

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

BEATRIZ FARIAS BITTENCOURT

**BIOSSÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA MEDIADA POR EXTRATO
ETANÓLICO DE PÓLEN DE *MYRACRODRUON URUNDEUVA***

Ilha Solteira – SP

2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

BEATRIZ FARIAS BITTENCOURT

**BIOSSÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA MEDIADA POR EXTRATO
ETANÓLICO DE PÓLEN DE *MYRACRODRUON URUNDEUVA***

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (PPGCM-FEIS-UNESP) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência dos Materiais.

Área de Conhecimento: Química dos Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Rosangela da Silva de Laurentiz

Coorientadora: Profa. Dra. Vanessa de Andrade Royo

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B624b Bittencourt, Beatriz Farias.
Biossíntese de nanopartículas de prata mediada por extrato etanólico de pólen de *Myracrodruon urundeuva* / Beatriz Farias Bittencourt. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
114 f.

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

Orientador: Rosângela da Silva de Laurentiz

Coorientador: Vanessa de Andrade Royo

Inclui bibliografia

1. Atividade antioxidante. 2. Triagem fitoquímica. 3. Estabilidade coloidal.

IMPACTO E RELEVÂNCIA ECONÔMICA E SOCIAL

A presente dissertação apresenta uma abordagem sustentável para a síntese verde de nanopartículas de prata utilizando extrato de pólen de *Myracrodruon urundeuva*. O método proposto está alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 3, 9, 12 e 15 da Organização das Nações Unidas (ONU), ao promover a valorização da biodiversidade brasileira, reduzir o uso de reagentes tóxicos e os custos de produção, além de apresentar potencial para aplicações nas áreas da saúde e da biotecnologia.

ECONOMIC AND SOCIAL IMPACT AND RELEVANCE

This dissertation presents a sustainable approach for the green synthesis of silver nanoparticles using *Myracrodruon urundeuva* pollen extract. The proposed method is aligned with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) 3, 9, 12, and 15 by promoting the valorization of Brazilian biodiversity, reducing the use of toxic reagents and production costs, and offering potential applications in healthcare and biotechnology.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Biossíntese de nanopartículas de prata mediada por extrato etanólico de pólen de *Myracrodruon urundeuva*

AUTORA: BEATRIZ FARIAS BITTENCOURT

ORIENTADORA: ROSANGELA DA SILVA DE LAURENTIZ

COORDINADORA: VANESSA DE ANDRADE ROYO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciência dos Materiais, especialidade: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

 Documento assinado digitalmente
ROSANGELA DA SILVA DE LAURENTIZ
Data: 24/08/2026 14:32:45-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. ROSANGELA DA SILVA DE LAURENTIZ (Participação Presencial)
Departamento de Física e Química / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

 Documento assinado digitalmente
CIBELY DA SILVA MARTIN SONVESSO
Data: 10/08/2026 22:23:14-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. CIBELY DA SILVA MARTIN SONVESSO (Participação Presencial)
Departamento de Física e Química / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Prof. Dr. ALEX MARTINS MACHADO (Participação Virtual)
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS

 Documento assinado digitalmente
ALEX MARTINS MACHADO
Data: 24/08/2026 19:49:16-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Ilha Solteira, 31 de julho de 2026.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, pelo amor incondicional, ensinamentos, incentivo constante e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais desafiadores. Cada conquista alcançada também pertence a vocês.

Aos meus amigos, agradeço o apoio, palavras de incentivo e por compreenderem as minhas ausências durante esta caminhada. A presença de cada um tornou esta trajetória mais leve e significativa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Professora Dra. Rosangela da Silva de Laurentiz, pela confiança, orientação, incentivo, dedicação e parceria ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência, disponibilidade e ensinamentos foram fundamentais para minha formação acadêmica e para a realização desta pesquisa.

Ao grupo de pesquisa GSOPN, agradeço pelo suporte científico, pelas discussões enriquecedoras, pela troca de conhecimentos e pelo ambiente colaborativo que tornaram esta jornada mais leve e produtiva. Estendo meu agradecimento a todos os colegas que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho, seja por meio de discussões, auxílio experimental ou apoio durante as diferentes etapas da pesquisa.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP), ao Departamento de Física e Química e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, agradeço pela excelente formação proporcionada, pelo ambiente acadêmico estimulante e pela infraestrutura disponibilizada, fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa e para minha formação como pesquisadora.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de Auxílio Equipamento Multiusuário, que viabilizou a aquisição dos equipamentos NEXUS 670 (Processo FAPESP nº 1997/07158-4), Zetasizer Advance Lab (Processo FAPESP nº 2022/03219-2) e NanoSight Pro (Processo FAPESP nº 2023/17369-9), essenciais para a realização das análises experimentais deste estudo.

Agradeço ao Laboratório de Microscopia de Ilha Solteira (LaMIS–UNESP) por disponibilizar acesso às instalações de microscopia e ao Elton José de Souza pelo suporte técnico na aquisição das imagens.

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

Por fim, deixo registrado meu sincero agradecimento a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa trajetória e contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

A busca por rotas sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de métodos verdes para a síntese de nanopartículas metálicas, destacando-se o uso de extratos vegetais como agentes redutores e estabilizantes. Neste trabalho, nanopartículas de prata (AgNPs) foram sintetizadas utilizando extratos do pólen de *Myracrodruon urundeuva* (aroeira). O uso do pólen apresenta uma vantagem relevante em relação a outras matrizes vegetais, como flores, uma vez que concentra diversos fitoconstituintes bioativos e pode ser obtido por meio de armadilhas instaladas na entrada de colmeias, sem causar danos à planta como a extração das flores. Os extratos foram avaliados quanto à composição fitoquímica, teor de compostos fenólicos e atividade antioxidante. Ambos apresentaram flavonoides, glicosídeos e triterpenoides, enquanto o extrato etanólico apresentou adicionalmente antraquinonas, carotenoides, cumarinas e taninos. Os resultados indicaram maior potencial redutor do extrato etanólico, que apresentou maior teor de fenóis totais ($9,983 \pm 0,549$ mg EAG/g) e maior atividade antioxidante ($CI_{50} = 69,34$ µg/mL) em comparação ao extrato aquoso ($3,707 \pm 0,0086$ mg EAG/g; $CI_{50} = 782,03$ µg/mL). Foram avaliadas diferentes proporções entre extrato etanólico e precursor nitrato de prata (1:01, 1:04, 1:09, 1:19, 1:49 e 1:99), temperatura e pH do meio reacional em 120 minutos de síntese. A formação das nanopartículas de prata foi monitorada por espectroscopia de extinção no ultravioleta-visível, observando-se a banda característica de ressonância plasmônica de superfície entre 420 e 450 nm. As nanopartículas obtidas foram caracterizadas por espalhamento dinâmico de luz (DLS) e potencial Zeta. Os resultados indicaram maior eficiência nas proporções 1:19 e 1:49, a 25 °C, pH 8,0, sob ultrassom. Análises complementares por rastreamento de nanopartículas (NTA), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), microscopia de força atômica (AFM) e difração de raios X (DRX) confirmaram partículas com tamanho entre 60 e 82 nm, morfologia predominantemente esférica e alta estabilidade, com potenciais zeta de -61 e -102 mV, respectivamente para 1:19 e 1:49. Análises de FTIR demonstraram que grupos hidroxila e carbonila dos fitoconstituintes do pólen atuam na redução dos íons prata e no capeamento estabilizante das partículas. A natureza cristalina da prata metálica foi confirmada por DRX, com tamanho médio de cristalito entre 21 e 24 nm. As nanopartículas de prata sintetizadas mantiveram sua estabilidade coloidal por 90 dias, preservando o tamanho e a carga superficial. Esses resultados demonstram que o pólen de *Myracrodruon urundeuva* é uma matriz biológica

eficiente para a produção de nanopartículas de prata estáveis, aliando o potencial antimicrobiano da prata às propriedades bioativas dos compostos presentes no pólen.

Palavras-chave: Atividade antioxidante; Triagem fitoquímica; Estabilidade coloidal.

ABSTRACT

The search for sustainable routes has driven the development of green methods for the synthesis of metallic nanoparticles, with the use of plant extracts as reducing and stabilizing agents standing out. In this study, silver nanoparticles (AgNPs) were synthesized using an ethanolic extract of *Myracrodruon urundeuva* (aroeira) pollen. The use of pollen presents a relevant advantage over other plant matrices, such as flowers, since it concentrates several bioactive phytoconstituents and can be obtained through traps installed at the entrance of beehives, without causing damage to the plant as occurs with flower extraction. The extracts were evaluated for their phytochemical composition, total phenolic content, and antioxidant activity. Both extracts presented flavonoids, glycosides, and triterpenoids, while the ethanolic extract additionally presented anthraquinones, carotenoids, coumarins, and tannins. The results indicated a greater reducing potential of the ethanolic extract, which presented a higher total phenolic content ($9,983 \pm 0,549$ mg GAE/g) and greater antioxidant activity ($IC_{50} = 69,34$ μ g/mL) compared to the aqueous extract ($3,707 \pm 0,0086$ mg GAE/g; $IC_{50} = 782,03$ μ g/mL). Different ratios between the ethanolic extract and the silver nitrate precursor (1:01, 1:04, 1:09, 1:19, 1:49, and 1:99), temperature, and pH of the reaction medium were evaluated over 120 minutes of synthesis. The formation of silver nanoparticles was monitored by ultraviolet-visible extinction spectroscopy, observing the characteristic surface plasmon resonance band between 420 and 450 nm. The nanoparticles obtained were characterized by dynamic light scattering (DLS) and zeta potential. The results indicated greater efficiency at ratios of 1:19 and 1:49, at 25 °C and pH 8.0, under ultrasound. Complementary analyses by nanoparticle tracking analysis (NTA), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), atomic force microscopy (AFM), and X-ray diffraction (XRD) confirmed particles with sizes ranging from 60 to 82 nm, predominantly spherical morphology, and high stability, with zeta potentials of -61 and -102 mV for 1:19 and 1:49, respectively. FTIR analyses demonstrated that hydroxyl and carbonyl groups of pollen phytoconstituents act in the reduction of silver ions and in the stabilizing capping of the particles. The crystalline nature of metallic silver was confirmed by XRD, with an average crystallite size ranging from 21 to 24 nm. The synthesized silver nanoparticles maintained their colloidal stability for 90 days, preserving their size and surface charge. These results showed that *Myracrodruon urundeuva* pollen is an efficient biological matrix for the production of stable silver nanoparticles, combining the antimicrobial potential of silver with the bioactive properties of pollen compounds.

Keywords: Antioxidant activity; Phytochemical screening; Colloidal stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Obtenção de nanomateriais por métodos físicos e químicos.....	22
Figura 2 - Classificação geral dos nanomateriais.....	23
Figura 3 - Representação esquemática de diferentes rotas de síntese de AgNPs.	26
Figura 4 - Representação esquemática das abordagens para obtenção de NPs.....	28
Figura 5 - Mecanismos de toxicidade das AgNPs.....	30
Figura 6 - Processo da síntese verde de AgNPs usando extrato vegetal.....	32
Figura 7 - Mecanismo esquemático da redução de íons prata e formação de AgNPs por agentes redutores naturais.	33
Figura 8 - Espécie adulta da <i>Myracrodruon urundeuva</i> (aroeira) e flores da planta.	36
Figura 9 - Flores de <i>M. urundeuva</i> (aroeira).....	38
Figura 10 - Processo de produção de pólen de abelha.	40
Figura 11 - Principais metabólitos secundários envolvidos na síntese verde de NPs: exemplos estruturais e funções desempenhadas.....	43
Figura 12 - Representação das etapas experimentais de preparação e obtenção do extrato vegetal de pólen de <i>M. urundeuva</i>	48
Figura 13 - Representação do processo de síntese de AgNPs mediado por extrato de pólen.	56
Figura 14 - Aspecto visual dos extratos aquoso e etanólico obtidos a partir do pólen de <i>M. urundeuva</i>	60
Figura 15 - Curva de calibração de ácido gálico para determinação do conteúdo de compostos fenólicos totais pelo método de Folin–Ciocalteu ($\lambda = 765 \text{ nm}$).	64
Figura 16 - Curva de inibição do radical DPPH em função da concentração para quercetina.	67
Figura 17 - Avaliação da atividade antioxidante dos extratos de pólen de <i>M. urundeuva</i> por meio da inibição do radical DPPH em função da concentração: (a) aquoso e (b) etanólico. ..	67
Figura 18 - Formação de AgNPs com extrato etanólico de pólen da <i>M. urundeuva</i> após 120 min de reação sob diferentes condições de pH e temperatura: (a) sistema inicial antes da síntese e pH 4,7; (b) pH 4,7 a 25 °C; (c) pH 4,7 a 45 °C; (d) pH 8,0 antes da síntese; (e) pH 8,0 a 25 °C; (f) pH 8,0 a 45 °C.....	70
Figura 19 - Espectros de extinção UV-Vis das AgNPs obtidas na proporção 1:01 (extrato:AgNO ₃), após diluição das amostras na razão 1:66,5 (v/v – AgNPs/água ultrapura), sob condições específicas em função do tempo de síntese: (a) temperatura 25 °C e pH 4,7; (b)	

temperatura 25 °C e pH 8,0; (c) temperatura 45 °C e pH 4,7; (d) temperatura 45 °C e pH 8,0.

..... 72

Figura 20 - Espectros de extinção UV-Vis das AgNPs obtidas na proporção 1:04 (extrato:AgNO₃), após diluição das amostras na razão 1:33 (v/v – AgNPs/água ultrapura), sob condições específicas em função do tempo de síntese: (a) temperatura 25 °C e pH 4,7; (b) temperatura 25 °C e pH 8,0; (c) temperatura 45 °C e pH 4,7; (d) temperatura 45 °C e pH 8,0.

..... 73

Figura 21 - Espectros de extinção UV-Vis das AgNPs obtidas na proporção 1:09 (extrato:AgNO₃), após diluição das amostras na razão 1:16,5 (v/v – AgNPs/água ultrapura), sob condições específicas em função do tempo de síntese: (a) temperatura 25 °C e pH 4,7; (b) temperatura 25 °C e pH 8,0; (c) temperatura 45 °C e pH 4,7; (d) temperatura 45 °C e pH 8,0.

..... 74

Figura 22 - Espectros de extinção UV-Vis das AgNPs obtidas na proporção 1:19 (extrato:AgNO₃), após diluição das amostras na razão 1:10 (v/v – AgNPs/água ultrapura), sob condições específicas em função do tempo de síntese: (a) temperatura 25 °C e pH 4,7; (b) temperatura 25 °C e pH 8,0; (c) temperatura 45 °C e pH 4,7; (d) temperatura 45 °C e pH 8,0.

..... 75

Figura 23 - Espectros de extinção UV-Vis das AgNPs obtidas na proporção 1:49 (extrato:AgNO₃), após diluição das amostras na razão 1:03 (v/v – AgNPs/água ultrapura), sob condições específicas em função do tempo de síntese: (a) temperatura 25 °C e pH 4,7; (b) temperatura 25 °C e pH 8,0; (c) temperatura 45 °C e pH 4,7; (d) temperatura 45 °C e pH 8,0.

..... 76

Figura 24 - Espectros de extinção UV-Vis das AgNPs obtidas na proporção 1:99 (extrato:AgNO₃), após diluição das amostras na razão 1:1,5 (v/v – AgNPs/água ultrapura), sob condições específicas em função do tempo de síntese: (a) temperatura 25 °C e pH 4,7; (b) temperatura 25 °C e pH 8,0; (c) temperatura 45 °C e pH 4,7; (d) temperatura 45 °C e pH 8,0.

..... 77

Figura 25 - Espectros de extinção UV-Vis das AgNPs obtidas em diferentes proporções extrato:AgNO₃ (1:01, 1:04, 1:09, 1:19, 1:49 e 1:99), após diluição das amostras na razão 1:10 (v/v – AgNPs/água ultrapura), sob temperatura 25 °C e pH 8,0 em função do tempo final de síntese (120 min.).

Figura 26 - Perfis de distribuição de tamanho hidrodinâmico por DLS das AgNPs em diferentes proporções extrato etanólico:AgNO₃ para as proporções (a) 1:01, (b) 1:04, (c) 1:09, (d) 1:19, (e) 1:49 e (f) 1:99, avaliando a influência do pH e da temperatura..... 83

Figura 27 - Distribuição do diâmetro hidrodinâmico x concentração das AgNPs sintetizadas nas proporções extrato:AgNO ₃ de 1:99, 1:49, 1:19 e 1:09, nas temperaturas de 25 e 45 °C em pH 8,0.....	86
Figura 28 - Micrografias de MEV destacando a morfologia predominantemente esférica e a estimativa do tamanho das AgNPs sintetizadas por via verde utilizando extrato etanólico de pólen de <i>M. urundeuva</i> , obtidas a 25 °C e pH 8,0, nas proporções extrato:AgNO ₃ de (a) 1:09, (b) 1:19, (c) 1:49 e (d) 1:99. Barra de escala: 400 nm.....	89
Figura 29 - Imagens de AFM das AgNPs sintetizadas por rota verde utilizando extrato etanólico de pólen da <i>M. urundeuva</i> na proporção 1:49 extrato:AgNO ₃), a 25 °C e pH 8,0: (a) imagem topográfica bidimensional (2D) e (b) reconstrução topográfica tridimensional (3D) da superfície (área de varredura de 5 × 5 µm).....	90
Figura 30 - Imagens de AFM das AgNPs sintetizadas por rota verde utilizando extrato etanólico de pólen da <i>M. urundeuva</i> na proporção 1:19 (extrato:AgNO ₃), a 25 °C e pH 8,0: (a) imagem topográfica bidimensional (2D) e (b) reconstrução topográfica tridimensional (3D) da superfície (área de varredura de 15 × 15 µm).	91
Figura 31 - Espectro de EDS e composição elementar das AgNPs da formulação 1:09 (extrato etanólico:AgNO ₃) sob temperatura a 25 °C e pH a 8,0.....	93
Figura 32 - Espectro de EDS e composição elementar das AgNPs da formulação 1:19 (extrato etanólico:AgNO ₃) sob temperatura a 25 °C e pH a 8,0.....	94
Figura 33 - Espectro de EDS e composição elementar das AgNPs da formulação 1:49 (extrato etanólico:AgNO ₃) sob temperatura a 25 °C e pH a 8,0.....	94
Figura 34 - Espectro de EDS e composição elementar das AgNPs da formulação 1:99 (extrato etanólico:AgNO ₃) sob temperatura a 25 °C e pH a 8,0.....	95
Figura 35 - Espectros de FTIR do extrato de pólen de <i>M. urundeuva</i> e das AgNPs sintetizadas nas proporções extrato:AgNO ₃ de 1:19 e 1:49, obtidas a 25 °C e pH 8,0.....	97
Figura 36 - Difrátogramas de DRX do extrato etanólico de pólen de <i>M. urundeuva</i> e das AgNPs sintetizadas a 25 °C e pH 8,0, nas proporções extrato: AgNO ₃ de 1:19 e 1:49.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese de AgNPs utilizando diferentes métodos: vantagens e desvantagens.	27
Tabela 2 - Técnicas de caracterização de AgNPs.....	29
Tabela 3 - Fatores que afetam os métodos de síntese verde.	33
Tabela 4 - Principais compostos bioativos e micronutrientes do pólen de diversas plantas. .	42
Tabela 5 - Condições experimentais empregadas no ensaio de atividade antioxidante pelo método do DPPH para os extratos aquoso e etanólico de pólen de <i>M. urundeuva</i>	53
Tabela 6 - Condições experimentais do ensaio de atividade antioxidante pelo método do DPPH para a quercetina.....	54
Tabela 7 - Relação volumétrica entre extrato de pólen e solução de AgNO ₃ utilizada na síntese das AgNPs.....	55
Tabela 8 - Condições experimentais avaliadas para a síntese verde de AgNPs utilizando extrato etanólico de pólen de <i>M. urundeuva</i>	56
Tabela 9 - Triagem fitoquímica qualitativa dos extratos de pólen de <i>M. urundeuva</i>	62
Tabela 10 - Valores de concentração (mg/mL) e absorção obtidos para os extratos analisados por UV-vis ($\lambda = 700$ nm).	64
Tabela 11 - Avaliação do diâmetro hidrodinâmico (d_h), índice de polidispersidade (PDI) e potencial zeta das AgNPs mediadas por extrato etanólico do pólen da <i>M. urundeuva</i>	80
Tabela 12 - Distribuição de diâmetro hidrodinâmico médio (d_h), concentração em partículas/mL e span das AgNPs sintetizadas nas proporções extrato:AgNO ₃ de 1:99, 1:49, 1:19 e 1:09, nas temperaturas de 25 e 45 °C em pH 8,0.....	86
Tabela 13 - Atribuição das bandas do espectro FTIR e identificação dos grupos funcionais e compostos associados no extrato e nas AgNPs.	97
Tabela 14 - Tamanho médio dos cristalitos das AgNPs sintetizadas nas proporções extrato: AgNO ₃ de 1:19 e 1:49, a 25 °C e pH 8,0, calculado pela equação de Debye-Scherrer.....	101
Tabela 15 - Monitoramento do pH, diâmetro hidrodinâmico (d_h), índice de polidispersidade (PDI) e potencial zeta durante o armazenamento das AgNPs por um período de 90 dias.....	103
Tabela 16 - Monitoramento do diâmetro hidrodinâmico médio (d_h), concentração de partículas/mL e span obtidas por NTA durante o armazenamento das AgNPs por um período de 90 dias.	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFM	Microscópio de Força Atômica
AgNPs	Nanopartículas de Prata
d_h	Diâmetro Hidrodinâmico
DLS	Espalhamento Dinâmico de Luz
DRX	Difração de Raios X
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X
ELS	Espalhamento de Luz Eletroforético
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NPs	Nanopartículas
NTA	Análise de Rastreamento de Nanopartículas
PDI	Índice de polidispersidade
pH	Potencial hidrogeniônico
ROS	Espécies Reativas de Oxigênio
SPR	Ressonância Plasmônica de Superfície
UV-Vis	Espectroscopia Ultravioleta-Visível

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

λ	Comprimento de onda
EAG	Equivalente de ácido gálico
mg EAG/g	Miligramas de equivalentes de ácido gálico por gramas
mg/mL	Miligramas por mililitro
ζ	Potencial Zeta
kHz	Quilohertz
rpm	Rotações por minuto

Compostos químicos

DPPH 1,1-difenil-2-picrilhidrazil

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1 SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS	21
2.1.1 Nanopartículas de prata.....	24
2.1.1.1 Toxicidade das AgNPs	30
2.1.1.2 Síntese Verde de AgNPs.....	31
2.2 EXTRATO VEGETAL	34
2.2.1 <i>Myracrodruon urundeuva</i>	36
2.2.1.2 Pólen Vegetal.....	38
2.2.1.2.1 Fitoconstituintes do Pólen	41
2.3 POTENCIAL ANTIMICROBIANO DAS AGNPs.....	44
3 OBJETIVOS.....	46
3.1 OBJETIVO GERAL	46
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	46
4 METODOLOGIA.....	47
4.1 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E REAGENTES.....	47
4.2 MÉTODOS	48
4.2.1 Preparo dos Extratos de Pólen da <i>M.urundeuva</i>	48
4.2.2 Caracterização dos Extratos de Pólen.....	48
4.2.2.1 Triagem Fitoquímica.....	49
4.2.2.2 Conteúdo Fenólico Total.....	52
4.2.2.3 Atividade Antioxidante.....	53
4.2.3 Síntese Verde de Nanopartículas de Prata.....	55
4.2.3.1. Preparo da Solução de Nitrato de Prata (AgNO ₃)	55
4.2.3.2 Síntese Verde Mediada por Extrato de Pólen de <i>M. urundeuva</i>	55
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
5.1 EXTRATOS DE PÓLEN DE <i>M. URUNDEUVA</i>.....	60
5.1.1 Caracterização dos Extratos de Pólen da <i>M. urundeuva</i>	62
5.1.1.1 Triagem Fitoquímica.....	62
5.1.1.2 Conteúdo Fenólico Total.....	64
5.1.1.3 Atividade Antioxidante.....	66
5.2 SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA.....	69

5.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AGNPs.....	80
5.3.1 Tamanho e Estabilidade Coloidal: Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS) e Potencial Zeta (ELS).....	80
5.3.2 Distribuição e Concentração de NPs: Rastreamento de Nanopartículas (NTA)	85
5.3.3 Morfologia: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	88
5.3.4 Morfologia e Topografia: Microscopia de Força Atômica (AFM).....	90
5.3.5 Análise Química Elementar: Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia (EDS).....	92
5.3.6 Grupos Funcionais e Interações Químicas: Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	95
5.3.7 Estrutura Cristalina: Difração de Raios X (DRX).....	100
5.4 ESTABILIDADE DAS NANOPARTÍCULAS DE PRATA.....	102
6 CONCLUSÕES.....	106
DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	107
REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

A síntese verde constitui uma abordagem sustentável e energeticamente eficiente para a produção de nanopartículas metálicas, sendo realizada a partir de diferentes fontes biológicas, como bactérias, algas, fungos e, especialmente, extratos vegetais. Estes últimos se destacam por oferecerem um método mais simples, econômico e operacionalmente viável. A presença de fitoconstituintes associados às nanopartículas pode influenciar suas propriedades físico-químicas e biológicas, particularmente a atividade antimicrobiana (Anju *et al.*, 2021).

Nanopartículas obtidas por síntese verde utilizando extratos vegetais apresentam, predominantemente, atividade antimicrobiana, podendo ainda exibir outras propriedades em função dos metabólitos secundários presentes, como atividade anticâncer (Thatyana *et al.*, 2023). Esses sistemas são obtidos por métodos ecologicamente adequados que favorecem a biocompatibilidade do nanomaterial final, diferenciando-se das rotas químicas convencionais pelo uso de precursores de baixa toxicidade (Nandhini *et al.*, 2024). Além disso, apresentam vantagens relacionadas ao custo-benefício, estabilidade e facilidade de obtenção, quando comparadas a nanopartículas sintetizadas por vias químicas convencionais ou mediadas por microrganismos (Deshmukh; Gupta; Kim, 2019).

Do ponto de vista biológico, essas nanopartículas demonstram propriedades antioxidantes relevantes, atuando na neutralização de radicais livres e na redução do estresse oxidativo. Adicionalmente, exibem atividade anti-inflamatória, o que as torna promissoras para aplicações terapêuticas, incluindo processos de regeneração tecidual e controle de infecções (Nandhini *et al.*, 2024).

As plantas constituem uma fonte abundante de metabólitos secundários com amplo potencial farmacológico (Ali *et al.*, 2016). Entre esses compostos, destacam-se os polifenóis, que desempenham papel fundamental como agentes redutores na síntese de nanopartículas de prata (AgNPs). A composição e a concentração desses metabólitos variam entre espécies vegetais, resultando em diferenças na capacidade redutora. Consequentemente, características como tamanho, estabilidade e atividade biológica das nanopartículas estão diretamente relacionadas ao perfil fitoquímico da planta utilizada e à interação desses metabólitos com a superfície das nanopartículas (Wang *et al.*, 2024).

Embora diversos estudos já tenham explorado o uso de plantas na síntese verde de nanopartículas, a variabilidade fitoquímica entre espécies indica a necessidade de investigação contínua de novas fontes vegetais. Tal abordagem pode contribuir para o desenvolvimento de nanopartículas mais sustentáveis, biocompatíveis e com propriedades biológicas aprimoradas,

ampliando suas aplicações nas áreas de ciência dos materiais e da saúde (Kulkarni *et al.*, 2023; Khan; Piccolella; Pacifico, 2025;).

Nesse cenário, o pólen surge como uma matéria-prima de valor biotecnológico, por apresentar uma diversidade de fitoconstituintes bioativos com potencial para atuar como agentes redutores e estabilizantes. Além de sua riqueza química, a utilização do pólen oferece uma vantagem ecológica por ser obtido a partir do excedente coletado por abelhas por meio de coletores nas colmeias, seu aproveitamento ocorre sem causar qualquer prejuízo físico ou reprodutivo à planta, contornando o impacto ambiental gerado pela colheita direta de folhas, cascas ou flores.

Contudo, apesar de a *Myracrodruon urundeuva* ser amplamente reconhecida por suas propriedades medicinais, há uma persistente lacuna na literatura científica quanto ao estudo fitoquímico do seu pólen e, principalmente, ao seu emprego em aplicações tecnológicas avançadas, como a síntese verde de AgNPs. Assim, a exploração dessa matriz ainda pouco explorada representa uma oportunidade estratégica de integrar a conservação ambiental ao desenvolvimento de novos materiais multifuncionais.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial do polén da *Myracrodruon urundeuva* (aroeira) como mediador na síntese verde de AgNPs, bem como realizar a caracterização físico-química das nanopartículas obtidas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Esse tópico apresenta o embasamento teórico e uma revisão dos trabalhos presentes na literatura referentes a síntese verde de nanopartículas de prata, permitindo assim uma visão crítica do estado-da-arte relacionado ao tema específico do presente trabalho.

2.1 Síntese de Nanopartículas

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da norma ABNT NBR ISO 80004-1:2024, os nanomateriais são definidos como materiais que apresentam qualquer dimensão localizada na nanoescala (10^{-9} unidades), reconhecendo como faixa de comprimento aproximadamente entre 1 e 100 nanômetros (nm). Materiais nessa escala apresentam propriedades distintas em relação ao seu comportamento na escala macroscópica (ABNT, 2024).

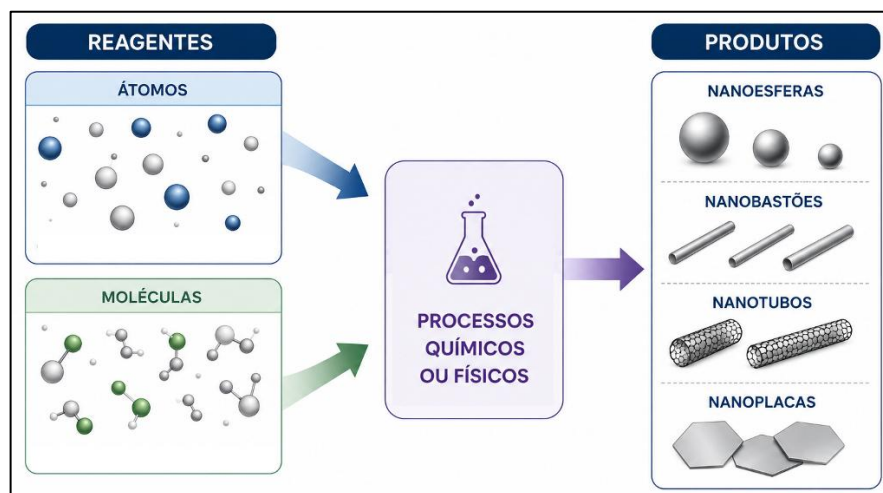
A nanotecnologia compreende o conjunto de conhecimentos científicos e tecnológicos voltados ao controle e à modificação da matéria em níveis atômico, molecular e supramolecular, geralmente envolvendo dimensões inferiores a 100 nanômetros. Devido às propriedades singulares que emergem nessa escala, essa área tem sido amplamente reconhecida como uma plataforma tecnológica inovadora e multifuncional. Estudos recentes destacam sua aplicação em diversos campos, incluindo a área médica, a eletrônica, os sistemas energéticos, o controle ambiental e a ciência dos materiais. No contexto da saúde, os nanomateriais assumem papel estratégico, contribuindo para aplicações médicas inovadoras, como sistemas de diagnóstico portátil e abordagens associadas à medicina regenerativa (Dabare; Rajapaksha; Munaweera, 2025).

À medida que ocorre a redução das dimensões das partículas, observa-se um aumento significativo da razão entre área superficial e volume, o que resulta na intensificação de propriedades químicas, físicas e biológicas quando comparadas a pesquisas feitas por materiais de maior escala dimensional (Ahmad *et al.*, 2023).

No âmbito da ciência dos materiais em escala nanométrica, emprega-se um conjunto de métodos direcionados à fabricação de produtos com arranjos atômicos controlados, obtidos por meio da organização de átomos e moléculas. A produção de nanomateriais fundamenta-se, principalmente, em duas estratégias complementares (Figura 1): a abordagem ascendente (*bottom-up*), definida pela construção de nanoestruturas a partir de unidades atômicas e

moleculares, e a abordagem descendente (*top-down*), que envolve uma redução progressiva de estruturas originalmente em microescala até dimensões nanométricas (Begmatova *et al.*, 2024).

Figura 1 - Obtenção de nanomateriais por métodos físicos e químicos.



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

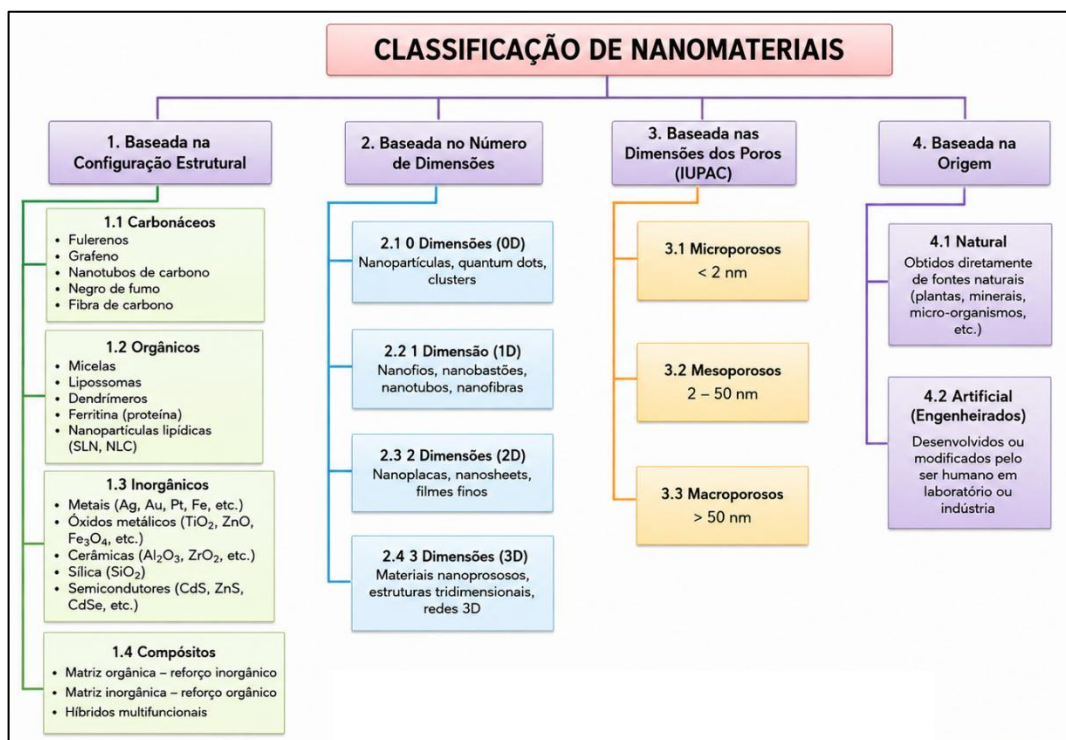
Nesse contexto, os nanomateriais podem ser organizados em diferentes classes, conforme características específicas que influenciam seu comportamento e suas aplicações. A Figura 2 ilustra essa classificação em cinco grupos distintos, levando em consideração aspectos como dimensão, origem, organização estrutural, propriedades de porosidade e potencial toxicidade (Mekuye; Abera, 2023).

Dentre as diferentes classes de nanomateriais, as nanopartículas (NPs) metálicas destacam-se em função de suas propriedades físico-químicas singulares e de seu amplo potencial de aplicação. Essas propriedades decorrem principalmente da elevada razão área superficial/volume e dos efeitos decorrentes da redução do tamanho para a escala nanométrica, que modificam significativamente o comportamento dos materiais quando comparados aos seus equivalentes macroscópicos. Essa característica favorece processos catalíticos, aumenta a capacidade de adsorção de moléculas e intensifica as interações entre as NPs e diferentes sistemas biológicos (Ahmad *et al.*, 2023; Burlec *et al.*, 2023).

As NPs metálicas apresentam propriedades ópticas únicas decorrentes do fenômeno conhecido como Ressonância de Plasmons de Superfície Localizada. Esse fenômeno resulta da oscilação coletiva dos elétrons livres presentes na superfície metálica quando excitados pela radiação eletromagnética, promovendo intensa absorção e espalhamento da luz em comprimentos de onda específicos. A posição e a intensidade dessa banda plasmônica

dependem do tamanho, da forma, da composição química, do estado de agregação das NPs e do meio em que estão dispersas (Shahalaei *et al.*, 2024).

Figura 2 - Classificação geral dos nanomateriais.



Fonte: Adaptado de Mekuye; Abera (2023).

Além das propriedades ópticas, esses nanomateriais apresentam propriedades eletrônicas e catalíticas superiores às observadas nos materiais macroscópicos. O aumento da densidade de sítios ativos superficiais favorece a transferência eletrônica e reduz a energia de ativação de diversas reações químicas, tornando esses materiais excelentes catalisadores para processos industriais, degradação de contaminantes e conversão de energia. Em determinados metais, como ferro, níquel e cobalto, também podem ser observadas propriedades magnéticas (Gautam *et al.*, 2023).

