pectin biopolymer films for active and functional packaging applications. The use of an extract concentration of 1:5 proved to be the most promising compared to other conditions, presenting more favorable hydrodynamic size, PDI, and Zeta. Regarding temperature, pH, precursor amount, and reaction time, the parameters established were 90 °C, pH 10, 5 g of zinc nitrate, and 4 h of synthesis. These factors were defined based on the characterizations performed throughout the work, such as DLS, XRD, FTIR, SEM, TEM, and UV-Vis. The crystallite size for the main sample was 25.8 nm, with crystalline peaks corresponding to the hexagonal wurtzite phase of ZnO. FTIR analysis revealed a well-defined peak (460 cm⁻¹), indicating the possible presence of the material. The micrographs obtained by SEM and TEM, along with their particle distribution histograms, demonstrated particles with an average size of 65.33 nm and predominantly spherical morphology. Pectin films with incorporated ZnONPs demonstrated potential for photoprotection against UV-B radiation, presenting a peak at 280 nm with an absorption of 60.4%. This approach yielded homogeneous and size-controlled ZnONPs, in addition to ensuring excellent incorporation and performance in the pectin film, indicating its potential for future analysis.

Keywords: Nanotechnology; green synthesis; biofilm; pequi; zinc oxide nanoparticles

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

π - Eletrons pi

A - Amêndoa

DLS - Espalhamento de luz dinâmico

EC - Exocarpo

EDS - Espectroscopia de raios x por energia dispersiva

EE – Endocarpo espinhoso

FTIR - Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

ME – Mesocarpo externo

MET - Microscopia Eletrônica de Transmissão

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MI – Mesocarpo interno

mL - Mililitro

mV - Milivolt

NaOH - Hidróxido de sódio

nm - Nanômetro

NPs - Nanopartículas

OFAT – One fator at a time

PDI - Índice de polidispersividade

pH - Potencial hidrogeniônico

RAM – Resistência antimicrobiana

ROS – Espécies reativas de oxigênio

μg - Micrograma

μL - Microlitros

UV - Ultravioleta

UV-Vis - Ultravioleta e visível

Zn^{2+} - íon zinco

$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – Nitrato de zinco hexahidratado

ZnO – Óxido de zinco

ZnONPs – Nanopartículas de óxido de zinco

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação morfológica das estruturas presentes no fruto pequi: exocarpo (EC), mesocarpo externo (ME), mesocarpo interno (MI), endocarpo externo (EE) e amêndoa (A)

Figura 2 – Estrutura química de algumas biomoléculas presentes no extrato da casca de pequi

Figura 3 – Armadura romana de latão de 475 a.C .

Figura 4 – Previsão do tamanho de mercado das ZnONPs até 2032.

Figura 5 - Estruturas cristalinas do ZnO: (a) sal gema (NaCl), (b) blenda de zinco e (c) wurtzita. As esferas em cinza e em preto representam o zinco e o oxigênio, respectivamente.

Figura 6 – Processo de formação das ZnONPs na presença do extrato vegetal.

Figura 7 – Representação mais aprofundada do mecanismo de formação das ZnONPs na presença de fitoquímicos.

Figura 8 - Representação das membranas de bactérias Gram-positivas e Gram-negativas.

Figura 9 – Representação dos mecanismos de ação das ZnONPs contra bactérias.

Figura 10 – Estrutura química da pectina

Figura – 11 (A) Extrato da casca do Pequi; (B) Meio reacional após o término da síntese contendo apenas o extrato da casca e o precursor; (C) Meio reacional após o término da síntese contendo o extrato da casca, NaOH e o precursor; (D) Amostra seca durante 24 horas em estufa a 100°C antes da calcinação; (E) Amostra após calcinação em 500°C durante 2 horas em forno mufla.

Figura 12 – Redispersão de ZnONPs em água deionizada por meio de ultrassom de ponteira.

Figura 13 - (A) Diâmetros hidrodinâmicos encontrados para as amostras de ZnONPs com 1:5 e 1:10 de concentração de extrato da casca de Pequi em meio reacional de pH 4,5, 60°C, 5g de precursor e 4 horas de reação; (B) Espectros eletrônicos UV-Vis do extrato da casca de Pequi em concentrações de 1:5 e 1:10 (m/v).

