

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

BÁRBARA CERQUEIRA OLIVEIRA

**Síntese verde de nanopartículas de prata mediada por extrato de *Artemisia
absinthium* (losna) e avaliação da atividade antimicrobiana**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAS

BÁRBARA CERQUEIRA OLIVEIRA

**SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA MEDIADA POR
EXTRATO DE *ARTEMISIA ABSINTHIUM* (LOSNA) E AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE
ANTIMICROBIANA**

Categoria do trabalho (Dissertação)
apresentada à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – Unesp como parte dos
requisitos para obtenção do título de mestre.

Nome do orientador(a):
Prof^a. Dr^a Rosangela da Silva de Laurentiz

Ilha Solteira

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Oliveira, Bárbara Cerqueira.
O48s Síntese verde de nanopartículas de prata mediada por extrato de *Artemisia absinthium* (losna) e avaliação da atividade antimicrobiana / Bárbara Cerqueira Oliveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
97 f. : il.

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

Orientador: Rosangela da Silva de Laurentiz

Inclui bibliografia

1. Síntese verde. 2. Nanopartículas de prata. 3. *Artêmia absinthium*. 4. Atividade antimicrobiana .

IMPACTO ESPERADO NA SOCIEDADE

A presente dissertação, ao investigar a síntese verde de nanopartículas de prata mediada por extrato de *Artemisia absinthium* e sua atividade antimicrobiana, apresenta potencial impacto científico, ambiental e social. A utilização de princípios da química verde contribui para a redução do uso de agentes químicos tóxicos e solventes agressivos, promovendo métodos de síntese mais sustentáveis e alinhados às demandas atuais por processos ecologicamente responsáveis.

No contexto da saúde pública, o desenvolvimento de novos agentes antimicrobianos é estratégico diante do aumento da resistência microbiana a antibióticos convencionais. As nanopartículas de prata sintetizadas por rota biogênica podem representar uma alternativa promissora para aplicação em formulações farmacêuticas, materiais hospitalares, curativos e revestimentos com ação antimicrobiana, contribuindo para a prevenção e o controle de infecções.

Adicionalmente, o aproveitamento de uma espécie vegetal medicinal amplamente conhecida valoriza a biodiversidade e reforça o potencial da bioeconomia, estimulando o uso racional de recursos naturais e a integração entre conhecimento tradicional e inovação tecnológica. O trabalho também contribui para a formação de recursos humanos qualificados nas áreas de nanotecnologia, química verde e biotecnologia, fortalecendo a capacidade científica e tecnológica nacional.

Dessa forma, espera-se que os resultados obtidos ampliem o conhecimento na área, incentivem o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e promovam impactos positivos nos setores da saúde, da indústria e do meio ambiente.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **Síntese verde de nanopartículas de prata mediada por extrato de *Artemisia absinthium* (losna) e avaliação da atividade antimicrobiana**

AUTORA: BÁRBARA CERQUEIRA OLIVEIRA

ORIENTADORA: ROSANGELA DA SILVA DE LAURENTIZ

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciência dos Materiais, área: Ciência e Engenharia dos Materiais pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 gov.br ROSANGELA DA SILVA DE LAURENTIZ
Data: 30/03/2026 18:09:34-0300
Verifique em <https://validar.it.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
 gov.br RENATO GRILLO
Data: 31/03/2026 10:12:20-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. RENATO GRILLO (Participação Virtual)
Departamento de Física e Química / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Documento assinado digitalmente
 gov.br REGIANE GODOY DE LIMA
Data: 31/03/2026 11:41:27-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dra. REGIANE GODOY DE LIMA (Participação Virtual)
Instituto de Física / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS

Ilha Solteira, 27 de março de 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Prof^a Dr^a Rosangela da Silva de Laurentiz pela orientação, pela confiança e por todo o apoio ao longo desta trajetória. Sou muito grata pelos ensinamentos, pela paciência e pela disponibilidade em ajudar sempre que necessário. Sua orientação foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação acadêmica.

Agradeço à Universidade Estadual Paulista (UNESP), ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais e ao Departamento de Física e Química (DFQ) pela estrutura e suporte oferecidos para a realização desta pesquisa.

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo Auxílio Equipamento Multiusuário que viabilizou a aquisição dos equipamentos NEXUS 670 (proc. 1997/07158-4), Zetasizer Advance Lab (proc. 2022/03219-2) e Nanosight Pro (proc. 2023/17369-9), fundamentais para as análises experimentais.

Ao Laboratório de Produtos Naturais e Espectrometria de Massas (LaPNEM) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, pela realização das atividades antimicrobianas.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, agradeço pelos conhecimentos compartilhados ao longo do curso.

Ao grupo de pesquisa GSOPN e aos colegas do departamento que auxiliaram nas análises de caracterização, agradeço pela colaboração durante o desenvolvimento experimental.

A Maria Aparecida, agradeço por ter sido essencial no meu processo de adaptação à nova cidade, oferecendo acolhimento e apoio em um momento muito importante dessa caminhada.

Aos meus pais, Tatiana e José Marcos, aos meus irmãos e às minhas avós, especialmente à minha avó Elenita, pelo carinho, apoio e incentivo durante toda a minha trajetória.

Aos amigos, pelo companheirismo ao longo desse percurso, especialmente à Beatriz, pela convivência diária e por compartilhar comigo os desafios dessa etapa.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, registro minha sincera gratidão.

RESUMO

A busca por processos sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de rotas verdes para a síntese de nanopartículas metálicas, utilizando extratos naturais como agentes redutores e estabilizantes. Neste trabalho, nanopartículas de prata (AgNPs) foram sintetizadas a partir de extrato aquoso de *Artemisia absinthium*. O extrato foi caracterizado quanto à composição fitoquímica, teor de compostos fenólicos e atividade antioxidante. Inicialmente, as sínteses foram realizadas para avaliar a melhor proporção metal:extrato (1:09, 1:19, 1:39, 1:49 e 1:99), sendo a formação das nanopartículas monitorada por espectrofotometria UV-Vis, com banda de plasmon entre 420 e 450 nm. Os testes fitoquímicos evidenciaram a presença de flavonoides, terpenoides, saponinas e taninos. O extrato apresentou conteúdo fenólico total de $17,59 \pm 0,08$ mg EAG/g e atividade antioxidante frente ao DPPH com CI_{50} de $1,93 \pm 0,90$ µg/mL, indicando potencial redutor adequado para a síntese verde de AgNPs. As formulações obtidas foram caracterizadas por espalhamento dinâmico de luz (DLS), potencial zeta, microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDX) e análise de rastreamento de nanopartículas (NTA). As proporções 1:09 e 1:19 apresentaram melhores parâmetros e foram selecionadas para otimização da síntese com ajuste de pH para 8. As nanopartículas apresentaram tamanho hidrodinâmico médio inicial de 50–60 nm, potencial zeta de aproximadamente -28 mV e morfologia predominantemente esférica. Após centrifugação e lavagem, observou-se aumento do tamanho médio (~100 nm), maior polidispersidade e alteração no potencial zeta, possivelmente devido à agregação ou seleção de partículas maiores. A atividade antimicrobiana foi avaliada frente a *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli* por ensaio de MTT. As formulações não apresentaram concentração inibitória mínima (CIM) frente a *S. aureus*, embora tenha sido observada redução da viabilidade bacteriana. Por outro lado, foram ativas contra *E. coli*, com CIM de 33 e 38 µg/mL para as proporções 1:09 e 1:19, respectivamente. Conclui-se que o extrato de *A. absinthium* apresenta composição adequada para a síntese verde de AgNPs estáveis e com potencial antimicrobiano, com possível aplicação em revestimentos e superfícies antimicrobianas.

Palavras-chave: síntese verde; nanopartículas de prata; *Artemisia absinthium*; atividade antimicrobiana.

ABSTRACT

The search for sustainable processes has driven the development of green routes for the synthesis of metallic nanoparticles, using natural extracts as reducing and stabilizing agents. In this study, silver nanoparticles (AgNPs) were synthesized using an aqueous extract of *Artemisia absinthium*. The extract was characterized in terms of phytochemical composition, total phenolic content, and antioxidant activity. Initially, syntheses were performed to evaluate the best metal:extract ratio (1:09, 1:19, 1:39, 1:49, and 1:99), and nanoparticle formation was monitored by UV-Vis spectrophotometry, with a plasmon band between 420 and 450 nm. Phytochemical screening revealed the presence of flavonoids, terpenoids, saponins, and tannins. The extract showed a total phenolic content of 17.59 ± 0.08 mg GAE/g and antioxidant activity against DPPH with an IC_{50} of 1.93 ± 0.90 μ g/mL, indicating suitable reducing potential for the green synthesis of AgNPs. The obtained formulations were characterized by dynamic light scattering (DLS), zeta potential, scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), and nanoparticle tracking analysis (NTA). The 1:09 and 1:19 ratios showed the best parameters and were selected for synthesis optimization with pH adjustment to 8. The nanoparticles exhibited an initial average size of 50–60 nm, zeta potential of approximately –28 mV, and predominantly spherical morphology. After centrifugation and washing steps, an increase in average size (~100 nm), higher polydispersity, and changes in zeta potential were observed, possibly due to aggregation or selection of larger particles. Antimicrobial activity was evaluated against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* using the MTT assay. The formulations did not show minimum inhibitory concentration (MIC) against *S. aureus*, although a reduction in bacterial viability was observed. On the other hand, activity against *E. coli* was detected, with MIC values of 33 and 38 μ g/mL for the 1:09 and 1:19 ratios, respectively. It is concluded that the *A. absinthium* extract presents a suitable composition for the green synthesis of stable AgNPs with antimicrobial potential, with possible applications in coatings and antimicrobial surfaces.