Embora exista uma ampla variedade de metais na natureza, apenas alguns possuem características intrínsecas que permitem a obtenção de NPs com elevada estabilidade coloidal, propriedades físico-químicas diferenciadas e desempenho funcional, tornando-os mais adequados para aplicações em nanotecnologia (Ahmad *et al.*, 2023). Esses materiais podem ser obtidos por meio de abordagens construtivas ou destrutivas, dependendo da estratégia de análise adotada. Sais de metais como alumínio (Al), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobalto (Co), cobre (Cu), ferro (Fe), ouro (Au), prata (Ag) e zinco (Zn) são frequentemente empregados na obtenção

de nanopartículas metálicas. Em decorrência dos efeitos quânticos e da razão elevada entre área superficial e volume, essas NPs apresentam interação elevada com a radiação na região do ultravioleta-visível, além de exibir propriedades antibacterianas, catalíticas, elétricas e térmicas superiores às de seus equivalentes em escala macroscópica. Tais características tornam os nanomateriais metálicos especialmente atrativos para aplicações científicas e tecnológicas, por possuírem boas propriedades ópticas (Mekuye; Abera, 2023).

2.1.1 Nanopartículas de prata

As nanopartículas de prata (AgNPs) destacam-se pelo amplo uso em aplicações comerciais. Historicamente, compostos à base de prata foram utilizados no controle de infecções e, na ciência contemporânea, permanecem amplamente investigados e empregados. A contínua utilização está relacionada com sua expressiva atividade antimicrobiana, a qual se manifesta mesmo em baixas concentrações, e associadas à área superficial elevada e características desses nanomateriais (Kerimkulova *et al.*, 2025).

Entre essas características, destacam-se o reduzido tamanho das partículas, a alta energia superficial e a capacidade de liberar íons Ag^+ de forma controlada. Em conjunto, esses fatores intensificam a interação das AgNPs com microrganismos (Gautam *et al.*, 2023; Shahalaei *et al.*, 2024).

As AgNPs são nanomateriais inorgânico de grande relevância, sobretudo em razão de sua elevada relação área superficial/volume quando comparadas à prata em estado macroscópico. As AgNPs coloidais apresentam propriedades singulares, tais como alta estabilidade química e atividade catalítica, alta área superficial específica, elevada capacitância da dupla camada elétrica, alta condutividade térmica e elétrica, além do espalhamento Raman intensificado por superfície (SERS) e de uma ressonância plasmônica de superfície (SPR) bem definida (Shivananda; Lakshmeesha; Swaroop, 2025).

Essas NPs também despertam grande interesse científico em virtude de sua elevada atividade antimicrobiana, inclusive contra bactérias resistentes a fármacos, além de apresentarem notável ação germicida em infecções de origem bacteriana. O efeito antimicrobiano das AgNPs está associado, principalmente, à liberação de íons prata (Ag^+), os quais contribuem para o aumento da permeabilidade da membrana celular e para a formação de espécies reativas de oxigênio, ocasionando danos às paredes celulares. Contudo, a propensão à agregação das AgNPs e possíveis alterações no perfil de liberação de Ag^+ em solução aquosa

podem reduzir a eficiência antimicrobiana desses nanomateriais, especialmente durante aplicações de uso prolongado (Tripathi; Goshisht, 2022).

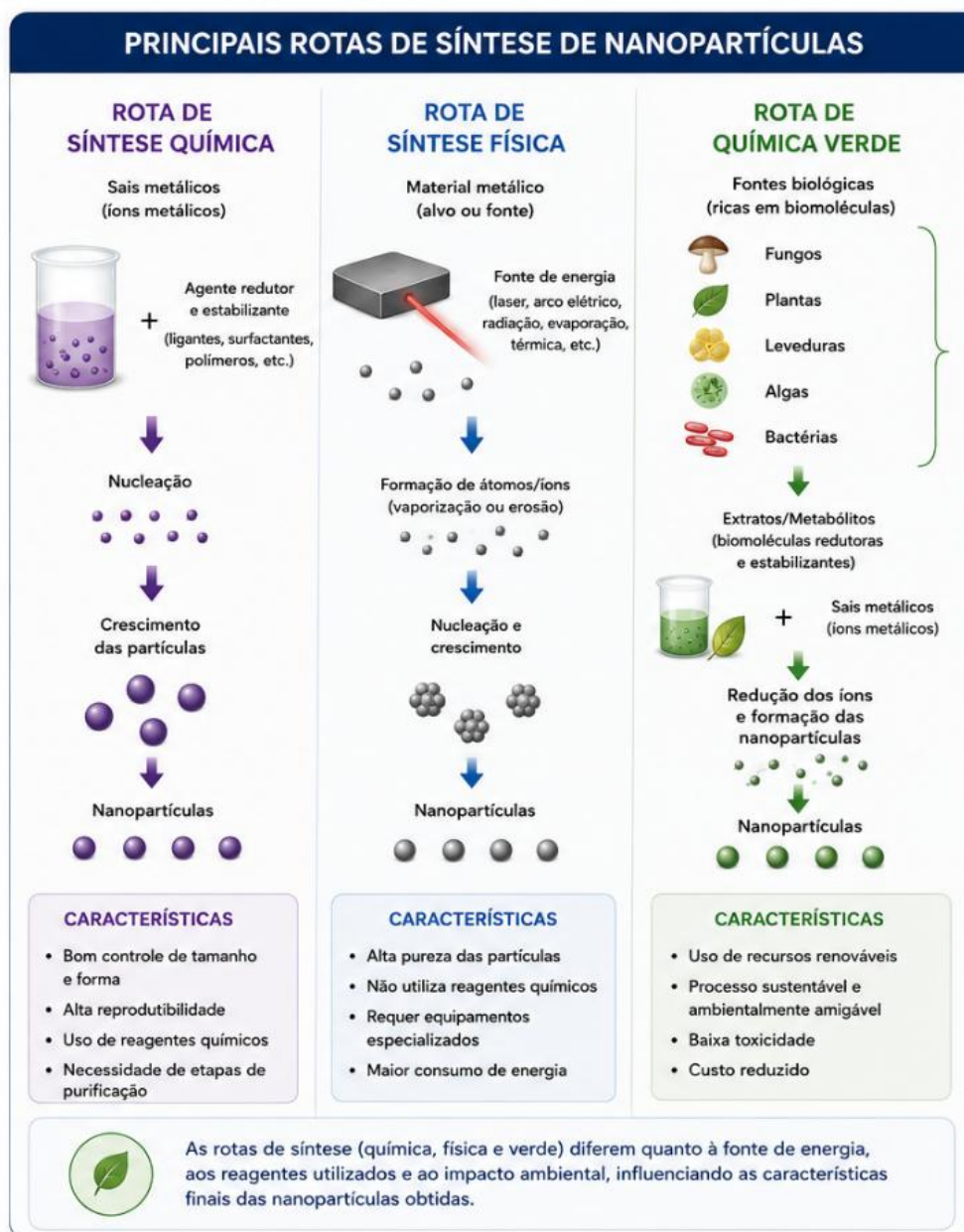
Embora as AgNPs sejam frequentemente tratadas como um único agente antibacteriano, sua atividade biológica resulta de dois mecanismos distintos, porém interligados: os efeitos diretos das próprias NPs e a ação dos íons de prata liberados a partir de sua superfície. As AgNPs atuam principalmente por meio do contato direto com as células bacterianas, podendo aderir à membrana, causar danos estruturais e, em alguns casos, ser internalizados. Por outro lado, os íons Ag^+ exercem sua atividade antimicrobiana ao interagir com componentes essenciais no interior da célula, como proteínas, DNA e enzimas, comprometendo funções metabólicas e o equilíbrio celular. A intensidade e a predominância desses mecanismos dependem das características físico-químicas das AgNPs, como tamanho, carga superficial, tipo de revestimento e das condições do meio em que se encontram (Karataş *et al.*, 2026).

As propriedades físicas, químicas e ópticas das AgNPs exercem um papel fundamental em seu desempenho, tornando essencial a consideração de determinadas características durante o processo de síntese. Entre os principais parâmetros a serem controladas destacam-se a distribuição de tamanho das partículas, as propriedades de superfície, a composição química, a morfologia aparente, a taxa de dissolução, bem como a natureza dos agentes redutores e dos agentes estabilizantes ou encapsulantes empregados (Tripathi; Goshisht, 2022).

Recentemente, as AgNPs têm recebido crescente atenção em razão da expressiva propriedade antimicrobiana, aliada a uma relação favorável custo-benefício. Essas NPs podem ser sintetizadas por diferentes rotas (Figura 3), sendo a redução química o método mais empregado, utilizando agentes redutores como borohidreto de sódio. Entretanto, as AgNPs obtidas por vias químicas têm sua acessibilidade limitada, devido à toxicidade possivelmente associada a reagentes usados no processo de síntese, o que restringe sua aplicação (Ahmad *et al.*, 2023).

Em complemento a essa representação visual, a Tabela 1 sistematiza os diferentes métodos de descrições descritas, relacionando seus princípios de funcionamento às respectivas vantagens e limitações. Esta comparação permite uma análise crítica das rotas disponíveis, destacando aspectos como controle do tamanho das partículas, eficiência do processo, impacto ambiental, custo e aplicabilidade biológica, fornecendo subsídios para a escolha do método mais adequado (Sharma *et al.*, 2022).

Figura 3 - Representação esquemática de diferentes rotas de síntese de AgNPs.



Fonte: Adaptado de Tripathi; Goshisht (2022).

A obtenção de NPs pode ser compreendida a partir de dois conceitos distintos e complementares, sendo a abordagem de obtenção e rota de síntese. Enquanto a rota de síntese corresponde ao método específico utilizado para promover essa formação, a abordagem refere-se à estratégia geral empregada para a formação das NPs, sendo classificadas em duas abordagens (Figura 4). Na abordagem *top-down*, as NPs são produzidas pela redução do tamanho de materiais macroscópicos por meio de processos físicos ou mecânicos, resultando na fragmentação do material até a escala nanométrica. Em contrapartida, a abordagem *bottom-up* baseia-se na organização de átomos, íons ou moléculas, que passam por etapas de nucleação

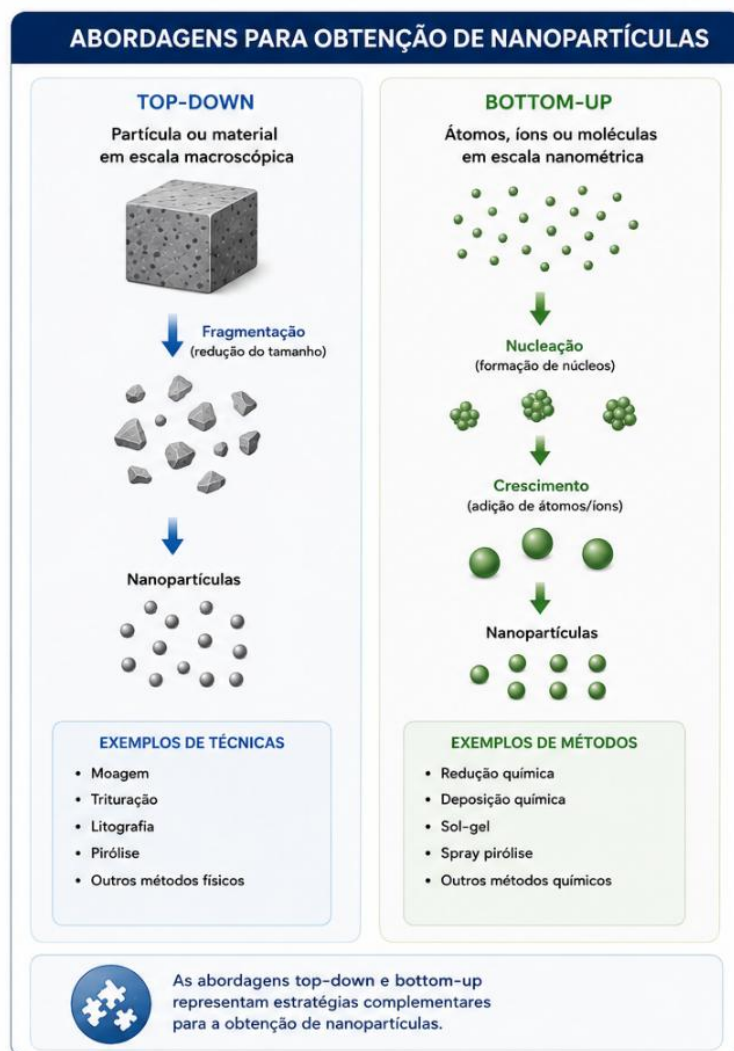
e crescimento para formar NPs com maior controle sobre tamanho, morfologia e distribuição. Dessa forma, as abordagens estabelecem o princípio de formação das NPs, ao passo que as rotas de síntese determinam os mecanismos e as condições experimentais empregados para sua obtenção (Jain *et al.*, 2024).

Tabela 1 - Síntese de AgNPs utilizando diferentes métodos: vantagens e desvantagens.

<i>Métodos de síntese</i>	<i>Princípio de síntese</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<i>Físico</i>	Utiliza energia física para obter AgNPs com distribuição de tamanho estreita.	A radiação atua como agente redutor, dispensando o uso de substâncias químicas perigosas e permitindo a produção rápida de AgNPs, isentas de contaminação e sem necessidade de purificação adicional.	Caro, com baixo rendimento, alto consumo de energia, contaminação do solvente e distribuição aleatória.
<i>Químico</i>	Os íons de prata são reduzidos a átomos de prata por meio de agentes redutores químicos.	Produção simples, econômica e de alto rendimento.	Toxicidade dos reagentes, necessidade de etapas adicionais de purificação devido à contaminação superficial, baixa uniformidade de tamanho, tendência à auto agregação e geração de subprodutos potencialmente perigosos durante o processo.
<i>Fotoquímico</i>	Através da utilização de intermediários gerados fotoquimicamente, ocorre a produção de cursos metálicos e a redução de íons metálicos.	Um processo limpo, com boa resolução espacial e praticidade.	São necessários custos elevados e um ambiente experimental.
<i>Biológico</i>	A redução de íons de prata a átomos de prata por meio de biomoléculas é um processo derivado de organismos vivos.	Custo-benefício e abundância de matérias-primas.	Controle sobre tamanho e forma das nanopartículas, variabilidade entre lotes do material biológico pode gerar dificuldade de reprodutibilidade.

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

Figura 4 - Representação esquemática das abordagens para obtenção de NPs.



Fonte: Adaptado de Tripathi; Goshisht (2022).

A avaliação do tamanho, morfologia, estabilidade coloidal e nanoestrutura das AgNPs requer a aplicação de um conjunto integrado de técnicas de caracterização, uma vez que nenhuma metodologia isolada é capaz de fornecer todas as informações possíveis. Nesse contexto, diferentes técnicas analíticas são empregadas de forma complementar para a caracterização completa das NPs, incluindo espectroscopia UV-Vis, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia eletrônica de transmissão (MET), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e difração de raios X (DRX), além de técnicas específicas à avaliação do comportamento coloidal, como espalhamento dinâmica de luz (DLS), potencial zeta e análise de rastreamento de nanopartículas (NTA). Cada uma dessas metodologias fornece informações específicas sobre propriedades ópticas, morfológicas, estruturais, químicas e de estabilidade das NPs (Shahzadi *et al.*, 2025). A Tabela 2 apresenta

um resumo das principais técnicas de caracterização utilizadas para AgNPs, bem como as informações obtidas a partir de cada método.

Tabela 2 - Técnicas de caracterização de AgNPs.

<i>Técnicas de caracterização</i>	<i>Principais informações obtidas</i>	<i>Aplicação dos dados obtidos</i>
<i>Análise de Rastreamento de Nanopartículas (NTA)</i>	Tamanho individual das partículas e concentração numérica.	Análise da distribuição de tamanho partícula a partícula e quantificação da concentração de AgNPs em suspensão.
<i>Difração de Elétrons em Área Seleccionada (SAED)</i>	Estrutura cristalina local.	Avaliação da cristalinidade e organização estrutural das AgNPs em escala nanométrica.
<i>Difração de Raios X (DRX)</i>	Estrutura cristalina e grau de cristalinidade.	Confirmação da fase cristalina da prata metálica (Ag ⁰) e cálculo do tamanho de cristalito.
<i>Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS)</i>	Tamanho hidrodinâmico e índice de polidispersidade (PDI).	Avaliação da distribuição de tamanho em suspensão e do comportamento coloidal das AgNPs.
<i>Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)</i>	Grupos funcionais e interações químicas.	Identificação de biomoléculas do extrato vegetal envolvidas na redução, estabilização e revestimento das AgNPs.
<i>Espectroscopia UV-Visível (UV-Vis)</i>	Propriedades ópticas e ressonância plasmônica de superfície (SPR).	Confirmação da formação das AgNPs, monitoramento da cinética de síntese, avaliação indireta do tamanho e estabilidade ao longo do tempo.
<i>Microscopia de Força Atômica (AFM)</i>	Morfologia, topografia e rugosidade superficial.	Avaliação da morfologia, rugosidade, distribuição e formação de aglomerados das AgNPs.
<i>Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET)</i>	Tamanho real, morfologia interna e distribuição de partículas.	Determinação precisa do tamanho nanométrico e visualização da homogeneidade das AgNPs.
<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	Morfologia superficial e tamanho das partículas.	Análise da forma, distribuição de tamanho e presença de aglomerados.
<i>Potencial zeta</i>	Carga superficial e estabilidade coloidal.	Determinação da estabilidade da suspensão coloidal e tendência à agregação.

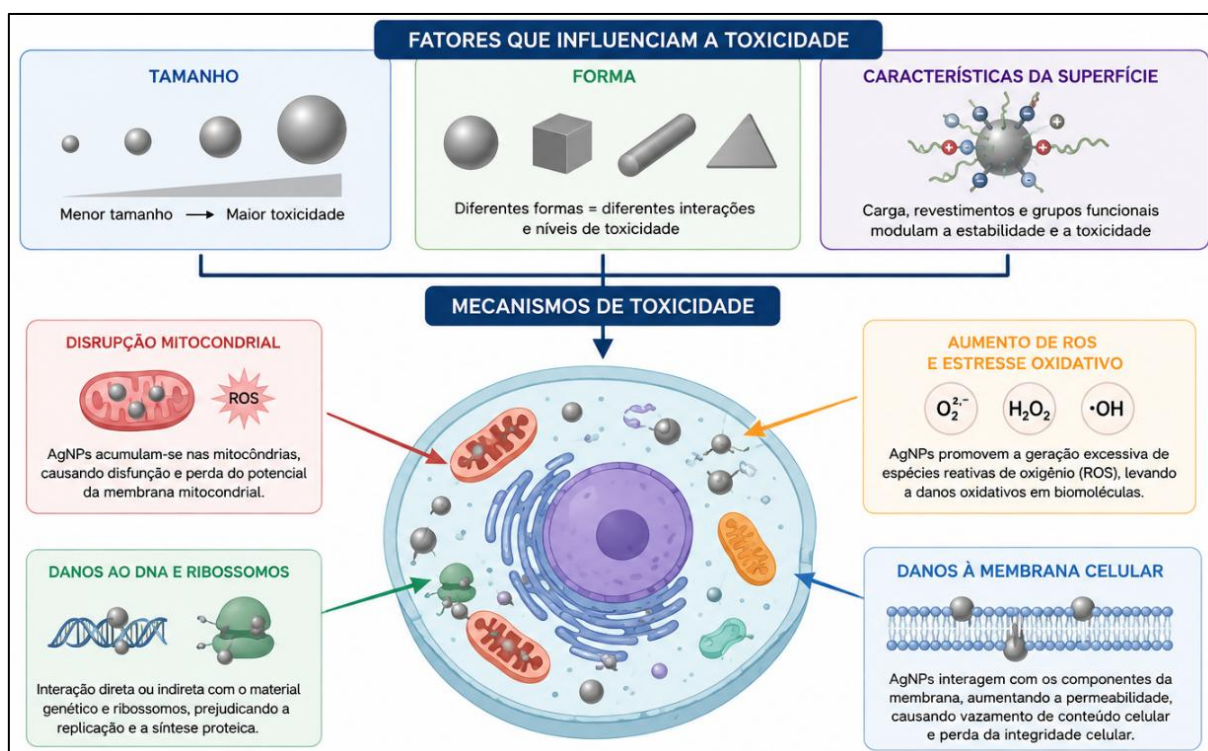
Fonte: Adaptado de Shahzadi *et al.* (2025).

2.1.1.1 Toxicidade das AgNPs

Os possíveis efeitos adversos das AgNPs devem ser analisados com cautela, uma vez que a ampliação de seu uso tem gerado preocupações quanto à toxicidade para a saúde humana e para o meio ambiente. Essa toxicidade depende de diversos fatores, como a estabilidade das NPs, a dose administrada e as características químicas da superfície, que influenciam diretamente a agregação de partículas no organismo. Além disso, as propriedades físico-químicas das AgNPs, como tamanho, forma e carga superficial, desempenham papel determinante em seu potencial tóxico (

Figura 5). Os mecanismos de toxicidade associados aos AgNPs variam de acordo com o sistema biológico associado, sendo os mais relevantes a alteração e ruptura da membrana celular e a produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (ROS). Esses processos comprometem o funcionamento das organelas celulares e levam a danos estruturais podem afetar significativamente. Dessa forma, as características morfológicas e superficiais das AgNPs influenciam diretamente sua interação com as células, determinando a intensidade dos efeitos biológicos observados (Karataş *et al.*, 2026).

Figura 5 - Mecanismos de toxicidade das AgNPs.



Fonte: Adaptado de Karataş *et al.* (2026).

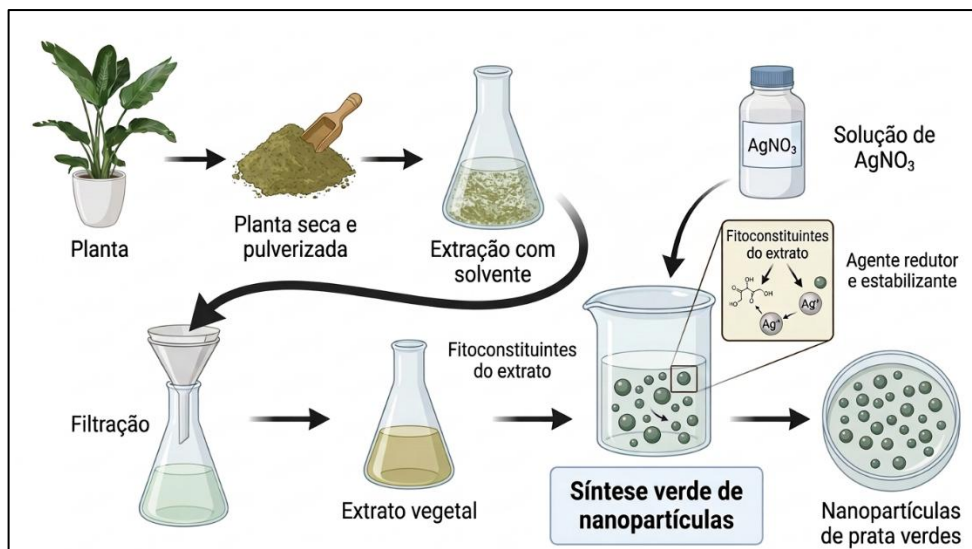
A utilização de substâncias químicas tóxicas em processos de síntese convencional constitui uma preocupação significativa, uma vez que pode provocar efeitos adversos tanto ao meio ambiente quanto aos organismos vivos. Diante desse cenário, observa-se um interesse crescente no desenvolvimento de rotas mais ecológicas para a síntese de AgNPs. Considerando a demanda por processos sustentáveis na obtenção de nanomateriais, diversas abordagens têm sido propostas e aprimoradas, com base em mecanismos de redução bioinspirados, os quais são, de modo geral, classificados como métodos biológicos (Sharma *et al.*, 2022).

2.1.1.2 Síntese Verde de AgNPs

Conforme observado na Figura 3, existem diferentes rotas de preparação para a síntese de AgNPs. Entretanto, a elevada toxicidade e o uso intensivo de reagentes químicos em muitos desses métodos limitam sua aplicação em sistemas biológicos. Diante disso, tem-se intensificado a busca por abordagens alternativas para a produção de AgNPs que sejam economicamente viáveis, seguras, ambientalmente sustentáveis e facilmente adaptáveis. Nesse contexto, as abordagens biológicas têm se destacado como uma solução promissora, uma vez que a propriedade verde emprega componentes biológicos, como algas, bactérias, fungos e outros organismos, para a redução de íons metálicos, configurando uma rota ecologicamente correta para a obtenção de NPs. Entre esses métodos, a síntese que utiliza extratos vegetais é considerada a mais vantajosa, pois utiliza fitoconstituintes naturais das plantas que atuam como agentes redutores, estabilizantes e de revestimento, suprimindo a necessidade de produtos químicos tóxicos (Sharma *et al.*, 2025b).

Essas biomoléculas não apenas facilitam a formação das AgNPs, mas também conferem ao nanomaterial propriedades físico-químicas diferenciadas e uma elevada relação área superficial/volume, fatores essenciais para suas atividades biológicas. Durante a síntese (Figura 6), os fitoconstituintes promovem a redução dos íons Ag^+ e permanecem adsorvidos à superfície das partículas. Essa camada de revestimento (*capping*) é fundamental para assegurar a estabilidade coloidal e a preservação das características funcionais das NPs ao longo do tempo (Ahmad *et al.*, 2023).

Figura 6 - Processo da síntese verde de AgNPs usando extrato vegetal.



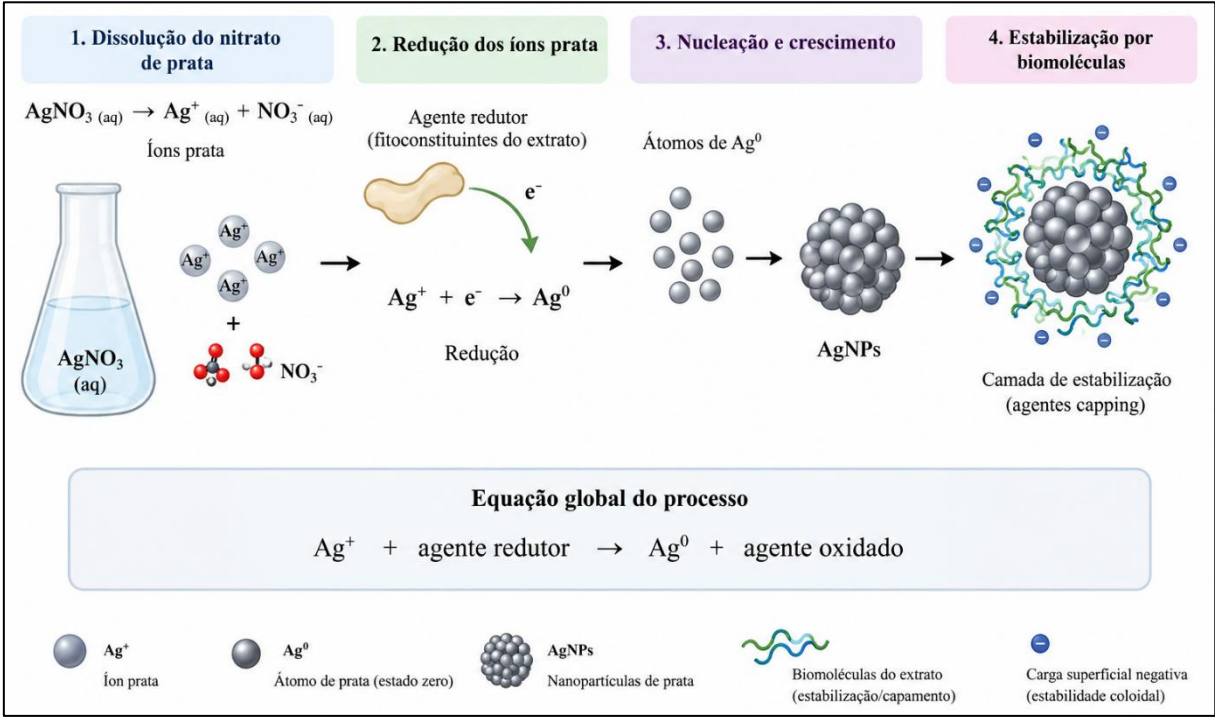
Fonte: Própria autora com auxílio da ferramenta de inteligência artificial ChatGPT (OpenAI) (2026).

Os extratos vegetais apresentam uma ampla variedade de fitoconstituintes e biomoléculas com capacidade redutora, como flavonoides, terpenoides oxigenados, aldeídos, cetonas, amidas, proteínas, polissacarídeos e vitaminas, os quais atuam na redução dos íons metálicos. Entre as diferentes abordagens de síntese verde, a rota mediada por extratos vegetais se destaca por ser mais rápida, economicamente viável e ambientalmente sustentável. Além disso, o emprego de extratos vegetais com propriedades antimicrobianas pode conferir às NPs maior eficácia contra microrganismos, devido à ação conjunta dos metabólitos bioativos e da prata (Tripathi; Goshisht, 2022).

O mecanismo de síntese fundamenta-se na interação entre fitoquímicos e o precursor metálico (Figura 7), resultando na formação de nanoestruturas onde os grupos orgânicos aderem à superfície metálica para prevenir a coalescência e garantir a estabilidade coloidal (Shahzadi *et al.*, 2025).

Durante a síntese verde, parâmetros como a concentração do extrato vegetal e do íon precursor, o tempo de síntese, o pH e a temperatura exercem influência direta as NPs formadas (Tabela 3). Em especial, a concentração e a composição química dos extratos vegetais desempenham papel determinante no controle do rendimento do processo e das propriedades finais dos AgNPs. Assim, a otimização dessas variáveis é fundamental para a obtenção de NPs com características reprodutíveis e adequadas às aplicações biológicas pretendidas (Sharma *et al.*, 2022).

Figura 7 - Mecanismo esquemático da redução de íons prata e formação de AgNPs por agentes redutores naturais.



Fonte: Própria autora com auxílio da ferramenta de inteligência artificial ChatGPT (OpenAI) (2026).

Tabela 3 - Fatores que afetam os métodos de síntese verde.

Fatores	Descrição	Impacto na síntese de AgNPs
<i>pH</i>	pH ácido ou alcalino.	O pH influencia os processos de nucleação e crescimento de AgNPs ao alterar a carga em suas superfícies. Partículas menores são frequentemente produzidas em pH mais alto, mas a agregação pode ocorrer em pH mais baixo.
<i>Temperatura</i>	Temperatura durante o processo de síntese.	Temperaturas mais elevadas podem causar agregação; temperaturas mais baixas promovem taxas de nucleação e redução, resultando em NPs em menor número e mais homogêneas.
<i>Proporção</i>	Quantidade de agente redutor e precursor metálico.	A redução da quantidade de agente impacta a estabilidade e a taxa de redução; maiores quantidades de precursor aumentam os sítios de nucleação, produzindo átomos reduzidos, mas também podem promover a acumulação.
<i>Tempo</i>	Tempo de reação.	Afeta o desenvolvimento e a maturação das NPs. Formas maiores e mais definidas podem resultar de durações mais longas, mas tempo excessivo também pode levar à agregação e à polidispersão.

Fonte: Shahzadi *et al.* (2025).

A estabilidade coloidal das AgNPs está diretamente relacionada à sua carga superficial, que é expressa pelo potencial zeta, cujos valores inferiores a -25 mV indicam estabilidade coloidal, uma vez que a forte repulsão eletrostática reduz a tendência à aglomeração das NPs. O potencial zeta corresponde à diferença de potencial elétrico entre a superfície da partícula e o meio dispersante, sendo um importante indicador da repulsão eletrostática entre partículas em suspensão. Dessa forma, AgNPs que apresentam potenciais zeta condizentes com o valor estipulado tendem a permanecer bem dispersas no meio, o que favorece uma maior área de contato com microrganismos e, conseqüentemente, resulta em maior atividade antibacteriana (Karataş *et al.*, 2026).

Assim, as variações de pH durante a síntese de AgNPs exercem influência significativa sobre o potencial zeta e, portanto, sobre a estabilidade coloidal das AgNPs. De modo geral, o aumento do pH, especialmente na faixa de 7 a 9, promove um incremento no valor do potencial zeta, favorecendo a obtenção de coloides mais estáveis. Em condições de pH mais alcalinos, as AgNPs tendem a apresentar menor propensão à aglomeração, resultando em sistemas coloidais mais homogêneos. Essa maior estabilidade reflete-se diretamente no desempenho biológico, uma vez que AgNPs apresentam atividade antibacteriana mais intensa e maior resistência à agregação em ambientes biológicos, quando comparadas com sondas estabilizadas apenas por mecanismos eletrostáticos menos eficientes (Salazar-Bryam *et al.*, 2021).

2.2 Extrato Vegetal

A síntese verde de AgNPs tem como objetivo reduzir o uso de substâncias químicas perigosas, empregando compostos bioativos presentes em extratos vegetais como agentes redutores e estabilizantes, os quais podem ser obtidos de diferentes partes das plantas. Nos últimos anos, diversas espécies vegetais foram exploradas para a produção de AgNPs, evidenciando uma ampla variedade de estratégias baseadas em plantas. A composição química desses extratos varia de acordo com a espécie vegetal, o que influencia diretamente a eficiência do processo e as características das NPs formadas. De modo geral, os principais metabólitos envolvidos são compostos secundários, como compostos fenólicos, saponinas e terpenoides oxigenados, os quais contribuem com a nucleação e o crescimento das partículas, destacando-se os compostos fenólicos pela sua elevada capacidade de doação de elétrons (Eker *et al.*, 2025).

O mecanismo de síntese envolve, de forma geral, uma interação entre o extrato vegetal e um precursor metálico nitrato de prata (AgNO_3). Os compostos bioativos presentes no extrato promovem simultaneamente a redução dos íons metálicos e o recobrimento superficial das NPs,

evitando sua agregação. Esse processo resulta na formação de sistemas mais produtivos e biologicamente ativos, sendo considerado eficiente, de baixo custo e ecologicamente correto. A diversidade de fitoquímicos presentes nos extratos vegetais exerce papel fundamental na síntese verde, influenciando a nucleação, o crescimento e a estabilização das NPs e, consequentemente, suas propriedades físico-químicas, como tamanho, morfologia e estabilidade coloidal (Thomas *et al.*, 2024).

O uso de plantas medicinais na síntese de AgNPs tem como base a atividade biológicas dessas plantas geralmente associadas a compostos fenólicos de várias subclasses. A escolha da planta interfere na obtenção das NPs, pois nem toda planta possui potencial redutor necessário para a redução eficiente de íons prata a prata metálica. Além disso, a composição fitoquímica varia entre os diferentes órgãos de uma mesma planta, como folhas, flores, caules e raízes. Adicionalmente, a escolha do solvente para a obtenção do extrato e as condições de síntese exercem influência significativa sobre a formação das AgNPs, afetando características como tamanho, morfologia, estabilidade coloidal e, consequentemente, suas aplicações biológicas (Dubey; Shukla; Hussain, 2023).

Estas últimas são, em parte, decorrentes da composição química do extrato vegetal, uma vez que biomoléculas adsorvidas à superfície das NPs podem contribuir para sua funcionalização e potencializar determinadas atividades biológicas. Nesse contexto, diversas plantas medicinais ricas em compostos fenólicos e antioxidantes têm sido empregadas com sucesso na síntese verde de AgNPs, destacando-se espécies como *Azadirachta indica* (nim), *Ocimum sanctum* (manjerição-sagrado) e *Curcuma longa* (cúrcuma). Além de suas reconhecidas propriedades antimicrobianas, anti-inflamatórias e antioxidantes, os fitoconstituintes dessas espécies promovem o recobrimento (*capping*) e a estabilização das NPs, reforçando a integração entre o conhecimento etnobotânico e o desenvolvimento de nanomateriais com potencial aplicação nas áreas da saúde, biotecnologia e remediação ambiental (Shahzadi *et al.*, 2025).

Dentre as espécies vegetais de interesse, destaca-se a *Myracrodruon urundeuva* (aroeira), amplamente utilizada na medicina tradicional devido às suas propriedades terapêuticas. Diferentes partes da planta, como casca, folhas, flores e pólen, apresentam elevada concentração de compostos fenólicos, especialmente flavonoides e taninos, metabólitos associados às atividades antimicrobiana, anti-inflamatória, antioxidante e cicatrizante. Estudos recentes têm demonstrado o potencial farmacológico de *M. urundeuva*, com aplicações no tratamento de processos inflamatórios, infecções e na regeneração tecidual (Sabóia Guerra Diógenes *et al.*, 2024).

Apesar do amplo reconhecimento de suas propriedades bioativas, os relatos sobre a utilização dessa espécie na síntese verde de AgNPs ainda são escassos, particularmente empregando extratos de pólen. Essa lacuna evidencia o potencial ainda inexplorado desse material como fonte de agentes redutores e estabilizantes para a síntese de AgNPs, reforçando a importância de estudos voltados ao desenvolvimento de rotas sustentáveis para a obtenção de nanomateriais com aplicações biomédicas e biotecnológicas.

2.2.1 *Myracrodruon urundeuva*

A espécie *M. urundeuva* (Figura 8), pertencente à família Anacardiaceae, ocorre predominantemente nos biomas Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica e apresenta elevado potencial econômico, ecológico e farmacológico. Diferentes órgãos da planta, incluindo casca, folhas, flores e pólen, são ricos em compostos fenólicos, especialmente taninos e flavonoides, aos quais são atribuídas diversas atividades biológicas. A casca do caule, em particular, é tradicionalmente utilizada na medicina popular devido às suas propriedades cicatrizantes, anti-inflamatórias e antimicrobianas, sendo empregada no tratamento de feridas, gastrites e outras afecções. Essas propriedades têm despertado crescente interesse científico, especialmente em estudos voltados ao desenvolvimento de produtos biotecnológicos e à síntese verde de nanomateriais (De Souza *et al.*, 2022).