Figura 14 – Diâmetros hidrodinâmicos encontrados para as amostras de ZnONPs sintetizadas a 25 °C e 90 °C em meio reacional de pH 4,5, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Figura 15 – Espectros eletrônicos UV-Vis e gráfico de Tauc das amostras de ZnONPs sintetizadas a 25 °C e 90 °C em meio reacional de pH 4,5, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Figura 16 - Histogramas da distribuição do diâmetro de Feret para a amostra em (A) 25°C e (C) 90°C em meio reacional de pH 4,5, 5g de precursor e 4 horas de reação. Micrografias de MEV correspondentes em (B) 25°C e (D) 90°C em meio reacional de pH 4,5, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Figura 17 – Diâmetro médio de Ferret, histograma e micrografias de MET para as amostras sintetizadas a 25 °C e 90 °C em meio reacional de pH 4,5, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Figura 18 – Difractogramas de raios X das ZnONPs sintetizadas em 25°C e 90°C em meio reacional de pH 4,5, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Figura 19 – FTIR das amostras de ZnONPs sintetizadas em 25°C e 90°C em meio reacional de pH 4,5, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Figura 20 - Diâmetros hidrodinâmicos encontrados para as amostras de ZnONPs com pH 4,5 e pH 10 em meio reacional em temperatura de 90 °C, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Figura 21 – Espectros eletrônicos UV-Vis e gráfico de Tauc das amostras de ZnONPs sintetizadas em pH 4,5 e pH 10 em meio reacional em temperatura de 90 °C, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Figura 22 - Histogramas do diâmetro de Feret em (A) pH 4,5 (C) pH 10 em meio reacional em temperatura de 90 °C, 5g de precursor e 4 horas de reação. Micrografias de MEV correspondentes a (B) pH 4,5 e (D) pH 10 em meio reacional em temperatura de 90 °C, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Figura 23 - Diâmetro médio de Ferret, histograma e micrografias de MET para as amostras sintetizadas em pH 4,5 e pH 10 em meio reacional em temperatura de 90 °C, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Figura 24 - Difrátogramas de raios X das ZnONPs sintetizadas em pH 4,5 e pH 10 em meio reacional em temperatura de 90 °C, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Figura 25 - FTIR das amostras de ZnONPs sintetizadas em pH 4,5 e pH 10 em meio reacional em temperatura de 90 °C, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Figura 26 - Diâmetros hidrodinâmicos encontrados para as amostras PeZnO (apenas extrato e precursor) e PuZnO (NaOH e precursor) com o meio reacional com temperatura de 90 °C, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Figura 27 – Diâmetros hidrodinâmicos encontrados para as amostras de ZnONPs com 2 g e 5 g de precursor com o meio reacional em pH 10, temperatura de 90 °C e 4 horas de reação.

Figura 28 - Espectros eletrônicos UV-Vis e gráfico de Tauc das amostras de ZnONPs sintetizadas com 2 g e 5 g de precursor com o meio reacional em pH 10, temperatura de 90 °C e 4 horas de reação.

Figura 29 - Histogramas da distribuição do diâmetro de Feret para a amostra com (A) 2g e (C) 5g com o meio reacional em pH 10, temperatura de 90 °C e 4 horas de reação. Micrografias de MEV correspondentes à amostra com (B) 2g e (D) 5g com o meio reacional em pH 10, temperatura de 90 °C e 4 horas de reação.

Figura 30 - Diâmetro médio de Feret, histograma e micrografias de MET para as amostras sintetizadas com 2 g e 5 g de precursor com o meio reacional em pH 10, temperatura de 90 °C e 4 horas de reação.

Figura 31 – Difrátogramas de raios X das ZnONPs sintetizadas com 2g e 5g de precursor com o meio reacional em pH 10, temperatura de 90 °C e 4 horas de reação.

Figura 32 - FTIR das amostras de ZnONPs sintetizadas com 2g e 5g de precursor com o meio reacional em pH 10, temperatura de 90 °C e 4 horas de reação.

Figura 33 - (A) Diâmetros hidrodinâmicos encontrados para as amostras de ZnONPs com 4 horas e 18 horas de reação em pH 10, temperatura de 90 °C e 5g de precursor.

Figura 34 - Espectros eletrônicos UV-Vis e gráfico de Tauc das amostras de ZnONPs sintetizadas com 4 horas e 18 horas de reação em pH 10, temperatura de 90 °C e 5g de precursor .

Figura 35 – Histogramas da distribuição do diâmetro de Feret para a amostra com (A) 4 horas e (C) 18 horas em pH 10, temperatura de 90 °C e 5g de precursor. Micrografias de MEV correspondentes à amostra com (B) 4 horas e (D) 18 horas em pH 10, temperatura de 90 °C e 5g de precursor.

Figura 36 - Diâmetro médio de Ferret, histograma e micrografias de MET para as amostras sintetizadas com 4 horas e 18 horas de reação em pH 10, temperatura de 90 °C e 5g de precursor.

Figura 37 - Difrátogramas de raios X das ZnONPs sintetizadas em 4 horas e 18 horas em pH 10, temperatura de 90 °C e 5g de precursor.

Figura 38 - FTIR das amostras de ZnONPs sintetizadas em 4 horas e 18 horas em pH 10, temperatura de 90 °C e 5g de precursor.

Figura 39 – Fotos dos filmes de pectina com ZnONPs 1% (A) 2% (B) 3% (C) 5% (D) 10% (E)

Figura 40 – Espectroscopia de transmissão de luz dos filmes PZ0, PZ1, PZ2, PZ3, PZ5 e PZ10.

Figura 41 – Micrografias da morfologia de superfície das amostras PZ0 (A), PZ1 (B), PZ2 (C) e PZ3 (D).

Figura 42 – Ângulo de contato dos filmes de pectina com ZnONPs, com o termo U (up) e D (down) inseridos referindo-se a qual face do filme foi analisada para cada amostra.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Reações realizadas e seus parâmetros.

Tabela 2 – Quantidade de ZnONPs utilizada em relação à de pectina.

Tabela 3 – Tamanho hidrodinâmico médio, PDI e potencial zeta das amostras sintetizadas a 25 °C e 90 °C em meio reacional de pH 4,5, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Tabela 4 - Tamanho hidrodinâmico médio, PDI e potencial zeta das amostras sintetizadas em pH 4,5 e pH 10 em meio reacional em temperatura de 90 °C, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Tabela 5 - Tamanho hidrodinâmico médio, PDI e potencial zeta das amostras PeZnO (apenas extrato e precursor) e PuZnO (NaOH e precursor) com meio reacional com temperatura de 90 °C, 5g de precursor e 4 horas de reação.