Keywords: green synthesis; silver nanoparticles; *Artemisia absinthium*; antimicrobial activity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de estruturas de metabólitos secundários de diferentes classes envolvidos no processo redox da síntese verde de AgNPs.

Figura 2 – Representação esquemática do mecanismo de formação da AgNPs via síntese verde, destacando as etapas de redução dos íons prata, nucleação, crescimento e estabilização (capping) por biomoléculas do extrato vegetal.

Figura 3 – Foto ilustrativa de *Artemisia absinthium* L.

Figura 4 – Principais mecanismos de toxicidade das AgNPs em células bacterianas: (A) dano à parede/membrana celular, (B) liberação de íons Ag^+ , (C) geração de Espécies Reativas de Oxigênio (ROS) e (D) interação com DNA e proteínas citoplasmáticas.

Figura 5 – Fluxograma do processo de obtenção do extrato aquoso de *Artemisia absinthium*, incluindo maceração das folhas secas, preparo da suspensão aquosa (10 g/100 mL), aquecimento a 50 °C por 30 minutos, filtração e armazenamento sob congelamento.

Figura 6 – Espectro de UV-Vis do extrato aquoso de *A. absinthium*.

Figura 7 – Curva analítica do ácido gálico utilizada para determinação do conteúdo fenólico total.

Figura 8 – Curva de inibição do radical DPPH pelo extrato de *A. absinthium*.

Figura 9 – Curva de inibição do radical DPPH pela quercetina.

Figura 10 – Foto das diferentes proporções entre extrato e nitrato de prata no início da síntese (A) e após 150 min (B).

Figura 11 – Espectros de absorção no UV-Vis durante a síntese de AgNPs em função do tempo de síntese para as diferentes formulações.

Figura 12 – Distribuição de tamanho hidrodinâmico por intensidade das nanopartículas de prata obtidas por síntese verde em diferentes proporções metal:extrato.

Figura 13 – Espectros de absorção no UV-Vis durante a síntese de AgNPs para a formulação 1:19pH em função do tempo de síntese.

Figura 14 – Espectros de absorção no UV-Vis durante a síntese de AgNPs para a formulação 1:09pH em função do tempo de síntese.

Figura 15 – Micrografia obtida por MEV da formulação 1:19 (a) e 1:19pH (b).

Figura 16 – Micrografia obtida por MEV da formulação 1:09 (a) e 1:09pH (b).

Figura 17 – Distribuição de tamanho hidrodinâmico equivalente e concentração de partículas determinada por NTA para as amostras 1:09pH, 1:19pH e suas respectivas formas centrifugadas (1:09pHc e 1:19pHc).

Figura 18 – Espectro de EDX e composição elementar das AgNPs da formulação 1:19pHc.

Figura 19 – Espectro de EDX e composição elementar das AgNPs da formulação 1:09pHc.

Figura 20 – Foto de placa de cultura usada no ensaio antimicrobiano indicando a presença e ausência de atividade bacteriana com controle negativo e controle positivo.

Figura 21 – Porcentagem de viabilidade de *S. aureus* em função das concentrações de AgNPs, nitrato de prata e extrato, determinada por ensaio de MTT.

Figura 22 – Porcentagem de viabilidade de *E. coli* em função das concentrações de AgNPs, nitrato de prata e extrato, determinada por ensaio de MTT.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições experimentais utilizadas no ensaio de atividade antioxidante pelo método DPPH.

Tabela 2 – Proporções entre o extrato aquoso de *A. absinthium* e a solução de AgNO₃ 1 mM utilizadas na síntese verde de AgNPs.

Tabela 3 – Resultados da triagem fitoquímica qualitativa do extrato aquoso de *Artemisia absinthium*.

Tabela 4 – Valores de absorbância e concentração obtidos para o extrato de *A. absinthium*.

Tabela 5 – Resultados de tamanho, índice de polidispersão e potencial zeta das formulações analisadas.

Tabela 6 – Resultados de tamanho, índice de polidispersão e potencial zeta das formulações 1:09, 1:19, 1:09pH e 1:19pH.

Tabela 7 – Parâmetros de tamanho e concentração obtidos por NTA para as formulações 1:09pH, 1:19pH, 1:09pHc e 1:19pHc.

Tabela 8 – Resultados de tamanho, índice de polidispersão e potencial zeta das formulações 1:09pHc e 1:19pHc.

Tabela 9 – Distribuição de tamanho e concentração de partículas por NTA das formulações de AgNPs armazenadas por até 75 dias.

LISTA DE ABREVIações, SIGLAS E SÍMBOLOS

AAS – espectrometria de absorção atômica

AgNPs – nanopartículas de prata

Ag⁰ – prata metálica

Ag⁺ – íon prata

C=O – carbonila

CLSI – Clinical and Laboratory Standards Institute

CFT – conteúdo fenólico total

Cl₅₀ – concentração capaz de inibir 50% do radical DPPH

CIM – concentração inibitória mínima

DLS – espalhamento dinâmico de luz

DMSO – dimetilsulfóxido

DPPH – 2,2-difenil-1-picril-hidrazil

EDX – espectroscopia por energia dispersiva de raios X

ELS – espalhamento eletroforético de luz

FTIR – espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier

HPLC-MS – cromatografia líquida de alta eficiência acoplada à espectrometria de massas

ICP-MS – espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado

ICP-OES – espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado

LSPR – ressonância de plasmons de superfície localizada

MEV – microscopia eletrônica de varredura

MET – microscopia eletrônica de transmissão

MH – Mueller-Hinton

MTT – brometo de tiazolil azul de tetrazólio

NADH – nicotinamida adenina dinucleotídeo reduzida

NADPH – nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato reduzida

NTA – análise de rastreamento de nanopartículas

PDI – índice de polidispersão

pH – potencial hidrogeniônico

RAM – resistência aos antimicrobianos

rpm – rotações por minuto

ROS – espécies reativas de oxigênio

SPR – ressonância plasmônica de superfície

UFC – unidades formadoras de colônia

UV-Vis – espectrofotometria na região do ultravioleta-visível

WHO – World Health Organization

-NH₂ – amina

-OH – hidroxila

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1. NANOPARTÍCULAS	18
2.1.1. CLASSIFICAÇÃO E PROPRIEDADES	18
2.1.2. MÉTODOS DE SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS.....	19
2.1.3. CARACTERIZAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS	20
2.1.4. APLICAÇÕES DAS NANOPARTÍCULAS.....	21
2.2. NANOPARTÍCULAS DE PRATA (AGNPs)	22
2.2.1. ASPECTOS GERAIS DA SÍNTESE DE AGNPs	23
2.2.2. METODOLOGIAS DE SÍNTESE	24
2.2.2.1. <i>Métodos físicos e químicos</i>	25
2.2.2.2. <i>Síntese Verde de Nanopartículas de Prata</i>	26
2.2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM A SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS USANDO EXTRATOS VEGETAIS	28
2.4. INFECÇÕES BACTERIANAS.....	33
2.5. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS	36
3. OBJETIVOS	37
3.1. OBJETIVO GERAL	37
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	37
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
4.1. EQUIPAMENTOS E REAGENTES.....	38
4.2. PREPARAÇÃO DO EXTRATO AQUOSO DE <i>A. ABSINTHIUM</i>	38
4.3. CARACTERIZAÇÃO FITOQUÍMICA DO EXTRATO	39
4.3.1. ANÁLISES QUALITATIVAS.....	40
4.3.1.1. <i>Teste para alcaloides:</i>	40
4.3.1.2. <i>Teste para antraquinonas</i>	40
4.3.1.3. <i>Teste para esteroides /triterpenoides:</i>	41
4.3.1.4 <i>Teste para flavonoides:</i>	41
4.3.1.5. <i>Teste para saponinas:</i>	41
4.3.1.6. <i>Teste para taninos:</i>	41
4.3.1.7. <i>Teste para cumarinas:</i>	42
4.4. DETERMINAÇÃO DE CONTEÚDO FENÓLICO	42
4.5. AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE.....	43
4.6. SÍNTESE VERDE DE AGNPs.....	45