Figura 8 - Espécie adulta da *Myracrodruon urundeuva* (aroeira) e flores da planta.

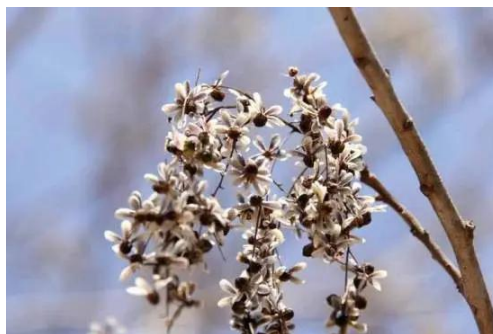


Fonte: Sítio da Mata (sd).

Diversos estudos atribuem à *M. urundeuva* importantes propriedades terapêuticas, destacando-se sua atividade anti-inflamatória. Na medicina tradicional, a casca do caule é amplamente utilizada no tratamento de inflamações ovarianas, infecções do trato urinário e doenças respiratórias, enquanto as raízes são empregadas no alívio de sintomas reumáticos e as folhas no tratamento de úlceras. Estudos farmacológicos demonstraram que os extratos alcoólicos e aquosos da casca apresentam expressiva atividade antiulcerogênica, atribuída principalmente às suas propriedades anticolinérgicas e anti-histamínicas, reduzindo significativamente lesões gástricas experimentalmente induzidas. Além disso, taninos isolados da casca exibem reconhecidas atividades anti-inflamatória, analgésica e antiulcerogênica, reforçando o potencial terapêutico da espécie (Barbosa *et al.*, 2022; Domingos; Silva, 2020; Coradin; Camillo; Pareyn, 2018).

Nas folhas de *M. urundeuva* foram identificados diversos compostos bioativos, destacando-se compostos fenólicos, especialmente flavonoides como quercetina, aromadendrina e agatisflavona. Esses metabólitos secundários apresentam reconhecidas atividades antioxidante, anti-inflamatória e antimicrobiana, sendo considerados os principais responsáveis pelo potencial farmacológico da espécie (Aguiar Galvão *et al.*, 2018). Diversos autores também relatam elevadas concentrações de compostos fenólicos, taninos e flavonoides nas folhas e na casca de *M. urundeuva* (Aquino *et al.*, 2019; Machado *et al.*, 2016). Entretanto, estudos específicos sobre a composição fitoquímica das flores, especialmente do pólen, ainda são escassos na literatura. As flores de *M. urundeuva* (Figura 9) apresentam características reprodutivas típicas de espécies dióicas, nas quais indivíduos masculinos e femininos produzem estruturas florais distintas, sendo o pólen essencial para o fluxo gênico e a reprodução da espécie (Gaino *et al.*, 2010). Embora a composição química das flores e do pólen ainda tenha sido pouco explorada, é esperado que essas estruturas também contenham compostos fenólicos e outros metabólitos secundários, uma vez que essas substâncias desempenham funções importantes na proteção contra estresses ambientais, na defesa química e na atração de polinizadores. Essa hipótese reforça o potencial do pólen de *M. urundeuva* como fonte de biomoléculas capazes de atuar como agentes redutores e estabilizantes na síntese verde de AgNPs.

Figura 9 - Flores de *M. urundeuva* (aroeira).



Fonte: Coradin; Camillo; Pareyn (2018).

Considerando as características botânicas, a ampla distribuição geográfica e o reconhecido potencial bioativo de *M. urundeuva*, torna-se relevante aprofundar a investigação não apenas da espécie como um todo, mas também de estruturas específicas capazes de concentrar compostos de interesse biológico. Entre essas estruturas, destaca-se o pólen, que, além de desempenhar papel fundamental no ciclo reprodutivo das plantas, apresenta composição química complexa e rica em metabólitos secundários. Essas características tornam o pólen uma matriz promissora para a prospecção de biomoléculas com potencial aplicação biotecnológica, incluindo seu emprego como fonte de agentes redutores e estabilizantes na síntese verde de AgNPs.

2.2.1.2 Pólen Vegetal

A apiterapia é uma prática terapêutica baseada na utilização de produtos derivados das abelhas para fins preventivos e terapêuticos. Entre os principais produtos apícolas destacam-se o mel, a própolis, a geleia real, a cera, o veneno de abelha e o pólen, empregados tradicionalmente no tratamento e na prevenção de diversas enfermidades. O uso desses produtos remonta à Antiguidade, com registros no antigo Egito, e, atualmente, tem despertado crescente interesse científico devido às suas propriedades biológicas e ao potencial de aplicação em áreas como cicatrização de feridas, tratamento de infecções e desenvolvimento de novos produtos biotecnológicos (Lima *et al.*, 2022).

Nas angiospermas, o grão de pólen corresponde ao gametófito masculino e é responsável pelo transporte das células reprodutivas masculinas até o óvulo por meio da formação do tubo polínico, possibilitando a fecundação e a formação de novas sementes (Foubert-Mendes *et al.*, 2025). Além de sua função reprodutiva, o pólen apresenta composição química complexa, constituída por proteínas, aminoácidos, carboidratos, lipídios, vitaminas,

minerais e uma ampla variedade de metabólitos secundários, especialmente compostos fenólicos, flavonoides e carotenoides. Esses compostos desempenham funções importantes na proteção contra estresses ambientais e conferem ao pólen elevada atividade antioxidante, antimicrobiana e anti-inflamatória.

O pólen apícola, formado pela mistura de grãos de pólen coletados por abelhas de diferentes espécies vegetais, é amplamente utilizado como suplemento alimentar devido ao seu elevado valor nutricional e às suas propriedades funcionais. Entretanto, sua composição química pode variar significativamente em função da origem botânica, localização geográfica, tipo de solo, condições climáticas e métodos de coleta e processamento. Essas variações influenciam diretamente o teor de compostos bioativos e, consequentemente, suas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, antimicrobianas e anticancerígenas (Rodríguez-Pólit *et al.*, 2023). A elevada concentração de compostos fenólicos e outros metabólitos redutores torna o pólen uma matéria-prima promissora para a síntese verde de nanopartículas metálicas, atuando simultaneamente como agente redutor dos íons metálicos e como agente estabilizante das NPs formadas.

As abelhas constituem os principais agentes polinizadores e, durante a coleta, misturam os grãos de pólen ao néctar e às secreções salivares, formando pequenos grânulos conhecidos como pólen apícola, com diâmetro geralmente entre 1,4 e 4,0 mm. Esse material apresenta elevado valor nutricional, sendo composto principalmente por carboidratos (20–40%), proteínas (15–30%), lipídios (1–5%), minerais (2,5–3,5%), vitaminas (0,02–0,7%) e compostos fenólicos, incluindo flavonoides, além de outros metabólitos bioativos responsáveis por suas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e antimicrobianas (Zhou *et al.*, 2025).

A produção do pólen apícola (Figura 10) inicia-se com a coleta dos grãos de pólen pelas abelhas durante a visita às flores. Após serem umedecidos com néctar e secreções salivares, os grãos são compactados em grânulos e transportados para a colmeia, onde parte desse material é armazenada nos favos e sofre transformações bioquímicas, originando o denominado pão de abelha, utilizado como fonte de nutrientes para a colônia. Para fins comerciais e científicos, o pólen é coletado por meio de armadilhas instaladas na entrada da colmeia, que removem parte dos grânulos transportados pelas abelhas sem comprometer o desenvolvimento da colônia. Após a coleta, o material é submetido à secagem, etapa essencial para reduzir a umidade, preservar a qualidade e aumentar sua estabilidade microbiológica (Qiao *et al.*, 2024).

Figura 10 - Processo de produção de pólen de abelha.



Fonte: Qiao *et al.* (2024).

O tipo de pólen influencia diretamente sua composição química e suas propriedades biológicas. Em comparação ao pólen monofloral, o pólen heterofloral coletado por abelhas reúne compostos provenientes de diferentes espécies vegetais, combinando perfis fitoquímicos distintos e, frequentemente, apresentando maior diversidade e teor de substâncias bioativas. Entretanto, sua composição pode variar significativamente em função da origem botânica, das condições ambientais, dos métodos de coleta, processamento e extração, bem como das técnicas analíticas empregadas para sua caracterização (Rodríguez-Pólit *et al.*, 2023). Entre os principais compostos bioativos presentes no pólen destacam-se os compostos fenólicos, especialmente flavonoides e ácidos fenólicos, responsáveis por grande parte de sua atividade antioxidante. Esses metabólitos atuam na neutralização de espécies reativas por meio da doação de elétrons ou átomos de hidrogênio, interrompendo reações em cadeia associadas ao estresse oxidativo. A capacidade antioxidante do pólen depende da concentração e do perfil desses compostos, os quais variam conforme a origem botânica e as condições de desenvolvimento da planta (Lawag *et al.*, 2021).

Considerando que os compostos fenólicos são os principais responsáveis tanto pela atividade antioxidante quanto pelo potencial redutor de extratos vegetais, a caracterização

fitoquímica do extrato de pólen torna-se uma etapa fundamental para compreender sua composição química e seu potencial como agente redutor e estabilizante na síntese verde de AgNPs. Dessa forma, o estudo integrado da espécie vegetal de origem, da composição do pólen e dos fitoconstituintes presentes no extrato fornece bases para correlacionar sua composição química com a eficiência da síntese e as propriedades das AgNPs obtidas.

2.2.1.2.1 Fitoconstituintes do Pólen

O pólen apícola apresenta composição química complexa, caracterizada por elevada diversidade de metabólitos secundários, entre os quais se destacam compostos fenólicos, especialmente flavonoides e taninos, além de terpenos e outros fitoquímicos com reconhecidas atividades antioxidante, antimicrobiana e anti-inflamatória (Tabela 4). A composição e a concentração desses metabólitos dependem da origem botânica do pólen e influenciam diretamente suas propriedades físico-químicas e biológicas, sobretudo sua capacidade de neutralizar espécies reativas de oxigênio e prevenir danos oxidativos em biomoléculas (Degáspari; Waszczynskyj, 2004; Fernandes *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2025).

Flavonoides e taninos destacam-se não apenas por suas atividades biológicas, mas também por seu elevado potencial redutor, enquanto terpenos e terpenoides contribuem para a estabilização e funcionalidade do sistema. No contexto da síntese verde de AgNPs, esses compostos desempenham papel fundamental ao atuarem simultaneamente como agentes redutores, promovendo a conversão de Ag^+ em Ag^0 , e como agentes estabilizantes (*capping*), prevenindo a agregação das NPs. Além disso, sua adsorção à superfície das AgNPs pode contribuir para a estabilidade coloidal e potencializar propriedades biológicas, como as atividades antimicrobiana, antioxidante e anti-inflamatória.

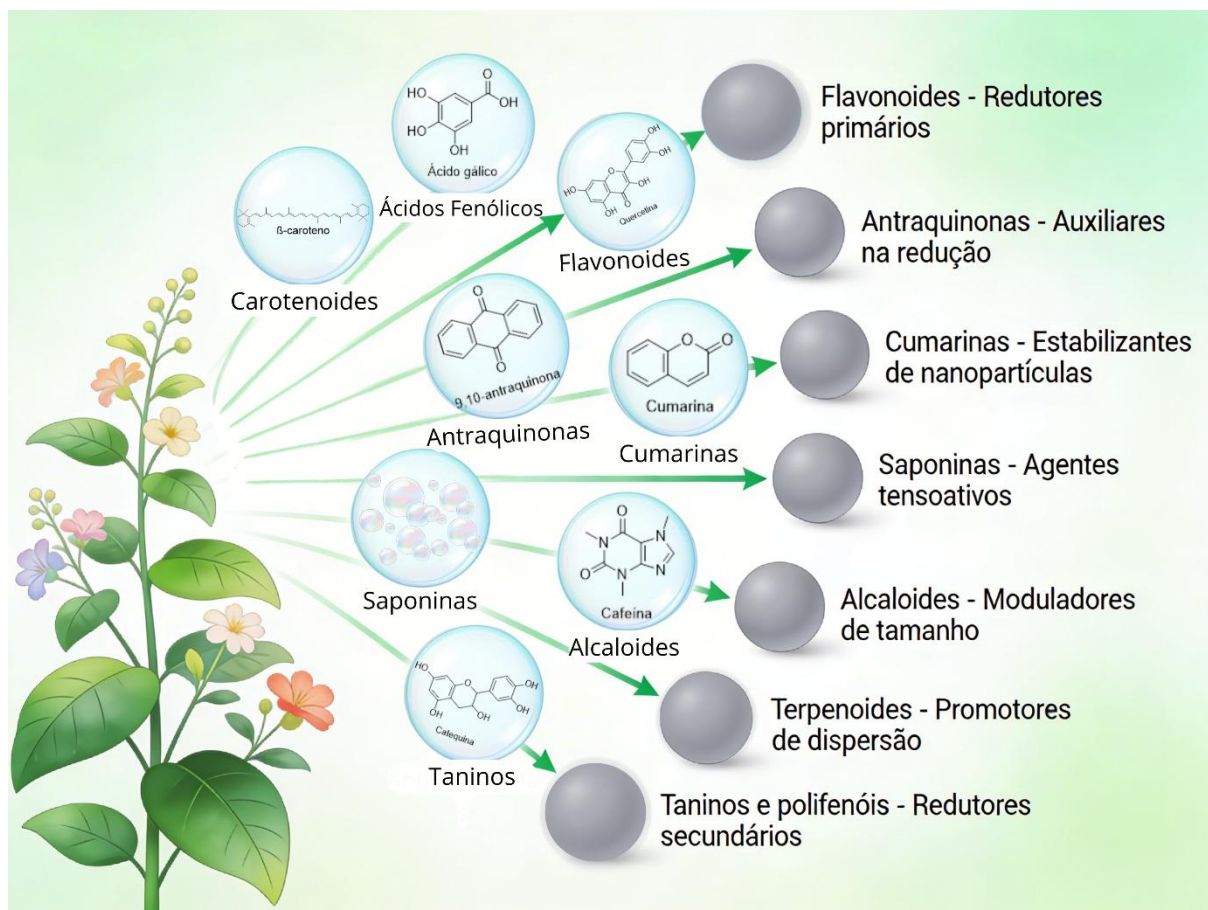
A Figura 11 esquematiza alguns compostos das principais classes, que são responsáveis pela síntese verde e suas principais funções durante a síntese, sendo que muitas dessas classes estão presente no pólen.

Tabela 4 - Principais compostos bioativos e micronutrientes do pólen de diversas plantas.

<i>Classe de compostos</i>	<i>Características estruturais</i>	<i>Principais constituintes</i>	<i>Conc. reportada</i>	<i>Atividades biológicas</i>
<i>Compostos fenólicos (total)</i>	Moléculas com um ou mais anéis aromáticos contendo grupos hidroxila (OH); variam de baixo a alto peso molecular.	Flavonoides, ácidos fenólicos.	0,7 – 136 mg EAG/g	Antioxidante, anti-inflamatória, protetora celular.
<i>Flavonoides (grupo dominante)</i>	Estrutura C6–C3–C6; frequentemente conjugados a açúcares ou ácidos orgânicos.	Flavonoides, antocianidinas.	0,1 – 78 mg QE/g	Antioxidante, anti-inflamatória, anticancerígena, antidiabética.
<i>Flavonóis predominantes</i>	Subclasse de flavonoides com alto potencial redutor.	Quercetina, kaempferol, isorhamnetina, miricetina.	—	Atividade antioxidante e anti-inflamatória.
<i>Quercetina</i>	Flavonol livre ou na forma de glicosídeos.	Derivados glicosilados de Quercetina.	—	Anti-inflamatória, anticancerígena, moduladora de vias celulares.
<i>Kaempferol</i>	Flavonol bioativo.	Kaempferol e glicosídeos.	—	Antiodesidade, antidiabética, reguladora do metabolismo lipídico.
<i>Isorhamnetina</i>	Derivado metilados da quercetina.	Isorhamnetina.	—	Antiproliferativa, anti-inflamatória, proteção contra estresse oxidativo.
<i>Ácidos fenólicos</i>	Derivados de ácidos hidroxicinâmicos (C6–C3), hidroxibenzoicos (C6–C1).	Ácido cafeico, ferúlico, cumárico, sináptico, gálico, vanílico.	—	Antioxidante, anti-inflamatória.
<i>Carotenoides</i>	Pigmentos lipossolúveis com cadeias de ligações duplas conjugadas.	β-criptoxantina, luteína, licopeno.	5 – 1233 µg/g	Antioxidante, proteção celular, ação anticancerígena.
<i>Vitaminas (geral)</i>	Micronutrientes essenciais ao metabolismo celular.	Vitaminas A, complexo B, C, D, E e K.	Variável conforme origem botânica	Regulação metabólica, antioxidante, imunomoduladora.
<i>Vitamina E (tocoferóis)</i>	Vitamina lipossolúvel antioxidante.	Tocoferóis	5 – 84 µg/g	Neuroprotetora, anti-inflamatória, anticancerígena.
<i>Vitamina C</i>	Vitamina antioxidante.	Ácido ascórbico.	14 – 797 µg/g	Antioxidante, síntese de colágeno, ação terapêutica.

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

Figura 11 - Principais metabólitos secundários envolvidos na síntese verde de NPs: exemplos estruturais e funções desempenhadas.



Fonte: Própria autora com auxílio da ferramenta de inteligência artificial ChatGPT (OpenAI) (2026).

Além de sua composição química, o uso do pólen como matéria-prima apresenta uma importante vantagem ecológica em relação à utilização direta de flores ou outras estruturas vegetais. Em espécies dióicas, como *M. urundeuva*, a polinização cruzada é essencial para a produção de sementes e para a manutenção da variabilidade genética das populações naturais, dependendo da transferência de pólen entre indivíduos, processo realizado principalmente por insetos (Freitas *et al.*, 2004; Gaino *et al.*, 2011). Assim, a coleta indiscriminada de flores para obtenção de extratos pode comprometer o sucesso reprodutivo da espécie. Em contraste, o pólen apícola é obtido a partir do excedente coletado pelas abelhas por meio de armadilhas instaladas na entrada da colmeia, sem interferir significativamente na polinização ou no desenvolvimento da colônia. Além disso, por concentrar grande parte dos metabólitos secundários presentes nas estruturas florais, o pólen constitui uma fonte rica de compostos bioativos com potencial para atuar como agentes redutores e estabilizantes na síntese verde de AgNPs. Dessa forma, sua utilização representa uma estratégia sustentável que alia a conservação da espécie ao

aproveitamento de um recurso renovável para a obtenção de AgNPs com potencial aplicação nas áreas biomédica e farmacêutica.

2.3 Potencial Antimicrobiano das AgNPs

As infecções bacterianas permanecem entre as principais causas de morbidade e mortalidade em todo o mundo. O uso extensivo e, muitas vezes, inadequado de antibióticos tem acelerado o surgimento da resistência antimicrobiana, reduzindo a eficácia dos tratamentos convencionais, prolongando internações hospitalares, aumentando os custos dos sistemas de saúde e elevando a mortalidade associada a infecções anteriormente tratáveis. Estima-se que, anualmente, aproximadamente 7,7 milhões de mortes estejam relacionadas a infecções bacterianas, das quais 4,95 milhões estejam associadas a patógenos resistentes aos antimicrobianos e 1,27 milhão sejam diretamente atribuídas à resistência aos antibióticos. Além disso, a disseminação de microrganismos multirresistentes compromete procedimentos médicos essenciais, como cirurgias, transplantes e terapias oncológicas, reforçando a necessidade do desenvolvimento de novas estratégias terapêuticas (Craig *et al.*, 2024; Okeke *et al.*, 2024).

Nesse contexto, as AgNPs destacam-se como uma alternativa promissora devido ao seu amplo espectro de atividade contra bactérias Gram-positivas, Gram-negativas, fungos e biofilmes microbianos (Abada *et al.*, 2024). Sua atividade antimicrobiana está diretamente relacionada às propriedades físico-químicas, especialmente ao reduzido tamanho de partícula e à elevada área superficial, que favorecem a interação com a superfície celular dos microrganismos. Como consequência, ocorrem alterações na integridade da membrana plasmática, aumento da permeabilidade celular, extravasamento de componentes intracelulares e liberação gradual de íons Ag^+ , os quais interferem em processos metabólicos essenciais, potencializando o efeito bactericida (Gong *et al.*, 2024). Além disso, as AgNPs podem atuar simultaneamente sobre diferentes alvos celulares, incluindo proteínas, enzimas respiratórias e material genético, promovendo danos irreversíveis e reduzindo a probabilidade de desenvolvimento de resistência quando comparadas aos antibióticos convencionais. Embora bactérias Gram-negativas sejam, em geral, mais suscetíveis devido à menor espessura da camada de peptidoglicano, diversos estudos demonstram atividade significativa das AgNPs contra ambos os grupos bacterianos (Menichetti *et al.*, 2023).

Nas rotas de síntese verde, os fitoconstituintes presentes nos extratos vegetais desempenham dupla função, atuando como agentes redutores e estabilizantes das NPs. Parte

desses compostos permanece adsorvida à superfície das AgNPs, contribuindo para sua estabilidade coloidal e podendo exercer efeito sinérgico com a prata metálica, potencializando atividades biológicas, especialmente a ação antimicrobiana, além de favorecer a biocompatibilidade do material (Gwada *et al.*, 2025; Illanes Tormena *et al.*, 2024). Essas características têm impulsionado o desenvolvimento de aplicações biomédicas das AgNPs, incluindo revestimentos antimicrobianos, sistemas de liberação de fármacos, curativos e outros biomateriais destinados ao controle de infecções, inclusive aquelas causadas por microrganismos resistentes aos antimicrobianos convencionais (Souza *et al.*, 2024; Bernardes *et al.*, 2025).

Considerando a reconhecida atividade antimicrobiana de *Myracrodruon urundeuva*, a riqueza do pólen em compostos fenólicos e a escassez de estudos sobre sua utilização na síntese verde de AgNPs, este trabalho propõe investigar o potencial do extrato de pólen dessa espécie na obtenção de AgNPs, buscando correlacionar sua composição fitoquímica com as características físico-químicas das NPs sintetizadas e seu potencial antimicrobiano.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial do extrato de pólen da *M. urundeuva* como mediador na síntese de nanopartículas de prata.

3.2 Objetivos Específicos

Em relação ao extrato de pólen:

- Determinar de forma qualitativa os fitoconstituintes;
- Determinar o conteúdo fenólico total;
- Determinar a atividade antioxidante.

Em relação à síntese verde:

- Sintetizar AgNPs usando o extrato variando condições experimentais (uso de ultrassom, diferentes proporções da relação extrato:AgNO₃, pH e temperatura);
- Caracterizar as nanopartículas sintetizadas utilizando técnicas de UV-Vis, DLS, potencial Zeta, NTA, MEV, EDX, FTIR, AFM e DRX.

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais, equipamentos e reagentes

O pólen de *M. urundeuva* (aroeira) foi disponibilizado pela Cooperativa dos Apicultores e Agricultores Familiares do Norte de Minas (COOPEMAPI) em colaboração com a Profa. Dra. Vanessa de Andrade Royo (Universidade Estadual de Montes Claros, Unimontes).

Todos os reagentes e solventes utilizados foram adquiridos de fornecedores comerciais (Sigma-Aldrich, Dinâmica e Synth) e empregados sem purificação adicional. As filtrações foram realizadas utilizando papel de filtro Whatman nº 1.

As reações de síntese foram monitoradas por espectrofotometria na região do UV-Vis em espectrofotômetro UV-1800 (Shimadzu), utilizando cubetas de quartzo com caminho óptico de 1 cm, à temperatura ambiente. As reações foram conduzidas sob agitação magnética em agitador Fisatom 752 ou em banho de ultrassom com aquecimento (Unique UltraCleaner 1400A). O pH das soluções foi determinado em pHmetro Q400AS (Quimis), equipado com eletrodo de vidro.

O tamanho hidrodinâmico e o índice de polidispersão foram determinados por Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS), utilizando cubetas de acrílico, enquanto o potencial zeta foi obtido por Espalhamento de Luz Eletroforético (ELS), empregando um Zetasizer Advance Lab (Blue Label, modelo ZSU3100, Malvern Panalytical).

As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia (EDS) foram realizadas em microscópio ZEISS EVO LS15. A Análise de Rastreamento de Nanopartículas (NTA) foi conduzida em um NanoSight Pro HB 500 (Malvern Panalytical Ltd).

As análises de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Microscopia de Força Atômica (AFM) e Difração de Raios X (DRX) foram realizadas em um Nicolet NEXUS 670, um Agilent 5500 e um difratômetro Shimadzu XRD-6000, respectivamente.

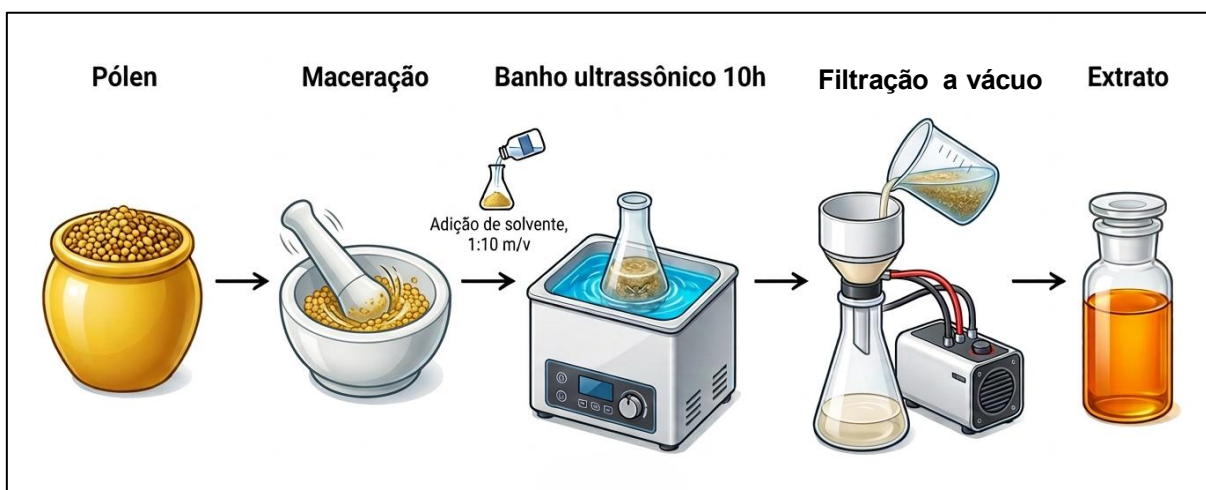
As NPs foram purificadas por centrifugação em microcentrífuga DT10KD+ (Daiki). A remoção de solventes sob pressão reduzida foi realizada em rotaevaporador Büchi R-210, acoplado a uma bomba de vácuo Büchi B-169. A água ultrapura utilizada em todos os experimentos foi obtida em sistema Milli-Q Direct-Q 3 UV (Merck Millipore). Nos ensaios fitoquímicos, a fluorescência das amostras sob radiação UV (365 nm) foi observada utilizando uma lanterna UV Boitton (modelo BOIT-LUB01).

4.2 Métodos

4.2.1 Preparo dos Extratos de Pólen da *M.urundeuva*

A obtenção dos extratos de pólen foi realizada por adaptação dos procedimentos descritos por Zhou *et al.* (2015) e Lopes *et al.* (2020). Inicialmente, o pólen de *M. urundeuva*, fornecido na forma de grânulos, foi submetido à trituração mecânica, visando reduzir o tamanho das partículas e aumentar a área superficial de contato com o solvente. Em seguida, empregou-se a proporção de 1:10 (m/v), utilizando-se 2 g de pólen para 20 mL de solvente (água ou etanol absoluto). As suspensões foram submetidas à extração em banho ultrassônico (40 kHz) durante 5 h por dia, em dois dias consecutivos, totalizando 10 h de extração. Após permanecerem em repouso sob refrigeração ($\leq 5^{\circ}\text{C}$) por 24 h, os extratos foram filtrados a vácuo em funil de Büchner. Os extratos obtidos foram armazenados sob refrigeração e protegidos da luz até sua utilização. A Figura 12 apresenta, de forma esquemática, as etapas de preparação dos extratos de pólen.

Figura 12 - Representação das etapas experimentais de preparação e obtenção do extrato vegetal de pólen de *M. urundeuva*.



Fonte: Própria autora (2026).

4.2.2 Caracterização dos Extratos de Pólen

Os extratos foram submetidos a testes para a caracterização qualitativa e quantitativa dos metabólitos secundários presentes, empregando testes colorimétricos e metodologias espectrofotométricas.

Nos testes qualitativos, utilizaram-se diretamente os extratos obtidos após o processo de extração, sem etapas adicionais de concentração. Para as análises quantitativas, entretanto, foi necessário utilizar os extratos secos. Para isso, os extratos foram concentrados em evaporador rotativo sob pressão reduzida e temperatura controlada, promovendo a remoção gradual do solvente e minimizando a degradação térmica dos compostos bioativos. Após a evaporação, os extratos secos foram acondicionados em recipientes adequados e mantidos sob refrigeração até sua utilização nas etapas experimentais subsequentes.

4.2.2.1 Triagem Fitoquímica

A triagem fitoquímica qualitativa foi realizada por testes específicos para alcaloides, antraquinonas, carotenoides, cumarinas, esteroides/terpenoides, flavonoides, saponinas e taninos. Os ensaios foram conduzidos por meio de testes colorimétricos e de precipitação, conforme os métodos descritos por Harborne (1998). Todos os ensaios foram realizados em triplicata, sob condições controladas, em temperatura ambiente, garantindo a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos. A interpretação dos testes foi baseada na observação de mudanças características de coloração, formação de precipitados ou desenvolvimento de espuma, indicativas da presença dos respectivos metabólitos nos extratos analisados.

Para o controle utilizou-se o solvente correspondente ao empregado na obtenção do extrato, o qual foi submetido às mesmas condições experimentais e tratado com os mesmos reagentes utilizados nas amostras analisadas, a fim de assegurar a confiabilidade dos resultados e descartar possíveis interferências do solvente.

Alíquotas dos extratos foram transferidas para tubos de ensaio previamente identificados, sendo utilizados aproximadamente 2 mL do extrato para a realização de cada teste fitoquímico qualitativo. Posteriormente, foram conduzidos os testes fitoquímicos específicos para a detecção das diferentes classes de metabólitos secundários presentes nos extratos, conforme descrito abaixo.

A detecção de alcaloides foi realizada por meio de testes de precipitação utilizando os reagentes clássicos de Dragendorff e Wagner. Inicialmente, uma alíquota do extrato líquido foi acidificada com solução de ácido clorídrico a 1% (v/v), com o objetivo de promover a protonação dos alcaloides e favorecer sua solubilização no meio aquoso. Em seguida, a solução foi filtrada utilizando funil contendo algodão, sendo o filtrado obtido empregado nos ensaios de identificação. Para o teste com o reagente de Dragendorff, foram adicionadas algumas gotas do reagente ao filtrado, sendo considerada indicativa de resultado positivo a formação de

precipitado de coloração alaranjada a avermelhada, característica da presença de alcaloides. No ensaio utilizando o reagente de Wagner, a adição do reagente ao filtrado promove a formação de precipitado de coloração marrom ou castanho-avermelhada, resultado também considerado indicativo da presença de compostos alcaloídicos no extrato analisado.

A triagem de antraquinonas foi realizada por meio do teste de Bornträger. Inicialmente, uma alíquota de 5 mL do extrato foi submetida a um processo de partição líquido-líquido com 5 mL de clorofórmio, utilizando-se um funil de separação, com o objetivo de promover a transferência dos compostos de caráter apolar para a fase orgânica. Após agitação e separação das fases, a fase clorofórmica foi coletada e transferida para um tubo de ensaio. Em seguida, foram adicionados 2 mL de solução de hidróxido de amônio a 10% (v/v), procedendo-se à leve agitação da mistura. O desenvolvimento de coloração rosa, vermelha ou violácea na fase alcalina foi considerado indicativo da presença de derivados antraquinônicos no extrato analisado.

A presença de carotenoides foi realizada por meio de um teste de extração com solvente apolar, baseado na afinidade desses pigmentos lipofílicos por solventes orgânicos não polares. Inicialmente, uma alíquota de 5 mL do extrato foi submetida a um processo de partição líquido-líquido com 5 mL de hexano, utilizando-se um funil de separação, com o objetivo de promover a transferência dos compostos apolares presentes na amostra para a fase orgânica hexânica. Após agitação e separação das fases, a fase contendo hexano (fase superior) foi cuidadosamente coletada e transferida para um tubo de ensaio para posterior observação. O desenvolvimento de coloração amarela a amarelo-alaranjada na fase hexânica foi considerado indicativo da presença de carotenoides no extrato analisado.

A análise qualitativa de cumarinas foi conduzida por meio do teste de fluorescência em papel filtro, baseado na capacidade desses compostos de emitir fluorescência característica quando expostos à radiação ultravioleta em meio alcalino. Para a realização do ensaio, gotas do extrato foi aplicada sobre papel filtro, formando uma mancha com aproximadamente 1 cm de diâmetro. Em seguida, foram adicionadas 1 a 2 gotas de solução de hidróxido de sódio (1 mol/L) sobre a área contendo o extrato. Após a secagem do papel filtro à temperatura ambiente, a amostra foi exposta à radiação ultravioleta (UV) com comprimento de onda de 365 nm. O aparecimento de fluorescência azul, verde ou amarelada foi considerado indicativo da presença de cumarinas no extrato analisado.

A presença de esteroides e triterpenoides foi avaliada por meio do teste de Liebermann–Burchard. Inicialmente, uma alíquota de 5 mL do extrato foi submetida a um processo de extração líquido-líquido com 5 mL de clorofórmio, utilizando-se um funil de separação, a fim

de promover a transferência dos compostos de caráter apolar para a fase orgânica. Após a separação das fases, a fase clorofórmica foi coletada e utilizada para a realização do ensaio. Para o teste, 2 mL da fase clorofórmica foram transferidos para um tubo de ensaio, aos quais se adicionou 1 mL de anidrido acético glacial. Em seguida, foram adicionadas cuidadosamente 2 a 3 gotas de ácido sulfúrico concentrado pelas paredes do tubo de ensaio, evitando agitação brusca e favorecendo a formação de um gradiente reacional. O desenvolvimento de coloração verde azulada foi considerado indicativo da presença de esteroides, enquanto a formação de colorações vermelha, rosada ou púrpura foi associada à presença de triterpenoides no extrato analisado.

A identificação de flavonoides foi realizada por meio do teste de Shinoda. Para isso, uma alíquota de 2 mL do extrato foi transferida para um tubo de ensaio, à qual foram adicionados pequenos fragmentos de magnésio metálico (aproximadamente 10–20 mg). Em seguida, foram adicionadas cuidadosamente 3 a 5 gotas de ácido clorídrico concentrado. A mistura foi mantida em repouso por alguns minutos para observação da reação. O desenvolvimento de coloração avermelhada, rosada ou alaranjada foi considerado indicativo da presença de compostos flavonoides no extrato analisado.

A análise qualitativa de glicosídeos foi realizada por meio de hidrólise ácida seguida do reagente de Benedict. Inicialmente, alíquotas de 2 mL dos extratos foram transferidas para tubos de ensaio separados. Em seguida, foram adicionados 2 mL de ácido clorídrico diluído (2 mol/L), e as amostras foram aquecidas em banho-maria a 60 °C por 10 minutos, sendo posteriormente resfriadas à temperatura ambiente. Após a hidrólise, as soluções foram neutralizadas com hidróxido de sódio até pH 7, seguidas da adição de 2 mL do reagente de Benedict e novo aquecimento em banho-maria por 5 minutos. O desenvolvimento da coloração verde ou amarela indicou baixa concentração, laranja ou vermelho tijolo foi considerado indicativo de alta concentração, enquanto a coloração azul indicou resultado negativo.

A detecção de saponinas foi avaliada por meio do teste de formação de espuma. Para a realização do ensaio, uma alíquota de 1 mL do extrato foi transferida para um tubo de ensaio contendo 5 mL de água ultrapura. A mistura foi submetida à agitação vigorosa por aproximadamente 60 segundos, seguida de repouso por cerca de 10 minutos, a fim de permitir a estabilização da espuma formada. A formação de espuma persistente e estável, com altura igual ou superior a aproximadamente 1 cm, foi considerada indicativa da presença de saponinas no extrato analisado.

A presença de taninos no extrato foi avaliada por meio do teste com cloreto férrico. Para isso, uma alíquota de 2 mL do extrato foi transferida para um tubo de ensaio, à qual foram

adicionadas 2 a 3 gotas de solução de cloreto férrico a 1% (m/v), seguida de leve agitação para homogeneização da mistura. O desenvolvimento de coloração azul-escuro foi considerado indicativo da presença de taninos hidrolisáveis, enquanto a formação de coloração verde-escuro foi associada à presença de taninos condensados no extrato analisado.