Tabela 6 - Tamanho hidrodinâmico médio, PDI e potencial zeta das amostras sintetizadas com 2 g e 5 g de precursor com o meio reacional em pH 10, temperatura de 90 °C e 4 horas de reação.

Tabela 7 - Tamanho hidrodinâmico médio, PDI e potencial zeta das amostras sintetizadas com 4 h e 18 de reação em pH 10, temperatura de 90 °C e 5g de precursor.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas dos filmes de pectina incorporados com 1, 2 e 3% ZnONPs.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Equação de Scherrer

Equação 2 – Equação de opacidade

Sumário

1-	INTRODUÇÃO	18
2-	REFERENCIAL TEÓRICO	20
	2.1 Pequi (<i>Caryocar brasiliense</i>)	20
	2.2 Nanopartículas de óxido de zinco	22
	2.3 Síntese verde	26
	2.4 Ação biocida em microrganismos	29
	2.5 Filme pectina	31
3-	OBJETIVO	32
	3.1 Objetivos específicos	33
4-	METODOLOGIA	33
	4.1 Obtenção do extrato vegetal:	33
	4.2 Obtenção das nanopartículas de óxido de zinco:	33
	4.3 Caracterização das nanopartículas de óxido de zinco	35
	4.4 Conformação de filme de pectina (PEC) com ZnONPs	36
	4.5 Análise da Capacidade de Fotoproteção	37
	4.6 Molhabilidade do filme	37
	4.7 Análises mecânicas	38
5-	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
	5.1 Produção de ZnONPs	38
	5.2 Influência da concentração de extrato vegetal na dispersão das ZnONPs	40
	5.3 Influência da temperatura	42
	5.4 Influência do pH	49
	5.5 Influência da quantidade de precursor	59
	5.6 Influência do tempo de síntese	67
	5.7 - Caracterizações dos filmes de pectina com ZnONPs incorporadas.	74
6-	CONCLUSÃO	78
7-	Referências	79

1- INTRODUÇÃO

A inovação que os antibióticos trouxeram com controle de patógenos bacterianos ajudou a salvar milhões de pessoas desde sua descoberta (início do século vinte) ^{[1][2]}. No entanto, o uso excessivo e descontrolado desses medicamentos levou a um aumento significativo da resistência antimicrobiana (RAM) ^[3]. Esse fenômeno ocorre devido à capacidade de adaptação evolutiva das bactérias ^[4]. Devido à sua rápida proliferação, é possível que, ao acaso, quando exposta repetidamente ao mesmo agente antimicrobiano, se adapte, iniciando assim uma seleção de uma possível nova cepa, mais resistente ao tratamento ^{[5][6]}.

Essas mudanças dificultam o tratamento de infecções, resultando em falhas terapêuticas, com a necessidade de fármacos cada vez mais potentes e onerosos, além de internações hospitalares prolongadas ^{[7][8]}. Nesse cenário, a Organização Mundial da Saúde (OMS) classificou a RAM como uma das dez maiores ameaças à saúde pública mundial, alertando que causará milhões de mortes futuras se não for devidamente controlada ^[9]. Essas previsões alarmantes trouxeram o foco da comunidade científica para a busca por tecnologias inovadoras, e, nesse contexto, nanopartículas óxido metálicas, dentre elas as de óxido de zinco (ZnONPs), despertam grande interesse, devido às suas possíveis aplicações para controle microbiológico ^{[8][10]}.

As ZnONPs apresentam propriedades que vão além das atividades antimicrobianas ^[11]. Elas contam com um fator fotocatalítico, que possibilita sua aplicação para retirada de poluentes (água e ar), devido à ação da luz UV, que excita a superfície da partícula, permitindo que essas cargas reajam com as moléculas de H₂O e O₂, gerando espécies reativas de oxigênio (ROS), responsáveis por degradar os contaminantes ^{[12][13]}. Associado a essa interação com o espectro da luz UV, as ZnONPs também apresentam efeito de bloqueio de radiação (UV-*shielding*), absorvendo essa faixa e conferindo potencial de aplicação em materiais e na indústria biomédica ^[14]. Contudo, sua rota convencional de síntese, podendo ser química ou física, necessita de muita energia e utiliza solventes orgânicos que são extremamente tóxicos, gerando um problema quanto à sua manipulação e descarte ^[15].

Nesse sentido, a síntese verde vem ganhando destaque para contornar ambas as problemáticas apontadas. A rota verde de reação explorada pela comunidade

bionanocompósito, facilitando a propagação de microfissuras e resultando em um rompimento prematuro sob tração ^[112].

As diferenças dos filmes PZ1 e PZ2 podem estar associadas a diferença de espessura média dos exemplares utilizados. Enquanto o filme PZ1 apresentou uma espessura média de 0,099 mm, o filme PZ2 teve 0,056 mm, mostrando assim uma diferença considerável, podendo justificar a diferença de tração e tenacidade observada entre essas duas amostras. Já para as amostras PZ0 (0,085 mm) e PZ3 (0,107 mm) permaneceram próximas da espessura vista na amostra PZ1.