4.6.1. METODOLOGIA GERAL	45
4.6.2. SÍNTESE COM CONTROLE DE PH.....	46
4.7. CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS DE PRATA	46
4.7.1. ANÁLISE POR DLS.....	46
4.7.2. ANÁLISE POR MEV E EDX	46
4.7.3. ANÁLISE POR NTA.....	47
4.8. ENSAIOS BIOLÓGICOS	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
5.1. EXTRATO AQUOSO DAS FOLHAS DA <i>A. ABSINTHIUM</i>	49
5.1.1. PREPARO DO EXTRATO	49
5.1.2. TRIAGEM FITOQUÍMICA DO EXTRATO	50
5.1.3. DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO FENÓLICO.....	53
5.1.4. DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE (DPPH).....	55
5.2. SÍNTESE VERDE E CARACTERIZAÇÃO DAS AgNPs.....	57
5.3. ESTABILIDADE DAS NANOPARTÍCULAS DE PRATA	74
5.4. ENSAIOS DE ATIVIDADE ANTIMICROBIANA	75
6. CONCLUSÃO.....	81

1. INTRODUÇÃO

A nanotecnologia tem se consolidado como uma das áreas mais promissoras da ciência moderna, dedicada ao estudo, manipulação e desenvolvimento de materiais em escala nanométrica, tipicamente entre 1 e 100 nm, na qual a elevada razão superfície/volume e os efeitos de confinamento eletrônico conferem aos materiais propriedades físico-químicas, biológicas e comportamentais distintas de suas formas macroscópicas, possibilitando o desenvolvimento de produtos com novas funcionalidades (ABBAS *et al.*, 2024). Entre os nanomateriais mais estudados destacam-se as nanopartículas de prata (AgNPs), amplamente reconhecidas por suas propriedades antimicrobianas, condutoras e catalíticas. Tais propriedades são fortemente dependentes do tamanho, morfologia e características de superfície das nanopartículas, fatores que influenciam diretamente sua reatividade, liberação de íons prata e interação com microrganismos (VIANA *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2024; KHAN *et al.*, 2024).

A síntese química convencional de nanopartículas frequentemente depende de agentes redutores fortes e solventes orgânicos que podem ser potencialmente tóxicos, representando desafios para aplicações biomédicas sensíveis e aumentando o impacto ambiental desses processos (AKHTER *et al.*, 2024). Em resposta a essas limitações, a síntese verde de nanopartículas utilizando extratos de plantas tem emergido como uma alternativa sustentável e segura, visto que compostos naturais presentes nos extratos vegetais podem atuar simultaneamente como agentes redutores e estabilizantes, eliminando a necessidade de químicos tóxicos e reduzindo a geração de resíduos (EKER *et al.*, 2025). Essa abordagem tem ganhado destaque na nanotecnologia devido ao seu menor custo, maior biocompatibilidade e menor impacto ambiental, além de produzir nanopartículas com propriedades físico-químicas ajustáveis pela escolha da espécie vegetal e condições de síntese (PANDEY *et al.*, 2020; SHAHZADI *et al.*, 2025).

O uso de extratos vegetais na síntese de nanopartículas é especialmente interessante, pois além de reduzir e estabilizar os íons metálicos, os compostos bioativos presentes nas plantas podem conferir novas propriedades às nanopartículas obtidas. Diversos estudos apontam que parâmetros como o pH, temperatura, tempo de reação e a concentração do extrato vegetal influenciam diretamente o tamanho, a estabilidade e a morfologia das AgNPs (DASHORA *et al.*, 2022; AZAD *et al.*, 2023).

Essas características determinam o desempenho das nanopartículas em aplicações biológicas e tecnológicas (SHAHZADI *et al.*, 2025).

As nanopartículas de prata (AgNPs) destacam-se nas aplicações biomédicas devido à sua expressiva atividade antimicrobiana, a qual está relacionada à elevada razão superfície/volume, à liberação controlada de íons Ag^+ e à capacidade de induzir estresse oxidativo e danos estruturais em microrganismos (DAKAL *et al.*, 2016). Estudos recentes demonstram que as AgNPs apresentam amplo espectro de ação contra bactérias Gram-positivas e Gram-negativas, fungos e determinados vírus, inclusive cepas resistentes a antimicrobianos convencionais (DAKAL *et al.*, 2022). Além da ação antimicrobiana, as AgNPs têm sido amplamente exploradas em aplicações biomédicas como curativos para feridas, revestimentos de dispositivos médicos, biomateriais com propriedades antibiofilme e sistemas de liberação controlada de fármacos, evidenciando seu potencial translacional na área da saúde (ZHANG *et al.*, 2023).

Artemisia absinthium L. (losna) é uma espécie amplamente reconhecida pela sua riqueza em compostos bioativos, incluindo fenóis, flavonoides, sesquiterpenos e outros terpenoides, sendo descritos mais de 90 metabólitos secundários nessa espécie (FERREIRA *et al.*, 2022). A presença desses constituintes químicos confere ao extrato vegetal elevada capacidade antioxidante e capacidade de redução, características que têm sido exploradas na síntese verde de nanomateriais (SAINI *et al.*, 2022). No contexto da produção de nanopartículas de prata (AgNPs), os compostos fenólicos e terpenoides presentes em extratos de plantas atuam como agentes redutores e estabilizantes, promovendo a redução dos íons metálicos e a formação de AgNPs de forma controlada, ao mesmo tempo em que minimizam a necessidade de reagentes químicos agressivos e preservam as propriedades benéficas inerentes ao extrato vegetal (IRAVANI, 2011).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo sintetizar nanopartículas de prata (AgNPs) por meio de uma abordagem de síntese verde utilizando extrato de *Artemisia absinthium* como agente redutor e estabilizante. Adicionalmente, será investigada a influência de diferentes condições de preparo, incluindo a variação na concentração do extrato vegetal e o emprego de ultrassom em comparação com a agitação convencional à temperatura ambiente. As nanopartículas obtidas serão caracterizadas quanto ao diâmetro hidrodinâmico, potencial zeta e morfologia, com o propósito de correlacionar esses parâmetros físico-químicos com

os mecanismos de formação das AgNPs. Além disso, será avaliado *in vitro* o potencial antimicrobiano das AgNPs frente a cepas de relevância clínica, incluindo bactérias Gram-positivas (*Staphylococcus aureus*) e Gram-negativas (*Escherichia coli*).

Diferentemente de estudos prévios, este trabalho explora a influência do ultrassom e a otimização de parâmetros de pH e concentração para *Artemisia absinthium*, visando o controle fino da morfologia.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Nanopartículas

Nanopartículas são materiais com tamanhos dimensionados na faixa nanométrica entre 1 e 100 nm. Nessa escala, as propriedades físico-químicas e biológicas diferem das observadas em escalas maiores, devido ao aumento da razão superfície/volume e a efeitos de confinamento quântico (JOUDEH; LINKE, 2022). Essas diferenças conferem às nanopartículas elevada reatividade superficial, grande capacidade de adsorção e interações específicas com biomoléculas, tornando-as ferramentas centrais em nanotecnologia aplicada à saúde, energia, catálise, eletrônica e tratamento ambiental (ALTAMMAR *et al.*, 2023).

2.1.1. Classificação e propriedades

De acordo com Joudeh e Linke (2022), as nanopartículas podem ser classificadas com base em critérios estruturais e composicionais, considerando-se principalmente sua composição química, morfologia e organização interna. Sob o ponto de vista composicional, podem ser categorizadas como metálicas, óxidos metálicos, poliméricas, carbonáceas ou semicondutoras. Em termos morfológicos, apresentam ampla diversidade de formas, incluindo estruturas esféricas, bastonetes (nanorods), lâminas (nanosheets) e outras arquiteturas anisotrópicas. Quanto à estrutura interna, podem ser descritas como partículas sólidas, porosas ou do tipo núcleo-casca (core-shell), nas quais diferentes materiais compõem camadas distintas, possibilitando a modulação de propriedades físico-químicas e funcionais.

Cada classe de nanopartículas apresenta propriedades físico-químicas específicas determinadas por sua composição e estrutura. Nanopartículas metálicas,

especialmente as nanopartículas de prata (AgNPs), exibem intensa ressonância de plasmons de superfície localizada (LSPR) e elevada atividade antimicrobiana, características que ampliam sua aplicabilidade em sensores, catálise e biomateriais (DAKAI *et al.*, 2022) Em contraste, nanopartículas de óxidos metálicos, como TiO_2 , ZnO e Fe_3O_4 , destacam-se por suas propriedades fotocatalíticas, semicondutoras ou magnéticas, sendo amplamente empregadas em remediação ambiental, diagnóstico por imagem e sistemas terapêuticos (ZHANG *et al.*, 2023). Por sua vez, nanopartículas poliméricas apresentam elevada biocompatibilidade, biodegradabilidade e capacidade de encapsulamento e liberação controlada de fármacos, o que favorece sua aplicação em sistemas avançados de liberação de fármacos (MITCHELL *et al.*, 2021).