4.2.2.2 Conteúdo Fenólico Total

O conteúdo fenólico total dos extratos foi determinado pelo método colorimétrico de Folin–Ciocalteu, conforme descrito por Domingues-López, Pérez e Lamuela-Raventós (2024). Todas as determinações foram realizadas em triplicata, e a concentração de compostos fenólicos foi calculada a partir de uma curva de calibração construída com ácido gálico como padrão de referência. Os resultados foram expressos em miligramas de equivalentes de ácido gálico por grama de extrato seco (mg EAG/g). Inicialmente, foi preparada uma solução estoque de ácido gálico (1,0 mg/mL) em água ultrapura. A partir dessa solução, foram preparadas soluções padrão nas concentrações de 0,075; 0,100; 0,125; 0,150; 0,175 e 0,200 mg/mL, utilizadas para a construção da curva calibração.

Para cada ponto da curva de calibração, uma alíquota de 1,0 mL da solução padrão foi transferida para um frasco de vidro com tampa, à qual foram adicionados 1,0 mL do reagente de Folin–Ciocalteu previamente diluído em água (1:2, v/v). Após homogeneização, adicionaram-se 2,0 mL de solução de carbonato de sódio (35 g/100 mL) e 2,0 mL de água ultrapura, sendo a mistura novamente homogeneizada.

A mistura reacional foi incubada ao abrigo da luz, à temperatura ambiente, por 30 min, para o desenvolvimento da coloração azul característica da reação de Folin–Ciocalteu. Após esse período, a absorbância foi medida em espectrofotômetro UV-Vis a 765 nm. O mesmo procedimento foi realizado para as amostras dos extratos, substituindo-se as soluções padrão de ácido gálico pelas soluções dos extratos.

A quantificação do conteúdo fenólico total foi realizada por meio da curva calibração construída com soluções padrão de ácido gálico, e os resultados foram expressos em miligramas de equivalentes de ácido gálico por grama de extrato seco (mg EAG/g), conforme a Equação 1.

$$C_{final} = \frac{C * V * FD}{m} \quad (1)$$

onde C_{final} é a concentração de compostos fenólicos totais, C é a concentração obtida pela curva de calibração (mg/mL de ácido gálico equivalente), V é o volume total do extrato (mL), FD é o fator de diluição da amostra ($FD_{\text{extrato aquoso}} = 2$ e $FD_{\text{extrato etanólico}} = 10$) e m é a massa da amostra utilizada na extração (g).

4.2.2.3 Atividade Antioxidante

A atividade antioxidante dos extratos foi avaliada pelo método de sequestro do radical livre DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil), conforme descrito por Menezes *et al.* (2010), utilizando a quercetina como padrão de referência.

Inicialmente, foi preparada uma solução de DPPH em etanol 70% (v/v), mantida ao abrigo da luz até sua utilização. Os extratos secos foram dissolvidos na concentração de 1,0 mg/mL e, a partir dessas soluções, foram preparadas diferentes diluições, conforme apresentado na Tabela 5.

Para o ensaio, cada alíquota do extrato foi completada com água ultrapura até o volume de 2,0 mL e, em seguida, adicionaram-se 2,0 mL da solução de DPPH em frascos de vidro com tampa. Após homogeneização, as misturas permaneceram incubadas ao abrigo da luz, à temperatura ambiente, por 30 min, para permitir a reação entre os compostos antioxidantes presentes nos extratos e o radical DPPH.

Ao término da incubação, a absorbância foi determinada em espectrofotômetro UV-Vis a 517 nm. A atividade antioxidante foi calculada com base na redução da absorbância em relação ao controle, constituído apenas pela solução de DPPH, sendo todas as determinações realizadas em triplicata.

Tabela 5 - Condições experimentais empregadas no ensaio de atividade antioxidante pelo método do DPPH para os extratos aquoso e etanólico de pólen de *M. urundeuva*.

<i>Extrato</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Conc. (µg/mL)</i>	<i>Vol. amostra (µL)</i>	<i>Vol. água (µL)</i>	<i>Vol. DPPH (µL)</i>
<i>Aquoso</i>	1	125	250	1750	2000
	2	250	500	1500	2000
	3	375	700	1300	2000
	4	500	1000	1000	2000
	5	625	1250	750	2000
<i>Etanólico</i>	1	50	100	1900	2000
	2	65	130	1870	2000
	3	80	160	1840	2000
	4	95	190	1810	2000
	5	110	220	1780	2000
	6	125	250	1750	2000

Fonte: Própria autora (2026).

Para a análise da quercetina, foi preparada inicialmente uma solução estoque na concentração de 1,0 mg/mL em etanol absoluto. Em seguida, essa solução foi diluída na proporção de 1:9 (v/v) em etanol absoluto e, a partir dela, foram preparadas soluções em diferentes concentrações (Tabela 6). As soluções foram submetidas ao mesmo procedimento experimental descrito para os extratos, incluindo incubação ao abrigo da luz por 30 min e leitura da absorbância a 517 nm.

Tabela 6 - Condições experimentais do ensaio de atividade antioxidante pelo método do DPPH para a quercetina.

<i>Ensaio</i>	<i>Concentração (µg/mL)</i>	<i>Vol. amostra (µL)</i>	<i>Vol. água (µL)</i>	<i>Vol. DPPH (µL)</i>
1	0,5	10	1990	2000
2	1,0	20	1980	2000
3	1,5	30	1970	2000
4	2,0	40	1960	2000
5	2,5	50	1950	2000
6	3,0	60	1940	2000

Fonte: Própria autora (2026).

Para a determinação da atividade antioxidante pelo método de sequestro do radical DPPH, foram utilizados um controle e um branco da amostra. O controle consistiu na solução de DPPH na ausência de extrato, sendo utilizado como referência para a absorbância máxima do radical livre. O branco foi preparado substituindo-se a solução de DPPH pelo solvente correspondente, contendo apenas o extrato nas mesmas condições experimentais, de modo a corrigir a interferência decorrente da coloração intrínseca da amostra. A atividade antioxidante foi expressa como percentual de inibição do radical DPPH (% de inibição) e calculada de acordo com a Equação 2.

$$\%inibição = \left(\frac{Abs_{controle} - (Abs_{amostra} - Abs_{branco})}{Abs_{controle}} \right) * 100 \quad (2)$$

Em que, $Abs_{amostra}$ corresponde à absorbância da mistura contendo extrato e DPPH, Abs_{branco} corresponde à absorbância da amostra sem DPPH e $Abs_{controle}$ corresponde à absorbância da solução de DPPH sem adição de extrato.

O valor de CI_{50} , definido como a concentração necessária para promover 50% de inibição do radical DPPH, foi determinado por regressão linear entre as concentrações das amostras e os respectivos percentuais de inibição. A partir da equação da reta, estimou-se a

concentração correspondente a 50% de inibição. O CI_{50} é um dos parâmetros mais utilizados para expressar a capacidade antioxidante de um material, sendo que menores valores indicam maior eficiência no sequestro de radicais livres.

4.2.3 Síntese Verde de Nanopartículas de Prata

4.2.3.1. Preparo da Solução de Nitrato de Prata ($AgNO_3$)

Uma solução aquosa de $AgNO_3$ na concentração de 1,0 mM foi preparada pela dissolução de 0,0170 g do sal em balão volumétrico de 100 mL, completando-se o volume com água ultrapura. A solução foi armazenada ao abrigo da luz para evitar a fotodegradação do $AgNO_3$ e utilizada como precursor metálico na síntese verde das AgNPs.

4.2.3.2 Síntese Verde Mediada por Extrato de Pólen de *M. urundeuva*

Para a síntese de AgNPs utilizando o extrato de pólen de *M. urundeuva*, foram avaliadas diferentes proporções entre extrato etanólico e a solução de $AgNO_3$ (Tabela 7). As soluções foram adicionadas nas proporções mencionadas para a obtenção de um volume máximo de 10 mL da mistura final, sendo acondicionados em frascos de vidro.

Tabela 7 - Relação volumétrica entre extrato de pólen e solução de $AgNO_3$ utilizada na síntese das AgNPs.

<i>Proporção extrato:$AgNO_3$</i>	<i>Extrato (μL)</i>	<i>$AgNO_3$ (μL)</i>
<i>1:99</i>	100	9.900
<i>1:49</i>	200	9.800
<i>1:19</i>	500	9.500
<i>1:09</i>	1.000	9.000
<i>1:04</i>	2.000	8.000
<i>1:01</i>	5.000	5.000

Fonte: Própria autora (2026).

As sínteses das AgNPs utilizando extrato etanólico foram realizadas de acordo com as condições experimentais apresentadas na Tabela 8, sob banho ultrassônico, com tempo máximo de reação de 120 min. Os fatores avaliados foram a proporção extrato: $AgNO_3$ o pH do extrato e a temperatura de reação. Inicialmente, as sínteses foram conduzidas utilizando o pH natural do extrato (4,7). Em seguida, uma segunda condição foi avaliada com o pH ajustado para 8,0

por meio da adição de carbonato de sódio, monitorando-se o valor com auxílio de um pHmetro. Para cada condição de pH e para cada proporção extrato:AgNO₃, as reações foram realizadas a 25 e 45 °C, mantendo-se todas as demais condições constantes e sob banho ultrassônico.

Tabela 8 - Condições experimentais avaliadas para a síntese verde de AgNPs utilizando extrato etanólico de pólen de *M. urundeuva*.

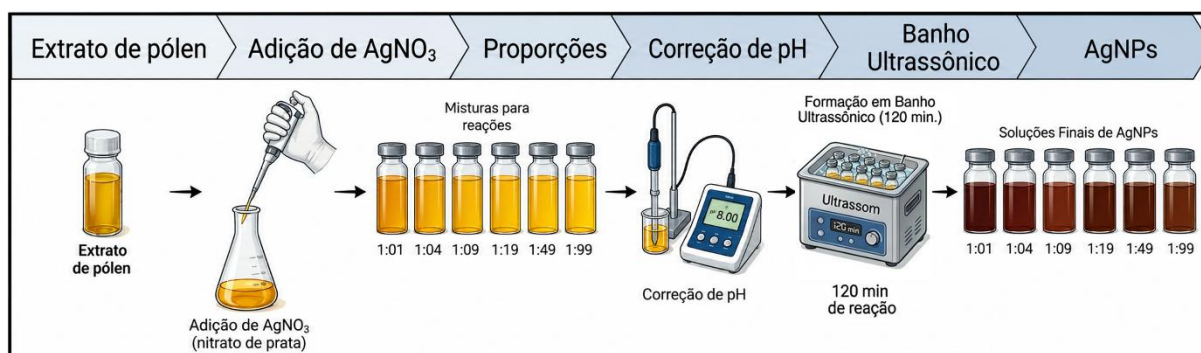
<i>Ensaio</i>	<i>Proporções extrato:AgNO₃</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>pH</i>
1 a 4	1:99	25 e 45	4,7 e 8,0
5 a 8	1:49	25 e 45	4,7 e 8,0
9 a 12	1:19	25 e 45	4,7 e 8,0
13 a 16	1:09	25 e 45	4,7 e 8,0
17 a 20	1:04	25 e 45	4,7 e 8,0
21 a 24	1:01	25 e 45	4,7 e 8,0

Fonte: Própria autora (2026).

Para cada proporção avaliada, foram realizados quatro ensaios experimentais, combinando duas temperaturas (25 e 45 °C) e dois valores de pH (4,7 e 8,0). A correção do pH foi realizada diretamente na mistura reacional, após o preparo das amostras com as proporções previamente estabelecidas de extrato vegetal e solução de AgNO₃. Dessa forma, cada conjunto de ensaios apresentado na Tabela 8 corresponde à variação sistemática dessas condições experimentais, permitindo avaliar simultaneamente a influência da temperatura e do pH no processo de síntese das AgNPs.

A formação das AgNPs foi evidenciada pela mudança de coloração das soluções, resultando na formação de suspensões coloidais com tonalidade característica, indicativa da formação das nanopartículas (Figura 13).

Figura 13 - Representação do processo de síntese de AgNPs mediado por extrato de pólen.



Fonte: Própria autora (2026).

A mudança de coloração da solução foi utilizada como indicativo inicial da redução dos íons Ag^+ e da formação das AgNPs. A confirmação da síntese foi realizada por espectroscopia de absorção no UV-Vis. As amostras foram analisadas em faixa espectral de 200 a 700 nm, utilizando cubetas de quartzo de 1 cm de caminho óptico. Para as análises, as suspensões coloidais foram previamente homogeneizadas e, quando necessário, diluídas em água ultrapura para evitar a saturação do sinal analítico.

As análises espectrofotométricas foram realizadas durante todo o período reacional, permitindo o monitoramento da síntese por meio da identificação da banda característica de SPR das AgNPs. Após síntese, os coloides foram fracionados e armazenados em frascos protegidos da luz e sob refrigeração ($\sim 8^\circ\text{C}$), para minimizar processos de fotodegradação. Além das caracterizações para os coloides recém preparados, também foram realizadas caracterizações ao longo do tempo de armazenamento, com o intuito de avaliar a estabilidade coloidal.

Após 24 horas da síntese, as amostras foram submetidas ao processo de purificação por centrifugação. Inicialmente, foi realizada uma etapa de pré-lavagem, na qual as suspensões foram centrifugadas a 3000 rpm por 10 minutos. O sobrenadante foi coletado e o precipitado descartado, com o objetivo de remover impurezas e resíduos de maior massa molecular. Posteriormente, as suspensões resultantes foram submetidas a três ciclos consecutivos de centrifugação a 10000 rpm por 15 minutos cada, nos quais os sobrenadantes foram descartados e os precipitados contendo as AgNPs foram preservados e concentrados.

O procedimento de purificação foi aplicado exclusivamente às amostras destinadas às análises de caracterização das AgNPs por MEV, EDX, FTIR, AFM e DRX.

4.2.4 Caracterização das Nanopartículas de Prata

As AgNPs obtidas com extrato etanólico foram caracterizadas por DLS, ELS, NTA, MEV, EDX, FTIR, AFM e DRX. Essas técnicas foram empregadas com o objetivo de avaliar a formação, propriedades físico-químicas, morfologia, composição elementar e os grupos funcionais associados às AgNPs sintetizadas.

A distribuição do tamanho hidrodinâmico das AgNPs e o potencial zeta foram realizadas a partir de suspensões coloidais com o objetivo de evitar múltiplos espalhamentos e garantir maior precisão dos resultados. A técnica de DLS, baseada no movimento browniano das partículas em suspensão, permitiu determinar o diâmetro médio hidrodinâmico e o índice de

polidispersidade (PDI), enquanto o ELS forneceu informações sobre o potencial zeta, relacionado à estabilidade coloidal do sistema.

As análises por NTA foram utilizadas para determinar a distribuição de tamanho e a concentração de partículas em suspensão, com base na visualização individual e no rastreamento do movimento browniano das AgNPs. O sistema operou com um laser de 405 nm, conduzidas à temperatura ambiente monitorada pelo sistema, sem controle térmico adicional da amostra, utilizando uma velocidade de fluxo de 0,3 mL/s. Para assegurar a precisão analítica e evitar a sobreposição de partículas, as dispersões foram previamente diluídas em água ultrapura nas razões de 1000 vezes (para as proporções 1:99 e 1:49) e 2000 vezes (para as proporções 1:19 e 1:09). Para cada amostra, foram realizadas cinco varreduras, com tempo de captura de vídeo de 11,5 s por aquisição. As medidas foram realizadas sob condições controladas, permitindo a obtenção de dados mais detalhados sobre a distribuição de tamanho em comparação com o DLS.

A morfologia, tamanho e distribuição das AgNPs foram avaliados por MEV. Para melhor avaliação, as amostras foram analisadas em duas condições: (A) suspensão original (sem diluição) e (B) diluição em água ultrapura na proporção 1:1. Uma pequena alíquota da amostra foi então depositada sobre suportes protetores (grid), sendo posteriormente mantida em dessecador por aproximadamente 24 horas para secagem completa. Antes da análise no equipamento, as amostras foram submetidas a um processo de metalização, com deposição de uma fina camada de ouro, a fim de melhorar a condutividade elétrica e a qualidade das imagens obtidas. As micrografias permitiram avaliar a morfologia, distribuição e aglomeração possível das NPs. A composição elementar foi determinada por EDX, acoplada ao MEV.

A caracterização química das AgNPs e do extrato foi realizada por FTIR, com o objetivo de identificar os grupos funcionais envolvidos nos processos de redução dos íons prata e estabilização das NPs. Para a análise a amostra líquida foi depositada sobre a pastilha de brometo de potássio (KBr) previamente preparada, sendo posteriormente submetida à secagem em dessecador por aproximadamente 24 horas, a fim de remover a umidade residual. Após a secagem, as amostras foram analisadas na faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1} com resolução espectral de 4 cm^{-1} , sendo utilizadas como número de varreduras 64 scans para o extrato e 128 scans para as amostras das AgNPs. A comparação entre os espectros do extrato e das NPs permitiu identificar alterações nas bandas de absorção, evidenciando a interação dos fitoconstituintes do pólen de *M. urundeuva* com a superfície das NPs.

A topografia superficial e as dimensões físicas em escala manométrica das AgNPs foram avaliadas por AFM. Para o preparo das amostras, uma pequena alíquota das amostras foi

depositada sobre suportes protetores (grid) e mantidas em dessecador por aproximadamente 24 horas para completa secagem. As imagens obtidas permitiram a análise tridimensional da superfície das NPs, fornecendo informações complementares sobre distribuição e possíveis aglomerações presentes nas amostras.

A estrutura cristalina das AgNPs foi investigada por DRX. Para a realização das análises as amostras foram depositadas em suporte de vidro e mantidas em secagem até a completa evaporação do solvente, formando uma camada homogênea sobre a superfície do suporte. As medidas foram realizadas em um difratômetro de raios X utilizando radiação Cu-K α ($\lambda = 1,5418$ Å), com filtro de níquel, tensão de 30 kV e corrente de 40 mA. Os difratogramas foram obtidos na faixa angular de 2θ entre 5° e 80° , com velocidade de varredura de 2° min^{-1} e passo angular de $0,02^\circ$. A técnica foi empregada com o objetivo de confirmar a formação das AgNPs, identificar sua estrutura cristalina e avaliar o grau de cristalinidade das amostras sintetizadas. A natureza cristalina das AgNPs foi determinada a partir da largura dos picos de DRX utilizando a fórmula de Debye-Scherrer (equação 3).

$$D = \frac{k * \lambda}{\beta * \cos\theta} \quad (3)$$

onde D representa o tamanho médio do cristalito, k a constante de Scherrer dependente da forma ($k = 0,9$, considerando a morfologia aproximadamente esférica das NPs), λ o comprimento de onda do raio X usado na difração, β a largura total à meia altura (FWHM) de um pico e θ o ângulo de difração, respectivamente.

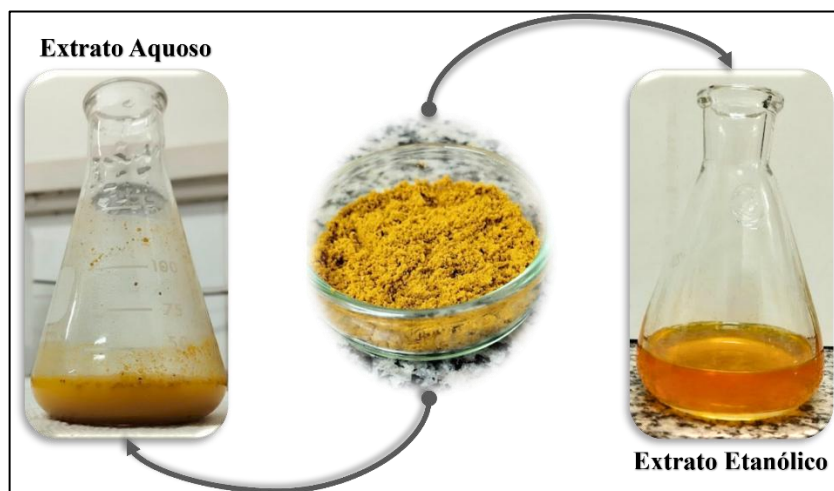
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Extratos de Pólen de *M. urundeuva*

A obtenção dos extratos de pólen de *M. urundeuva* foi realizada utilizando água e etanol como solventes extratores, com o objetivo de avaliar a influência do meio de extração sobre a composição química dos extratos e o potencial redutor dos fitoconstituintes obtidos.

De modo geral, o tipo de solvente empregado exerce influência significativa sobre as características físico-químicas dos extratos, uma vez que a polaridade do meio extrator determina a solubilidade e a eficiência de extração de diferentes classes de compostos bioativos. Observou-se que os extratos obtidos apresentaram diferenças visuais de coloração e aspecto (Figura 14). O extrato aquoso apresentou tonalidade mais clara e aspecto turvo, enquanto o extrato etanólico apresentou coloração amarelada mais intensa e aspecto límpido, sugerindo diferenças na composição e na concentração dos compostos extraídos.

Figura 14 - Aspecto visual dos extratos aquoso e etanólico obtidos a partir do pólen de *M. urundeuva*.



Fonte: Própria autora (2026).

Durante o armazenamento sob congelamento a -15°C , observou-se visualmente que os extratos mantiveram seu aspecto original ao longo do período avaliado.

A extração por solventes é amplamente empregada na obtenção de extratos a partir de matrizes vegetais, principalmente devido à sua simplicidade operacional, eficiência e possibilidade de seleção de solventes com diferentes propriedades físico-químicas. O rendimento desse processo é influenciado por diversos fatores, tais como o tempo e a

temperatura de extração, a razão entre amostra e solvente, além da composição química e das características físicas do material vegetal. Esses compostos podem variar desde moléculas de menor massa molar, como ácidos fenólicos e antocianinas, até estruturas mais complexas e polimerizadas, como os taninos, presentes em diferentes proporções. Além disso, os compostos fenólicos podem estar associados a outros constituintes da matriz vegetal, como carboidratos e proteínas, fatores que podem influenciar sua extração e disponibilidade (Dai; Mumper, 2010).

O extrato etanólico apresenta características de polaridade intermediária, permitindo a extração de compostos com diferentes graus de polaridade, incluindo metabólitos secundários menos polares e estruturalmente mais complexos. Esses compostos são amplamente descritos na literatura por sua capacidade de atuar na redução de íons metálicos e na estabilização de NPs, desempenhando funções como agentes redutores e de capeamento. A presença de grupos funcionais, como hidroxilas e carbonilas, favorece as interações químicas envolvidas nesses processos. Nesse contexto, flavonoides na forma aglicona, taninos e outros compostos fenólicos podem ser eficientemente extraídos por solventes como o etanol. Estudos demonstram que solventes orgânicos apresentam elevada eficiência na extração de compostos fenólicos quando comparados à água, resultando frequentemente em extratos com maior diversidade química e maior atividade antioxidante (Kuda; Ikemori, 2009; Xue *et al.*, 2014).

O processo de extração usando banho ultrassônico aumenta a eficiência na liberação de compostos bioativos presentes na matriz vegetal. A técnica baseia-se na cavitação acústica, no qual ondas ultrassônicas promovem ciclos de especificidade e rarefação no meio líquido, levando à formação e implosão de microbolhas. Esse processo gera forças de cisalhamento, microjatos e elevadas pressões locais capazes de romper estruturas celulares, aumentando a área de contato entre o solvente e o material vegetal e, conseqüentemente, favorecendo a difusão dos compostos de interesse para o meio extrator (Kumar; Srivastav; Sharanagat, 2021).

Além disso, a extração em banho ultrassônico apresenta vantagens como redução do tempo de remoção e aumento do rendimento quando comparada a métodos convencionais, sendo considerada uma técnica eficiente e sustentável no preparo de extratos (Chemat *et al.*, 2017).

Para a determinação do rendimento, alíquotas dos extratos foram submetidas à secagem sob pressão reduzida até a completa remoção do solvente. Os rendimentos obtidos foram de 35,2% para o extrato aquoso e 30,1% para o extrato etanólico.

5.1.1 Caracterização dos Extratos de Pólen da *M. urundeuva*

5.1.1.1 Triagem Fitoquímica

A triagem fitoquímica qualitativa dos extratos de pólen de *M. urundeuva* revelou a presença de diferentes classes de metabólitos secundários, com variações associadas ao solvente empregado, conforme apresentado na Tabela 9. A eficiência de extração desses compostos está diretamente relacionada à polaridade do solvente e às características químicas das moléculas presentes na matriz vegetal. A identificação dos fitoconstituintes foi realizada por meio de reações colorimétricas e formação de precipitados característicos após a adição de reagentes específicos, conforme descrito por Harborne (1998). O extrato etanólico apresentou maior diversidade de fitoconstituintes detectados quando comparado ao extrato aquoso.

Tabela 9 - Triagem fitoquímica qualitativa dos extratos de pólen de *M. urundeuva*.

<i>Classe de metabólitos</i>	<i>Teste empregado</i>	<i>Extrato aquoso</i>	<i>Extrato etanólico</i>
<i>Alcaloides</i>	Dragendorff/Wagner	–	–
<i>Antraquinonas</i>	Bornträger	–	+
<i>Carotenoides</i>	Extração com hexano	–	+
<i>Cumarinas</i>	Fluorescência em UV (365 nm)	–	+
<i>Esteroides</i>	Liebermann–Burchard	–	–
<i>Flavonoides</i>	Shinoda	+	+
<i>Glicosídeos</i>	Benedict	+	+
<i>Saponinas</i>	Teste de espuma	–	–
<i>Taninos</i>	Cloreto férrico (FeCl ₃)	–	+
<i>Triterpenoides</i>	Liebermann–Burchard	+	+

Legenda: (+) presença ; (–) ausência

Fonte: Própria autora (2026).

Os extratos apresentaram perfis fitoquímicos distintos em função do solvente empregado, sendo o extrato etanólico caracterizado por maior diversidade de fitoconstituintes, incluindo antraquinonas, taninos, cumarinas e carotenoides, ausentes no extrato aquoso. Por outro lado, classes como flavonoides, glicosídeos e terpenoides foram identificadas em ambos os sistemas extratores. De modo geral, estudos de triagem fitoquímica indicam a predominância de compostos fenólicos, flavonoides e taninos em diferentes tipos de pólen, os quais estão associados a relevantes atividades biológicas, especialmente antioxidantes e antimicrobianas (Sadeq *et al.*, 2021).

A maior diversidade de fitoconstituintes observada no extrato etanólico é particularmente relevante para a síntese verde de AgNPs, uma vez que compostos presentes na matriz vegetal podem atuar como agentes redutores e estabilizantes durante o processo de formação das AgNPs. Esses fitoquímicos apresentam grupos funcionais capazes de interagir com os íons metálicos, destacando-se as hidroxilas ($-\text{OH}$), carbonilas ($\text{C}=\text{O}$), aminas ($-\text{NH}_2$) e sistemas aromáticos conjugados. Tais metabólitos secundários, incluindo polifenóis e proteínas, participam ativamente da formação dos núcleos metálicos e do subsequente recobrimento das partículas, assegurando a estabilidade coloidal do sistema final (Alharbi; Alsubhi; Felimban, 2022).

A extração aquosa favorece a obtenção de compostos de maior polaridade (hidrofilicos), como flavonoides glicosilados, açúcares e fenólicos simples, cuja atividade antioxidante está associada principalmente à capacidade de neutralizar espécies reativas por meio da doação de elétrons ou átomos de hidrogênio (Boeing *et al.*, 2014).

Em contraste, o uso de etanol permite a extração de metabólitos com polaridade intermediária a baixa, incluindo flavonoides na forma aglicona, cumarinas, antraquinonas e triterpenoides. Essa característica está relacionada à natureza anfifílica do etanol, que apresenta um grupo hidroxila ($-\text{OH}$), capaz de estabelecer ligações de hidrogênio com compostos polares, e uma cadeia carbônica que favorece a interação com regiões menos polares das moléculas. Dessa forma, o etanol apresenta maior capacidade de extrair uma variedade de metabólitos secundários, podendo resultar em extratos com composição química diversificada e potencial antioxidante diferenciado (Do *et al.*, 2014).

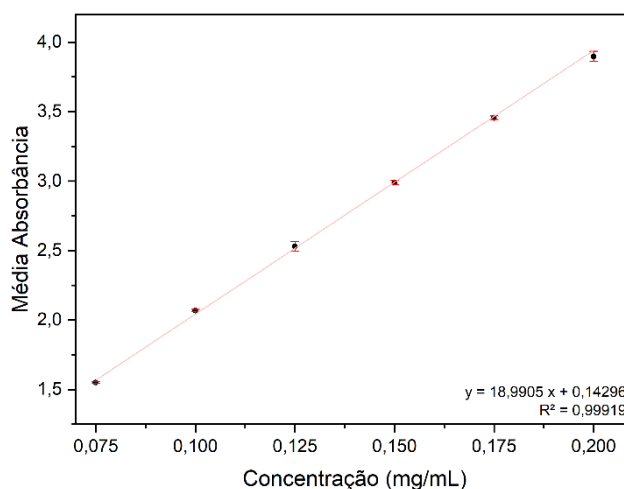
Do ponto de vista funcional, flavonoides apresentam reconhecidas atividades antioxidantes, anti-inflamatórias e cardioprotetoras, enquanto os taninos destacam-se por suas propriedades antimicrobianas e adstringentes. Compostos de menor polaridade, como terpenoides e carotenoides, também podem contribuir para a atividade antioxidante em ambientes lipofílicos, participando da proteção celular contra espécies reativas de oxigênio (Islam *et al.*, 2023).

Dessa forma, as diferenças observadas entre os extratos refletem a seletividade dos solventes empregados, com a água favorecendo a extração de compostos hidrossolúveis e o etanol permitindo a obtenção de uma maior diversidade de metabólitos secundários. Essa característica apresenta relevância para a síntese verde de AgNPs, uma vez que os compostos extraídos podem atuar como agentes redutores e estabilizantes durante a formação das AgNPs, reforçando o potencial do pólen de *M. urundeuva* como matriz promissora para aplicações em nanobiotecnologia.

5.1.1.2 Conteúdo Fenólico Total

A determinação do conteúdo fenólico total dos extratos de pólen foi realizada pelo método colorimétrico de Folin–Ciocalteu, utilizando ácido gálico como padrão para a construção da curva de calibração. A curva de calibração (Figura 15) apresentou boa linearidade dentro da faixa de concentração científica, com coeficiente de determinação (R^2) a 0.99947, obtendo-se a equação $y = 18,70057 x + 0,17739$, a partir do que foi possível determinar a concentração dos compostos fenólicos nas amostras por meio da conversão dos valores de absorção medidos a 700 nm.

Figura 15 - Curva de calibração de ácido gálico para determinação do conteúdo de compostos fenólicos totais pelo método de Folin–Ciocalteu ($\lambda = 765$ nm).



Fonte: Própria autora (2026).

As leituras de absorção obtidas para os extratos foram convertidas em valores de concentração por meio da curva padrão de ácido gálico. Os resultados referentes às três repetições analíticas estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores de concentração (mg/mL) e absorção obtidos para os extratos analisados por UV-vis ($\lambda = 700$ nm).

<i>Extrato</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Concentração equipamento (mg/mL)</i>	<i>Absorbância</i>	<i>Concentração equação da reta (mg/mL)</i>
<i>Aquoso</i>	1	0,192	3,639	0,185
	2	0,193	3,653	0,186
	3	0,192	3,639	0,185

	Média ± SD	0,192 ± 0,0006	3,644 ± 0,008	0,185 ± 0,0004
<i>Etanólico</i>	1	0,113	2,142	0,105
	2	0,102	1,937	0,094
	3	0,109	2,054	0,100
	Média ± SD	0,108 ± 0,006	2,044 ± 0,103	0,1 ± 0,005

Fonte: Própria autora (2026).

Para o extrato aquoso, o conteúdo de compostos fenólicos totais foi determinado com base na Equação 1, considerando volume de extração de 50 mL, fator de diluição igual a 2 e massa de amostra de 5 g. Dessa forma, foi obtido um fator de conversão igual a 20, resultando em valores finais de 3,70; 3,72 e 3,70 mg EAG/g. A média do conteúdo fenólico total para o extrato aquoso foi de $3,707 \pm 0,0086$ mg EAG/g, evidenciando baixa variação entre as replicatas e, consequentemente, boa reprodutibilidade experimental.

Com base na equação 2, para o extrato etanólico, aplicando-se a mesma solução de conversão, considerando volume de 60 mL, fator de diluição igual a 10 e massa de 6 g, obteve-se um fator global de 100. Assim, os valores finais calculados foram 10,51; 9,41 e 10,04 mg EAG/g, resultando em um conteúdo fenólico total médio de $9,983 \pm 0,549$ mg EAG/g.

Segundo Carpes *et al.* (2007), o pólen coletado por abelhas apresenta teores característicos de polifenóis totais, os quais podem variar em função da origem botânica das espécies vegetais exploradas. Essa variabilidade está diretamente relacionada à diversidade de fontes florais, refletindo na composição química do pólen e, consequentemente, em sua propriedade. O teor de compostos fenólicos totais nos extratos de pólen, segundo os autores, foi influenciado pela concentração de etanol utilizado na extração (de 40-90%), variando entre 3,6 e 8,1 mg EAG/g para o pólen de Alagoas e entre 6,6 e 10,9 mg EAG/g para o pólen do Paraná, que apresentou valores mais elevados. De modo geral, as concentrações de etanol (60–80%) mostraram maior eficiência na extração dos compostos fenólicos, resultando em maiores teores, sem diferenças específicas entre essas condições. Esses resultados indicam que tanto o solvente quanto a origem do pólen influenciam diretamente na remoção desses compostos.

De acordo com a triagem fitoquímica para o extrato aquoso, a presença restrita de flavonoides, glicosídeos e triterpenoides indica uma menor disponibilidade de compostos com elevada capacidade redutora e estabilizante. Essa limitação é reforçada pela baixa atividade antioxidante, que indica capacidade reduzida do extrato em atuar como agente redutor. Além disso, o perfil fitoquímico restrito, com ausência de compostos fenólicos mais complexos e altamente reativos, compromete a estabilização das partículas formadas.

A comparação entre os extratos avaliados neste estudo evidencia que o extrato etanólico apresentou teor significativamente superior aos compostos fenólicos em relação ao extrato aquoso. Esse comportamento pode ser atribuído à maior eficiência do etanol na extração de compostos fenólicos, especialmente aqueles de menor polaridade, os quais apresentam maior solubilidade em solventes orgânicos.

Do ponto de vista da síntese verde de AgNPs, os compostos fenólicos presentes no extrato vegetal desempenham papel relevante nos processos de redução dos íons Ag^+ e estabilização das AgNPs formadas. Dessa forma, o maior teor desses compostos observado no extrato etanólico sugere maior potencial desse extrato como agente redutor e estabilizante durante a síntese.

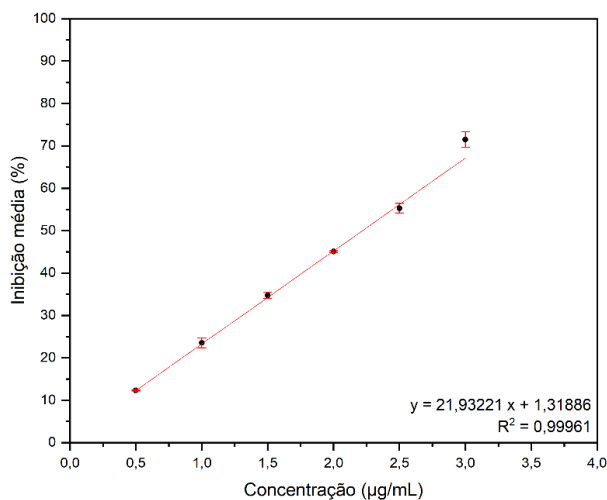
Em conjunto, os resultados indicam que ambos os extratos apresentam teores relevantes de compostos fenólicos, porém o extrato etanólico demonstrou maior eficiência na extração desses metabólitos, característica que pode contribuir para seu melhor desempenho na síntese verde das AgNPs.

5.1.1.3 Atividade Antioxidante

A atividade antioxidante dos extratos aquoso e etanólico do pólen foi avaliada pelo método de sequestro do radical DPPH, utilizando a quercetina como padrão de referência. A porcentagem de inibição do radical DPPH foi calculada de acordo com a Equação 2. Logo, os resultados foram expressos como porcentagem de inibição do radical em função da concentração ($\mu\text{g/mL}$). A partir das curvas de calibração obtidas para cada amostra, foram calculados os valores de CI_{50} , correspondentes à concentração para inibir 50% do radical DPPH, utilizando como parâmetro a regressão linear obtida.

A curva de calibração da quercetina está apresentada na Figura 16.

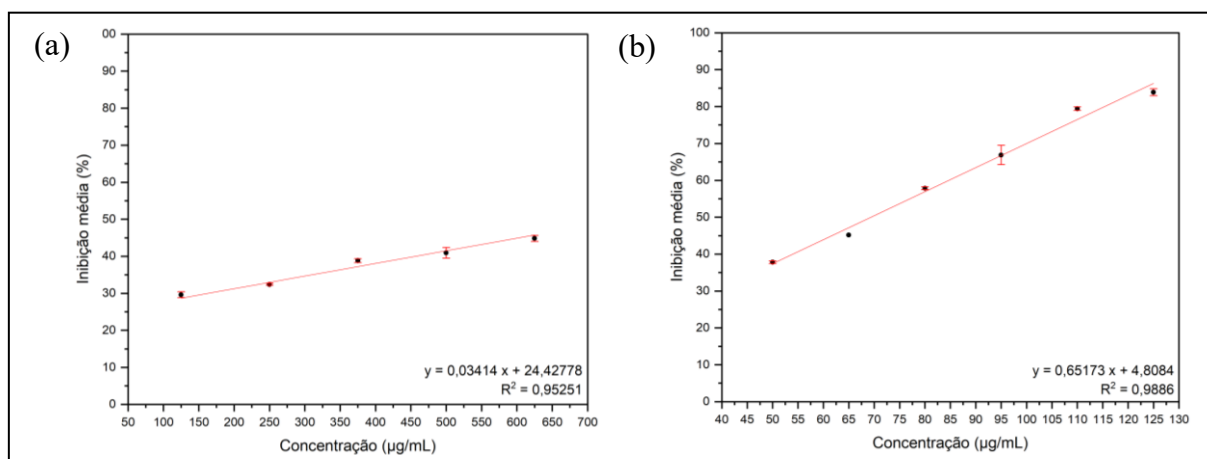
Figura 16 - Curva de inibição do radical DPPH em função da concentração para quercetina.