6- CONCLUSÃO

Os resultados quanto à síntese utilizando o extrato da casca de pequi demonstraram potencial para a produção de ZnONPs. Nas condições otimizadas (1:5 de extrato, 90 °C, pH 10, 5 g de precursor e 4 h de reação), foram obtidas partículas com tamanho médio de cristalito de 25,8 nm, diâmetro médio de Feret de 65,33 nm $\pm$ 22,13 nm, índice de polidispersidade de 0,3278 e potencial zeta de -39,38 mV e um band gap de 3,05 eV. Mostrando ser uma síntese como uma boa homogeneidade de tamanho, um indicativo da eficiência reacional para obter nanopartículas em um tamanho adequado e estáveis.

A incorporação das ZnONPs em filmes de pectina conferiu ao material propriedades funcionais de interesse para embalagens sustentáveis. Os compósitos apresentaram elevada transparência (>97%) e significativa capacidade de bloqueio da radiação ultravioleta (UV-A e UV-B), mantendo características desejáveis para aplicações na indústria de embalagens alimentícias. As análises morfológicas evidenciaram relevos superficiais compatíveis com a presença das nanopartículas na matriz polimérica, enquanto as medidas de ângulo de contato sugeriram tendência de aumento da hidrofiliabilidade, sem diferenças estatisticamente significativas entre as formulações.

Apesar dos resultados promissores, algumas limitações foram observadas, como a presença de resíduos de NaNO₃ em determinadas condições de síntese e a necessidade de otimização de processos de lavagem e dispersão para reduzir aglomerações e aumentar a reprodutibilidade. Esses aspectos devem ser aprimorados em estudos futuros para consolidar o controle de pureza e morfologia das partículas.

De forma abrangente, este estudo evidencia que o uso da casca de pequi, tradicionalmente considerada resíduo agroindustrial, representa uma estratégia inovadora para a síntese verde de nanomateriais. Ao aliar a valorização de subprodutos do Cerrado com o desenvolvimento de bionanocompósitos de pectina, esta pesquisa contribui para a criação de alternativas ambientalmente mais seguras às rotas convencionais de síntese e para o avanço de materiais biodegradáveis com potencial aplicação no setor de embalagens.

7- Referências

- 1 - SMITH, J *et al.* Placeholder Text: A Study. **The Journal of Citation Styles**, v. 3, 15 jul. 2021.
- 2 - American Chemical Society International Historic Chemical Landmarks. Discovery and Development of Penicillin. 1999.
- 3 – LLOR, C; BJERRUM, L. Antimicrobial resistance: risk associated with antibiotic overuse and initiatives to reduce the problem. **Ther Adv Drug Saf.** 2014.
- 4 – MUNITA, J. M; ARIAS CA. Mechanisms of Antibiotic Resistance. **Microbiol Spectr.** 2016.
- 5 - DARUKA, L., CZIKKELY, M.S., SZILI, P. *et al.* ESKAPE pathogens rapidly develop resistance against antibiotics in development in vitro. **Nat Microbiol.** v 10, p 313–331, 2025.
- 6 - UEMURA, K *et al.* Rapid and Integrated Bacterial Evolution Analysis unveils gene mutations and clinical risk of *Klebsiella pneumoniae*. **Nat Commun** v 16, p 2917, 2025.
- 7 – WOZNIAK, T. M, DYDA A, LEE, X. The Increased Length of Hospital Stay and Mortality Associated With Community-Associated Infections in Australia. **Open Forum Infect Dis.** 2022.
- 8 - SINGHA, B; SINGH, V; SONI, V. Alternative therapeutics to control antimicrobial resistance: a general perspective. **Frontiers in Drug Discovery**, v. 4, 2024.
- 9 – World Health Organization (WHO). Ten Threats to Global Health in 2019. **World Health Organization**, 2019.

- 10 - MENDES, C. R *et al.* Ação antibacteriana e mecanismos-alvo de nanopartículas de óxido de zinco contra patógenos bacterianos. **Sci Rep.** v 12 , p 2658, 2022.
- 11 – DEY, S *et al.* A critical review on zinc oxide nanoparticles: Synthesis, properties and biomedical applications. **Intelligent Pharmacy**, v. 3, n. 1, p. 53–70, 2025.
- 12 - KASUMOV, A. M. *et al.* Photocatalysis with the Use of ZnO Nanostructures as a Method for the Purification of Aquatic Environments from Dyes. **Journal of Water Chemistry and Technology**, v. 43, n. 4, p. 281–288, 2021.
- 13 – TAKHAR, V; SINGH, S. Nanomaterials ROS: a comprehensive review for environmental applications. **Environmental Science: Nano**, v. 12, n. 5, p. 2516–2550, 2025
- 14 - KAUR, H *et al.* Green synthesis of ZnO nanoparticles using *E. cardamomum* and zinc nitrate precursor: a dual-functional material for water purification and antibacterial applications. **RSC Advances**, v. 15, n. 21, p. 16742–16765, 2025.
- 15 - ALPROL, A E. *et al.* Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Padina pavonica* extract for efficient photocatalytic removal of methylene blue. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 32160, 2024.
- 16 - KALPANA, V. N.; DEVI RAJESWARI, V. A Review on Green Synthesis, Biomedical Applications, and Toxicity Studies of ZnO NPs. **Bioinorganic Chemistry and Applications**, v. 2018, p. 1–12, 2018.
- 17 - OLIVEIRA, M. N. S *et al.* POST-HARVEST QUALITY OF PEQUI (*Caryocar brasiliense* CAMB.) COLLECTED FROM THE PLANT OR AFTER NATURALLY FALLING OFF AND SUBJECTED TO SLOW AND QUICK FREEZING. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 39, n. 1, 2017.
- 18 - FRACASSO, J. A. R *et al.* Anti-Inflammatory Effect and Toxicological Profile of Pulp Residue from the *Caryocar Brasiliense*, a Sustainable Raw Material. **Gels**, v. 9, n. 3, p. 234, 2023.
- 19 - GOMES, B. H *et al.* Chemical composition and nutritional of pequi fruits (*Caryocar brasiliense* Camb.) with and without thorns at the endocarp. **International Journal of Food Science and Nutrition**, v. 4, p. 48-55, 2019