Três parâmetros fundamentais governam o comportamento físico-químico e biológico das nanopartículas: tamanho, morfologia e química de superfície. O tamanho influencia diretamente a razão área superficial/volume e, conseqüentemente, a fração de átomos expostos, impactando propriedades catalíticas, ópticas e eletrônicas; nanopartículas menores tendem a apresentar maior reatividade e variações significativas na resposta óptica devido a efeitos de confinamento quântico e plasmônico (AMENDOLA *et al.*, 2017; JOUDEH; LINKE, 2022) A morfologia, por sua vez, afeta a distribuição de campos elétricos locais e o comportamento da ressonância plasmônica de superfície (SPR) em nanopartículas metálicas, podendo promover deslocamentos no comprimento de onda de absorção conforme a *anisotropia estrutural (por exemplo, nanobastões ou nanoplacas)* (LINK *et al.*, 2000) Além disso, a composição e a funcionalização superficial desempenham papel determinante na estabilidade coloidal, na interação com biomoléculas e membranas celulares e na biodisponibilidade sistêmica, influenciando diretamente o desempenho em aplicações biomédicas e ambientais (ALBANESE *et al.*, 2012; YANG *et al.*, 2015)

2.1.2. Métodos de síntese de nanopartículas

Alguns métodos podem ser empregados para a síntese de nanopartículas, os quais diferem quanto ao princípio de formação, controle estrutural e impacto ambiental. De modo geral, tais métodos físicos, como ablação a laser e vaporização-condensação, oferecem excelente controle de pureza e dimensão, porém exigem equipamentos sofisticados e elevado consumo energético (ALTAMMAR *et al.*, 2023). Métodos químicos, como a redução usando citrato ou borohidreto, permitem controle

sintético e escala, mas utilizam reagentes potencialmente tóxicos (JOUDEH; LINKE, 2022, ABBAS *et al.*, 2024). Já os métodos biológicos (também chamado método de síntese verde) utilizam extratos vegetais, microrganismos ou biomoléculas como agentes redutores e estabilizantes, oferecendo uma possibilidade mais sustentável para sintetizar nanopartículas (ALTAMMAR *et al.*, 2023).

Alguns parâmetros podem influenciar diretamente na síntese de nanopartículas, sendo eles, pH, temperatura, razão precursor/ agente redutor e presença de ultrassom. Esses, influenciam o balanço entre nucleação e crescimento, determinando a distribuição de tamanho e morfologia do produto (JOUDEH; LINKE, 2022).

2.1.3. Caracterização de nanopartículas

Após a síntese das nanopartículas a caracterização é uma etapa essencial para compreender suas propriedades físico-químicas, estruturais e funcionais. A obtenção de informações precisas sobre o tamanho, a morfologia, a distribuição de tamanho, o potencial zeta, a cristalinidade e a composição elementar são fundamentais para correlacionar os parâmetros de síntese com o desempenho e a estabilidade das nanopartículas (KASAR *et al.*, 2020).

Entre as técnicas mais utilizadas, a espectroscopia UV-Vis é amplamente empregada como método inicial de caracterização de nanopartículas metálicas, pois permite monitorar a formação e a estabilidade coloidal das partículas em solução. No caso das nanopartículas de prata, o pico de ressonância plasmônica de superfície (SPR) geralmente aparece entre 400 e 450 nm, sendo indicativo da presença e do tamanho médio das partículas (EVANOFF; CHUMANOV, 2005). Alterações na posição e intensidade desse pico estão diretamente relacionadas ao diâmetro e à dispersão das partículas.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a microscopia eletrônica de transmissão (MET) são ferramentas indispensáveis para observar a morfologia, a forma e o tamanho das nanopartículas em escala nanométrica. A MET, em especial, permite visualizar diretamente a estrutura e medir o diâmetro das partículas com alta precisão, enquanto a MEV fornece informações tridimensionais da superfície e da agregação das partículas (JEEVANANDAM *et al.*, 2018).

A análise de potencial zeta fornece informações sobre a estabilidade coloidal das nanopartículas em suspensão. Valores elevados (positivos ou negativos) indicam

repulsão eletrostática entre as partículas, prevenindo a agregação e garantindo estabilidade da dispersão. A análise por Dynamic Light Scattering (DLS) permite medir o tamanho hidrodinâmico médio e a polidispersão, fornecendo dados complementares sobre a uniformidade do sistema (POCHAPSKI *et al.*, 2021).

A técnica de Nanoparticle Tracking Analysis (NTA) pode ser empregada para a determinação do tamanho e da concentração das nanopartículas em suspensão. Diferentemente do DLS, que fornece um tamanho médio baseado na intensidade do espalhamento da luz, o NTA possibilita a visualização e o rastreamento individual das partículas por meio da análise do movimento browniano, permitindo obter a distribuição de tamanho baseada em número e estimar a concentração de partículas por unidade de volume. Essa abordagem é particularmente útil em sistemas polidispersos, fornecendo informações complementares sobre a heterogeneidade da dispersão (FILIPE; HAWE; JISKOOT, 2010).

Técnicas complementares, como a espectroscopia de infravermelho (FTIR), permitem identificar os grupos funcionais responsáveis pela redução e estabilização das nanopartículas, auxiliando na compreensão das interações entre os compostos fitoquímicos do extrato vegetal e a superfície das nanopartículas (BALCIUNAITIENE *et al.*, 2021).

Dessa forma, o conjunto dessas técnicas garante uma análise completa, possibilitando a correlação entre as condições de síntese e o comportamento físico-químico das nanopartículas formadas.

2.1.4. Aplicações das nanopartículas

Devido às suas características físico-químicas únicas, as nanopartículas apresentam amplo potencial de aplicação em múltiplos campos científicos e tecnológicos. Na medicina e farmacologia, atuam como vetores de entrega de fármacos, agentes de contraste, entre outros. Na eletrônica os nanomateriais podem ser componentes redutores e sensores de alta sensibilidade, também é possível verificar o uso de nanopartículas na área ambiental, sendo usadas na adsorção e degradação de poluentes, e no tratamento de água (ALTAMMAR *et al.*, 2023). No âmbito veterinário e agrícola, servem em formulações antimicrobianas e sistemas de liberação controlada de princípios ativos. Assim, fica evidente o amplo potencial das nanopartículas, capazes de atender a demandas de distintos campos científicos e industriais (JOUDEH; LINKE, 2022; YANG *et al.*, 2021).

2.2. Nanopartículas de prata (AgNPs)

As AgNPs são estruturas metálicas com dimensões inferiores a 100 nm que exibem propriedades físico-químicas distintas da prata em escala macroscópica, em razão do aumento da razão área superficial/volume e de efeitos relacionados ao confinamento eletrônico (ZAHOOOR *et al.*, 2021). A redução para a escala nanométrica potencializa a atividade antimicrobiana da prata, favorecendo maior interação com membranas celulares microbianas, geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), produzidas a partir da desestabilização do metabolismo respiratório bacteriano, e liberação controlada de íons Ag^+ , mecanismos associados à sua elevada eficácia biocida (DAKAL *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2023). Além disso, as AgNPs apresentam propriedades ópticas e catalíticas dependentes do tamanho e da morfologia, o que amplia sua aplicabilidade tecnológica (ZHANG *et al.*, 2023). Essa versatilidade torna as AgNPs um dos nanomateriais mais investigados nas últimas décadas, com aplicações consolidadas em biomedicina, agricultura, catálise e processos de purificação de água (ABBAS *et al.*, 2024).

O comportamento das AgNPs é fortemente influenciado por três parâmetros principais: tamanho, morfologia e composição superficial. O tamanho determina a fração de átomos expostos e influencia diretamente propriedades como atividade catalítica, estabilidade coloidal e resposta óptica. A morfologia, por sua vez, modula a distribuição de campos elétricos locais e afeta fenômenos ópticos dependentes da anisotropia estrutural. Já a química de superfície, incluindo agentes estabilizantes e funcionalizações, exerce papel determinante na estabilidade coloidal, na interação com biomoléculas e na biodisponibilidade, impactando diretamente o desempenho biológico das nanopartículas (ABBAS *et al.*, 2024; DAKAL *et al.* 2016).