Fonte: Própria autora (2026).

A quercetina apresentou CI_{50} de $2,15 \pm 0,03 \mu\text{g/mL}$, confirmando sua elevada capacidade antioxidante. Estudo recente reportou valor de CI_{50} para a quercetina a $1,18 \pm 0,02 \mu\text{g/mL}$ (Kalinowska *et al.*, 2021), dependendo das condições experimentais, evidenciando sua alta eficiência como sequestradora de radicais livres. O valor obtido neste trabalho indica uma atividade antioxidante evidente, associada às condições experimentais empregadas, como concentração de DPPH e tempo de ocorrência, fatores que influenciam diretamente esse parâmetro. As curvas de calibração dos extratos, aquoso e etanólico, está apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Avaliação da atividade antioxidante dos extratos de pólen de *M. urundeuva* por meio da inibição do radical DPPH em função da concentração: (a) aquoso e (b) etanólico.



Fonte: Própria autora (2026).

Para os extratos avaliados, observou-se diferença significativa na atividade antioxidante em função do solvente empregado. O extrato etanólico apresentou menor valor de CI_{50} ($69,34 \pm 0,51 \mu\text{g/mL}$), enquanto o extrato aquoso apresentou CI_{50} de $782,57 \pm 21,83 \mu\text{g/mL}$, indicando menor capacidade de neutralização do radical DPPH. De acordo com a literatura, menores valores de CI_{50} estão associados a maior atividade antioxidante, uma vez que menores concentrações do extrato são necessárias para inibir 50% do radical livre presente no meio reacional (Abarca-Vargas; Zamilpa; Petricevich, 2019).

Embora o extrato aquoso tenha apresentado maior rendimento de extração, esse resultado não está necessariamente relacionado a uma maior concentração de compostos responsáveis pela atividade antioxidante. O maior rendimento pode estar associado à extração de componentes solúveis não antioxidantes, enquanto o extrato etanólico apresentou maior eficiência na extração de compostos bioativos com capacidade de atuar como agentes antioxidantes e potenciais agentes redutores.

A partir dos dados apresentados na Tabela 5, observa-se que foram empregadas concentrações significativamente mais elevadas na análise de atividade antioxidante para o extrato aquoso em comparação ao extrato etanólico (cerca de 4,5 vezes maior), com o objetivo de alcançar 50% de inibição do DPPH radical. Ainda assim, conforme evidenciado na Figura 17, o extrato aquoso não atingiu esse nível de atividade antioxidante, apresentando valores máximos de inibição em cerca de 45%. Em contrapartida, o extrato etanólico apresentou eficiência elevada, ultrapassando 80% de inibição na concentração de $125 \mu\text{g/mL}$.

Desta forma, embora o CI_{50} do extrato aquoso tenha sido estimado em $782,57 \pm 21,83 \mu\text{g/mL}$ por meio da regressão linear, esse valor representa apenas uma extrapolação, uma vez que não houve interseção experimental com 50% de interferência. Um ponto importante de comparação entre os extratos é a concentração de $125 \mu\text{g/mL}$, comum a ambos os conjuntos de dados (primeiro ponto do extrato aquoso e último ponto do extrato etanólico). Nessa concentração, observa-se uma diferença expressiva na atividade antioxidante, com o extrato etanólico apresentando porcentagem superior a 80%, enquanto o extrato aquoso apresenta cerca de 30%, evidenciando a maior eficiência do solvente etanólico com potencial antioxidante.

Compostos com CI_{50} inferiores a $50 \mu\text{g/mL}$ são considerados altamente ativos, entre 50 e $100 \mu\text{g/mL}$ apresentam forte atividade, entre 101 e $250 \mu\text{g/mL}$ atividade moderada, entre 251 e $500 \mu\text{g/mL}$ atividade fraca e acima de $500 \mu\text{g/mL}$ são classificados sem atividade antioxidante (Alzahrani *et al.*, 2024).

Em estudo de referência, os extratos hidroetanólicos de pólen apresentaram valores de CI_{50} variando entre aproximadamente $117 \pm 0,03$ e $597,93 \pm 0,96 \mu\text{g/mL}$, dependendo da origem geográfica das amostras (Lopes *et al.*, 2019).

Observa-se que o extrato etanólico obtido neste trabalho apresentou atividade antioxidante superior à maioria dos extratos descritos na literatura, uma vez que seu valor de CI_{50} ($69,34 \pm 0,51 \mu\text{g/mL}$) é inferior ao menor valor relatado no estudo comparativo ($117 \pm 0,03 \mu\text{g/mL}$), apresentando maior eficiência na neutralização do DPPH radical. Por outro lado, o extrato aquoso apresentou comportamento semelhante aos extratos descritos no artigo, cujos valores de CI_{50} ultrapassaram $500 \mu\text{g/mL}$, reforçando a baixa eficiência antioxidante desse sistema extrator.

O método de extração por banho ultrassônico contribui para o aumento da eficiência na obtenção desses compostos, promovendo maior ruptura celular e facilitando a liberação de metabólitos bioativos (Khursheed *et al.*, 2024). Estudos recentes demonstram que a extração ultrassônica pode aumentar significativamente tanto o teor de compostos fenólicos quanto a atividade antioxidante medida pelo DPPH, quando comparado a métodos convencionais aliado ao melhor solvente para a extração (Gueffai *et al.*, 2022).

5.2 Síntese Verde de Nanopartículas de Prata

A escolha do pólen como agente mediador da síntese está relacionada à sua composição química, especialmente à presença de compostos fenólicos. Além do potencial redutor, esses metabólitos apresentam capacidade de formar complexos com íons metálicos por meio de processos de quelatação, favorecendo interações com espécies reativas e desempenhando papel relevante em sistemas químicos e biológicos (Carpes *et al.*, 2007).

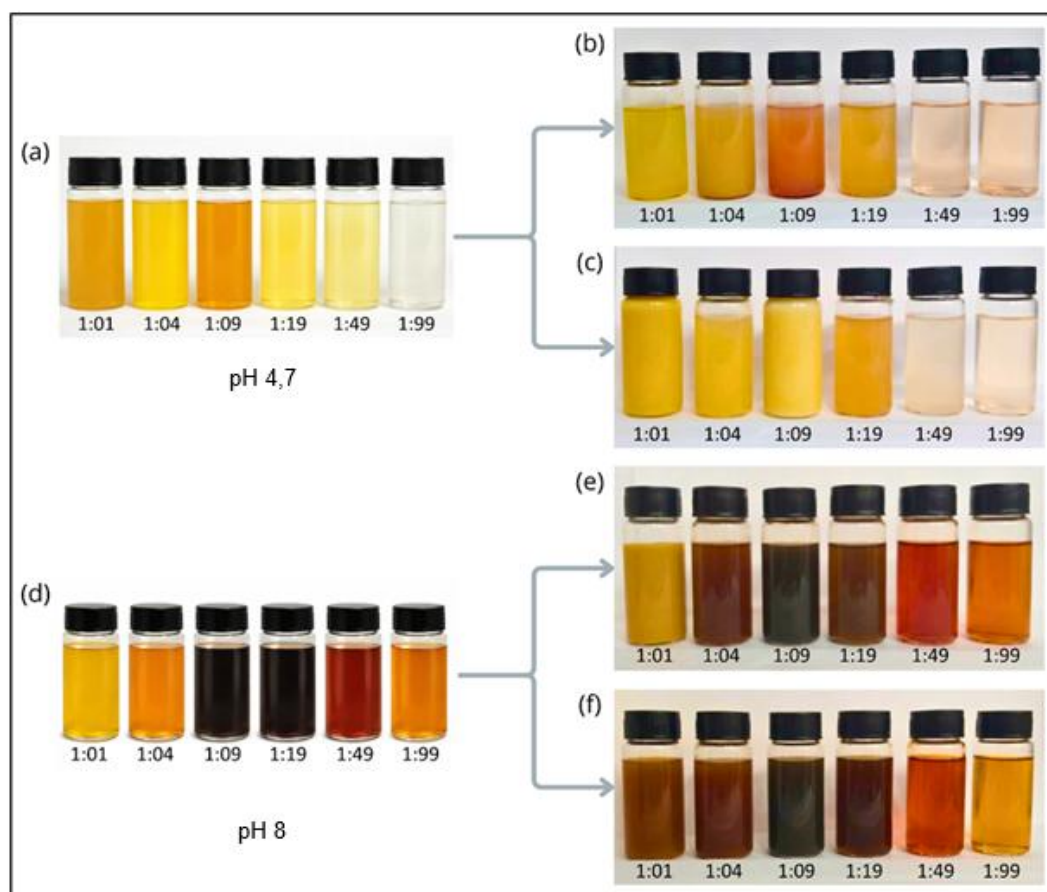
A síntese mediada pelo extrato etanólico de pólen de *M. urundeuva* resultou na formação de AgNPs. O acompanhamento por UV-vis da SPR revelou bandas centradas em comprimentos de onda condizentes com a escala nanométrica (420–450 nm), evidenciando que a riqueza fitoquímica dessa matriz vegetal foi determinante para a conversão eficiente dos íons prata.

Visualmente foi possível observar alteração das cores dos coloides de acordo com as condições de otimização de síntese, como apresentado na Figura 18. Nesse trabalho foram avaliadas em seis proporções extrato: AgNO_3 (1:01, 1:04, 1:09, 1:19, 1:49 e 1:99), dois valores de pHs (4,7 e 8,0) e duas temperaturas (25 e 45 °C). No total, foram investigadas 24 condições experimentais distintas, com tempo reacional de 120 minutos, permitindo observar a influência desses parâmetros no processo de formação das NPs.

As mudanças visuais observadas nos coloides com transição de tonalidades de tons amarelos claros para coloração amarronzada, está associada à formação de AgNPs devido ao fenômeno de SPR. Entretanto, a intensidade e a velocidade dessa alteração variaram de acordo com as condições experimentais avaliadas.

A mudança de coloração indica que o extrato etanólico apresentou, de modo geral, capacidade de formação de NPs, o que pode ser atribuído às várias classes de fitoquímicos presentes, maior teor de compostos fenólicos e à elevada atividade antioxidante apresentada nos ensaios qualitativos e quantitativos (Vanlalveni *et al.*, 2021). Através dessa interação, os fitoconstituintes não apenas facilitam a formação das nanoestruturas, mas também provêm um revestimento protetor, prevenindo processos de agregação e garantindo a preservação das propriedades biológicas do coloide.

Figura 18 - Formação de AgNPs com extrato etanólico de pólen da *M. urundeuva* após 120 min de reação sob diferentes condições de pH e temperatura: (a) sistema inicial antes da síntese e pH 4,7; (b) pH 4,7 a 25 °C; (c) pH 4,7 a 45 °C; (d) pH 8,0 antes da síntese; (e) pH 8,0 a 25 °C; (f) pH 8,0 a 45 °C.



Fonte: Própria autora (2026).

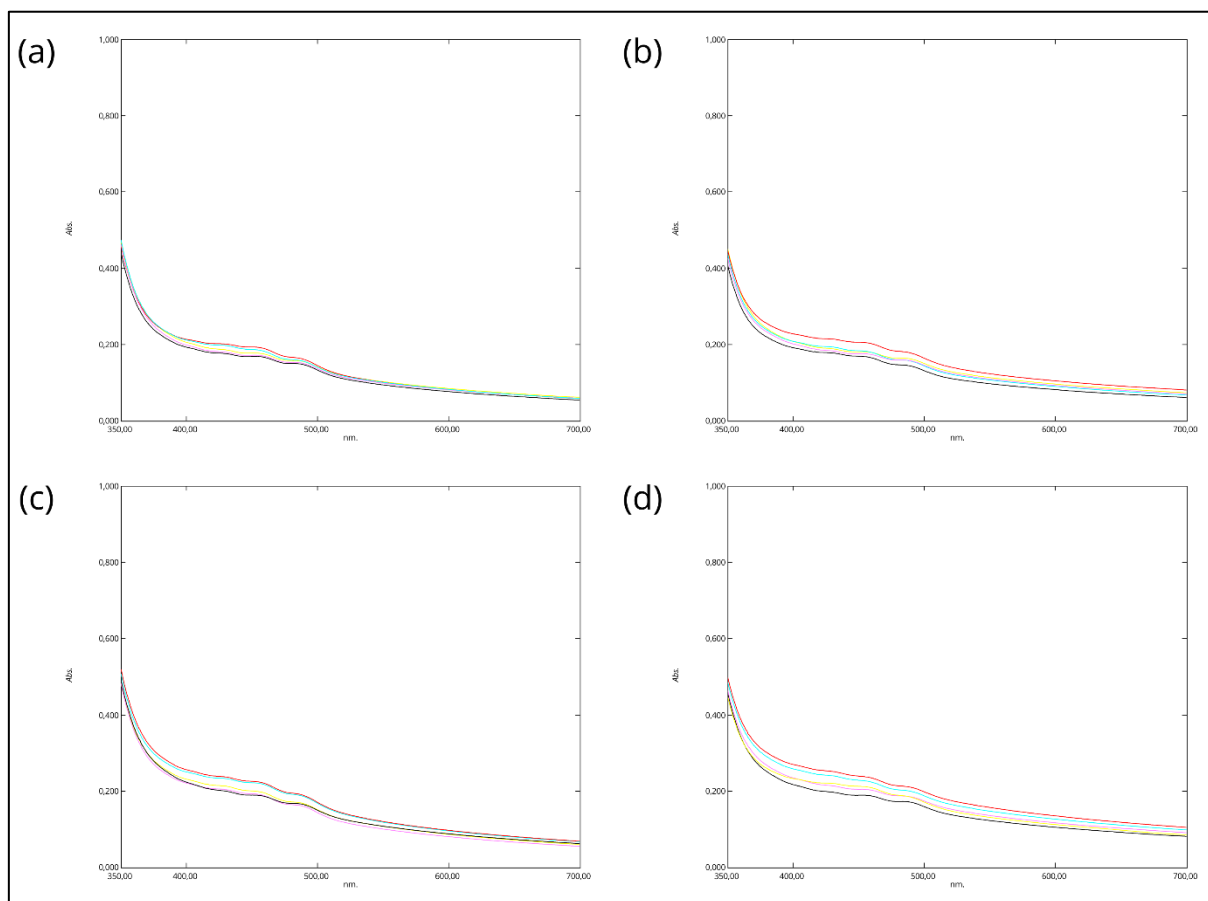
A proporção entre extrato e solução de AgNO_3 é um parâmetro importante na síntese verde de AgNPs, pois determina o equilíbrio entre a quantidade de agentes redutores e estabilizantes presentes no extrato e a concentração de íons metálicos disponíveis para redução. Estudo demonstra que a variação dessa razão influencia diretamente os processos de nucleação e crescimento das AgNPs, afetando propriedades como tamanho, morfologia e estabilidade (Jalab *et al.*, 2021).

Os espectros obtidos apresentaram bandas características na região de aproximadamente 427 nm para todas as proporções extrato: AgNO_3 avaliadas.

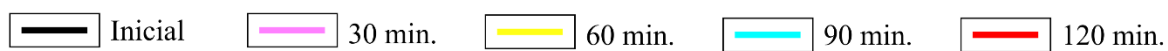
A espectroscopia de UV-Vis destaca-se não apenas no monitoramento da evolução espectral ao longo do tempo, mas também como uma ferramenta essencial de caracterização qualitativa das AgNPs. A análise minuciosa do perfil da banda de SPR fornece indicativos estruturais valiosos sobre o sistema coloidal, como simetria da banda, largura a meia altura e comprimento de onda máximo indicando distribuição de tamanho, forma e agregação das partículas formadas. Ressalta-se que o UV-Vis não se configura como uma técnica quantitativa direta para a determinação do diâmetro geométrico das nanopartículas. Trata-se de uma avaliação diagnóstica indireta e comparativa, cujos indicativos de tamanho e polidispersão devem ser complementados e validados pelas técnicas de DLS, NTA e microscopia, as quais oferecem medições diretas e detalhadas das dimensões e da concentração do sistema (Dhaka *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024).

Assim, os efeitos das diferentes proporções extrato: AgNO_3 (1:01, 1:04, 1:09, 1:19, 1:49 e 1:99) foram analisadas por espectroscopia de UV-Vis e estão apresentados nas Figuras 19 a 24. Para possibilitar a comparação direta entre as diferentes proporções de síntese, a Figura 25 apresenta os espectros de extinção UV-Vis obtidos a partir de amostras preparadas sob as mesmas condições experimentais com melhores resultados (temperatura de 25 °C e pH 8,0). Em todas os espectros foram observadas a banda SPR em aproximadamente 427 nm, sendo atribuídas a NPs predominantemente esféricas. Os valores de comprimento de onda obtidos neste estudo estão de acordo com dados descritos na literatura, que relatam bandas de extinção nessa mesma faixa para AgNPs sintetizadas por rotas verdes (Nouri *et al.*, 2020; Ahmad *et al.*, 2023).

Figura 19 - Espectros de extinção UV-Vis das AgNPs obtidas na proporção 1:01 (extrato:AgNO₃), após diluição das amostras na razão 1:66,5 (v/v – AgNPs/água ultrapura), sob condições específicas em função do tempo de síntese: (a) temperatura 25 °C e pH 4,7; (b) temperatura 25 °C e pH 8,0; (c) temperatura 45 °C e pH 4,7; (d) temperatura 45 °C e pH 8,0.

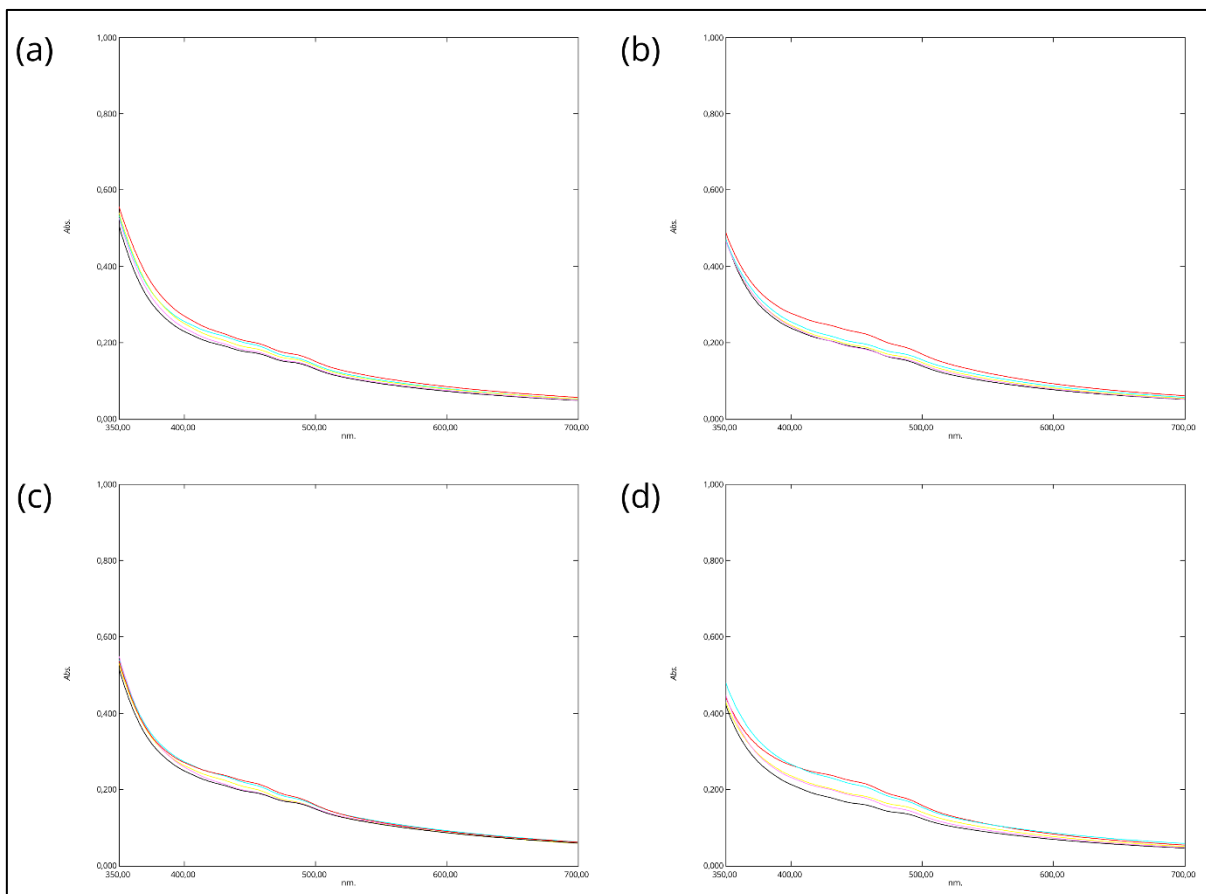


Legenda:



Fonte: Própria autora (2026).

Figura 20 - Espectros de extinção UV-Vis das AgNPs obtidas na proporção 1:04 (extrato:AgNO₃), após diluição das amostras na razão 1:33 (v/v – AgNPs/água ultrapura), sob condições específicas em função do tempo de síntese: (a) temperatura 25 °C e pH 4,7; (b) temperatura 25 °C e pH 8,0; (c) temperatura 45 °C e pH 4,7; (d) temperatura 45 °C e pH 8,0.

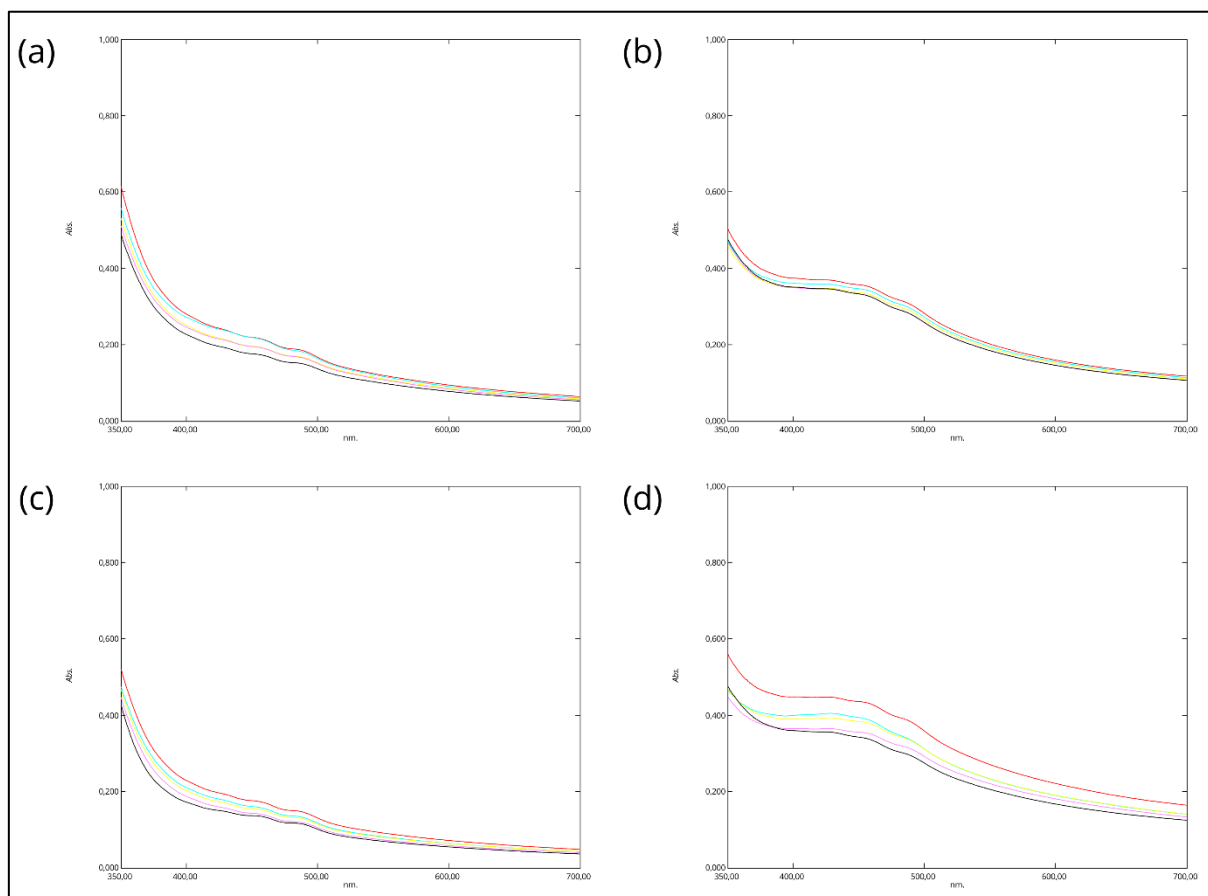


Legenda:

Inicial
 30 min.
 60 min.
 90 min.
 120 min.

Fonte: Própria autora (2026).

Figura 21 - Espectros de extinção UV-Vis das AgNPs obtidas na proporção 1:09 (extrato:AgNO₃), após diluição das amostras na razão 1:16,5 (v/v – AgNPs/água ultrapura), sob condições específicas em função do tempo de síntese: (a) temperatura 25 °C e pH 4,7; (b) temperatura 25 °C e pH 8,0; (c) temperatura 45 °C e pH 4,7; (d) temperatura 45 °C e pH 8,0.

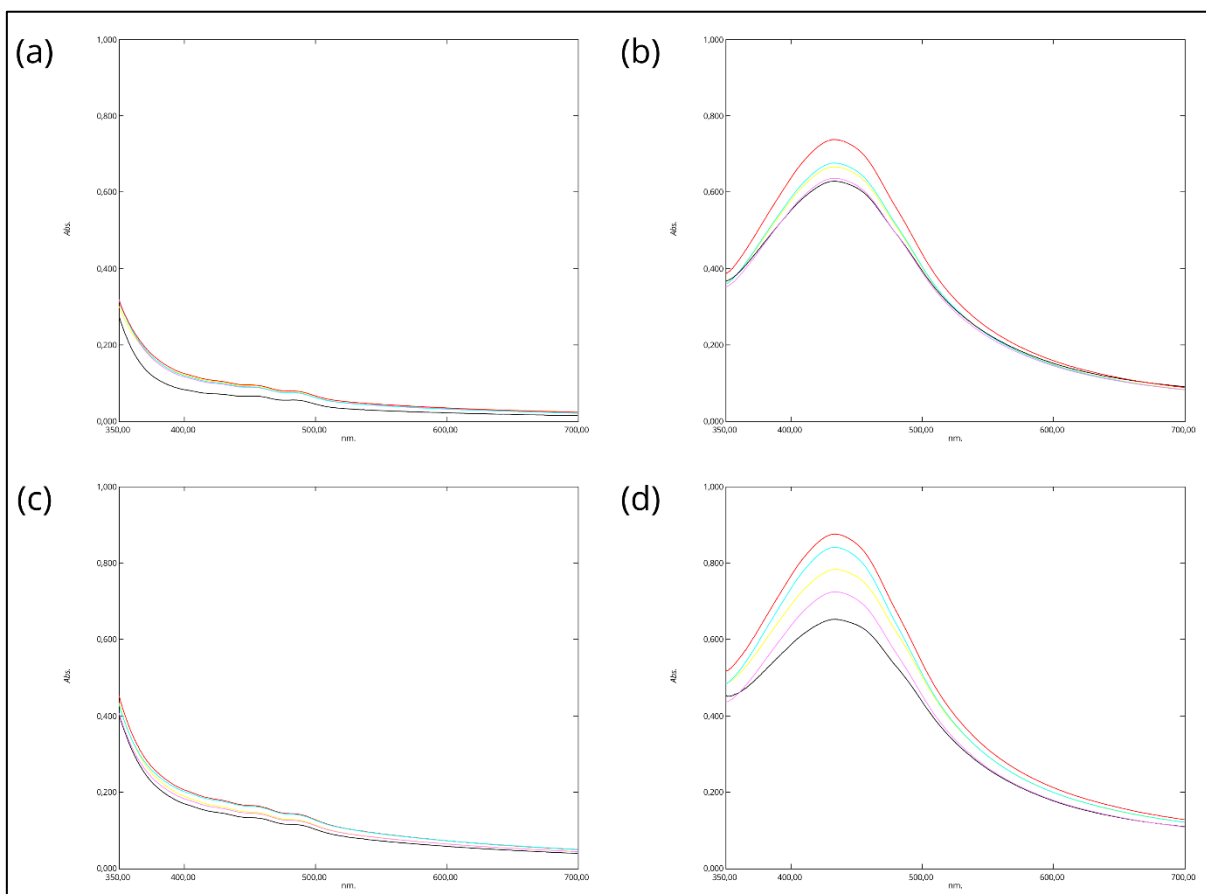


Legenda:



Fonte: Própria autora (2026).

Figura 22 - Espectros de extinção UV-Vis das AgNPs obtidas na proporção 1:19 (extrato:AgNO₃), após diluição das amostras na razão 1:10 (v/v – AgNPs/água ultrapura), sob condições específicas em função do tempo de síntese: (a) temperatura 25 °C e pH 4,7; (b) temperatura 25 °C e pH 8,0; (c) temperatura 45 °C e pH 4,7; (d) temperatura 45 °C e pH 8,0.

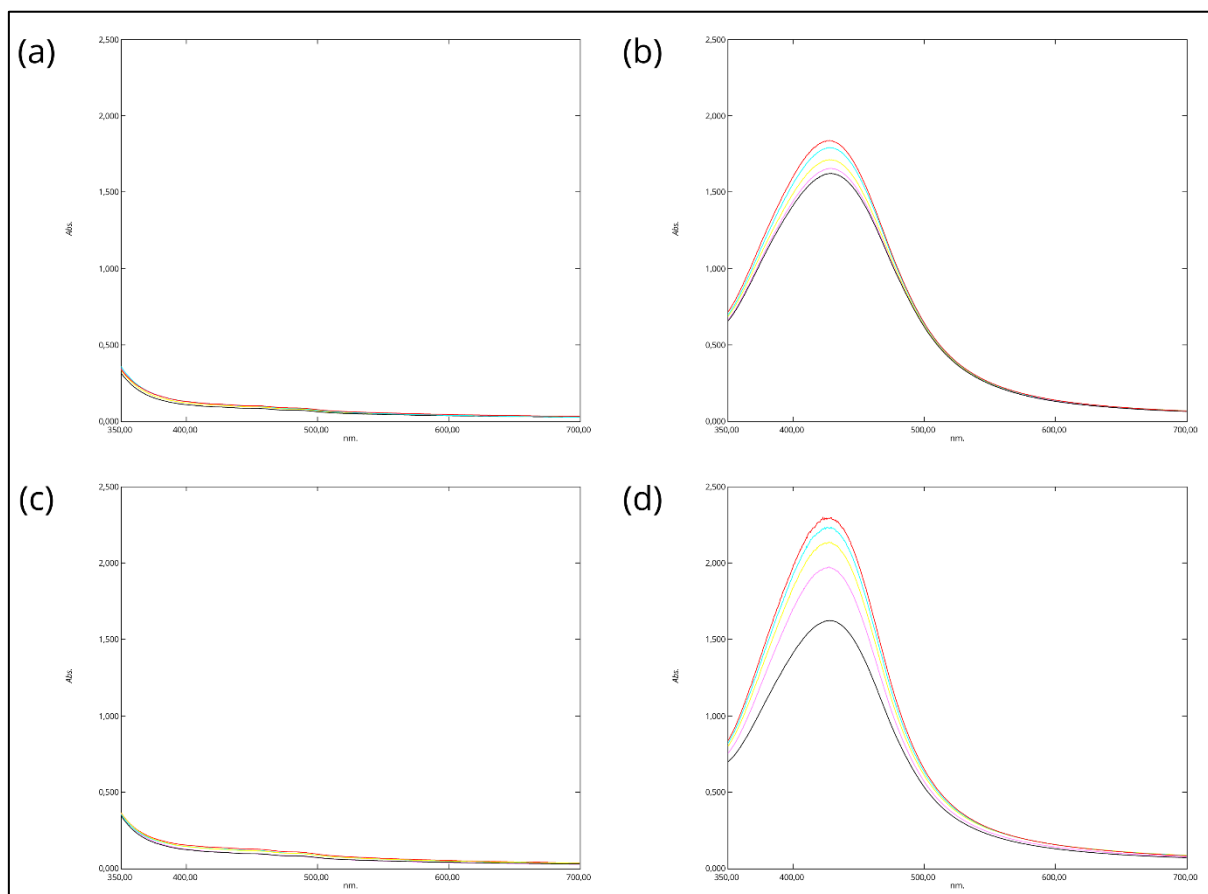


Legenda:



Fonte: Própria autora (2026).

Figura 23 - Espectros de extinção UV-Vis das AgNPs obtidas na proporção 1:49 (extrato:AgNO₃), após diluição das amostras na razão 1:03 (v/v – AgNPs/água ultrapura), sob condições específicas em função do tempo de síntese: (a) temperatura 25 °C e pH 4,7; (b) temperatura 25 °C e pH 8,0; (c) temperatura 45 °C e pH 4,7; (d) temperatura 45 °C e pH 8,0.

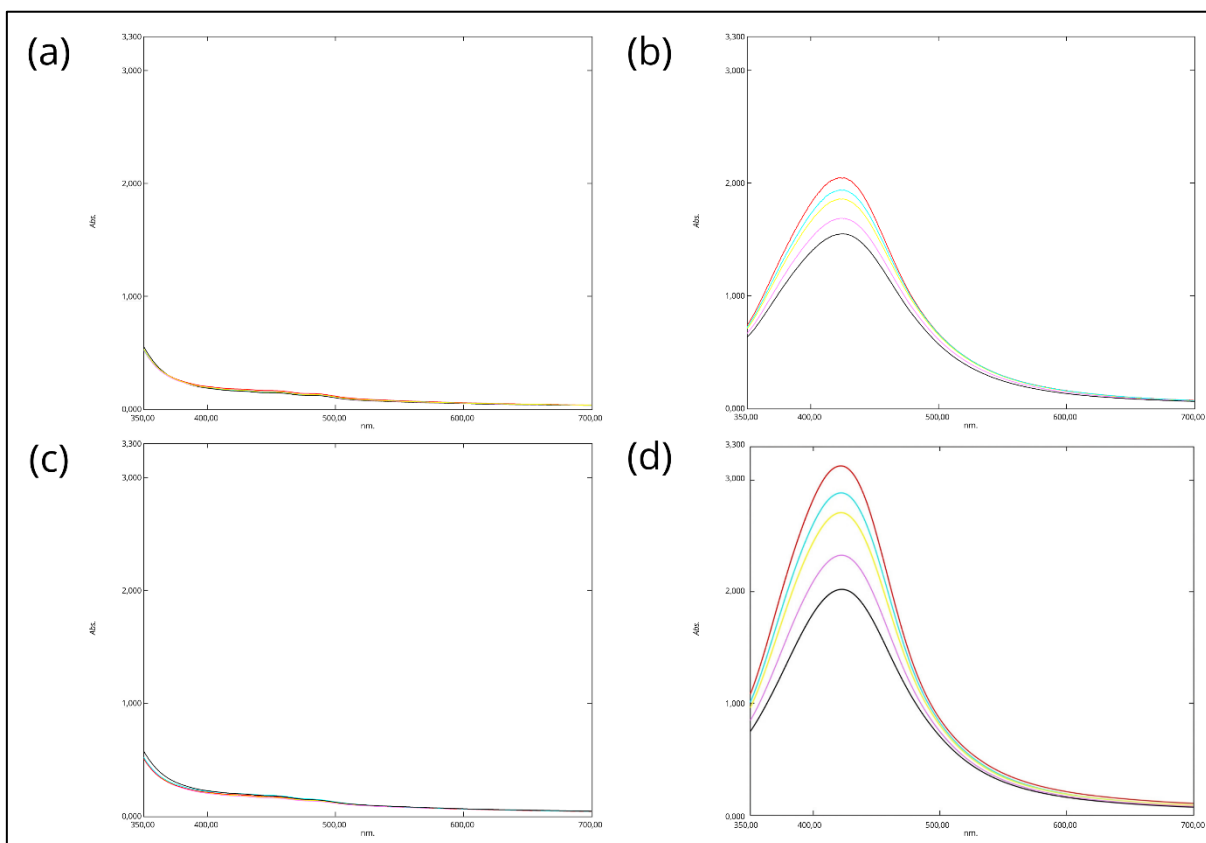


Legenda:



Fonte: Própria autora (2026).

Figura 24 - Espectros de extinção UV-Vis das AgNPs obtidas na proporção 1:99 (extrato:AgNO₃), após diluição das amostras na razão 1:1,5 (v/v – AgNPs/água ultrapura), sob condições específicas em função do tempo de síntese: (a) temperatura 25 °C e pH 4,7; (b) temperatura 25 °C e pH 8,0; (c) temperatura 45 °C e pH 4,7; (d) temperatura 45 °C e pH 8,0.