- 20 - ALAMRI, M. S. *et al.* Food packaging's materials: A food safety perspective. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 28, n. 8, p. 4490–4499, 2021.
- 21 - BAUER, F *et al.* Plastics and climate change—Breaking carbon lock-ins through three mitigation pathways. **One Earth**, v. 5, n. 4, p. 361–376, 2022.
- 22 - PRASAD, J *et al.* Biopolymer based composite packaging: A sustainable approach for fruits and vegetables preservation. **Applied Food Research**, v. 5, n. 2, p. 101211, 2025.
- 23 - JÚNIOR, S. D. O *et al.* Use of fruit epicarps to formulate pectin-based bioactive films / Utilização de epicarpos de frutos para formulação de filmes bioativos à base de pectinas. **Brazilian Applied Science Review**, v. 5, n. 6, p. 2160–2175, 2021.
- 24 - ZHANG, H *et al.* Tuning the hydrophobic performance and thermal stability of pectin film by acetic anhydride esterification. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 276, p. 133746, 2024.
- 25 - NGO, T. M. P. *et al.* Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on the Properties of Pectin/Alginate Edible Films. **International Journal of Polymer Science**, v. 2018, p. 1–9, 2018.
- 26 - MELLINAS, A, C; JIMÉNEZ, A; GARRIGÓS, M. C. Pectin-Based Films with Cocoa Bean Shell Waste Extract and ZnO/Zn-NPs with Enhanced Oxygen Barrier, Ultraviolet Screen and Photocatalytic Properties. **Foods**, v. 9, n. 11, p. 1572, 2020.
- 27 - SHARABY, M. R. *et al.* Novel pectin-based nanocomposite film for active food packaging applications. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 20673, 2022.
- 28 - VITTA, F. A. CARYOCARACEAE. Flora Fanerogâmica do Estado de São Paulo. **Instituto de Botânica**, São Paulo, v. 4, p 169-170. 2005
- 29 - CUNHA, M. C. D *et al.* Physical, chemical and sensory implications of pequi (Caryocar brasiliense Camb.) sweet bread made with flour, pulp and fruit by-product. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 95, n. 2, 2023.
- 30 - GUIMARÃES, M *et al.* Extraction and Characterization of Pequi Seed Oil for Biodiesel Production: A Green Management of Waste to Biofuel Using Ethanol and Heterogeneous Catalysis. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 2022.

- 31 - ROMANI, V. P *et al.* Exploring pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) mesocarp flour of Brazilian Cerrado biome to produce gluten-free antioxidant biscuits. **Journal of Food Science**, v. 90, n. 3, 2025.
- 32 - SIQUEIRA, R. A *et al.* Pequi mesocarp: a new source of pectin to produce biodegradable film for application as food packaging. **Food Science and Technology**, v. 42, 2022.
- 33 - ASCARI, J.; TAKAHASHI, J. A.; BOAVENTURA, M. A. D. The phytochemistry and biological aspects of Caryocaraceae family. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 15, n. 2, p. 293–308, 2013.
- 34 - ISLAM, F *et al.* Exploring the Journey of Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO-NPs) toward Biomedical Applications. **Materials**, v. 15, n. 6, p. 2160, 15 mar. 2022.
- 35 – Wikipedia Contributors. Zinc Oxide. **Wikipedia, Wikimedia Foundation**, 2019, en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide.
- 36 - SINGH, H *et al.* Revisiting the Green Synthesis of Nanoparticles: Uncovering Influences of Plant Extracts as Reducing Agents for Enhanced Synthesis Efficiency and Its Biomedical Applications. **International Journal of Nanomedicine**, v.18, p. 4727–4750, 2023.
- 37 - VERMA, M. K. P. Nano Zinc Oxide Market - by Product (Coated Nano ZnO, Un-Coated Nano ZnO), by Application (Personal Care & Cosmetics, Paints & Coatings, Textiles, Electronics) & Forecast, 2024-2032. **Global Market Insights Inc.** 2024.
- 38 - MELO, J. O. F *et al.* Phenolic Compounds Characterization of *Caryocar brasiliense* Peel with Potential Antioxidant Activity. **Plants**, v. 13, n. 15, p. 2016, 2024.
- 39 - MORKOÇ, H.; ÖZGÜR, Ü. Zinc oxide : fundamentals, materials and device technology. **Wiley-VCH**, 2009.
- 40 - MANSY, S. *et al.* Computational and experimental study of wurtzite phase ZnO nanoparticles. **Materials Today Communications**, v. 35, p. 105688, 2023.
- 41 - CLARKE, B; GHANDI, K. The Interplay of Growth Mechanism and Properties of ZnO Nanostructures for Different Applications. **Small**, v. 19, n. 44, 2023.