Entre as propriedades biológicas mais relevantes das AgNPs destaca-se a atividade antimicrobiana de amplo espectro, atribuída à liberação controlada de íons Ag^+ , à interação com membranas celulares microbianas e à indução de estresse oxidativo por meio da geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), mecanismos que promovem danos estruturais e funcionais culminando na morte celular (ABBAS *et al.*, 2024). No campo biomédico, as nanopartículas de prata são incorporadas a curativos avançados, revestimentos antimicrobianos para dispositivos médicos, agentes cicatrizantes e formulações farmacêuticas, sobretudo em razão de sua eficácia frente a microrganismos de relevância clínica, incluindo bactérias Gram-

positivas, Gram-negativas e fungos. Estudos relatam maior atividade antimicrobiana das AgNPs contra bactérias Gram-negativas, atribuída principalmente às diferenças estruturais da parede celular desses microrganismos (ABBAS *et al.*, 2024; BURLEC *et al.*, 2023; JANGID *et al.*, 2024). Do ponto de vista óptico, as AgNPs apresentam ressonância plasmônica de superfície (SPR), fenômeno caracterizado pela oscilação coletiva de elétrons da banda de condução quando excitados por radiação eletromagnética incidente, podendo ser monitorado por espectroscopia UV-Vis. Devido à essas propriedades plasmônicas (ABBAS *et al.* 2024) são exploradas no desenvolvimento de sensores ópticos e dispositivos fotônicos (DAKAL *et al.* 2016). Além disso, devido à sua natureza metálica e elevada organização cristalina, as AgNPs exibem alta condutividade elétrica e térmica, favorecendo aplicações em dispositivos eletrônicos, tintas condutoras e materiais compósitos funcionais (ABBAS *et al.* 2024).

Em contexto ambiental, as AgNPs têm sido investigadas para purificação de água e degradação de poluentes orgânicos, explorando simultaneamente suas propriedades catalíticas e antimicrobianas (ABBAS *et al.* 2024). Na agricultura, suas atividades antifúngica e bactericida têm sido avaliadas como alternativa para o controle de fitopatógenos, contribuindo para estratégias de manejo mais sustentáveis (BURLEC *et al.* 2023; JANGID *et al.* 2024).

A combinação de propriedades físico-químicas e biológicas confere às AgNPs elevada versatilidade tecnológica, o que justifica o crescente interesse no desenvolvimento de métodos de síntese mais sustentáveis e controlados, capazes de modular suas características estruturais e funcionais para aplicações específicas (SELVAM *et al.*, 2026; SHAHZADI *et al.*, 2025).

2.2.1. Aspectos gerais da síntese de AgNPs

A eficiência da síntese e as características físico-químicas das AgNPs são fortemente dependentes das condições experimentais empregadas durante o processo de formação. Parâmetros como concentração do sal precursor (geralmente AgNO_3), pH do meio reacional, temperatura, tempo de reação e proporção entre agente redutor e precursor desempenham papel determinante na cinética de nucleação e crescimento das nanopartículas, influenciando diretamente o tamanho, a

morfologia, a distribuição granulométrica e a estabilidade coloidal (IRAVANI, 2011; DAKAL *et al.* 2016).

O pH da solução é um fator crítico, especialmente em sínteses verdes mediadas por extratos vegetais. Em condições alcalinas, observa-se aumento da taxa de nucleação devido à maior disponibilidade de espécies redutoras ionizadas, o que favorece a formação de partículas menores e mais homogêneas. Em contrapartida, valores de pH mais baixos tendem a reduzir a velocidade de redução dos íons Ag^+ , resultando em partículas maiores ou com maior tendência à agregação (PIRTARIGHAT *et al.*, 2019). A temperatura também influencia significativamente a cinética reacional; elevações térmicas aumentam a taxa de redução e o crescimento cristalino, podendo promover maior dispersão ou, em alguns casos, agregação, dependendo da estabilidade coloidal do sistema (DAKAL *et al.* 2016).

Além dos parâmetros convencionais, técnicas assistidas por energia, como ultrassom e micro-ondas, têm sido investigadas para intensificar a síntese. A irradiação ultrassônica favorece fenômenos de cavitação, aumentando a taxa de nucleação e promovendo maior uniformidade das partículas (BANG; SUSLICK, 2010; ABAD *et al.*, 2012). De maneira semelhante, o uso de micro-ondas proporciona aquecimento rápido e homogêneo do meio reacional, reduzindo o tempo de síntese e contribuindo para melhor controle do tamanho e da morfologia das nanopartículas (BILECKA; NIEDERBERGER, 2010; ALQADI *et al.*, 2021)

O controle adequado desses parâmetros é essencial para a obtenção de AgNPs com propriedades reprodutíveis e direcionadas a aplicações específicas, especialmente em sistemas biológicos, nos quais tamanho e funcionalização superficial são determinantes para desempenho e segurança.

2.2.2. Metodologias de síntese

De maneira geral, as estratégias de síntese podem ser classificadas em métodos físicos, químicos e biológicos. Métodos físicos, como evaporação-condensação e ablação a laser, permitem elevado controle estrutural, porém demandam alto consumo energético; métodos químicos utilizam agentes redutores e estabilizantes sintéticos, possibilitando boa reprodutibilidade, mas frequentemente envolvem reagentes potencialmente tóxicos; por sua vez, abordagens biológicas como a síntese verde mediada por extratos vegetais ou microrganismos, têm ganhado destaque por oferecerem alternativas ambientalmente mais sustentáveis,

economicamente viáveis e compatíveis com aplicações biomédicas (AHMED *et al.*, 2022; EKER *et al.*, 2025). Nesse contexto, observa-se uma tendência crescente no desenvolvimento de rotas de síntese alinhadas aos princípios da química verde, priorizando redução de resíduos, uso de solventes menos agressivos e maior biocompatibilidade dos nanomateriais produzidos (AKHTER *et al.*, 2024; EKER *et al.*, 2025).

2.2.2.1. Métodos físicos e químicos

Os métodos físicos de síntese de nanopartículas de prata, como evaporação-condensação, ablação a laser e *sputtering*, baseiam-se principalmente em abordagens do tipo *top-down*, nas quais um material metálico macroscópico é fragmentado até atingir a escala nanométrica (IRAVANI., 2011). Na técnica de evaporação-condensação, a prata metálica é vaporizada sob altas temperaturas e posteriormente condensada em atmosfera controlada, resultando em nanopartículas de elevada pureza e baixa contaminação química. De maneira semelhante, a ablação a laser envolve a irradiação de um alvo metálico submerso em meio líquido ou gasoso, promovendo a ejeção de espécies metálicas que nucleiam e crescem como nanopartículas coloidais (ZHANG *et al.*, 2023). Já o *sputtering* utiliza bombardeamento iônico para remover átomos da superfície metálica, permitindo deposição controlada ou formação de nanomateriais com morfologia relativamente bem definida. Apesar das vantagens relacionadas ao alto grau de pureza e controle estrutural, esses métodos demandam infraestrutura sofisticada, alto consumo energético e custos operacionais elevados, o que pode limitar sua aplicação em larga escala (IRAVANI, 2011).

Em contraste, os métodos químicos seguem predominantemente uma abordagem *bottom-up*, baseada na redução de íons Ag^+ em solução para formação de prata metálica (Ag^0), seguida por processos de nucleação e crescimento controlado (DAKAL *et al.* 2016). Geralmente utiliza-se o nitrato de prata (AgNO_3) como precursor, enquanto agentes redutores como citrato de sódio, borohidreto de sódio ou hidrazina promovem a conversão química do metal iônico em nanopartículas. A adição de agentes estabilizantes ou *capping agents* é frequentemente necessária para evitar agregação e controlar o tamanho final das partículas. Embora esses métodos apresentem elevada eficiência, simplicidade experimental e boa reprodutibilidade, muitas das substâncias empregadas são potencialmente tóxicas e podem gerar

resíduos químicos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana, especialmente quando se considera aplicações biomédicas (AHMAD *et al.* 2019; DAKAL *et al.* 2016)

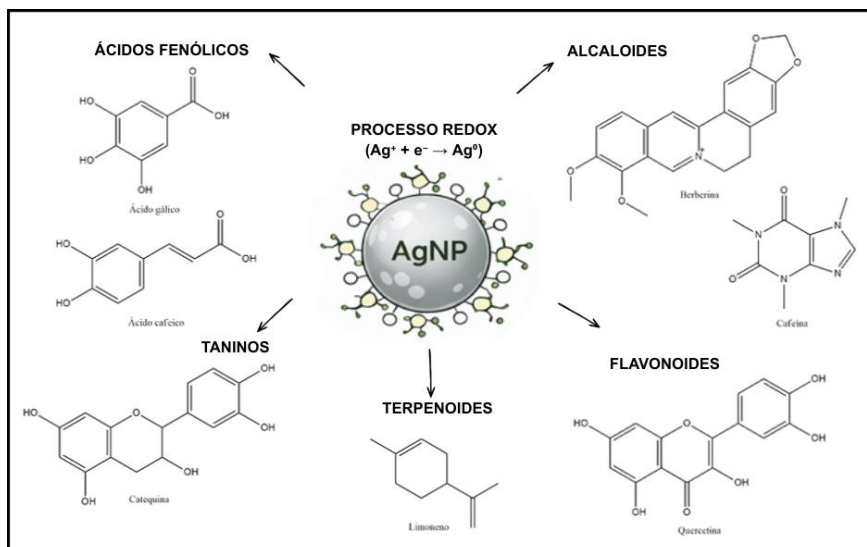
2.2.2.2. Síntese Verde de Nanopartículas de Prata

A síntese verde tem emergido como uma abordagem estratégica na nanotecnologia contemporânea, visando a obtenção de nanomateriais por rotas mais sustentáveis, economicamente viáveis e ambientalmente compatíveis. Essa metodologia foi impulsionada pelas limitações associadas aos métodos físico-químicos convencionais, que frequentemente demandam agentes redutores tóxicos, solventes orgânicos agressivos, condições reacionais severas e elevado consumo energético (DAKAL *et al.* 2016). Em consonância com os princípios da química verde, a síntese biogênica busca reduzir resíduos perigosos, minimizar riscos ambientais e ampliar a biocompatibilidade dos nanomateriais produzidos.