Legenda:



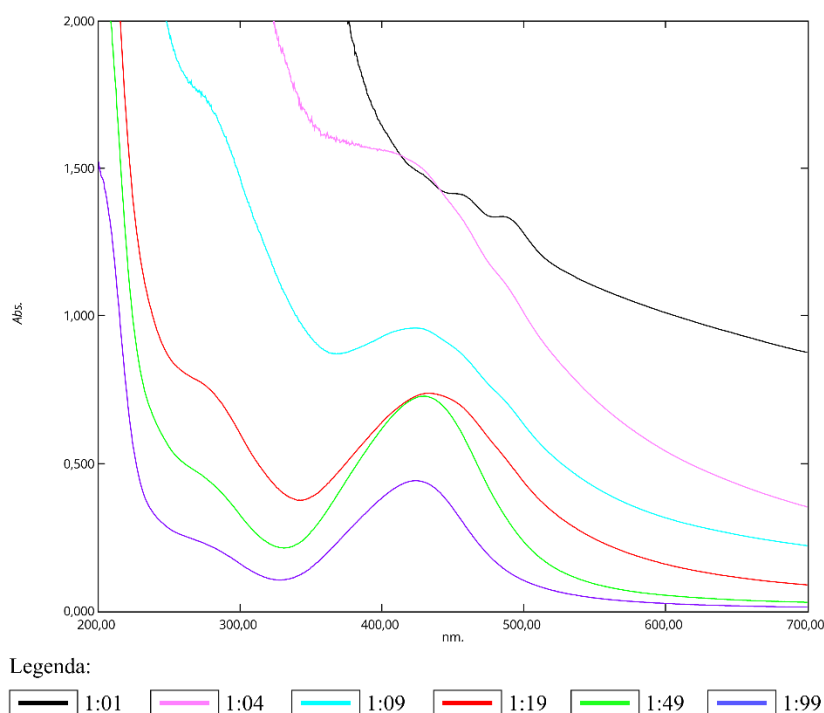
Fonte: Própria autora (2026).

Em relação às proporções extrato:AgNO₃, as condições com menor proporção de extrato em relação ao AgNO₃ (1:19, 1:49 e 1:99) apresentaram maior eficiência na formação de NPs, proporcionando um equilíbrio adequado entre a quantidade de agente redutor disponível e a concentração de íons metálicos.

Para possibilitar a comparação direta entre as diferentes proporções de síntese, a Figura 25 apresenta os espectros de extinção UV-Vis obtidos a partir de amostras preparadas sob as mesmas condições experimentais com melhores resultados (temperatura de 25 °C e pH 8,0). Além disso, todas as amostras foram submetidas à mesma diluição (1:10, v/v), independentemente da proporção extrato:AgNO₃ utilizado, garantindo a padronização da concentração durante a leitura espectral. Esse procedimento foi avaliado de forma comparativa

quanto às variações de intensidade, largura e posição das bandas plasmônicas para cada proporção, garantindo que as diferenças observadas estejam relacionadas exclusivamente às condições de especificidade.

Figura 25 - Espectros de extinção UV-Vis das AgNPs obtidas em diferentes proporções extrato:AgNO₃ (1:01, 1:04, 1:09, 1:19, 1:49 e 1:99), após diluição das amostras na razão 1:10 (v/v – AgNPs/água ultrapura), sob temperatura 25 °C e pH 8,0 em função do tempo final de síntese (120 min.).



Fonte: Própria autora (2026).

As proporções menores de extrato em relação ao AgNO₃ favorecem uma nucleação mais controlada, resultando em partículas menores, enquanto concentrações elevadas de extrato podem levar ao excesso de compostos orgânicos, promovendo o crescimento descontrolado e possível agregação de NPs. Resultados semelhantes foram relatados por Vanlalveni *et al.* (2021), que demonstrou que o aumento da concentração do extrato leva à formação de NPs maiores devido ao favorecimento do crescimento em relação à nucleação inicial.

Em condições em que a quantidade de extrato é limitada, os compostos fitoquímicos atuam de forma mais eficiente na redução inicial dos íons metálicos, promovendo a formação de núcleos bem definidos, enquanto a menor presença de substâncias orgânicas reduz a probabilidade de crescimento descontrolado e interações intermoleculares que levam à

agregação. Além disso, a maior disponibilidade de íons Ag^+ pode favorecer uma taxa de nucleação mais abundante, resultando em NPs com melhor distribuição de tamanho e maior uniformidade. Dessa forma, proporções com maior fração de AgNO_3 , como observado neste estudo, podem contribuir para a formação de sistemas melhores e com menor tendência à aglomeração, sendo uma estratégia eficiente para otimização das propriedades físico-químicas das NPs sintetizadas (Abada *et al.*, 2024; Dhir *et al.*, 2024).

De acordo com a definição da banda SPR, foi possível observar que o pH 8,0, caracterizado como levemente alcalino, apresentou influência significativa sobre o processo de síntese. Nessa condição, observou-se uma cinética de formação das NPs mais rápida, evidenciada pela intensificação da coloração das suspensões coloidais, sugerindo maior eficiência na redução dos íons Ag^+ e na formação das AgNPs.

Segundo De La Cruz-Puma *et al.* (2024), o pH é um parâmetro essencial na síntese de AgNPs, pois influencia diretamente seu tamanho, distribuição e estabilidade. Em pH ácido (como pH 3), forma-se uma menor quantidade de NPs, com alta polidispersidade e maior tendência à agregação, devido à baixa repulsão eletrostática e menor eficiência na redução. Com o aumento do pH, há maior desprotonação dos compostos fenólicos do extrato, o que intensifica sua capacidade redutora e estabilizadora, favorecendo a formação de NPs, sendo o pH 8,0 uma condição mais adequada. Por outro lado, em pH mais elevados (9 e 10), o excesso de espécies redutoras pode levar ao crescimento excessivo das partículas e à sua aglomeração, reduzindo a estabilidade do sistema.

Por outro lado, a temperatura exerceu pouca influência na formação das AgNPs nas condições avaliadas. As análises realizadas sob aquecimento (45 °C) tiveram comportamento semelhante ao conduzido em temperatura a 25 °C, não sendo observadas diferenças expressivas na intensidade ou na velocidade de formação das NPs. Esse resultado sugere que, nas condições experimentais empregadas, a energia térmica adicional não foi um fator determinante para o processo reacional.

A influência da temperatura na síntese verde de NPs está relacionada tanto à cinética de redução dos íons metálicos quanto à estabilidade dos compostos bioativos presentes no extrato vegetal. Embora temperaturas elevadas possam acelerar determinadas etapas da síntese, o aumento excessivo da temperatura pode favorecer a degradação de compostos fenólicos, reduzindo sua capacidade redutora e afetando a estabilidade das NPs formadas (Alara; Abdurahman; Ukaegbu, 2021).

Além disso, em sistemas contendo extratos obtidos com etanol, o aumento da temperatura pode influenciar a composição do meio reacional devido à maior volatilidade desse

solvente, cujo ponto de ebulição é inferior ao da água ($\sim 78^\circ\text{C}$). Essa característica pode alterar gradualmente a concentração dos constituintes do sistema e interferir na reprodutibilidade do processo. Dessa forma, a utilização de temperaturas moderadas ou próximas às condições ambientais pode favorecer a preservação dos compostos bioativos do extrato e contribuir para a manutenção da estabilidade do sistema coloidal.

As condições que envolveram o uso do extrato etanólico, proporções extrato: AgNO_3 com menor quantidade de extrato, pH levemente alcalino e temperatura a 25°C levaram a formação mais eficiente das AgNPs, indicando maior disponibilidade de agentes redutores e melhores condições para estabilização das NPs. Desta forma, uma análise conjunta dos fatores estudados evidencia que a síntese das AgNPs foi fortemente dependente das condições experimentais utilizadas.

As formulações obtidas a partir das condições experimentais otimizadas foram submetidas a análises de caracterização a fim de comparar entre elas os tamanhos, composição, morfologia, número de partículas e fatores indicativos de estabilidade das AgNPs.

5.3 Caracterização das AgNPs

A caracterização das AgNPs sintetizadas foi realizada por meio de diferentes técnicas que permitiram uma avaliação abrangente das propriedades ópticas, estruturais, morfológicas e de estabilidade das NPs obtidas.

5.3.1 Tamanho e Estabilidade Coloidal: Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS) e Potencial Zeta (ELS)

A Tabela 11 apresenta os dados de DLS obtidos para as proporções extrato: AgNO_3 utilizadas nos processos de otimizações da síntese verde.

Tabela 11 - Avaliação do diâmetro hidrodinâmico (d_h), índice de polidispersidade (PDI) e potencial zeta das AgNPs mediadas por extrato etanólico do pólen da *M. urundeuva*.

<i>Extrato:AgNO₃</i>	<i>Temperatura</i>	<i>pH</i>	<i>d_h (nm)</i>	<i>PDI</i>	<i>Potencial Zeta (mV)</i>
<i>1:01</i>	25 °C	4,7	411,9 ± 6,86	0,082 ± 0,028	-11,1 ± 3,02
	25 °C	8,0	562,2 ± 40,50	0,473 ± 0,327	-44,1 ± 1,09
	45 °C	4,7	628,9 ± 56,61	0,266 ± 0,151	-19,1 ± 0,58
	45 °C	8,0	733,2 ± 48,16	0,023 ± 0,007	-54,7 ± 0,61
<i>1:04</i>	25 °C	4,7	294,8 ± 3,37	0,125 ± 0,050	-30,9 ± 0,27

	25 °C	8,0	333,7 ± 5,18	0,111 ± 0,072	-56,6 ± 0,84
	45 °C	4,7	324,7 ± 5,39	0,132 ± 0,025	-31,8 ± 0,86
	45 °C	8,0	376,0 ± 4,97	0,116 ± 0,032	-74,3 ± 1,27
	45 °C	8,0	157,8 ± 5,12	0,340 ± 0,051	-67,3 ± 1,16
1:09	25 °C	4,7	243,4 ± 0,41	0,152 ± 0,038	-44,2 ± 1,11
	25 °C	8,0	205,8 ± 2,72	0,232 ± 0,034	-71,4 ± 2,05
	45 °C	4,7	238,7 ± 2,41	0,185 ± 0,024	-45,3 ± 2,02
	45 °C	8,0	157,8 ± 5,12	0,340 ± 0,051	-67,3 ± 1,16
1:19	25 °C	4,7	241,0 ± 3,49	0,208 ± 0,028	-59,6 ± 1,51
	25 °C	8,0	98,2 ± 1,98	0,531 ± 0,043	-102,3 ± 2,62
	45 °C	4,7	285,2 ± 5,84	0,212 ± 0,018	-24,3 ± 1,72
	45 °C	8,0	110,0 ± 1,02	0,567 ± 0,011	-93,8 ± 4,02
1:49	25 °C	4,7	265,5 ± 10,87	0,389 ± 0,021	-37,3 ± 0,99
	25 °C	8,0	142,6 ± 2,10	0,260 ± 0,036	-61,5 ± 1,90
	45 °C	4,7	201,2 ± 2,25	0,279 ± 0,005	-43,0 ± 1,33
	45 °C	8,0	162,7 ± 1,45	0,239 ± 0,018	-65,5 ± 1,80
1:99	25 °C	4,7	192,2 ± 3,99	0,208 ± 0,021	-43,6 ± 0,78
	25 °C	8,0	154,6 ± 2,70	0,249 ± 0,015	-50,3 ± 2,29
	45 °C	4,7	200,8 ± 1,93	0,207 ± 0,003	-42,6 ± 1,34
	45 °C	8,0	156,8 ± 2,42	0,233 ± 0,019	-60,9 ± 2,05

Fonte: Própria autora (2026).

Os menores tamanhos de diâmetro hidrodinâmicos foram obtidos nas proporções intermediárias, com destaque para 1:19 (25 °C, pH 8,0), que apresentou o menor valor (98,2 ± 1,98 nm), seguido por 1:19 (45 °C, pH 8,0) (110 ± 1,02 nm) e 1:49 (25 °C, pH 8,0) (142,6 ± 2,10 nm). Observa-se que o pH 8,0 favoreceu a redução do tamanho médio, especialmente em proporções com menor quantidade de extrato, colaborando com os resultados obtidos por espectroscopia de extinção.

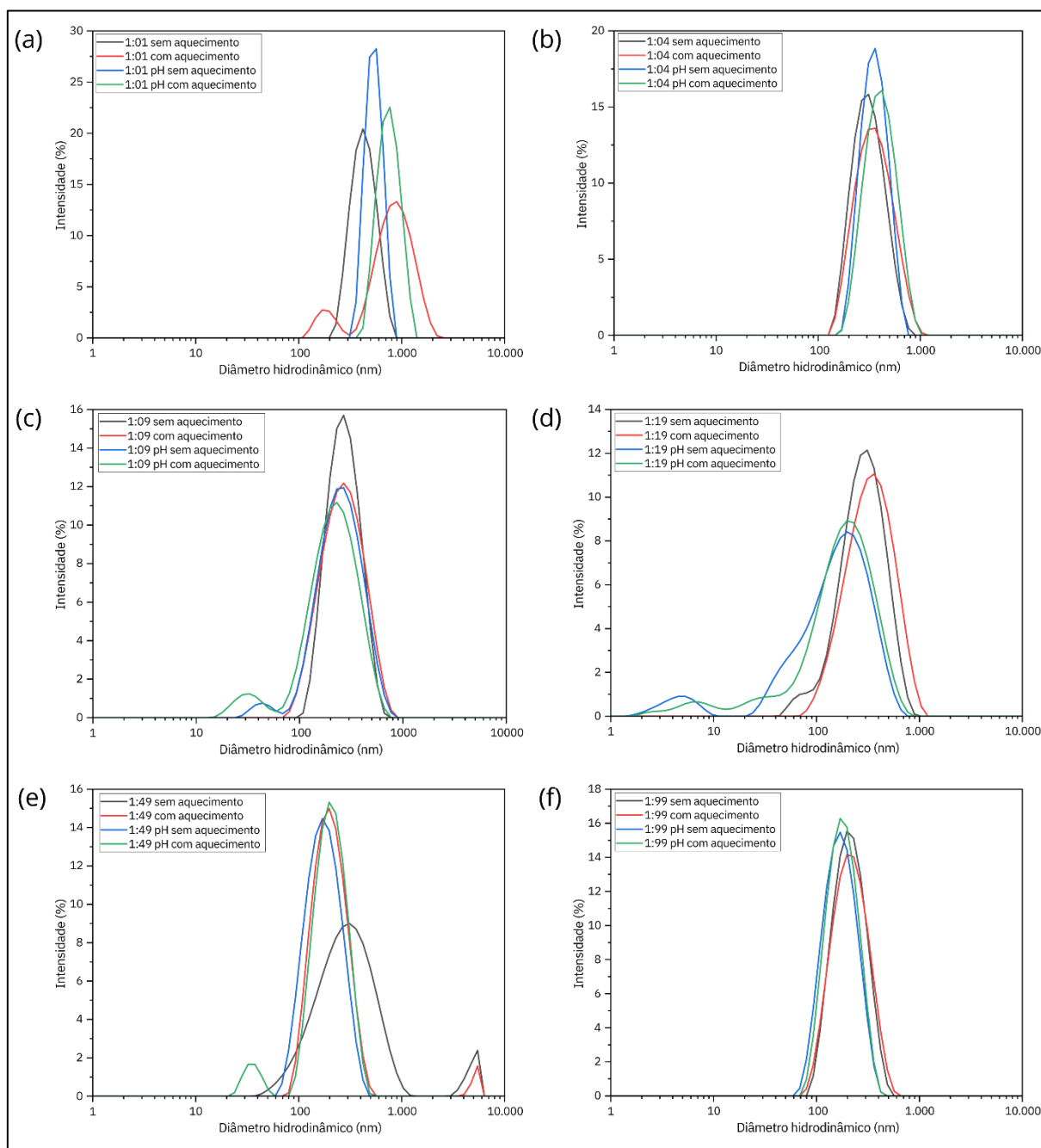
Os resultados obtidos para o diâmetro hidrodinâmico estão de acordo com a literatura recente sobre síntese verde de AgNPs. Estudos reportam, em geral, tamanhos médios por DLS na faixa de 50 a 100 nm, podendo atingir valores mais elevados dependendo do extrato vegetal e das condições de reação, como observado por Kerimkulova *et al.* (2025b), que encontrou partículas entre 52 e 164 nm. Resultados semelhantes também foram reportados em outros trabalhos, com tamanhos médios próximos de 90 nm para AgNPs sintetizados por rota verde (Elmehalawy *et al.*, 2025). Embora algumas das amostras deste estudo apresentem valores mais elevados, essas ainda se encontram dentro da faixa relatada na literatura para síntese verde de AgNPs.

É importante destacar que os valores obtidos por DLS tendem a ser superiores aos tamanhos reais das NPs. Isso ocorre porque a técnica mede o diâmetro hidrodinâmico, que inclui não apenas o núcleo metálico, mas também a camada de biomoléculas adsorvidas na

superfície e a camada de solvatação ao redor das partículas. O DLS também é sensível à presença de agregados, uma vez que partículas maiores dispersam mais luz, influenciando diretamente o resultado médio (Alruhaili *et al.*, 2025; Lina *et al.*, 2025; Han *et al.*, 2026).

As distribuições de tamanho hidrodinâmico obtidas por DLS para as diferentes proporções extrato etanólico:AgNO₃ e diferentes condições experimentais estão apresentadas na Figura 26.

Figura 26 - Perfis de distribuição de tamanho hidrodinâmico por DLS das AgNPs em diferentes proporções extrato etanólico:AgNO₃ para as proporções (a) 1:01, (b) 1:04, (c) 1:09, (d) 1:19, (e) 1:49 e (f) 1:99, avaliando a influência do pH e da temperatura.



Fonte: Própria autora (2026).

O índice de polidispersidade (PDI) é um parâmetro obtido por DLS, utilizado para avaliar a homogeneidade da distribuição de tamanho das NPs em suspensão. Esse índice varia de 0 a 1, sendo que valores próximos de zero indicam sistemas monodispersos, com distribuição de tamanho uniforme, enquanto valores mais elevados refletem maior heterogeneidade e ampla

distribuição de tamanhos. Estudos recentes sobre AgNPs sintetizadas por rotas verdes relatam valores frequentemente na faixa de 0,2 a 0,5, dependendo das condições de síntese e dos agentes estabilizantes utilizados (Rodrigues, 2024). De modo geral, valores de PDI inferiores a 0,1 são considerados altamente monodispersos, valores entre 0,1 e 0,3 indicam distribuição moderadamente uniforme, e valores superiores a 0,3 sugerem sistemas polidispersos, possivelmente associados à agregação de partículas. Assim, o PDI fornece uma indicação importante da qualidade coloidal do sistema, estando diretamente relacionada à estabilidade e reprodutibilidade das NPs. Esse comportamento é amplamente descrito na literatura, sendo o PDI um parâmetro essencial para a caracterização de sistemas nanoparticulados em meio líquido (Hoseini *et al.*, 2023). No presente estudo, os valores de PDI foram predominantemente abaixo de 0,5 (Tabela 11).

O potencial zeta é outro importante parâmetro utilizado para avaliar a estabilidade coloidal de suspensões de NPs, pois está relacionado à carga elétrica presente em sua superfície. Valores elevados, tanto positivos quanto negativos, promovem maior repulsão eletrostática entre as partículas, reduzindo a tendência à agregação e favorecendo a estabilidade da suspensão ao longo do tempo. Dessa forma, a determinação do potencial zeta é fundamental para prever o comportamento coloidal das AgNPs e sua adequação para aplicações biotecnológicas e biomédicas. Valores entre -20 a -30 mV são considerados suficientes para garantir a estabilidade devido à repulsão eletrostática entre partículas (Diaz-López *et al.*, 2025). Sistemas com valores absolutos de potencial zeta superiores a ± 30 mV são considerados altamente estáveis, devido à forte repulsão eletrostática entre as partículas, o que reduz a tendência à agregação.

Os valores de potencial zeta obtidos para as várias AgNPs obtidas variaram de $-11,1 \pm 3,02$ a $-102,3 \pm 2,62$ mV, apenas duas amostras apresentaram valores inferiores a esses (Tabela 11). Esses valores se enquadram dentro da faixa de potencial zeta obtidos para AgNO₃ sintetizadas por rotas verdes. Os valores de potencial zeta negativo indicam a presença de grupos funcionais ionizáveis, como hidroxilas e carboxilas, provenientes dos metabólitos secundários dos extratos vegetais. Além disso, estudos recentes demonstram que mesmo valores relativamente baixos de potencial zeta podem estar associados a sistemas derivados quando há estabilização estérica promovida por biomoléculas adsorvidas, reforçando o papel dos extratos vegetais como agentes multifuncionais na síntese de NPs (Flieger *et al.*, 2021; Liaqat *et al.*, 2022; Öztürk; Kaplan; Çalış, 2024).

Considerando conjuntamente o tamanho médio, o PDI e o potencial zeta, verificou-se que as AgNPs com propriedades físico-químicas mais favoráveis foram obtidas em pH 8,0, nas

proporções extrato: AgNO₃ de 1:09, 1:19, 1:49 e 1:99, à temperatura ambiente. Entre essas condições, as proporções 1:19 e 1:49 apresentaram o melhor equilíbrio entre os parâmetros avaliados indicando maior estabilidade coloidal.

Os resultados demonstram que o pH exerceu maior influência sobre as características das NPs do que a temperatura. Além disso, as proporções intermediárias e mais diluídas favoreceram a obtenção de sistemas mais homogêneos, com distribuição de tamanho mais uniforme e menor tendência à agregação.

A influência do pH está relacionada ao estado de ionização dos grupos funcionais presentes nos compostos do extrato vegetal. Em meio levemente alcalino, ocorre a desprotonação de grupos hidroxila e carboxila, aumentando a carga negativa na superfície das NPs. Como consequência, intensifica-se a repulsão eletrostática entre as partículas, refletida em maiores valores absolutos de potencial zeta, o que dificulta a agregação e favorece a formação de suspensões coloidais mais estáveis. Esse comportamento está de acordo com a literatura, que descreve o pH como um dos principais fatores responsáveis por controlar a carga superficial das NPs e, conseqüentemente, sua estabilidade coloidal (Siani *et al.*, 2023; Öztürk; Kaplan; Çalış, 2024).

5.3.2 Distribuição e Concentração de NPs: Rastreamento de Nanopartículas (NTA)

As análises por NTA foram realizadas para determinar o diâmetro hidrodinâmico, a distribuição de tamanho e a concentração de partículas das AgNPs, com base no acompanhamento individual de suas trajetórias em suspensão.

Para essa análise, foram selecionadas para essa caracterização as amostras que apresentaram os resultados mais promissores, permitindo uma avaliação mais detalhada das condições de síntese. Dessa forma, foram analisadas as proporções extrato: AgNO₃ de 1:09, 1:19, 1:49 e 1:99, todas em pH 8,0, sob temperaturas de 25 e 45 °C, cujos resultados são apresentados na Tabela 12 e na Figura 27. Essa abordagem possibilitou comparar o efeito da temperatura em sistemas previamente selecionados por apresentarem maior estabilidade coloidal e menor polidispersidade.

A análise por NTA surge como um complemento fundamental aos dados obtidos por DLS. Enquanto o DLS fornece uma média baseada na intensidade do espalhamento de luz, o NTA permite a visualização individual e o rastreamento do movimento browniano de cada partícula em suspensão.

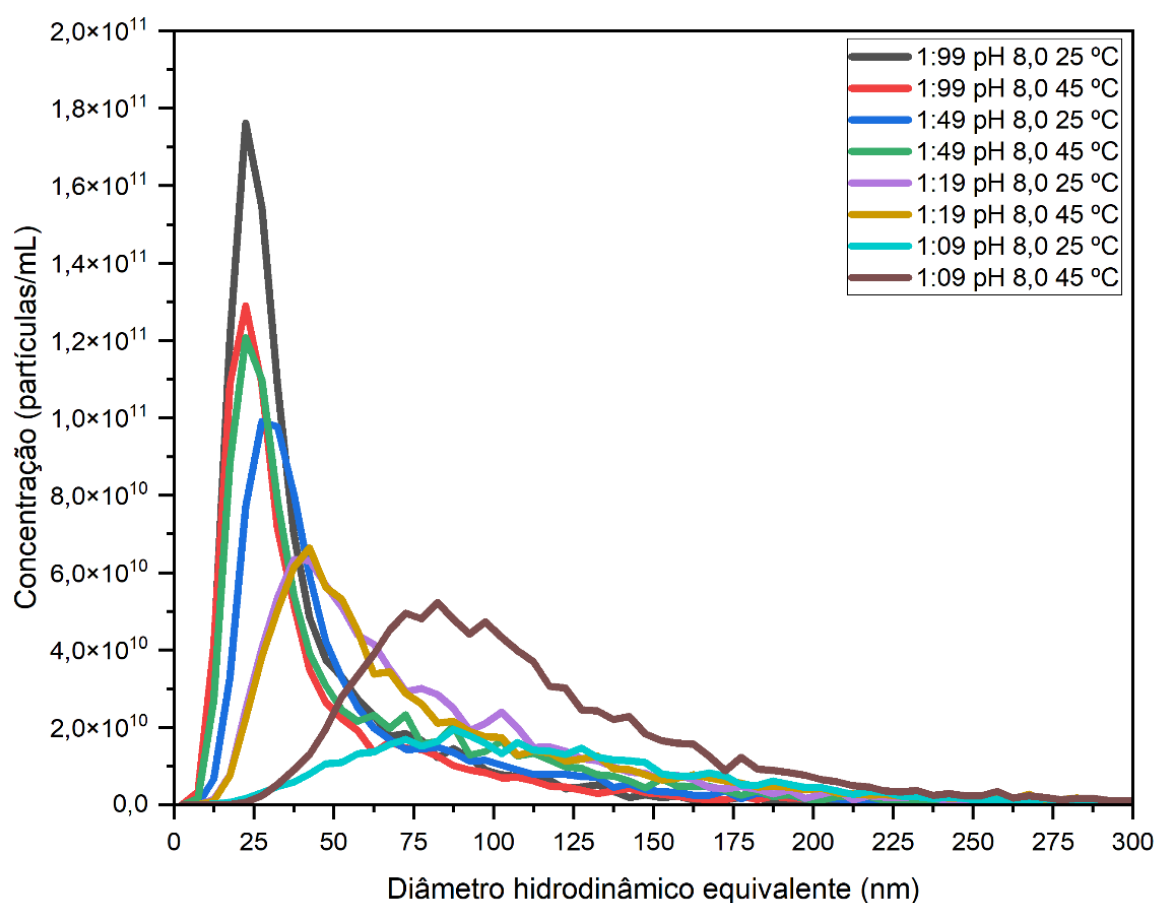
Tabela 12 - Distribuição de diâmetro hidrodinâmico médio (d_h), concentração em partículas/mL e span das AgNPs sintetizadas nas proporções extrato:AgNO₃ de 1:99, 1:49, 1:19 e 1:09, nas temperaturas de 25 e 45 °C em pH 8,0.

<i>Amostra</i>	<i>Condição</i>	d_h	<i>Moda</i>	<i>Concentração</i>	<i>D10</i>	<i>D50</i>	<i>D90</i>	<i>Span</i>
1:99	25 °C	44 ± 3	22,5	$1,01 \times 10^{12} \pm 1,72 \times 10^{11}$	18	31	87	2,27
	45 °C	51 ± 5	22,5	$8,05 \times 10^{11} \pm 1,68 \times 10^{11}$	17	31	106	2,91
1:49	25 °C	60 ± 6	27,5	$7,90 \times 10^{11} \pm 3,02 \times 10^{11}$	23	40	123	2,49
	45 °C	62 ± 8	22,5	$9,05 \times 10^{11} \pm 3,15 \times 10^{11}$	19	37	130	2,98
1:19	25 °C	82 ± 3	37,5	$8,57 \times 10^{11} \pm 8,95 \times 10^{10}$	31	62	148	1,88
	45 °C	87 ± 6	42,5	$8,37 \times 10^{11} \pm 1,74 \times 10^{11}$	31	62	172	2,25
1:09	25 °C	126 ± 8	97,5	$4,37 \times 10^{11} \pm 1,26 \times 10^{11}$	54	110	209	1,41
	45 °C	117 ± 4	82,5	$9,75 \times 10^{11} \pm 5,41 \times 10^{11}$	58	100	190	1,32

*Os valores de d_h , Moda, D10, D50 e D90 são expressos em nanômetros (nm). Já a concentração é expressa em partículas/mL.

Fonte: Própria autora (2026).

Figura 27 - Distribuição do diâmetro hidrodinâmico x concentração das AgNPs sintetizadas nas proporções extrato:AgNO₃ de 1:99, 1:49, 1:19 e 1:09, nas temperaturas de 25 e 45 °C em pH 8,0.



Fonte: Própria autora (2026).

A concentração de partículas apresentou uma dependência direta em relação às proporções utilizadas. Observou-se que as formulações mais diluídas (1:19, 1:49 e 1:99) exibiram as maiores concentrações, atingindo ordens de 10^{11} a 10^{12} partículas/mL. A Figura 27 corrobora esses resultados, mostrando distribuições de tamanho com múltiplos picos em algumas condições, estabelecendo a presença de limitações específicas de partículas. Esse comportamento é típico de sistemas sintetizados por rotas verdes, cujas diferentes biomoléculas atuam simultaneamente como agentes redutores e estabilizantes, resultando em nucleação e crescimento heterogêneos.

O parâmetro Span, calculado a partir dos valores de D10, D50 e D90 (diâmetros abaixo de 10%, 50% e 90%, respectivamente), é amplamente utilizado para avaliar a largura da distribuição, sendo que valores menores indicam maior uniformidade do sistema. De acordo com estudos recentes, a polidispersidade está diretamente relacionada à estabilidade coloidal, uma vez que sistemas mais heterogêneos apresentam maior probabilidade de interação entre partículas e consequente agregação (Ducoli *et al.*, 2025).

Essa grandeza, expressa pela razão $(D_{90} - D_{10}) / D_{50}$, indica a largura da distribuição de tamanho das partículas, sendo valores mais elevados associados a sistemas mais heterogêneos. Valores de Span inferiores a 0,5 são característicos de sistemas monodispersos, enquanto valores entre 0,5 e 1,0 indicam dispersões moderadamente fluidas, e valores superiores a 1,0 refletem sistemas polidispersos, com ampla distribuição de tamanhos e maior tendência à heterogeneidade.

De modo geral, as distribuições de tamanho tiveram caráter polidisperso, conforme evidenciado pelos valores de Span, que variaram aproximadamente entre 1,32 e 2,98. Observe-se que, para a proporção 1:49, a condição sem aquecimento apresentou tamanho médio de 60 ± 6 nm e Span de 2,49, enquanto o aquecimento ocorreu em aumento do tamanho médio (62 ± 8 nm) e da polidispersidade (Span = 2,98), mostrando que o aumento da temperatura favorece a agregação ou crescimento das partículas. Esse resultado indica que, embora o aquecimento possa acelerar a cinética de nucleação, ele também promove o crescimento descontrolado e a agregação das NPs, resultando em distribuições mais amplas.

Dentre as variáveis estudadas, o pH 8,0 apresentou-se como o fator predominante para o sucesso da síntese. O meio levemente alcalino promove a desprotonação dos fitoconstituintes do pólen (como fenóis e flavonoides), intensificando sua capacidade redutora e estabilizadora, como observado anteriormente. Esse fenômeno resultou em partículas menores e mais homogêneas, conforme evidenciado pelos diâmetros hidrodinâmicos reduzidos obtidos nesta condição.

Quanto à temperatura, os dados de NTA indicaram que a condição de 25 °C foi tecnicamente superior à de 45 °C. Embora o aquecimento possa acelerar a cinética reacional, essa variável não exerceu influência significativa na maioria das amostras e, em alguns casos, tendeu a aumentar a polidispersidade (*Span*) e o diâmetro médio. Na proporção 1:49, por exemplo, a amostra a 25 °C apresentou de 60 ± 6 nm e *Span* de 2,49, enquanto a 45 °C esses valores subiram para 62 ± 8 nm e 2,98, respectivamente, indicando uma tendência ao crescimento descontrolado ou à agregação térmica.

Dessa forma, a interpretação conjunta dos dados de NTA permitiu a seleção criteriosa das amostras para as análises subsequentes de microscopia. As proporções 1:19 e 1:49 (em pH 8,0 e 25 °C) foram escolhidas para caracterização por demais técnicas por representarem os sistemas com melhor desempenho em termos de tamanho reduzido, alta concentração de partículas e estabilidade coloidal.

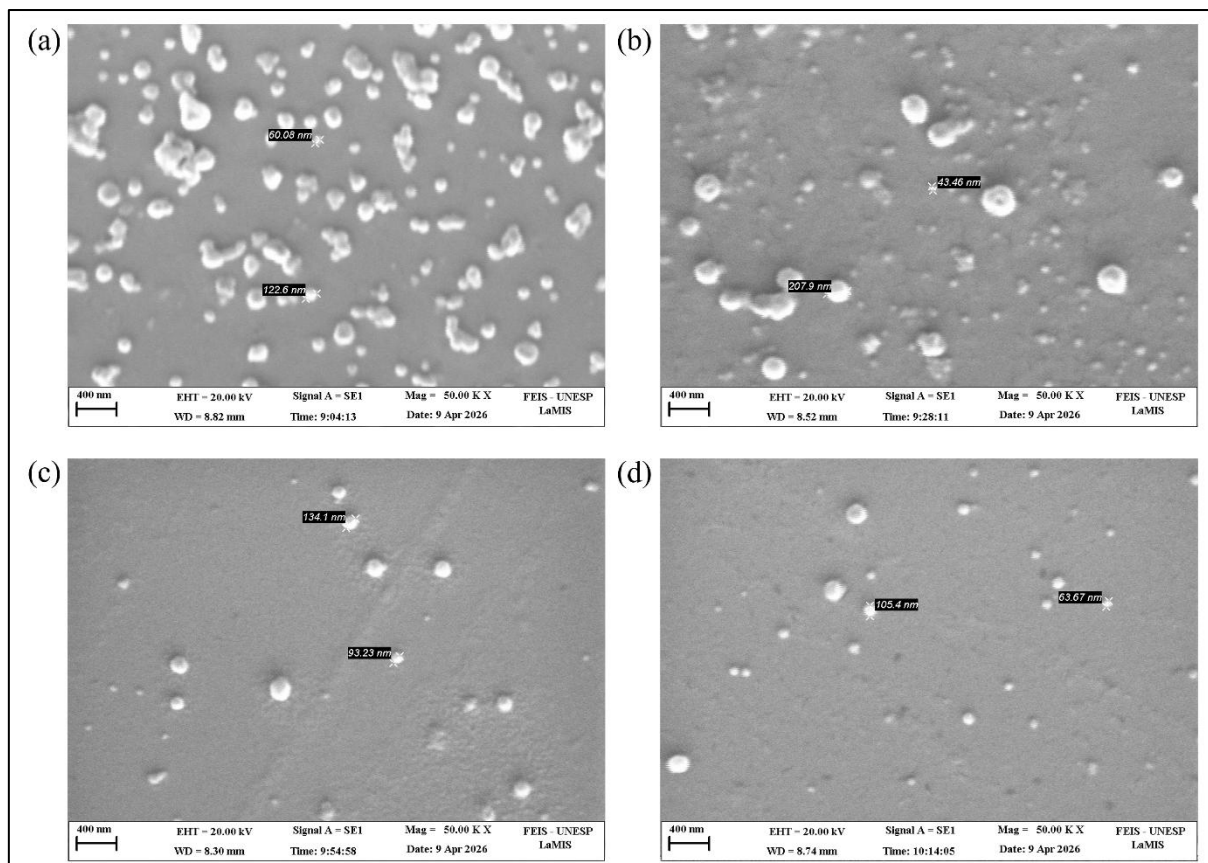
5.3.3 Morfologia: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização morfológica das AgNPs foi realizada por MEV (Figura 28), permitindo avaliar o formato e distribuição. As micrografias obtidas evidenciaram a formação de estruturas esféricas. Os tamanhos observados nas imagens foram inferiores aos valores obtidos por DLS, o que é esperado devido à ausência da camada de solvatação nessa técnica.

Esse comportamento foi observado em estudo recente, nos quais NPs sintetizadas por rotas verdes tiveram tamanhos significativamente maiores por DLS em comparação com técnicas de microscopia, devido à presença de compostos orgânicos adsorvidos na superfície metálica (Raguvaran *et al.*, 2026,).

Foram selecionadas para caracterização por MEV apenas as amostras que apresentaram melhor desempenho na formação de NPs. Nesse contexto, destacam-se as proporções 1:09, 1:19, 1:49 e 1:99 conduzidas sob condições de pH 8,0 e temperatura de 25 °C (Figura 28). A escolha dessas amostras se justifica pelo tamanho, polidispersão e concentração das AgNPs, quando comparada às demais condições avaliadas. Essas condições foram consideradas ideais para uma análise mais aprofundada das propriedades morfológicas e composicionais do material sintetizado.

Figura 28 - Micrografias de MEV destacando a morfologia predominantemente esférica e a estimativa do tamanho das AgNPs sintetizadas por via verde utilizando extrato etanólico de pólen de *M. urundeuva*, obtidas a 25 °C e pH 8,0, nas proporções extrato:AgNO₃ de (a) 1:09, (b) 1:19, (c) 1:49 e (d) 1:99. Barra de escala: 400 nm.