- 42 - EL-SAADONY, M *et al.* Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles: Preparation, Characterization, and Biomedical Applications - A Review. **International Journal of Nanomedicine**, v. Volume 19, p. 12889–12937, 2024.
- 43 – NANDHINI, J; KARTHIKEYAN, E; RAJESHKUMAR, S. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: Eco-friendly advancements for biomedical marvels. **Resources Chemicals and Materials**, v. 3, n. 4, p. 294–316, 2024.
- 44 - JAN, H *et al.* Plant-Based Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO-NPs) Using Aqueous Leaf Extract of *Aquilegia pubiflora* : Their Antiproliferative Activity against HepG2 Cells Inducing Reactive Oxygen Species and Other *In Vitro* Properties. **Oxidative Medicine and Cellular Longevity**, v. 2021, n. 1, 2021.
- 45 - MUTUKWA, D; TAZIWA, R. T; KHOTSENG, L. A Review of Plant-Mediated ZnO Nanoparticles for Photodegradation and Antibacterial Applications. **Nanomaterials**, v. 14, n. 14, p. 1182, 2024.
- 46 – HARPRING, M.; COX, J. V. Plasticity in the cell division processes of obligate intracellular bacteria. **Frontiers in Cellular and Infection Microbiology**, v. 13, 2023.
- 47- RAGLIN, S. S.; KENT, A. D. Navigating nitrogen sustainability with microbiome-associated phenotypes. **Trends in Plant Science**, v. 30, n. 5, p. 471–483, 2025.
- 48 - KANDARI, A et al. Biotics and bacterial function: impact on gut and host health. **The ISME Journal**, v. 18, n. 1, 2024.
- 49 - STEWARD, K. Gram Positive vs Gram Negative. **Technology Networks**, 2019.
- 50 – SALTON, M. R. J.; KIM, K. S. Structure. In: Baron S, editor. **Medical Microbiology**. 4th ed. Galveston (TX): University of Texas Medical Branch at Galveston; 1996. Chapter 2.
- 51 - ROWDEN, A. Gram-Positive and Gram-Negative: What Is the Difference?. **Www.medicalnewstoday.com**, 2022.
- 52 - WINNY, A. The Superbug Fight Needs a Better Business Model. **Global Health NOW**, 2024.
- 53 - MENDES, C. R *et al.* Antibacterial action and target mechanisms of zinc oxide nanoparticles against bacterial pathogens. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 2658, 2022.

- 54 - ABEBE, B *et al.* A Review on Enhancing the Antibacterial Activity of ZnO: Mechanisms and Microscopic Investigation. **Nanoscale Research Letters**, v. 15, n. 1, p. 190, 2020.
- 55 – RAMOS-SOUZA, C *et al.* Changing Desplicable Me: Potential replacement of azo dye yellow tartrazine for pequi carotenoids employing ionic liquids as high-performance extractors. **Food Research International**, v. 174, p. 113593, 2023.
- 56 - MAYRINCK, C *et al.* Synthesis, Properties and Applications of Nanostructured Zinc Oxide. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 5, 2014.
- 57 - LUQUE, P. A. *et al.* Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Citrus sinensis extract. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 29, n. 12, p. 9764–9770, 2018.
- 58 – PORTO, R. C. T *et al.* Nanopartículas de óxido de zinco sintetizadas pelo método poliol: caracterização e avaliação da atividade antibacteriana. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. suppl 1, 2018.
- 59 – HADIDI, Milad *et al.* The Potential Health Benefits of Gallic Acid: Therapeutic and Food Applications. **Antioxidants**, v. 13, n. 8, p. 1001, 2024.
- 60 – KAMAL, A *et al.* Plant phytochemicals-mediated synthesis of zinc oxide nanoparticles with antimicrobial, pharmacological, and environmental applications. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 96, n. 4, 2024
- 61 - CLOGSTON, J. D.; PATRI, A. K. Zeta Potential Measurement. **Methods Mol Biol.** p. 63–70, 2011.
- 62 - AN, S. S. A. *et al.* Physicochemical properties of surface charge-modified ZnO nanoparticles with different particle sizes. **International Journal of Nanomedicine**, p. 41, 2014.
- 63 - TOSCANO, M *et al.* Effect of reaction conditions on particle size of zno nanoparticles via controlled precipitation method and in-vitro antibacterial capacity. **Química Nova**, 2022.
- 64 - MANZOOR, U *et al.* Effect of Synthesis Temperature, Nucleation Time, and Postsynthesis Heat Treatment of ZnO Nanoparticles and Its Sensing Properties. **Journal of Nanomaterials**, v. 2015, n. 1, 2015.

- 65 - MODRIĆ-ŠAHBAZOVIĆ, A *et al.* Role of synthesis temperature in the formation of ZnO nanoparticles via the Sol-Gel process. **Journal of Crystal Growth**, v. 650, p. 128003, 2025.
- 66 - PEI, J *et al.* Advancements in the Synthesis and Functionalization of Zinc Oxide-Based Nanomaterials for Enhanced Oral Cancer Therapy. **Molecules**, v. 29, n. 11, p. 2706, 2024.
- 67 - SONG, Z *et al.* Characterization of optical properties of ZnO nanoparticles for quantitative imaging of transdermal transport. **Biomedical Optics Express**, v. 2, n. 12, p. 3321, 2011.
- 68 - NAIEL, B *et al.* Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Sea Lavender (*Limonium pruinatum* L. Chaz.) extract: characterization, evaluation of anti-skin cancer, antimicrobial and antioxidant potentials. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 20370, 2022.
- 69 - WANG, N; YANG, Y; YANG, G. Great blue-shift of luminescence of ZnO nanoparticle array constructed from ZnO quantum dots. **Nanoscale Research Letters**, v. 6, n. 1, p. 338, 2011.
- 70 - SEDEFOGLU, N. Green synthesis of ZnO nanoparticles by *Myrtus communis* plant extract with investigation of effect of precursor, calcination temperature and study of photocatalytic performance. **Ceramics International**, v. 50, n. 6, p. 9884–9895, 2024.
- 71 - WOUTERS, C *et al.* Assessing particle count in electron microscopy measurements of nanomaterials to support regulatory guidance. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 11803, 7 abr. 2025.
- 72 - AVILES, K. M.; LEAR, B. J. Practical Guide to Automated TEM Image Analysis for Increased Accuracy and Precision in the Measurement of Particle Size and Morphology. **ACS Nanoscience Au**, v. 5, n. 3, p. 117–127, 2025.
- 73 - RICE, S. B. *et al.* Particle size distributions by transmission electron microscopy: an interlaboratory comparison case study. **Metrologia**, v. 50, n. 6, p. 663–678, 2013.