Nessa abordagem, extratos vegetais, biomoléculas isoladas, microrganismos e algas atuam simultaneamente como agentes redutores e estabilizantes (*capping agents*), promovendo a conversão de íons metálicos em nanopartículas metálicas estáveis (KAABIPOUR; HEMMATI, 2021; AHMED *et al.*, 2022). No caso específico da síntese de AgNPs com extratos vegetais, metabolitos secundários presentes nos extratos vegetais, como flavonoides, fenóis, ácidos fenólicos, terpenoides e alcaloides, desempenham papel fundamental no processo redox (Figura 1). Esses metabólitos secundários contêm grupos funcionais, como hidroxilas (-OH), carbonilas (C=O) e aminas (-NH₂), capazes de doar elétrons para reduzir os íons Ag⁺ provenientes sais de prata precursores, formando prata metálica em escala nanométrica (AHMED *et al.*, 2022; EKER *et al.*, 2025).

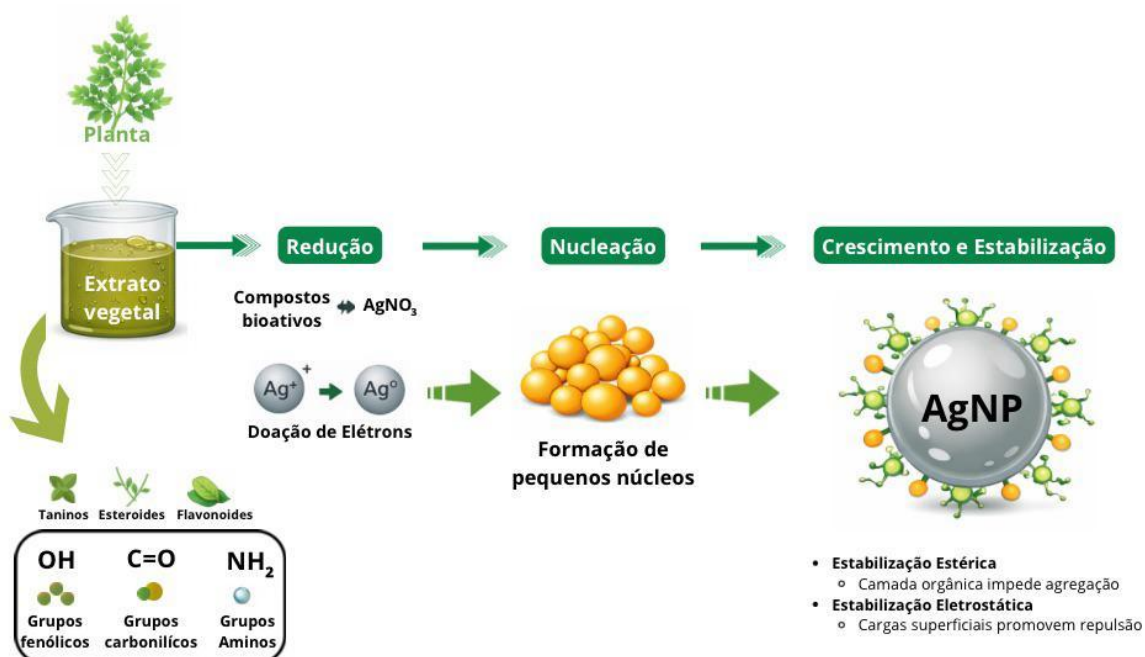
O mecanismo de formação das AgNPs por síntese verde geralmente envolve três etapas principais: Redução dos íons Ag⁺ por compostos fenólicos ou outros agentes redutores naturais; nucleação, caracterizada pela formação de pequenos núcleos metálicos estáveis; e crescimento controlado das nanopartículas, seguido de estabilização superficial por biomoléculas adsorvidas, que impedem a agregação por efeitos estéricos e/ou eletrostáticos (DAKAL *et al.* 2016) (Figura 2). A presença dessas moléculas orgânicas na superfície das nanopartículas não apenas confere estabilidade coloidal, mas também pode modular propriedades biológicas, como biocompatibilidade e atividade antimicrobiana

Figura 1 - Exemplo de estruturas de metabolitos secundários de diferentes classes envolvidos no processo redox da síntese verde de AgNPs.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Figura 2 – Representação esquemática do mecanismo de formação da AgNPs via síntese verde, destacando as etapas de redução dos íons prata, nucleação, crescimento e estabilização (capping) por biomoléculas do extrato vegetal.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Além da sustentabilidade do processo, a síntese verde permite frequentemente a obtenção de nanopartículas funcionalizadas de forma natural, com superfície revestida por compostos bioativos remanescentes do extrato vegetal, o que pode potencializar suas aplicações biomédicas e ambientais (KAABIPOUR; HEMMATI, 2021). Dessa forma, essa estratégia representa uma alternativa promissora para a produção de AgNPs com menor impacto ambiental e maior adequação a aplicações sensíveis (XIN *et al.*, 2022).

2.2.3. Fatores que influenciam a síntese verde de nanopartículas usando extratos vegetais

Mesmo em rotas de síntese verde, diversos parâmetros experimentais exercem influência direta sobre o tamanho, a morfologia, a dispersão coloidal e a estabilidade das nanopartículas, de maneira semelhante ao que ocorre nos métodos químicos convencionais (SHAHZADI *et al.*, 2025; MUSTAPHA *et al.*, 2022). Entretanto, na síntese biogênica, um dos fatores mais determinantes é a espécie vegetal utilizada, especialmente em função do seu perfil fitoquímico. A composição e a concentração de metabólitos secundários responsáveis pelo potencial de redução variam significativamente entre espécies e entre diferentes partes da planta (folhas, caules, raízes, flores ou sementes). Essa variação quantitativa e qualitativa afeta diretamente a disponibilidade de grupos funcionais redutores ($-OH$, $-C=O$, $-NH_2$) responsáveis pela conversão de íons metálicos (Ag^+) em prata metálica (Ag^0) (AKHTER *et al.*, 2024; SELVAM *et al.*, 2026). Os compostos com esses grupos funcionais presentes no extrato também desempenham papel fundamental na estabilização superficial das nanopartículas por meio da adsorção na superfície metálica, formando uma camada orgânica que controla a agregação e a estabilidade coloidal (DAKAL *et al.* 2016).

Além disso, a parte da planta selecionada desempenha papel crucial, uma vez que folhas geralmente apresentam maior teor de compostos fenólicos e flavonoides, enquanto raízes e cascas podem concentrar alcaloides ou outros metabólitos específicos. Consequentemente, diferenças na composição do extrato refletem-se na cinética de nucleação, no crescimento cristalino e no controle do tamanho das nanopartículas (AKHTER *et al.*, 2024; SHAHZADI *et al.*, 2025).

Outro parâmetro relevante é o solvente empregado no processo de extração, pois a eficiência de extração dos metabólitos secundários depende da polaridade do

solvente. Ácidos fenólicos e flavonoides, por exemplo, apresentam maior solubilidade em solventes polares (como água e etanol), enquanto terpenoides tendem a ser mais solúveis em solventes menos polares. Dessa forma, nem todos os solventes são capazes de disponibilizar adequadamente os agentes redutores e *capping agents*, o que impacta diretamente as características físico-químicas das AgNPs. Entretanto, além do solvente, tempo e a temperatura de extração também influenciam a concentração final desses compostos, podendo alterar a eficiência do processo redox e a estabilidade coloidal das nanopartículas formadas (SIKDAR *et al.*, 2023).

A concentração do precursor metálico em relação à quantidade de extrato vegetal é outra variável crítica na síntese verde sendo geralmente expressa como a razão ou proporção metal:extrato. Essa proporção regula o equilíbrio entre a disponibilidade de íons Ag^+ e a quantidade de biomoléculas redutoras e estabilizantes presentes no sistema. Estudos demonstram que existe uma correlação direta entre essa razão e a densidade de nucleação, influenciando significativamente o tamanho final das nanopartículas (DAKAL *et al.* 2016; HAJI *et al.*, 2022).

Quando a concentração de precursor metálico é baixa em relação ao extrato, há maior disponibilidade de compostos redutores por íon metálico, favorecendo uma redução rápida e simultânea dos íons Ag^+ . Essa condição promove elevada densidade de nucleação, resultando na formação de grande número de núcleos metálicos em curto intervalo de tempo. Como o metal disponível passa a ser distribuído entre muitos núcleos, o crescimento individual é limitado, originando nanopartículas menores e com distribuição de tamanho mais homogênea (AHMED *et al.*, 2022; HAJI *et al.*, 2022).