Fonte: Própria autora (2026).

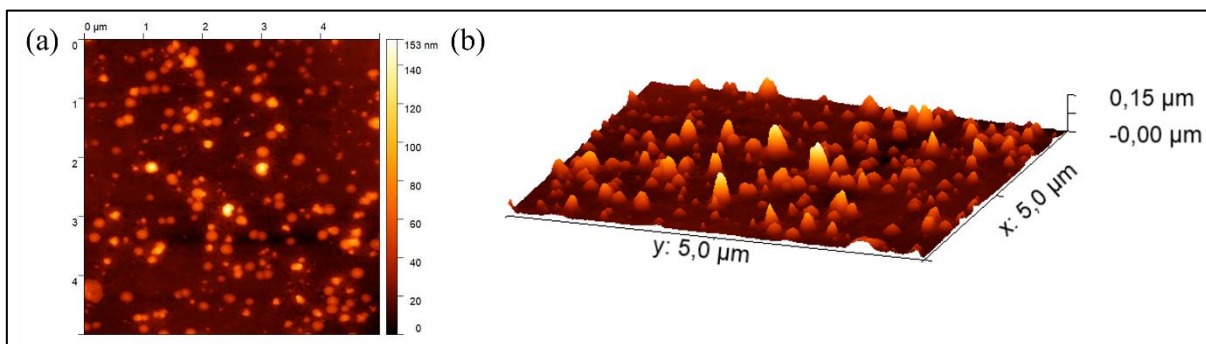
Resultados semelhantes foram reportados por Santos *et al.* (2024), o qual foi sintetizado AgNPs utilizando extrato de pólen e observaram partículas com morfologia predominantemente esférica, além de tendência à agregação, atribuída à presença de biomoléculas adsorvidas em sua superfície. Chand *et al.* (2021) também relataram AgNPs com morfologia esférica e distribuição heterogênea obtidas por síntese verde utilizando extrato vegetal. Os autores evidenciam que a complexidade química dos extratos naturais pode favorecer a formação de sistemas polidispersos. Contudo, vale ressaltar que, embora o pólen tenha sido a matriz utilizada nessas investigações, os referidos trabalhos não especificam a origem.

5.3.4 Morfologia e Topografia: Microscopia de Força Atômica (AFM)

A morfologia superficial das AgNPs também foi analisada por AFM. Essa técnica possibilita a obtenção de imagens tridimensionais em escala nanométrica, permitindo avaliar parâmetros importantes relacionados ao tamanho das partículas, rugosidade superficial, homogeneidade da dispersão e grau de agregação (Zehra *et al.*, 2025). Assim, as imagens de AFM, apresentadas nas Figuras 29 e 30, foram obtidas para as AgNPs sintetizadas nas proporções 1:19 e 1:49, sob condições de síntese estabelecidas em pH 8,0 e temperatura de 25 °C, evidenciando uma superfície recoberta por estruturas nanométricas distribuídas ao longo de toda a área analisada.

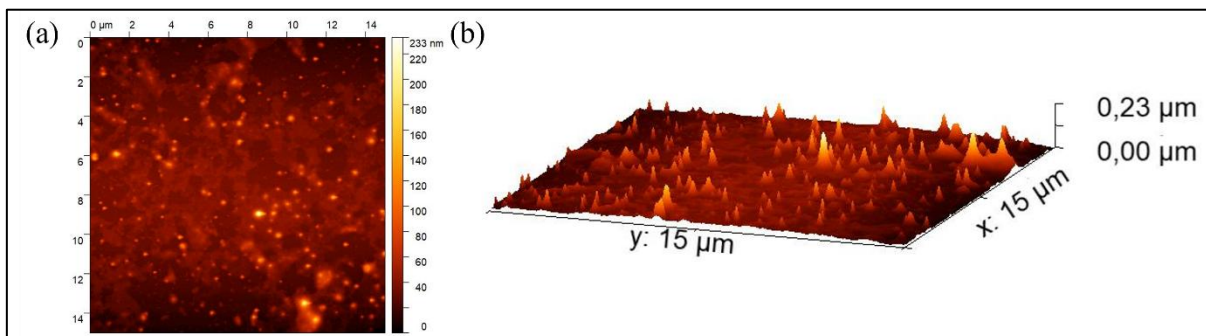
Ressalta-se que, embora a caracterização por MEV tenha contemplado as quatro formulações principais da triagem (1:09, 1:19, 1:49 e 1:99), a análise por AFM foi direcionada exclusivamente às proporções 1:19 e 1:49. Essa seleção fundamentou-se na avaliação integrada dos parâmetros físico-químicos prévios (DLS, potencial zeta, NTA e MEV), nos quais esses dois sistemas apresentaram o melhor desempenho, caracterizado pelo equilíbrio entre reduzido diâmetro hidrodinâmico, elevada estabilidade coloidal (potencial zeta de -102 mV e -61 mV, respectivamente) e alta concentração de partículas.

Figura 29 - Imagens de AFM das AgNPs sintetizadas por rota verde utilizando extrato etanólico de pólen da *M. urundeuva* na proporção 1:49 extrato:AgNO₃, a 25 °C e pH 8,0: (a) imagem topográfica bidimensional (2D) e (b) reconstrução topográfica tridimensional (3D) da superfície (área de varredura de 5 × 5 µm).



Fonte: Própria autora (2026).

Figura 30 - Imagens de AFM das AgNPs sintetizadas por rota verde utilizando extrato etanólico de pólen da *M. urundeuva* na proporção 1:19 (extrato:AgNO₃), a 25 °C e pH 8,0: (a) imagem topográfica bidimensional (2D) e (b) reconstrução topográfica tridimensional (3D) da superfície (área de varredura de 15 × 15 μm).



Fonte: Própria autora (2026).

A topografia obtida demonstrou uma superfície composta por elevações correspondentes às NPs individuais, apresentando distribuição relativamente uniforme e ausência de grandes estruturas micrométricas, permitindo observar diferenças de altura entre partículas isoladas e pequenos agregados. A presença desses agregados é frequentemente atribuída ao processo de secagem da amostra sobre o substrato. Assim, pequenos aglomerados observados por AFM não necessariamente indicam instabilidade coloidal, mas representam uma característica comum em NPs produzidas por síntese verde (Thomas *et al.*, 2024).

Na imagem bidimensional (2D) referente à proporção extrato:AgNO₃ de 1:49, obtida em área de varredura de 5 × 5 μm, observa-se elevada densidade de NPs individualizadas, distribuídas de maneira relativamente homogênea, com poucas regiões livres de deposição. A reconstrução tridimensional (3D) confirma a presença de picos topográficos bem definidos, correspondentes às AgNPs depositadas sobre o substrato, apresentando altura máxima próxima de 153 nm. A predominância de estruturas isoladas sugere que, nessa condição experimental, ocorreu nucleação eficiente e crescimento controlado das NPs.

Por outro lado, a amostra sintetizada na proporção extrato:AgNO₃ de 1:19, analisada em área de varredura de 15 × 15 μm, apresentou distribuição semelhante, porém com menor densidade superficial de partículas e maior espaçamento entre elas. A reconstrução tridimensional revelou picos topográficos mais elevados, atingindo aproximadamente 233 nm, indicando a presença de estruturas de maior dimensão ou pequenos aglomerados formados durante a deposição da amostra. Esse comportamento pode estar relacionado à maior disponibilidade de espécies metálicas durante o processo de crescimento cristalino ou à

coalescência parcial das NPs durante a secagem sobre o substrato, fenômeno frequentemente observado em análises de AFM.

A comparação entre as duas condições evidencia que a proporção extrato: nitrato de prata influenciou diretamente a organização topográfica das AgNPs. A condição 1:49 apresentou uma superfície mais densa, recoberta por NPs, com picos topográficos mais uniformemente distribuídos. A condição 1:19 exibiu menor densidade de partículas por unidade de área e maior variação de altura. Essas diferenças sugerem que a razão entre extrato e precursor metálico exerce influência sobre os processos de nucleação e crescimento das NPs, refletindo-se na distribuição espacial e na uniformidade topográfica observadas por AFM. De modo geral, o equilíbrio entre esses processos é determinante para a obtenção de partículas com distribuição mais homogênea e menor tendência à formação de agregados.

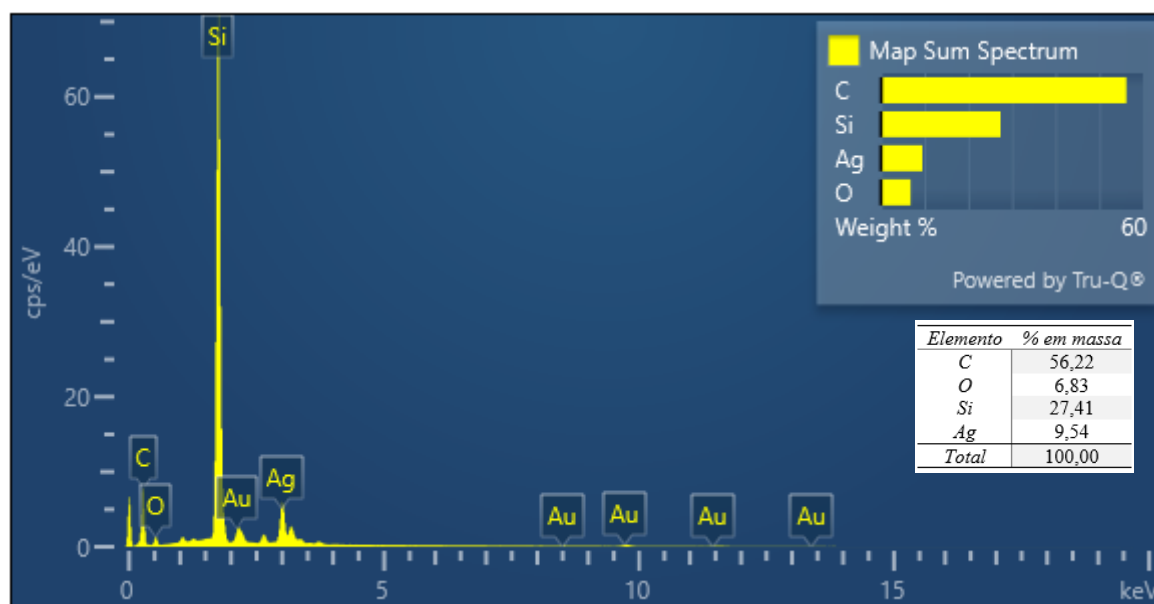
As características morfológicas observadas neste estudo estão em concordância com trabalhos recentes da literatura, onde AgNPs sintetizadas a partir de extratos vegetais foram caracterizadas por AFM e apresentaram distribuição homogênea, morfologia predominantemente esférica, pequenos aglomerados superficiais e rugosidade superficial, atribuídos ao processo de secagem da amostra. Os autores ressaltam que o AFM permitiu visualizar claramente a topografia das partículas e confirmar sua distribuição sobre o substrato, resultados semelhantes aos observados no presente trabalho (Bhavi *et al.*, 2024; Kamalanathan *et al.*, 2024).

5.3.5 Análise Química Elementar: Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia (EDS)

A análise por EDS confirmou a composição elementar das NPs sintetizadas (Figuras 31 a 34). Os espectros apresentaram um pico específico da prata metálica (Ag^0), localizado na região de aproximadamente 3 keV, confirmando a redução dos íons Ag^+ e a formação efetiva das NPs. Além disso, foram observados sinais correspondentes a elementos como silício (Si) associados ao grid utilizado como suporte para a amostra, carbono (C) e oxigênio (O) que podem ser provenientes dos compostos orgânicos do extrato adsorvidos na superfície das NPs. A espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) fornece a composição elementar relativa da região analisada, expressa em porcentagem em massa ou porcentagem atômica, calculada a partir da intensidade dos sinais característicos emitidos por cada elemento. Dessa forma, as porcentagens obtidas são influenciadas pela presença de todos os constituintes detectados na área analisada. No presente estudo, a elevada intensidade dos sinais de silício está

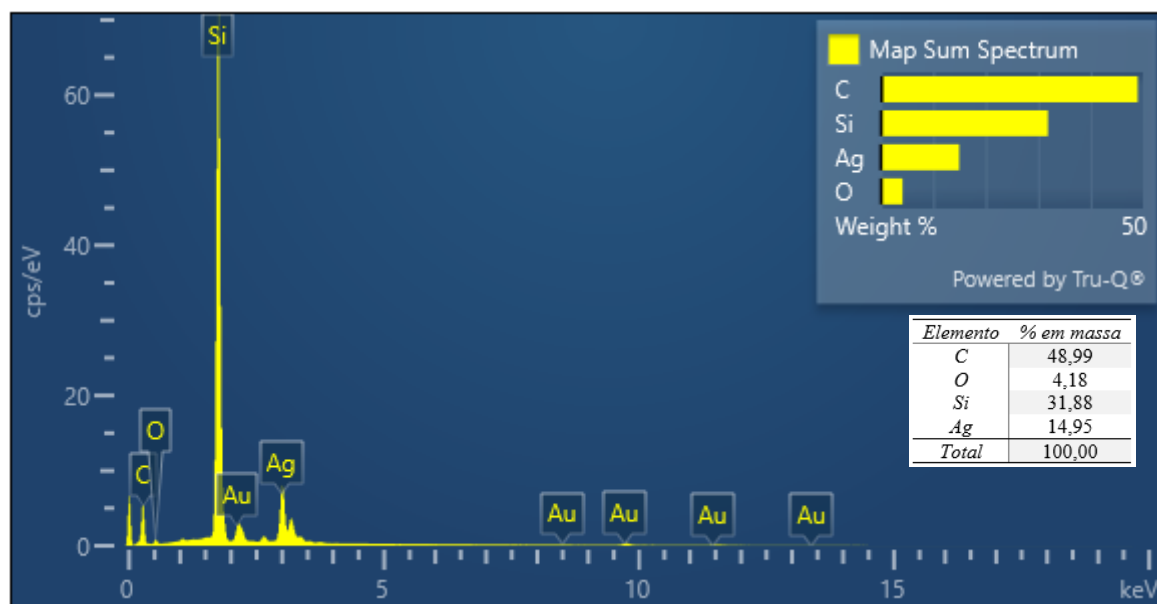
relacionada ao substrato utilizado para a deposição das amostras durante a análise. Consequentemente, a elevada contribuição desses elementos reduz a porcentagem relativa de prata determinada por EDS, embora isso não indique baixa quantidade de AgNPs na amostra, mas sim uma limitação inerente à composição da região analisada.

Figura 31 - Espectro de EDS e composição elementar das AgNPs da formulação 1:09 (extrato etanólico:AgNO₃) sob temperatura a 25 °C e pH a 8,0.



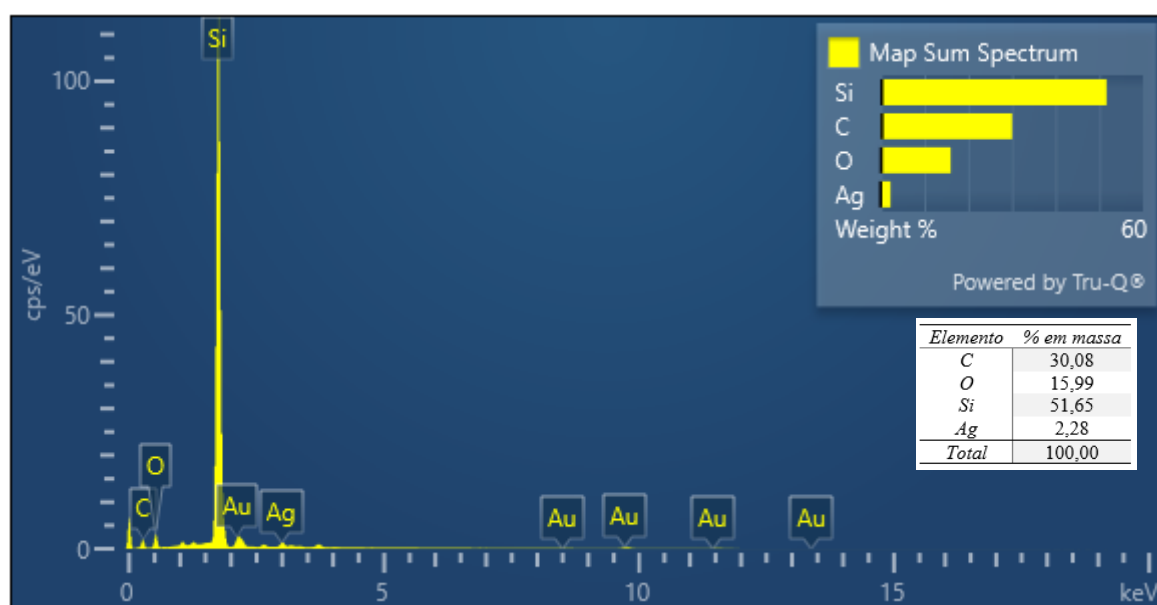
Fonte: Própria autora (2026).

Figura 32 - Espectro de EDS e composição elementar das AgNPs da formulação 1:19 (extrato etanólico:AgNO₃) sob temperatura a 25 °C e pH a 8,0.



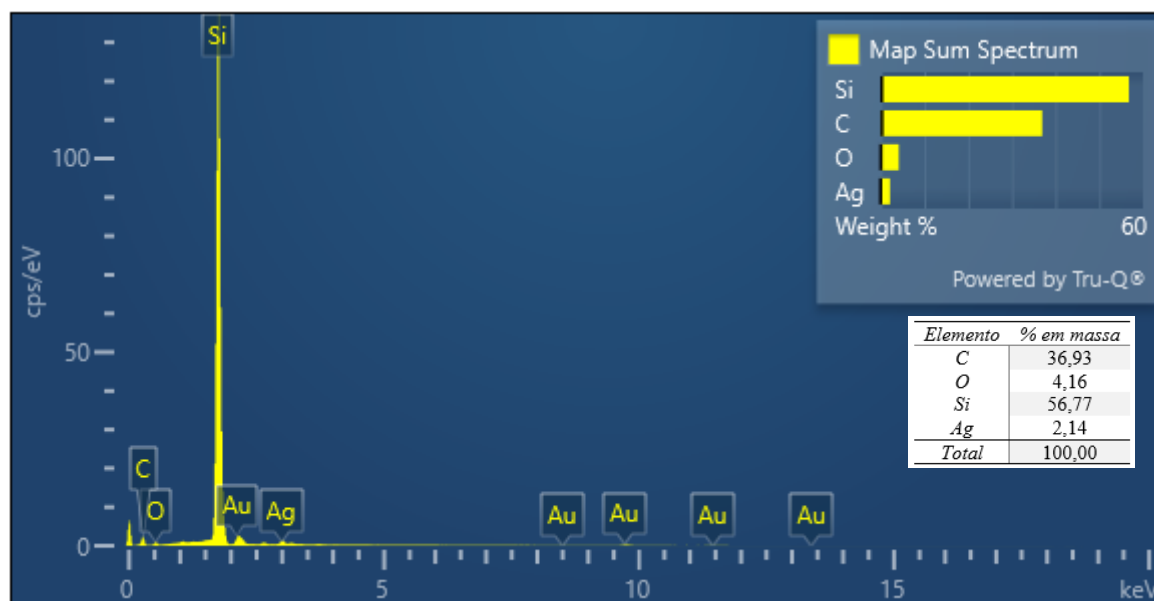
Fonte: Própria autora (2026).

Figura 33 - Espectro de EDS e composição elementar das AgNPs da formulação 1:49 (extrato etanólico:AgNO₃) sob temperatura a 25 °C e pH a 8,0.



Fonte: Própria autora (2026).

Figura 34 - Espectro de EDS e composição elementar das AgNPs da formulação 1:99 (extrato etanólico:AgNO₃) sob temperatura a 25 °C e pH a 8,0.



Fonte: Própria autora (2026).

Resultados semelhantes foram descritos por Flieger *et al.* (2021), que destacaram a presença de compostos orgânicos adsorvidos à superfície de NPs sintetizadas por rotas verdes utilizando extratos naturais. De forma semelhante, Turunc, Kahraman e Binzet (2021), ao caracterizarem AgNPs sintetizadas com extratos de pólen por EDS, observaram a predominância de prata e sinais secundários de elementos associados à matriz orgânica, confirmando o papel dos compostos bioativos na formação e estabilização das NPs.

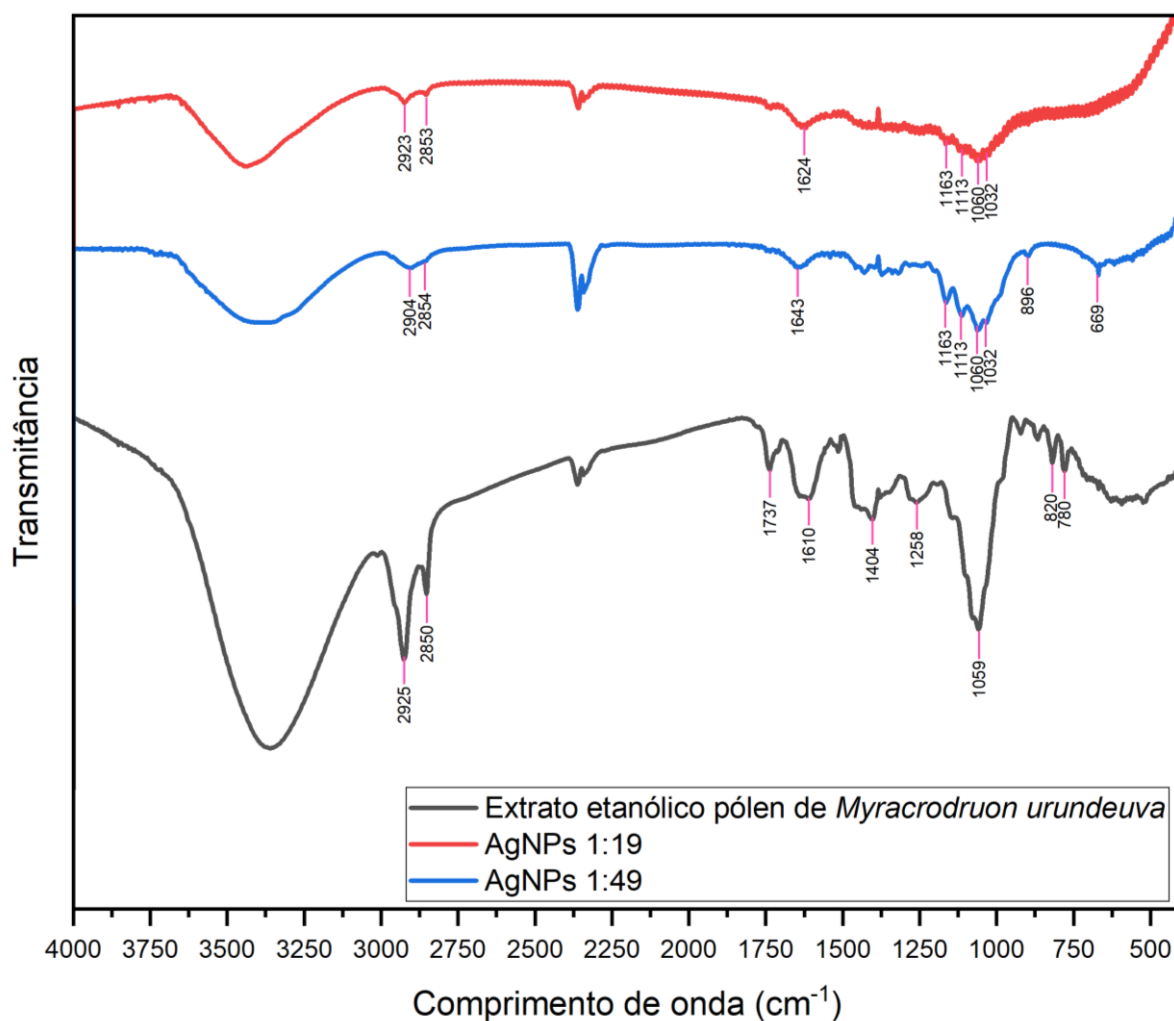
5.3.6 Grupos Funcionais e Interações Químicas: Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Com base em todas as caracterizações realizadas para as AgNO₃ obtidas das várias proporções extrato:AgNO₃, as demais análises de caracterização foram realizadas apenas com as AgNPs obtidas das proporções 1:19 e 1:49 que no conjunto de todos os parâmetros foram as que apresentaram melhores resultados incluindo menor quantidade de AgNO₃ em relação ao extrato. A proporção 1:99 apesar de apresentar bons parâmetros de tamanho e estabilidade utiliza praticamente o dobro da quantidade de AgNO₃ do que a proporção 1:49 que apresentou parâmetros semelhantes.

Análise por FTIR das proporções 1:19 e 1:49 (Figura 35) foram realizadas com o objetivo de identificar os principais grupos funcionais presentes nas amostras, avaliar o envolvimento dos compostos orgânicos nos processos de redução dos íons Ag^+ e estabilização das NPs, bem como verificar a presença de biomoléculas adsorvidas à superfície das AgNPs, responsáveis pelo seu capeamento e estabilidade coloidal.

Os espectros obtidos (Figura 35) incluem bandas características em regiões associadas aos grupos hidroxila ($-\text{OH}$), carbonila ($\text{C}=\text{O}$) e ligações $\text{C}-\text{O}$, típicas de compostos fenólicos, flavonoides e outros metabólitos secundários e bandas atribuídas às vibrações do grupo amina ($\text{N}-\text{H}$). As principais atribuições listadas na Tabela 13. Ressalta-se que os espectros de FTIR foram apresentados de forma independente em relação aos valores absolutos de transmitância, com posições verticais intencionais entre as curvas. Essa abordagem foi adotada com o objetivo de melhorar a visualização e facilitar a comparação entre os diferentes espectros, evitando sobreposição excessiva das bandas. Dessa forma, a análise foi baseada nas posições e perfis das bandas características, e não nos valores absolutos de transmissão.

Figura 35 - Espectros de FTIR do extrato de pólen de *M. urundeuva* e das AgNPs sintetizadas nas proporções extrato:AgNO₃ de 1:19 e 1:49, obtidas a 25 °C e pH 8,0.



Fonte: Própria autora (2026).

Tabela 13 - Atribuição das bandas do espectro FTIR e identificação dos grupos funcionais e compostos associados no extrato e nas AgNPs.

<i>Amostra</i>	<i>Comprimento de onda (cm⁻¹)</i>	<i>Grupo funcional</i>	<i>Possível atribuição dos fitoconstituintes</i>
<i>AgNPs 1:19</i>	3600 – 3100	O-H (estiramento, banda larga)	Fenóis, flavonoides, taninos, polifenóis
	3500 – 3300	N-H (estiramento)	Proteínas, aminoácidos
	~2923 / ~2853	C-H (estiramento)	Cadeias alifáticas (lipídios, terpenos)
	~1624	C=O / C=C (carbonila / aromático)	Flavonoides, compostos fenólicos, amidas (proteínas)
	1200 – 1000	C-O-C / C-O	Polissacarídeos, glicosídeos
<i>AgNPs 1:49</i>	3600 – 3100	O-H (estiramento, banda larga)	Fenóis, flavonoides, taninos, polifenóis
	~2904 / ~2854	C-H (estiramento)	Cadeias alifáticas (lipídios, terpenos)

<i>Extrato</i>	~1643	C=O / C=C (carbonila / aromático)	Flavonoides, compostos fenólicos, amidas (proteínas)
	1200 – 1000	C-O-C / C-O	Polissacarídeos, glicosídeos
	~896 / ~669	C-H (dobramento – fora do plano)	Compostos aromáticos (fenólicos)
	3600 – 3100	O-H (estiramento, banda larga)	Fenóis, flavonoides, taninos, álcoois (polifenóis)
	3500 – 3300	N-H (estiramento)	Proteínas, aminoácidos
	~2925 / ~2580	C-H (estiramento)	Cadeias alifáticas (lipídios, terpenos)
	~1737	C=O	Ácidos carboxílicos, ésteres, aldeídos/cetonas conjugadas (lipídios, compostos fenólicos oxidados)
	~1610	N-H (dobramento)	Proteínas (amida I)
	~1404	C-H / OH (dobramento / fenólico)	Fenóis, taninos
	~1258	C-O (estiramento)	Álcoois, fenóis, éteres (flavonoides, polissacarídeos)
	~1059	C-O-C / C-O	Polissacarídeos, glicosídeos
	~820 / ~780	C-H (dobramento – fora do plano)	Compostos aromáticos (fenólicos)

Fonte: Própria autora (2026).

De acordo com a literatura, extratos etanólicos tendem a apresentar maior diversidade de grupos específicos orgânicos, incluindo carbonilas, compostos aromáticos e grupos alcoólicos, que podem atuar simultaneamente como agentes redutores e estabilizantes.

As bandas observadas na região de 3200–3600 cm⁻¹ são atribuídas ao estiramento de grupos hidroxila (O–H), característicos de compostos fenólicos, flavonoides e taninos, podendo também haver contribuição de grupos N–H de proteínas (Adkins *et al.* 2023). Após a formação das AgNPs, nota-se uma leve alteração na intensidade e no formato dessa banda, indicando a participação desses grupos na redução dos íons Ag⁺ e na estabilização das NPs, como descrito por Nguyen *et al.* (2024).

Na região de aproximadamente 2900 cm⁻¹, observam-se bandas associadas ao estiramento de ligações C–H de cadeias alifáticas, diminuindo a presença de compostos orgânicos como lipídios e metabólitos secundários. Essas bandas apresentam pequenas variações após a síntese, interagindo com a superfície das NPs. Bandas intensas próximas a 2300–2400 cm⁻¹ também são observadas, frequentemente associadas a CO₂, podendo sofrer alterações devido à interação com o meio reacional.

No espectro do extrato etanólico de pólen de *M. urundeuva*, foi observada uma banda em 1737 cm⁻¹, atribuída ao estiramento da ligação C=O de grupos carbonílicos, possivelmente associados a ésteres, aldeídos e/ou ácidos carboxílicos presentes nos constituintes do extrato.

Após a síntese das AgNPs, essa banda não foi observada nos espectros das amostras nas proporções 1:19 e 1:49. Esse comportamento pode estar relacionado à participação de compostos contendo grupos carbonílicos nos processos de redução dos íons Ag^+ e/ou na estabilização das NPs. Resultados semelhantes foram observados em estudos recentes de síntese verde de AgNPs, nos quais bandas próximas a $1732\text{--}1745\text{ cm}^{-1}$ presentes nos extratos vegetais desapareceram após a formação das nanopartículas, sendo essa alteração relacionada à interação dos constituintes fitoquímicos com a prata e à sua participação na formação e estabilização das AgNPs (Almayouf *et al.*, 2024; Balcha *et al.*, 2024).

As bandas em torno de $1600\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$ indicam vibrações de grupos carbonila ($\text{C}=\text{O}$), ligações $\text{C}=\text{C}$ aromáticas e vibrações de amida I de proteínas. A diminuição ou deslocamento dessa banda após a formação das AgNPs indica que proteínas e compostos carbonílicos atuam como agentes redutores e estabilizantes. Resultados semelhantes foram relatados por estudos que associam essa região à presença de compostos bioativos responsáveis pela redução de Ag^+ (Qubtia *et al.*, 2024).

Na faixa de $1400\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$, as bandas podem ser atribuídas a vibrações de deformação de grupos C-H e O-H , compatíveis com compostos fenólicos e outros metabólitos presentes no extrato vegetal. Já na região de $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$, observa-se uma banda característica de estiramento das ligações C-O e C-O-C , típica de álcoois, éteres e polissacarídeos. A identificação desses grupos funcionais sugere a permanência de biomoléculas adsorvidas à superfície das AgNPs, atuando como agentes de capeamento e contribuindo para a estabilidade coloidal das NPs. Bandas nessa região também foram descritas por Saravanan (2021), que atribuiu picos próximos de 1040 cm^{-1} a grupos alcoólicos envolvidos na estabilização de AgNPs sintetizadas por rota verde.

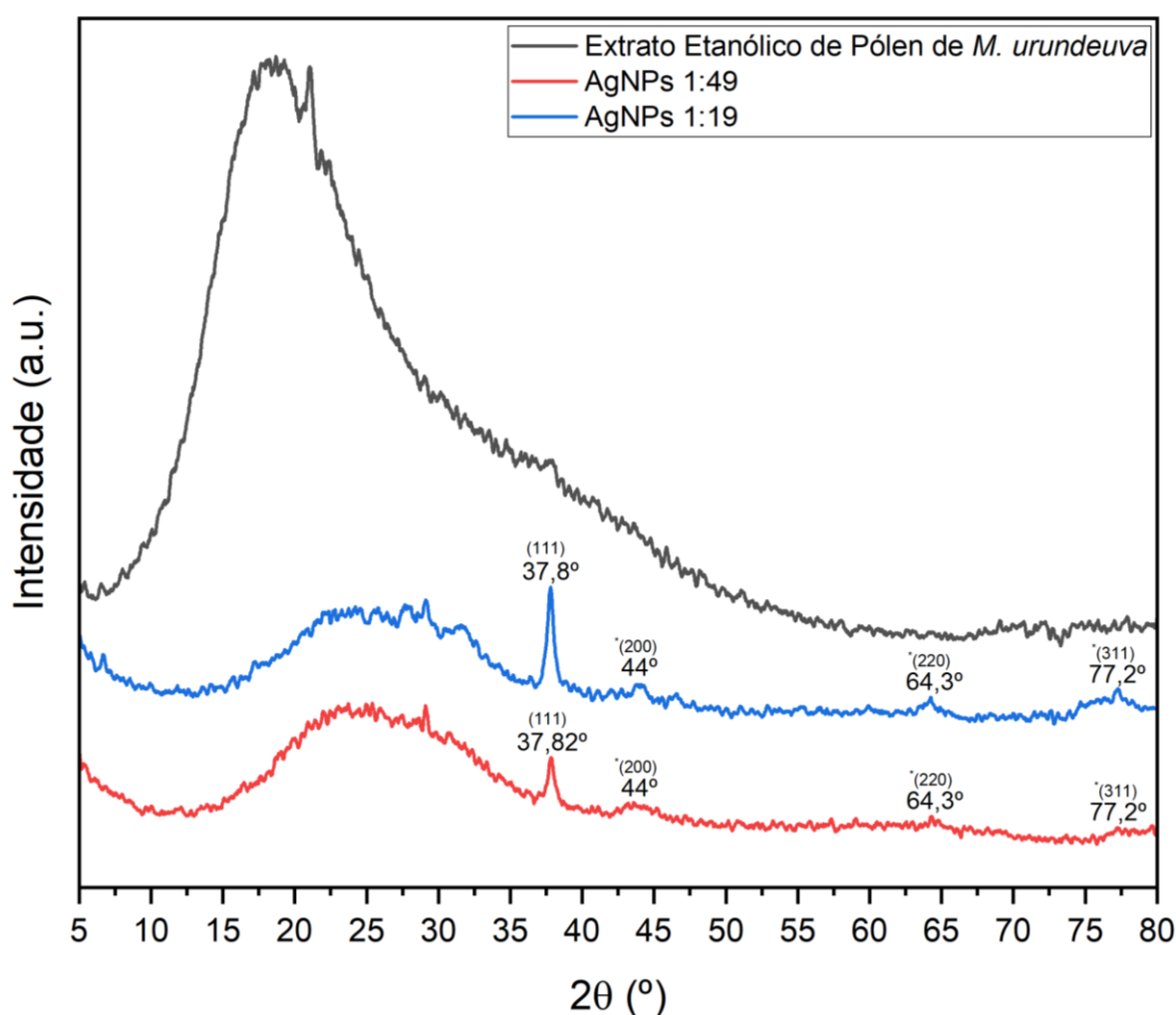
Por fim, na região abaixo de 800 cm^{-1} , são observadas bandas relacionadas a vibrações fora do plano de compostos aromáticos e possíveis interações metal-ligante, evidenciando processos associados à formação das NPs.

Assim, a comparação entre os espectros do extrato e das NPs evidenciou alterações na intensidade, bem como deslocamentos e, em alguns casos, o surgimento de novas bandas, proporcionou a interação desses grupos específicos com a superfície das NPs. Esses resultados confirmam que os compostos presentes no extrato atuam não apenas como agentes redutores, mas também como estabilizantes, formando uma camada orgânica ao redor das NPs. Esse comportamento é totalmente descrito na literatura, onde mudanças nas bandas de FTIR são consideradas como evidência da interação entre biomoléculas e a superfície das NPs (Sharma *et al.*, 2025a).

5.3.7 Estrutura Cristalina: Difração de Raios X (DRX)

A estrutura cristalina das AgNPs sintetizadas nas proporções extrato: AgNO₃ de 1:19 e 1:49, a 25 °C e pH 8,0, foi investigada por difração de raios X (DRX). Para fins de comparação, também foi analisado o extrato etanólico de pólen de *M. urundeuva*. Os difratogramas obtidos são apresentados na Figura 36.

Figura 36 - Difratogramas de DRX do extrato etanólico de pólen de *M. urundeuva* e das AgNPs sintetizadas a 25 °C e pH 8,0, nas proporções extrato: AgNO₃ de 1:19 e 1:49.



Fonte: Própria autora (2026).

O difratograma correspondente ao extrato etanólico apresentou um amplo halo difuso entre aproximadamente 15 e 30° (2θ), característica típica de materiais predominantemente amorfos. Esse comportamento é frequentemente associado à presença de biomoléculas presentes em extratos vegetais, como compostos fenólicos, flavonoides, proteínas, carboidratos

e outros metabólitos secundários, que não apresentam organização cristalina de longo alcance (Alrofaidi *et al.*, 2026).