- 74 - ZAPAROLI, H. H. *et al.* Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles: A Possible Photosensitizing Agent in Photodynamic Therapy. **Materials Research**, v. 27, n. suppl 2, 2024.
- 75 - MUTUKWA, D; TAZIWA, R. T.; KHOTSENG, L. A Review of Plant-Mediated ZnO Nanoparticles for Photodegradation and Antibacterial Applications. **Nanomaterials**, v. 14, n. 14, p. 1182, 2024.
- 76 - FIEDOT-TOBOŁA, M *et al.* Gallic Acid Based Black Tea Extract as a Stabilizing Agent in ZnO Particles Green Synthesis. **Nanomaterials**, v. 11, n. 7, p. 1816, 2021.
- 77 - ALIANNEZHADI, M *et al.* Ultrasound-assisted green synthesized ZnO nanoparticles with different solution pH for water treatment. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 7203, 2025.
- 78 - ABDULQODUS, A. N *et al.* Green synthesis of ZnO nanoparticles: effect of pH on morphology and photocatalytic degradation efficiency. **Applied Physics A**, v. 131, n. 9, p. 720, 2025.
- 79 - ARCINIEGAS-GRIJALBA, P. A. *et al.* ZnO nanoparticles (ZnO-NPs) and their antifungal activity against coffee fungus *Erythricium salmonicolor*. **Applied Nanoscience**, v. 7, n. 5, p. 225-241, 2017.
- 80 - BENZARTI, Z *et al.* Novel Green Synthesis Route of ZnO Nanoparticles for Dielectric Applications. **Nanomaterials**, v. 15, n. 13, p. 991, 2025.
- 81 - IBRAHIM, A *et al.* Molten salts in the light of corrosion mitigation strategies and embedded with nanoparticles to enhance the thermophysical properties for CSP plants. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 219, p. 110768, 2021.
- 82 - LIN, Chia-Chang; YOU, Yi-Cheng. Mass-production of ZnO nanoparticles by precipitation in a rotating packed bed: effect of zinc salt. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 8451–8458, 2020.
- 83 - SUN, P; LV, Z; SUN, C. Study on the Synthesis of Nano Zinc Oxide Particles under Supercritical Hydrothermal Conditions. **Nanomaterials**, v. 14, n. 10, p. 844, 2024.
- 84 - WHITEHEAD, C. B.; ÖZKAR, S; FINKE, R. G. LaMer's 1950 model for particle formation of instantaneous nucleation and diffusion-controlled growth: a historical look

at the model's origins, assumptions, equations, and underlying sulfur sol formation kinetics data. **Chemistry of Materials**, v. 31, n. 18, p. 7116-7132, 2019.

85 – ZAFAR, M. N *et al.* Effective adsorptive removal of azo dyes over spherical ZnO nanoparticles. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 713–725, 2019.

86 - GONZÁLEZ VERA, O. F.; MUTIZ, J. J.; URRESTA ARAGÓN, J. Síntesis y caracterización de catalizadores tipo Cu soportado en MgO, SiO₂, ZnO y Al₂O₃ aplicados a la hidrogenólisis del glicerol. **Revista ION**, v. 30, n. 2, p. 31–41, 2018.

87 - GINES-PALESTINO, R *et al.* Microstructural, Morphological, and Optical Study of Synthesis of ZnO and Pt-ZnO Nanoparticles by a Simple Method Using Different Precipitating Agents. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 2024.

88 - HAMID, A.; FADHEL, A.; AZARA, S. Studying the effect of irradiation time in preparing zinc oxide nanoparticles prepared by microwave method. **Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures**, v. 17, n. 4, p. 1417–1422, 2022.

89 - KAGALKAR, A *et al.* Enhanced metal ion adsorption using ZnO-MXene nanocomposites with machine learning-based performance prediction. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 15563, 2025.

90 – AL-KORDY, H. M. H.; SABRY, S. A.; MABROUK, M. E. M. Statistical optimization of experimental parameters for extracellular synthesis of zinc oxide nanoparticles by a novel haloalcaliphilic *Alkalibacillus* sp.W7. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 10924, 2021.

91 - GETIE, S. et al. Síntese e caracterização de nanopartículas de óxido de zinco para aplicações antibacterianas. **J. Nanomed. Nanotecnologia. S**, v. 8, n. 4, 2017.

92 - KARAM, S. T.; ABDULRAHMAN, A. F. Green Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles by Using Thyme Plant Leaf Extract. **Photonics**, v. 9, n. 8, p. 594, 2022.