Por outro lado, quando a concentração de Ag^+ é elevada em relação à quantidade de extrato, pode ocorrer limitação na disponibilidade de agentes redutores e estabilizantes. Nesse cenário, a nucleação torna-se menos intensa e o crescimento cristalino passa a predominar, conduzindo à formação de partículas com maior diâmetro médio. Além disso, a menor quantidade relativa de biomoléculas adsorvidas na superfície pode comprometer a estabilização estérica e eletrostática, favorecendo agregação e aumento da polidispersidade (KAABIPOUR; HEMMATI, 2021).

Em conjunto, esses fatores evidenciam que, embora a síntese verde seja considerada mais sustentável, ela requer rigoroso controle experimental para garantir reprodutibilidade, uniformidade e estabilidade das nanopartículas obtidas.

Plantas que apresentam elevada concentração de compostos fenólicos e outros metabólitos com potencial redutor são consideradas candidatas promissoras

para a obtenção de extratos aplicáveis na síntese verde de AgNPs (CHANDRAKER *et al.*, 2021).

Estudos recentes demonstram que a síntese verde de AgNPs utilizando extratos vegetais tem produzido materiais com dimensões nanométricas controladas e ampla aplicabilidade tecnológica. Uma revisão sistemática recente relatou que extratos de espécies como *Ocimum sanctum*, *Curcuma longa* e *Azadirachta indica* possibilitaram a obtenção de AgNPs com diâmetros predominantemente entre 10 e 50 nm, aplicadas com sucesso em processos de fotocatalise de corantes, remediação ambiental e como agentes antimicrobianos (SHAHZADI *et al.*, 2025). De forma semelhante, Khatoon *et al.* (2024) destacaram que o extrato de *Quercus incana* permitiu a síntese de AgNPs com dimensões entre 8 e 41 nm, as quais apresentaram potencial aplicação como sensores para detecção de metais pesados. Adicionalmente, uma revisão publicada por Dhir *et al.* (2024) compilou múltiplos estudos envolvendo extratos de plantas medicinais, evidenciando que as nanopartículas obtidas frequentemente apresentaram tamanhos médios inferiores a 40 nm e demonstraram atividades antimicrobiana, antifúngica e antioxidante significativas.

Outro aspecto fundamental a ser considerado na utilização de extratos vegetais é que a natureza e a proporção dos metabólitos secundários são fortemente influenciadas por fatores ambientais e agronômicos, como composição do solo, temperatura, umidade, intensidade de radiação solar, altitude, disponibilidade hídrica e pressão de pragas. Variações nessas condições podem alterar significativamente o perfil fitoquímico da planta, impactando diretamente a concentração dos compostos disponíveis para o processo redox (SELMAR; KLEINWÄCHTER, 2013; YANG *et al.*, 2018;). Estudos em fitoquímica demonstram que estresses ambientais podem induzir ou suprimir rotas biossintéticas secundárias, modificando a atividade antioxidante e o potencial redutor dos extratos vegetais (ISAH, 2019). Assim, uma mesma espécie cultivada em regiões distintas pode apresentar diferenças quantitativas e qualitativas em seus metabólitos, o que influencia diretamente sua capacidade de reduzir íons metálicos e estabilizar nanopartículas durante a síntese verde (GOBBO-NETO; LOPES, 2007; MOORE *et al.*, 2014; YANG *et al.*, 2018; ISAH, 2019). Portanto, nanopartículas sintetizadas a partir de diferentes extratos tendem a exibir propriedades distintas (AHMED *et al.*, 2016; LAKHANI *et al.*, 2025).

Essas diferenças estruturais e superficiais refletem-se diretamente nas propriedades químicas, ópticas e biológicas das AgNPs. Assim, cada extrato vegetal pode conferir às nanopartículas uma espécie de “assinatura química”, tornando suas propriedades finais dependentes da origem botânica utilizada e das condições de preparo do extrato (RAI *et al.* 2009; AHMED *et al.*, 2016; LAKHANI *et al.*, 2025).

Portanto, para que a síntese verde de AgNPs utilizando extratos vegetais se consolide como uma alternativa viável para aplicações tecnológicas e biológicas, é fundamental investir no desenvolvimento de protocolos padronizados, na otimização sistemática dos parâmetros de síntese (pH, temperatura, proporção metal:extrato, tempo reacional), em métodos robustos de caracterização físico-química (UV-Vis, DLS, MEV/MET, DRX, FTIR, NTA) e na realização de ensaios toxicológicos *in vitro* e *in vivo* que garantam tanto a reprodutibilidade quanto a biossegurança dos nanomateriais obtidos (MOGHADDAM *et al.*, 2015; JEEVANANDAM *et al.*, 2018).

Nesse contexto, plantas amplamente empregadas na medicina tradicional e que possuam cultivo comercial estabelecido representam candidatas estratégicas para esse tipo de síntese, pois apresentam composição fitoquímica relativamente bem documentada, disponibilidade em larga escala e cadeia produtiva estruturada, favorecendo a padronização do extrato e a escalabilidade do processo (KHALIL *et al.*, 2014; SARANYA *et al.*, 2017). Assim, a escolha racional da matéria-prima vegetal constitui um passo decisivo para a transição da síntese verde do ambiente laboratorial para aplicações industriais, biomédicas e ambientais.

2.3. *Artemisia absinthium* L (*A. absinthium*)

No contexto da síntese verde, a *A. absinthium*, conhecida popularmente como losna, apresenta elevado potencial para essa aplicação. Trata-se de uma espécie medicinal amplamente utilizada na fitoterapia tradicional e com cultivo comercial estabelecido em diversas regiões do mundo. Sua relevância fitoquímica está associada à presença de diferentes classes de metabólitos secundários, incluindo flavonoides, ácidos fenólicos, lactonas sesquiterpênicas e terpenoides, os quais podem atuar tanto como agentes redutores na conversão de Ag⁺ em Ag⁰ quanto como agentes estabilizantes na superfície das nanopartículas formadas (BORA; SHARMA, 2013; EMAMI *et al.*, 2012).

Além disso, *A. absinthium* apresenta propriedades biológicas amplamente descritas na literatura, como atividade antioxidante, antimicrobiana, anti-inflamatória e

antiparasitária, atribuídas justamente ao seu perfil fitoquímico diversificado (FIAMEGOS *et al.*, 2011; KARABEGOVIC *et al.*, 2011; ABAD *et al.*, 2012; SZOPA *et al.*, 2020).

Dessa forma, considerando seu perfil químico, disponibilidade comercial e relevância farmacológica, *A. absinthium* configura-se como uma candidata promissora para a síntese verde de AgNPs com potencial aplicação em áreas biomédicas e ambientais.

A *A. absinthium*, pertencente à família Asteraceae, é uma planta subarbustiva, de caule piloso, com pouco mais de 1 m de altura. Suas folhas são multifendidas de lóbulos finos, canescentes, de margem inteira, de 7 a 12 cm de comprimento, possui flores em capítulos subglobosos, amarelos, agrupados em panículas (LORENZI; MATOS, 2005) (Figura 3).

Figura 3 - Foto ilustrativa de *Artemisia absinthium* L.



Fonte: Jardim Etnobotânico (2026).

É uma espécie amplamente distribuída em regiões temperadas do Hemisfério Norte e encontra-se naturalizada em diversas regiões fora de sua área de origem. Essa ampla distribuição geográfica contribui para elevada variabilidade intraespecífica, refletida em diferenças morfológicas e químicas entre populações, incluindo variações quantitativas e qualitativas em metabólitos secundários (KOSAKOWSKA *et al.*, 2025).

Estudos fitoquímicos recentes demonstram que a espécie apresenta um perfil complexo, rico em lactonas sesquiterpênicas (como absintina e artabsina), flavonoides (quercetina, rutina, isorhamnetina), ácidos fenólicos (ácido clorogênico, salicílico e vanílico) e componentes voláteis do óleo essencial, incluindo populações com

elevados teores de davanona (SZOPA *et al.*, 2020) que confere a planta um sabor muito amargo. Análises metabolômicas mais aprofundadas identificaram, em partes aéreas da planta, 15 ácidos fenólicos, 26 flavonoides e 14 lactonas sesquiterpênicas, evidenciando a elevada diversidade de metabólitos secundários com potencial redox (TRIFAN *et al.*, 2022).

Como evidência experimental, Balciunaitiene *et al.* (2021) demonstraram que o extrato de *A. absinthium* foi capaz de promover a síntese de AgNPs predominantemente esféricas, com diâmetro médio aproximado de 46 nm, indicando eficiência na nucleação e controle do crescimento das partículas. Nesse estudo os autores utilizaram folhas da *A. absinthium* de origem báltica, mais precisamente da Lituânia cujo clima difere muito do clima da América do Sul, ou seja, essa planta apresenta um perfil fitoquímico diferente de um exemplar que cresce no Brasil.