Nos difratogramas das AgNPs observa-se uma alteração significativa no perfil cristalográfico em relação ao extrato vegetal, caracterizada pela redução da intensidade do halo amorfo e pelo surgimento de um pico de difração intenso em aproximadamente $37,8^\circ$ (2θ), correspondente ao plano cristalográfico (111) da prata metálica com estrutura cúbica de face centrada (FCC), de acordo com a ficha JCPDS nº 04-0783. Adicionalmente, foram identificadas reflexões de menor intensidade em aproximadamente 44° , $64,3^\circ$ e $77,2^\circ$ (2θ), atribuídas aos planos (200), (220) e (311), respectivamente, confirmando a formação da fase cristalina da prata metálica.

Resultados semelhantes têm sido descritos na literatura em estudos que sintetizaram AgNPs utilizando extratos vegetais. Nesses trabalhos, os difratogramas apresentaram um pico predominante correspondente ao plano (111) em $38,1^\circ$, acompanhado por reflexões de menor intensidade atribuídas aos planos (200), (220) e (311) em $44,3^\circ$, $64,4^\circ$ e $77,3^\circ$, respectivamente. Os autores relacionaram a predominância do plano (111) ao crescimento preferencial dos cristalitos e atribuíram a menor intensidade das demais reflexões ao reduzido tamanho das NPs e ao recobrimento de sua superfície por biomoléculas provenientes dos extratos vegetais (Akhtar *et al.*, 2025; Nouri *et al.*, 2020).

Os tamanhos médios dos cristalitos das AgNPs analisadas foram estimados pela equação de Debye-Scherrer (Equação 3). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Tamanho médio dos cristalitos das AgNPs sintetizadas nas proporções extrato: AgNO_3 de 1:19 e 1:49, a 25°C e pH 8,0, calculado pela equação de Debye-Scherrer.

<i>Amostra</i>	<i>2θ ($^\circ$)</i>	<i>FWHM ($^\circ$)</i>	<i>Plano</i>	<i>Tamanho do cristalito (nm)</i>
<i>AgNPs 1:49</i>	37,80	0,342	(111)	24,6
<i>AgNPs 1:19</i>	37,82	0,396	(111)	21,2

Fonte: Própria autora (2026).

Comparando as duas condições experimentais, verifica-se que ambas apresentaram perfil cristalográfico semelhante, indicando que a alteração da proporção extrato: AgNO_3 não modificou significativamente a estrutura cristalina da prata formada. Entretanto, observa-se que a amostra sintetizada na proporção 1:19 apresentou maior intensidade do pico correspondente ao plano (111) e menor tamanho médio de cristalito (21,2 nm) em comparação à proporção 1:49 (24,6 nm). Os valores obtidos estão dentro da faixa comumente reportada para AgNPs sintetizadas por rotas verdes, cujos cristalitos geralmente variam entre 10 e 30 nm, dependendo

da fonte biológica empregada e das condições de síntese. Dessa forma, os resultados indicam que ambas as condições produziram AgNPs com elevada organização cristalina, sendo que a proporção 1:19 favoreceu a formação de domínios cristalinos ligeiramente menores (Ibrahim *et al.*, 2025).

De forma geral, os resultados indicam que o extrato etanólico é capaz de atuar como agente redutor e estabilizante na síntese verde de AgNPs, porém com diferenças evidentes na composição química e no mecanismo de interação com o metal para cada proporção utilizada. Essas diferenças influenciaram diretamente as propriedades das AgNPs, como tamanho e estabilidade. A análise integrada das variáveis de caracterização, incluindo a detecção da banda SPR em 427 nm por espectroscopia no UV-Vis, a morfologia esférica observada por MEV e AFM, e a natureza cristalina confirmada por DRX, demonstrou que a rota mediada pelo pólen de *M. urundeuva* é altamente eficiente para a produção de nanomateriais.

A decisão de prosseguir com as caracterizações aprofundadas e os ensaios biológicos utilizando apenas as proporções 1:19 e 1:49 fundamentou-se no equilíbrio superior entre diâmetro hidrodinâmico (DLS), potencial zeta e concentração de partículas (NTA). As sínteses apresentaram alta estabilidade coloidal. Além disso, os dados de FTIR confirmaram que grupos hidroxila e carbonila dos fitoconstituintes do pólen foram incorporados com sucesso à superfície metálica, garantindo o capeamento necessário para a funcionalidade biológica pretendida.

Embora a proporção 1:99 tenha apresentado os resultados mais expressivos em termos de redução de tamanho médio e concentração de partículas nas análises de NTA (44 nm e $1,01 \times 10^{12}$ partículas/mL), a diferença observada em relação à proporção 1:49 (60 nm e $7,90 \times 10^{11}$ partículas/mL) foi considerada tecnicamente pequena diante do custo operacional. Optou-se por priorizar a proporção 1:49 pois utiliza menos precursor metálico (AgNO_3) em relação à massa de extrato para obter resultados semelhantes. Portanto, as proporções 1:19 e 1:49 mostraram-se as mais viáveis para o desenvolvimento de um insumo biotecnológico que alie eficiência nanométrica ao uso racional de recursos.

5.4 Estabilidade das Nanopartículas de Prata

A estabilidade coloidal das AgNPs sintetizadas a partir do extrato etanólico de pólen de *M. urundeuva* foi monitorada durante um período de 90 dias (3 meses) por meio das análises de pH, DLS, potencial zeta e NTA.

Durante os 90 dias de armazenamento, os valores de pH das suspensões de AgNPs permaneceram praticamente inalterados (Tabela 15). Esse comportamento comprova a estabilidade do pH no sistema e sugere a preservação dos grupos funcionais ionizados na superfície metálica ao longo do tempo.

Os resultados obtidos por DLS (Tabela 15) demonstraram que o diâmetro hidrodinâmico médio das AgNPs permaneceu relativamente estável durante o período de armazenamento, apresentando apenas pequenas variações entre as análises realizadas no primeiro, segundo e terceiro mês. A ausência de aumento expressivo do tamanho hidrodinâmico indica que não ocorreu agregação significativa das partículas ao longo do tempo, evidenciando que os compostos bioativos presentes no extrato foram eficientes na estabilização das AgNPs.

Tabela 15 - Monitoramento do pH, diâmetro hidrodinâmico (d_h), índice de polidispersidade (PDI) e potencial zeta durante o armazenamento das AgNPs por um período de 90 dias.

<i>Amostra</i>	<i>Tempo (dias)</i>	<i>pH</i>	<i>d_h (nm)</i>	<i>PDI</i>	<i>Potencial Zeta (mV)</i>
<i>AgNPs 1:49</i>	1	8,00	$142,6 \pm 2,10$	$0,260 \pm 0,036$	$-61,5 \pm 1,90$
	30	7,94	$142,2 \pm 1,56$	$0,265 \pm 0,021$	$-60,01 \pm 1,19$
	60	7,86	$140 \pm 0,28$	$0,261 \pm 0,006$	$-53,95 \pm 1,23$
	90	7,78	$140,2 \pm 1,80$	$0,275 \pm 0,043$	$-53,23 \pm 2,04$
<i>AgNPs 1:19</i>	1	8,00	$98,2 \pm 1,98$	$0,531 \pm 0,043$	$-102,3 \pm 2,62$
	30	8,06	$96,5 \pm 2,61$	$0,583 \pm 0,023$	$-62,59 \pm 2,96$
	60	7,80	$94,4 \pm 2,28$	$0,583 \pm 0,027$	$-59,1 \pm 0,66$
	90	7,79	$92,9 \pm 1,60$	$0,602 \pm 0,101$	$-50,2 \pm 0,67$

* Durante todo o período de avaliação da estabilidade em função do tempo, as amostras foram mantidas sob refrigeração a $\sim 8^\circ\text{C}$ e na ausência de luz.

Fonte: Própria autora (2026).

Para o PDI, os valores permaneceram praticamente constantes ao longo do armazenamento, sugerindo que a distribuição de tamanho das AgNPs não sofreu alterações significativas, indicando homogeneidade da suspensão coloidal. Esse comportamento demonstra que o processo de síntese foi capaz de produzir AgNPs relativamente uniformes e que a camada estabilizante formada pelos fitoquímicos do extrato vegetal permaneceu eficiente durante o período avaliado.

As análises de potencial zeta complementaram os dados de DLS, refletindo o comportamento da carga superficial das AgNPs ao longo do armazenamento. Para a formulação 1:49, os valores variaram de forma sutil, passando de $-61,5 \pm 1,90$ para $-53,2 \pm 1,23$ mV aos 90 dias. Por sua vez, a proporção 1:19 apresentou um decréscimo mais pronunciado no módulo da carga superficial nos primeiros 30 dias (de $-102,3 \pm 2,62$ para $-62,6 \pm 2,96$ mV), seguido de um

declínio mais brando até o final do monitoramento ($-50,2 \pm 0,67$ mV). Apesar dessa redução no potencial zeta, ressalta-se que ambas as suspensões mantiveram valores absolutos elevados (superiores a $|-50$ mV|), permanecendo amplamente acima do limite mínimo de $|-30$ mV necessário para assegurar repulsão eletrostática eficiente e prevenir a agregação coloidal.

Os resultados obtidos na análise de NTA (Tabela 16) demonstraram que as suspensões de AgNPs mantiveram concentrações da mesma ordem de grandeza (10^{11} partículas/mL) ao longo dos 90 dias de armazenamento, sem evidências de perdas expressivas por sedimentação ou agregação.

Tabela 16 - Monitoramento do diâmetro hidrodinâmico médio (d_h), concentração de partículas/mL e span obtidas por NTA durante o armazenamento das AgNPs por um período de 90 dias.

<i>Amostra</i>	<i>Tempo (dias)</i>	<i>d_h (nm)</i>	<i>Moda (nm)</i>	<i>Concentração (partículas/mL)</i>	<i>Span</i>
<i>AgNPs 1:49</i>	1	60 ± 6	27,5	$7,90 \times 10^{11} \pm 3,02 \times 10^{11}$	2,49
	30	58 ± 4	27,5	$3,69 \times 10^{11} \pm 6,99 \times 10^{10}$	2,18
	60	52 ± 4	32,5	$8,55 \times 10^{11} \pm 3,16 \times 10^{11}$	2,10
	90	65 ± 4	27,5	$1,17 \times 10^{12} \pm 6,88 \times 10^{10}$	2,74
<i>AgNPs 1:19</i>	1	82 ± 3	37,5	$8,57 \times 10^{11} \pm 8,95 \times 10^{10}$	1,88
	30	97 ± 4	42,5	$2,04 \times 10^{11} \pm 2,21 \times 10^{10}$	1,80
	60	95 ± 5	47,5	$3,81 \times 10^{11} \pm 4,56 \times 10^{10}$	1,80
	90	91 ± 3	47,5	$1,02 \times 10^{12} \pm 3,77 \times 10^{10}$	1,96

* Durante todo o período de avaliação da estabilidade em função do tempo, as amostras foram mantidas sob refrigeração a ~ 8 °C na ausência de luz.

Fonte: Própria autora (2026).

Em relação ao diâmetro hidrodinâmico médio, por NTA observou-se pequenas variações entre os períodos de monitoramento. Para as AgNPs 1:49, houve redução do diâmetro aos 60 dias, seguida de aumento aos 90 dias, enquanto as AgNPs 1:19 apresentaram discreto aumento do tamanho após 60 dias, permanecendo praticamente estáveis até o final do período. Os valores de moda e de *span* também apresentaram apenas pequenas oscilações, principalmente nas AgNPs 1:19, indicando que a distribuição de tamanho das partículas foi preservada durante o armazenamento.

A interpretação conjunta dos resultados obtidos por pH, DLS, potencial zeta e NTA demonstra que as AgNPs sintetizadas apresentaram elevada estabilidade coloidal durante o período de armazenamento. Os resultados obtidos evidenciam que as AgNPs sintetizadas permaneceram estáveis durante os 90 dias de armazenamento, preservando suas características coloidais e estruturais. Desta forma, a estabilidade garante que as propriedades físico-químicas

das AgNPs sejam mantidas ao longo do tempo, assegurando maior reprodutibilidade experimental.

6 CONCLUSÕES

Os resultados das análises qualitativas e quantitativas dos extratos do pólen da *M. urundeuva* mostrou que o extrato etanólico possui maior quantidade de fitoconstituintes, maior conteúdo fenólico e maior potencial redutor do que o extrato aquoso, portanto foi o escolhido para mediar a síntese das AgNPs.

Foram avaliados como os efeitos da variação da proporção extrato: AgNO₃, da temperatura e pH sobre o tamanho, a distribuição e a estabilidade das AgNPs sintetizadas. Dentre as sínteses avaliadas, a proporção extrato: AgNO₃ 1:99 apresentou os resultados mais expressivos em termos de redução de tamanho e maior concentração de partículas nas análises de NTA. No entanto, observou-se que essa proporção utiliza maior quantidade do precursor metálico, além de obter parâmetros de estabilidade e diâmetro semelhantes a proporção 1:49. Visando o uso racional de recursos e o alinhamento aos princípios da química verde, as proporções 1:19 e 1:49 foram definidas como as mais viáveis, pois garantem eficiência nanométrica com um melhor custo-benefício e menor desperdício de reagentes.

Quanto aos parâmetros físico-químicos, a escolha do pH 8,0 foi determinante, pois o meio levemente alcalino promove a desprotonação dos grupos hidroxila dos fitoconstituintes do pólen, intensificando sua capacidade redutora e estabilizadora. Isso resultou em partículas menores e sistemas coloidais mais estáveis, evidenciados pelos elevados valores de potencial zeta. A temperatura de 25 °C mostrou-se tecnicamente superior, uma vez que o aquecimento a 45 °C não acelerou significativamente a síntese.

Dessa forma, conclui-se que a síntese verde de AgNPs utilizando extrato etanólico de pólen de *M. urundeuva* representa uma alternativa sustentável e eficiente para a obtenção de nanomateriais com características físico-químicas adequadas. Os resultados demonstram que o controle das condições reacionais, especialmente da proporção extrato:AgNO₃ e do pH, exerce papel determinante na formação das AgNPs, contribuindo para a obtenção de sistemas coloidais mais estáveis.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Declaro que ferramentas de Inteligência Artificial Generativa foram utilizadas neste trabalho nas seguintes etapas: ChatGPT foi utilizado para tradução de trechos do texto para o idioma inglês, apoio ao aprimoramento da redação científica, à elaboração de ilustrações esquemáticas e ao auxílio nas buscas avançadas em bases de dados e catálogos bibliográficos, auxiliando na identificação de referências científicas relevantes durante a etapa de levantamento bibliográfico. NotebookLM foi utilizado como apoio à revisão linguística e à melhoria da fluidez textual, durante a etapa de revisão do manuscrito.

Todo o conteúdo gerado foi revisado criticamente e validado pelo autor, que assume integral responsabilidade pela originalidade e veracidade do texto final, em conformidade com a Portaria CNPq nº 2.664/2026.

REFERÊNCIAS

- ABADA, Emad *et al.* Review green synthesis of silver nanoparticles by using plant extracts and their antimicrobial activity. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 31, n. 1, p. 103877, 2024.
- ABARCA-VARGAS, Rodolfo; ZAMILPA, Alejandro; PETRICEVICH, Vera L. Development and Validation of Conditions for Extracting Flavonoids Content and Evaluation of Antioxidant and Cytoprotective Activities from *Bougainvillea x buttiana* Bracteas (var. Rose). **Antioxidants**, v. 8, n. 8, p. 264, 2019.
- ADKINS, Jaley Faith *et al.* Directing the size and dispersity of silver nanoparticles with kudzu leaf extracts. **RSC Advances**, v. 13, n. 36, p. 25360–25368, 2023.
- AGUIAR GALVÃO, W. R. *et al.* Gastroprotective and anti-inflammatory activities integrated to chemical composition of *Myracrodruon urundeuva* Allemão - A conservationist proposal for the species. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 222, p. 177–189, 2018.
- AHMAD, Awais *et al.* Ultrasonic-assisted green synthesis of silver nanoparticles through cinnamon extract: biochemical, structural, and antimicrobial properties. **International Journal of Food Properties**, v. 26, n. 1, p. 1984–1994, 2023.
- AHMAD, Shahbaz *et al.* Green synthesis of gold and silver nanoparticles using crude extract of *Aconitum violaceum* and evaluation of their antibacterial, antioxidant and photocatalytic activities. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 11, p. 1320739, 2024.
- ALARA, Oluwaseun Ruth; ABDURAHMAN, Nour Hamid; UKAEGBU, Chinonso Ishamel. Extraction of phenolic compounds: A review. **Current Research in Food Science**, v. 4, p. 200–214, 2021.
- ALHARBI, Njud S.; ALSUBHI, Nehad S.; FELIMBAN, Afnan I. Green synthesis of silver nanoparticles using medicinal plants: Characterization and application. **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, v. 15, n. 3, p. 109–124, 2022.
- ALMAYOUF, Mina A. *et al.* Nanotherapy for Cancer and Biological Activities of Green Synthesized AgNPs Using Aqueous *Saussurea costus* Leaves and Roots Extracts. **Pharmaceuticals**, v. 17, n. 10, p. 1371, 15 out. 2024.
- ALROFAIDI, Mohammad A. *et al.* Green synthesis of silver nanoparticles using *Achillea arabica* and their antioxidant, anti-inflammatory, antidiabetic, and antimicrobial activities. **Discover Nano**, v. 21, n. 1, p. 183, 2026.
- ALRUHAILI, Mohammed H. *et al.* Green synthesis of silver nanoparticles from *Bacillus subtilis*-mediated feather hydrolysate: antimicrobial, larvicidal against *Culex pipiens*, and anticancer activities. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 12, n. 1, p. 116, 2025.
- ALZHRANI, Abdullah Y. A. *et al.* Design, synthesis, pharmacological evaluation, and *in silico* studies of the activity of novel spiro pyrrolo[3,4-*d*]pyrimidine derivatives. **RSC Advances**, v. 14, n. 2, p. 995–1008, 2024.

AQUINO, Nayara *et al.* Chemical Composition and Anti-Inflammatory Activity of the Decoction from Leaves of a Cultivated Specimen of *Myracrodruon urundeuva*. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 30, n. 8, p. 1616–1623, 2019.

ASHWATHI, K. *et al.* Phytochemical profiling of ethanolic extract of bee pollen using Gas Chromatography Mass Spectroscopy and its in silico analysis of hypocholesterolemic activity. **ENTOMON**, v. 49, n. 1, p. 55–64, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 80004-1:2024**: Nanotecnologias — Vocabulário — Parte 1: Vocabulário-base. Rio de Janeiro, 2024.

BALCHA, Muluemebet Aboye *et al.* Adsorptive removal of Cr(VI) from aqueous solution with green synthesized silver nanoparticle using *Justicia schimperiana* leaf extract. **Discover Materials**, v. 4, n. 1, p. 90, 19 dez. 2024.

BARBOSA, Ângela Monick Ramos *et al.* Levantamento etnobotânico de plantas utilizadas como medicinais por parteiras no município de Serra Talhada – PE. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, p. e176111334720, 4 out. 2022.

BEGMATOVA, Dilfuza *et al.* Use of educational technologies in teaching the basics of nanophysics, nanomaterials and nanotechnologies. **Results in Optics**, v. 16, p. 100717, 2024.

BERNARDES, Lucas Matos Martins *et al.* Green synthesis, characterization, and antimicrobial activity of silver nanoparticles from water-soluble fractions of Brazilian Kefir. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 10626, 2025.

BHAVI, Santosh Mallikarjun *et al.* Biogenic silver nanoparticles from *Simarouba glauca* DC leaf extract: Synthesis, characterization, and anticancer efficacy in lung cancer cells with protective effects in *Caenorhabditis elegans*. **Nano TransMed**, v. 3, p. 100052, 2024.

BURLEC, Ana Flavia *et al.* Current Overview of Metal Nanoparticles' Synthesis, Characterization, and Biomedical Applications, with a Focus on Silver and Gold Nanoparticles. **Pharmaceuticals**, v. 16, n. 10, p. 1410, 2023.

CHAND, Kishore *et al.* Green synthesis, characterization and photocatalytic activity of silver nanoparticles synthesized with *Nigella Sativa* seed extract. **Chemical Physics Letters**, v. 763, p. 138218, 2021.

CHEMAT, Farid *et al.* Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 34, p. 540–560, 2017.

CORADIN, Lidio; CAMILLO, Julcéia; PAREYN, Frans Germain Corneel (Ed.). Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região Nordeste. Brasília, DF: MMA, 2018. (Série Biodiversidade; 51) Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/publicacoes/biodiversidade/category/142-serie-biodiversidade.html>>, Acesso em: 28 dez. 2025.

CRAIG, Michael *et al.* Antimicrobial resistance at a crossroads: the cost of inaction. **The Lancet**, v. 404, n. 10458, p. 1083–1085, 2024.

DABARE, Sanduni; RAJAPAKSHA, Sisitha; MUNAWEERA, Imalka. Responsible innovation in nanotechnology: response to grand societal challenges. **Nanoscale Advances**, v. 7, n. 23, p. 7424–7439, 2025.

DAI, Jin; MUMPER, Russell J. Plant Phenolics: Extraction, Analysis and Their Antioxidant and Anticancer Properties. **Molecules**, v. 15, n. 10, p. 7313–7352, 2010.

DE SOUZA, Lindomar Maria *et al.* Does the type of substrate influence growth and antioxidant systems? Case study of *Myracrodruon urundeuva* under water deficit. **South African Journal of Botany**, v. 151, p. 841–851, 2022.

DHAKA, Anita *et al.* A review on biological synthesis of silver nanoparticles and their potential applications. **Results in Chemistry**, v. 6, p. 101108, dez. 2023.

DHANALAKSHMI, M.; LOSETTY, Venkatramana. Synthesis of sustainable silver nanoparticles using plant extract and their antimicrobial, anticancer, and photocatalytic dye degradation efficiency analysis. **Process Biochemistry**, v. 144, p. 64–78, 2024.

DHIR, Rajan *et al.* Plant-mediated synthesis of silver nanoparticles: unlocking their pharmacological potential—a comprehensive review. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 11, p. 1324805, 2024.

DIAZ-LÓPEZ, Jorge Benjamín *et al.* Optimization of silver nanoparticles synthesis using *Elaeis guineensis* Jacq. residue extract and their antibacterial activity against *Pseudomonas aeruginosa*. **Journal of Materials Science: Materials in Engineering**, v. 20, n. 1, p. 88, 2025.

DOMINGOS, Flávia Regina; SILVA, Maria Arlene Pessoa Da. Uso, conhecimento e conservação de *Myracrodruon urundeuva*: uma revisão sistemática. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, p. e2329118851, 12 nov. 2020.

DUBEY, Roshan Kumar; SHUKLA, Satyam; HUSSAIN, Zeashan. Green Synthesis of Silver Nanoparticles; A Sustainable Approach with Diverse Applications. **Chinese Journal of Applied Physiology**, p. e20230007, 2023.

DUCOLI, Serena *et al.* Quantitative evaluation of true-to-life nanoplastics using UV-visible spectroscopy and comparative analytical techniques. **Environmental Science: Nano**, v. 12, n. 11, p. 4935–4947, 2025.

EKER, Furkan *et al.* Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Plant Extracts: A Comprehensive Review of Physicochemical Properties and Multifunctional Applications. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 26, n. 13, p. 6222, 2025.

ELMEHALAWY, Nabila G. *et al.* Eco-friendly synthesis of silver nanoparticles: multifaceted antioxidant, antidiabetic, anticancer, and antimicrobial activities. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 37349, 2025.

FLIEGER, Jolanta *et al.* Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Natural Extracts with Proven Antioxidant Activity. **Molecules**, v. 26, n. 16, p. 4986, 2021.

FOUBERT-MENDES, Sara *et al.* A review on the function of arabinogalactan-proteins during pollen grain development. **Plant Reproduction**, v. 38, n. 1, p. 8, 2025.

FREITAS, Miguel L. M. *et al.* Mating system of a population of *Myracrodruon urundeuva* F.F. & M.F. Allemão using the fAFLP molecular marker. **Genetics and Molecular Biology**, v. 27, n. 3, p. 425–431, 2004.

GAINO, Ana P. S. C. *et al.* Understanding the effects of isolation on seed and pollen flow, spatial genetic structure and effective population size of the dioecious tropical tree species *Myracrodruon urundeuva*. **Conservation Genetics**, v. 11, n. 5, p. 1631–1643, 2010.

GAINO, Ana Paula Silva Campos *et al.* Mating system in *Myracrodruon urundeuva* (Anarcadiaceae): implications for conservation genetics. **Brazilian Journal of Botany**, v. 34, n. 4, p. 545–551, 2011.

GAUTAM, Sonali *et al.* Transition metal-based nanoparticles as potential antimicrobial agents: recent advancements, mechanistic, challenges, and future prospects. **Discover Nano**, v. 18, n. 1, p. 84, 2023.

GONG, Xianyun *et al.* An overview of green synthesized silver nanoparticles towards bioactive antibacterial, antimicrobial and antifungal applications. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 323, p. 103053, 2024.

GUEFFAI, Abdelkrim *et al.* Phenolics from Defatted Black Cumin Seeds (*Nigella sativa* L.): Ultrasound-Assisted Extraction Optimization, Comparison, and Antioxidant Activity. **Biomolecules**, v. 12, n. 9, p. 1311, 2022.

GWADA, Cynthia A. *et al.* Phytochemical-assisted synthesis, optimization, and characterization of silver nanoparticles for antimicrobial activity. **RSC Advances**, v. 15, n. 18, p. 14170–14181, 2025.

HAN, Yaxi *et al.* Green synthesis, characterization, and anticancer activity of silver nanoparticles via *Pulsatilla koreana* root extract. **Frontiers in Nutrition**, v. 13, p. 1746280, 2026.

HARBORNE, J.B. *Phytochemical Methods—A Guide to Modern Techniques of Plant Analysis*. **Chapman and Hall**: 3rd ed., London, UK, 1998.

HOSEINI, Benyamin *et al.* Application of ensemble machine learning approach to assess the factors affecting size and polydispersity index of liposomal nanoparticles. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 18012, 2023.

IBRAHIM, Nourhan M. *et al.* Chemical and green synthesis of silver nanoparticles and their use as an electrocatalyst for water splitting. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 159, p. 150536, 2025.

ILLANES TORMENA, Renata Pascoal *et al.* Enhancing the antimicrobial activity of silver nanoparticles against pathogenic bacteria by using *Pelargonium sidoides* DC extract in microwave assisted green synthesis. **RSC Advances**, v. 14, n. 30, p. 22035–22043, 2024.

JAIN, Kavya *et al.* Rethinking Nanoparticle Synthesis: A Sustainable Approach vs. Traditional Methods. **Chemistry – An Asian Journal**, v. 19, n. 21, p. e202400701, 2024.

KALINOWSKA, Monika *et al.* Co (II) Complex of Quercetin–Spectral, Anti-/Pro-Oxidant and Cytotoxic Activity in HaCaT Cell Lines. **Applied Sciences**, v. 11, n. 19, p. 9244, 2021.

KAMALANATHAN, Jayanthi *et al.* Microwave-assisted green synthesis of silver nanoparticles using *Cynoglossum furcatum* extract: biomedical evaluation against A431 skin cancer cell line. **Materials Technology**, v. 39, n. 1, p. 2401260, 2024.

KARATAŞ, Hasan *et al.* Silver Nanoparticles in Antibacterial Research: Mechanisms, Applications, and Emerging Perspectives. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 27, n. 2, p. 927, 2026.

KERIMKULOVA, Aigul Zh. *et al.* Microwave-assisted rapid biosynthesis of silver nanoparticles using *Simarouba glauca* leaf extract and its antimicrobial activity. **Nano-Structures & Nano-Objects**, v. 44, p. 101582, 2025.

KHAN, Humaira; PICCOLELLA, Simona; PACIFICO, Severina. Harnessing plant extracts for green nanoparticle synthesis: Toward a sustainable future. **Materials Today Sustainability**, v. 31, p. 101195, set. 2025.

KHURSHEED, Tara *et al.* Ultrasound-assisted solvent extraction of phenolics, flavonoids, and major triterpenoids from *Centella asiatica* leaves: A comparative study. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 111, p. 107091, 2024.

KUDA, Takashi; IKEMORI, Takahiko. Minerals, polysaccharides and antioxidant properties of aqueous solutions obtained from macroalgal beach-casts in the Noto Peninsula, Ishikawa, Japan. **Food Chemistry**, v. 112, n. 3, p. 575–581, 2009.

KULKARNI, Deepak *et al.* Biofabrication of nanoparticles: sources, synthesis, and biomedical applications. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 11, p. 1159193, 2 maio 2023.

KUMAR, Kshitiz; SRIVASTAV, Shivmurti; SHARANAGAT, Vijay Singh. Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 70, p. 105325, 2021.

LAWAG, Ivan Lozada *et al.* Optimisation of Bee Pollen Extraction to Maximise Extractable Antioxidant Constituents. **Antioxidants**, v. 10, n. 7, p. 1113, 2021.

LI, Jiangtao *et al.* Construction and application of a pollen emissions model based on phenology and random forests. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 25, n. 6, p. 3583–3602, 2025.

LI, Pei-Jun *et al.* Physicochemical characterization and antibacterial activities of silver nanoparticles prepared by amidated low-methoxyl pectin. **RSC Advances**, v. 14, n. 52, p. 38582–38589, 2024

LIAQAT, Nida *et al.* Green synthesized silver nanoparticles: Optimization, characterization, antimicrobial activity, and cytotoxicity study by hemolysis assay. **Frontiers in Chemistry**, v. 10, p. 952006, 2022.

LIMA, William Gustavo *et al.* Antifungal, antibiofilm and anti-resistance activities of Brazilian monofloral honeys against *Candida* spp. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 42, p. 102335, 2022.

LINA, Jakia Mustary *et al.* Green-synthesized silver nanoparticles for improved heat stress resilience and germination in potato seeds. **RSC Advances**, v. 15, n. 47, p. 39975–39987, 2025.

LOPES, Alberto Jorge Oliveira *et al.* Anti-Inflammatory and Antinociceptive Activity of Pollen Extract Collected by Stingless Bee *Melipona fasciculata*. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 18, p. 4512, 2019.

MACHADO, Alessandra Cury *et al.* “Aroeira” (*Myracrodruon urundeuva*) methanol extract: the relationship between chemical compounds and cellular effects. **Pharmaceutical Biology**, v. 54, n. 11, p. 2737–2741, 2016.

MEHDI ZABIHI, Mohammad *et al.* Green synthesis of non-toxic silver nanoparticles using *Salvia tebesana* Bunge extract: Optimization, cytotoxicity, and antibacterial activities. **Results in Chemistry**, v. 7, p. 101510, 2024.

MEKUYE, Bawoke; ABERA, Birhanu. Nanomaterials: An overview of synthesis, classification, characterization, and applications. **Nano Select**, v. 4, n. 8, p. 486–501, 2023.

MENEZES, J.D.S. *et al.* Compostos bioativos e potencial antioxidante do pólen apícola produzido por abelhas africanizadas (*Apis mellifera* L.). **Rev Inst Adolfo Lutz**, São Paulo, v. 69, n. 2, p. 233–242, 2010.

MENICHETTI, Arianna *et al.* Effect of Size, Shape and Surface Functionalization on the Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles. **Journal of Functional Biomaterials**, v. 14, n. 5, p. 244, 2023.

NOURI, Afsaneh *et al.* Ultrasonic-assisted green synthesis of silver nanoparticles using *Mentha aquatica* leaf extract for enhanced antibacterial properties and catalytic activity. **Colloid and Interface Science Communications**, v. 35, p. 100252, 2020.

OKEKE, Iruka N. *et al.* The scope of the antimicrobial resistance challenge. **The Lancet**, v. 403, n. 10442, p. 2426–2438, 2024.

ÖZTÜRK, Kılılcım; KAPLAN, Meryem; ÇALIŞ, Sema. Effects of nanoparticle size, shape, and zeta potential on drug delivery. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 666, p. 124799, 2024.

QIAO, Jiangtao *et al.* New insights into bee pollen: Nutrients, phytochemicals, functions and wall-disruption. **Food Research International**, v. 178, p. 113934, 2024.

QUBTIA, Maria *et al.* Evaluation of Plant-Based Silver Nanoparticles for Antioxidant Activity and Promising Wound-Healing Applications. **ACS Omega**, v. 9, n. 10, p. 12146–12157, 2024.

RAGUVARAN, Krishnan *et al.* A novel approach to silver nanoparticle biosynthesis using ursolic acid from *Catharanthus roseus* for therapeutic effects. **Scientific Reports**, v. 16, n. 1, p. 6377, 2026.

RODRIGUES, Adriana De Souza. **Avaliação do espectro de ação antimicrobiano de nanopartículas de prata desenvolvidas por nanotecnologia verde para aplicação em produtos médico-hospitalares**. Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2024.

RODRÍGUEZ-PÓLIT, Cristina *et al.* Chemical Properties and Biological Activity of Bee Pollen. **Molecules**, v. 28, n. 23, p. 7768, 2023.

SABÓIA GUERRA DIÓGENES, Érika *et al.* Evaluation of the skin whitening and antioxidant activity of *Myracrodruon urundeuva* extract (aroeira-do-sertão). **Natural Product Research**, v. 38, n. 20, p. 3663–3668, 2024.

SALAZAR-BRYAM, Ana Maria *et al.* Silver nanoparticles stabilized by ramnolipids: Effect of pH. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 205, p. 111883, 2021.

SARAVANAN, S. Functional, structural and morphological property of green synthesized silver nanoparticles using azadirachta indica leaf extract. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 1815–1818, 2021.

SHAHALAEI, Mona *et al.* A review of metallic nanoparticles: present issues and prospects focused on the preparation methods, characterization techniques, and their theranostic applications. **Frontiers in Chemistry**, v. 12, p. 1398979, 2024.

SHAHZADI, Sehar *et al.* A review on green synthesis of silver nanoparticles (SNPs) using plant extracts: a multifaceted approach in photocatalysis, environmental remediation, and biomedicine. **RSC Advances**, v. 15, n. 5, p. 3858–3903, 2025.

SHARMA, Kamana *et al.* Phytochemical analysis and green synthesis of silver nanoparticles using *Centella asiatica* leaf and stem extracts: An investigation of antibacterial activity. **PLOS One**, v. 20, n. 9, p. e0321172, 2025a.

SHARMA, Nitin Kumar *et al.* Green Route Synthesis and Characterization Techniques of Silver Nanoparticles and Their Biological Adeptness. **ACS Omega**, v. 7, n. 31, p. 27004–27020, 2022.

SHARMA, Rabi Kiran *et al.* Silver nanoparticles derived from *Viscum articulatum*: a green approach to antioxidant, antibacterial, and sensing activities. **Results in Chemistry**, v. 18, p. 102834, 2025b.

SHIVANANDA, C.S.; LAKSHMEESHA, Rao B.; SWAROOP, K. Tuning of optical properties of multifunctional silk fibroin films patterned by silver nanoparticles. **Next Materials**, v. 8, p. 100834, 2025.

SIANI, Paulo *et al.* Modeling Zeta Potential for Nanoparticles in Solution: Water Flexibility Matters. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 127, n. 19, p. 9236–9247, 2023.

SÍTIO DA MATA. Aroeira-preta (*Myracrodruon urundeuva*). Disponível em: <<https://www.sitiodamata.com.br/importacao/aroeira-preta-myracrodruon-urundeuva.html>>. Acesso em: 14 abr. 2026.

SOUZA, José Antonio Santos *et al.* ‘Green’ silver nanoparticles combined with tyrosol as potential oral antimicrobial therapy. **Journal of Dentistry**, v. 143, p. 104867, 2024.

THATYANA, Maxwell *et al.* Advances in Phytonanotechnology: A Plant-Mediated Green Synthesis of Metal Nanoparticles Using *Phyllanthus* Plant Extracts and Their Antimicrobial and Anticancer Applications. **Nanomaterials**, v. 13, n. 19, p. 2616, 22 set. 2023.

THOMAS, Shijith *et al.* Plant-based synthesis, characterization approaches, applications and toxicity of silver nanoparticles: A comprehensive review. **Journal of Biotechnology**, v. 394, p. 135–149, 2024.

TRIPATHI, Neetu; GOSHISHT, Manoj Kumar. Recent Advances and Mechanistic Insights into Antibacterial Activity, Antibiofilm Activity, and Cytotoxicity of Silver Nanoparticles. **ACS Applied Bio Materials**, v. 5, n. 4, p. 1391–1463, 2022.

TURUNC, Ersan; KAHRAMAN, Oskay; BINZET, Riza. Green synthesis of silver nanoparticles using pollen extract: Characterization, assessment of their electrochemical and antioxidant activities. **Analytical Biochemistry**, v. 621, p. 114123, 2021.

XUE, Yunsheng *et al.* Density functional theory study of the structure–antioxidant activity of polyphenolic deoxybenzoins. **Food Chemistry**, v. 151, p. 198–206, 2014.

ZEHRA, Syeda Hijab *et al.* Advancements in Green Synthesis of Silver-Based Nanoparticles: Antimicrobial and Antifungal Properties in Various Films. **Nanomaterials**, v. 15, n. 4, p. 252,

ZHOU, Wangting *et al.* Preparation technologies, structural characteristics and biological activities of polysaccharides from bee pollen: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 306, p. 141545, 2025.