93 - KANTCHEVA, M.; CIFTLIKLI, E. Z. FTIR spectroscopic characterization of NO_x species adsorbed on ZrO₂ and ZrO₂-SO₄²⁻. **Journal of Physical Chemistry B**, v. 106, n. 15, p. 3941–3949, 2002.

- 94 - HANDIQUE, K. C.; BARMAN, B.; KALITA, P. K. Effect of Zn^{2+} ion concentration on the optoelectronic properties of chemically synthesized ZnSe nanorods. **Physica B: Condensed Matter**, v. 674, p. 415571, 2024.
- 95 - LIU, L *et al.* Supercritical hydrothermal synthesis of nano-ZnO: Effects of key parameters and reaction mechanism. **Ceramics International**, v. 49, n. 19, p. 31313–31324, 2023.
- 96 - KIRAKOSYAN, A *et al.* Optical Properties of Colloidal $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ Nanocrystals by Controlled Growth of Lateral Dimension. **Crystal Growth & Design**, v. 17, n. 2, p. 794–799, 2017.
- 97 - SEREJO, R. C. *et al.* An Innovative Green Eco-Friendly Method for the Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles Using *Plinia cauliflora* Extract. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 35, n. 11, 2024.
- 98 - AMIN, G. *et al.* Influence of pH, Precursor Concentration, Growth Time, and Temperature on the Morphology of ZnO Nanostructures Grown by the Hydrothermal Method. **Journal of Nanomaterials**, v. 2011, p. 1–9, 2011.
- 99 - RODRIGUEZ-LOYA, J.; LERMA, M.; GARDEA-TORRESDEY, J. L. Dynamic Light Scattering and Its Application to Control Nanoparticle Aggregation in Colloidal Systems: A Review. **Micromachines**, v. 15, n. 1, p. 24, 2023.
- 100 – MUTUKWA, D.; TAZIWA, R.; KHOTSENG, L. E. A Review of the Green Synthesis of ZnO Nanoparticles Utilising Southern African Indigenous Medicinal Plants. **Nanomaterials**, v. 12, n. 19, p. 3456, 2022
- 101 – KANINGINI, A. G *et al.* Effect of Optimized Precursor Concentration, Temperature, and Doping on Optical Properties of ZnO Nanoparticles Synthesized via a Green Route Using Bush Tea (*Athrixia phylicoides* DC.) Leaf Extracts. **ACS Omega**, v. 7, n. 36, p. 31658–31666, 2022.
- 102 - KANDASAMY, M *et al.* Green synthesis of ultrafine zinc oxide nanoparticles for photocatalytic degradation of methylene blue dye: Optimization and kinetic studies. **Results in Engineering**, v. 27, p. 105846, 2025.
- 103 – STOICA, M *et al.* Review of Bio-Based Biodegradable Polymers: Smart Solutions for Sustainable Food Packaging. **Foods**, v. 13, n. 19, p. 3027, 2024.

- 104 – WESTLAKE, J. R et al. Biodegradable biopolymers for active packaging: demand, development and directions. **Sustainable Food Technology**, v. 1, n. 1, p. 50–72, 2023.
- 105 – CHENG, J et al. Applications of biodegradable materials in food packaging: A review. **Alexandria Engineering Journal**, v. 91, p. 70–83, 2024.
- 106 – CHANDEL, V et al. Current Advancements in Pectin: Extraction, Properties and Multifunctional Applications. **Foods**, v. 11, n. 17, p. 2683, 2022.
- 107 – SYARIFUDDIN, A et al. Pectin-based edible films and coatings: From extraction to application on food packaging towards circular economy- A review. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 9, p. 100680, 2025.
- 108 – ZHOU, Y et al. Multifunctional pectin films based on mussel-inspired modified 2D Ag nanosheets for long-lasting antibacterial and enhanced barrier properties. **Food Hydrocolloids**, v. 137, p. 108331, 2023.
- 109 – SHARABY, M. R et al. Novel pectin-based nanocomposite film for active food packaging applications. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 20673, 2022.
- 110 - ELIM, Y. A et al. Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Aqueous Extract of *Deverra tortuosa* and their Cytotoxic Activities. **Sci Rep**, v. 10, p. 3445, 2020.
- 111 - BALA, N et al. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Hibiscus subdariffa leaf extract: effect of temperature on synthesis, anti-bacterial activity and anti-diabetic activity. **RSC Advances**, v. 5, n. 7, p. 4993-5003, 2015.
- 112 – VASUNDHARA, K. K. S. Green synthesis of ZnO nanoparticles from Neem and Eucalyptus leaves extract for photocatalytic applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 92, p. 787–795, 2023.
- 113 - JAFAROVA, V. N.; & ORUDZHEV, G. S. Structural and electronic properties of ZnO: A first-principles density-functional theory study within LDA(GGA) and LDA(GGA)+U methods. **Solid State Communications**, v. 325, p. 114166, 2021.
- 114 - NASIM, I *et al.* Green synthesis of ZnO nanoparticles and biological applications as broad-spectrum bactericidal, antibiofilm effects and biocompatibility studies on Zebrafish embryo. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 169, p. 113049, 2024.

115 – KOIRALA, P.; SABLANI, S. S.; & NIRMAL, N. Gelatin/ pectin based composite films re-enforced with mango peel extract loaded zein nanoparticles and zinc oxide nanoparticles: Enhanced mechanical and functional properties. **LWT**, v. 226, p. 117997, 2025.