Dessa forma, tornam-se necessários novos estudos direcionados à exploração do elevado potencial de *A. absinthium*, especialmente no que se refere à sua reconhecida atividade antimicrobiana e à possibilidade de obtenção de AgNPs funcionalizadas com perfis fitoquímicos distintos daqueles já descritos na literatura (ALI *et al.*, 2016; BALCIUNAITIENE *et al.*, 2021; EKER *et al.*, 2025; SHAHZADI *et al.*, 2025). A espécie tem sido associada a efeitos antimicrobianos contra bactérias Gram-positivas, Gram-negativas e fungos, conforme estudos que evidenciaram a atividade inibitória contra *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e *Candida albicans* (FIAMEGOS *et al.*, 2011; KARABEGOVIĆ *et al.*, 2011; SZOPA *et al.*, 2020; AHMAD *et al.*, 2021).

Considerando que os metabólitos secundários presentes no extrato podem permanecer adsorvidos à superfície das nanopartículas, variações na natureza e proporção desses compostos podem promover diferenças significativas nas interações dos nanomateriais com sistemas biológicos (RAI *et al.* 2009). Tal funcionalização natural pode induzir efeitos sinérgicos entre a liberação de íons Ag⁺ e a bioatividade intrínseca dos fitoconstituintes, potencialmente intensificando a atividade antimicrobiana e ampliando o espectro de ação contra microrganismos resistentes (EKER *et al.*, 2025; SHAHZADI *et al.*, 2025; SZOPA *et al.*, 2020).

2.4. Infecções bacterianas

As infecções bacterianas continuam entre os principais desafios da saúde pública global, especialmente diante do avanço da resistência aos antimicrobianos

(RAM). A World Health Organization classifica a RAM como uma das maiores ameaças à saúde mundial, destacando o impacto crescente de cepas multirresistentes em ambientes hospitalares e comunitários (WHO, 2023). Estimativas indicam que a resistência bacteriana esteve associada a milhões de mortes em 2019, reforçando a urgência por alternativas terapêuticas inovadoras (MURRAY *et al.*, 2022).

Bactérias Gram-positivas, como *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*), apresentam espessa camada de peptidoglicano, enquanto bactérias Gram-negativas, como *Escherichia coli* (*E. coli*), possuem membrana externa rica em lipopolissacarídeos que dificultam a penetração de antibióticos, contribuindo para maior resistência intrínseca (BREIJYEH *et al.*, 2020). Compostos bioativos presentes nos extratos vegetais, como flavonoides, ácidos fenólicos e lactonas, atuam na síntese verde das AgNPs, sendo os grupos hidroxila (-OH) dos flavonoides e ácidos fenólicos considerados os principais sítios ativos responsáveis pela redução química dos íons Ag^+ . Nesse contexto, as AgNPs destacam-se como alternativa promissora devido ao seu mecanismo de ação multimodal, que inclui desestabilização da membrana celular, liberação de íons Ag^+ , geração de espécies reativas de oxigênio (ROS) e interação com proteínas e DNA bacteriano (Figura 4). Essa multiplicidade de mecanismos reduz a probabilidade de desenvolvimento rápido de resistência (DAKAL *et al.*, 2016; LIAO *et al.*, 2019).

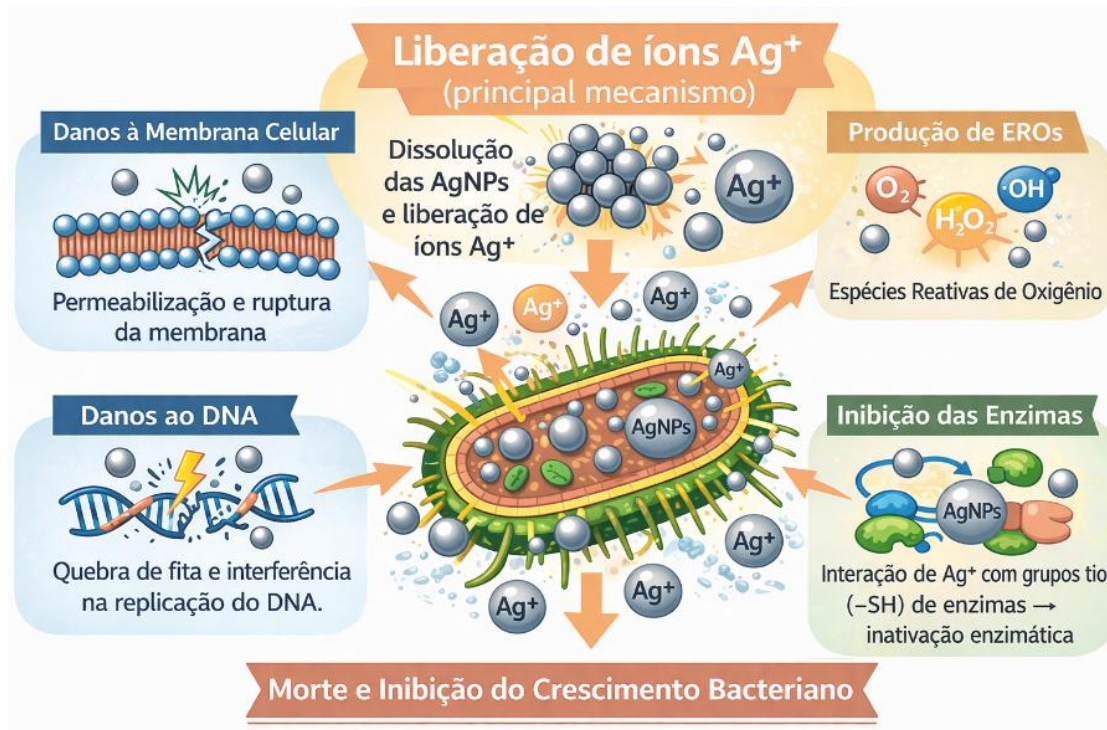
Além da eficácia antimicrobiana, o potencial de aplicação das AgNPs está intimamente relacionado às suas propriedades físico-químicas, especialmente ao tamanho de partícula. Nanopartículas menores apresentam maior área superficial específica, o que favorece maior interação com microrganismos e maior liberação de íons prata; entretanto, essa mesma característica pode aumentar sua citotoxicidade em células humanas, exigindo avaliação criteriosa de dose, via de administração e tempo de exposição (LIAO *et al.*, 2019; FERDOUS; NEMMAR, 2020).

No que se refere ao uso oral, estudos indicam que partículas muito pequenas (<10 nm) podem atravessar barreiras biológicas e se distribuir sistemicamente, acumulando-se em órgãos como fígado e baço, o que levanta preocupações toxicológicas e reforça a necessidade de controle rigoroso de tamanho e dose (FERDOUS; NEMMAR, 2020). Assim, embora exista potencial para aplicações orais controladas, essa via requer avaliações aprofundadas de biodistribuição e segurança.

Por outro lado, o uso tópico das AgNPs tem se mostrado particularmente promissor e já encontra aplicações consolidadas, especialmente em curativos para feridas e queimaduras, onde a ação antimicrobiana local reduz risco de infecção e favorece a cicatrização. Nesses casos, a exposição sistêmica é significativamente menor, aumentando a margem de segurança (KALANTARI *et al.*, 2020).

Além disso, as AgNPs têm sido amplamente incorporadas em tintas e revestimentos com propriedades antimicrobianas. Estudos demonstram que revestimentos contendo AgNPs podem inibir o crescimento bacteriano e reduzir significativamente a carga microbiana em superfícies hospitalares, contribuindo para o controle de infecções associadas à assistência à saúde (PALADINE *et al.*, 2025; KHALIFA *et al.*, 2025).

Figura 4 – Principais mecanismos de toxicidade das AgNPs em células bacterianas: (A) dano à parede/membrana celular, (B) liberação de íons Ag^+ , (C) geração de Espécies Reativas de Oxigênio (ROS) e (D) interação com DNA e proteínas citoplasmáticas.



Fonte: Elaborada pela autora com auxílio do ChatGPT (OpenAI, 2026)

Outro campo relevante é o uso como revestimento de materiais cirúrgicos e dispositivos médicos, como cateteres, próteses e instrumentos hospitalares. A modificação superficial com AgNPs reduz formação de biofilmes e colonização

bacteriana, fator crítico na prevenção de infecções associadas a dispositivos médicos e odontológicos (CHOI *et al.*, 2023).

Portanto, as AgNPs apresentam amplo espectro de aplicação antimicrobiana, com potencial terapêutico e preventivo em diferentes contextos clínicos e ambientais. Entretanto, sua eficácia está diretamente relacionada ao controle preciso de parâmetros como tamanho, morfologia e concentração, de modo a equilibrar atividade antimicrobiana e segurança biológica. Nesse cenário, a síntese verde surge como estratégia promissora para obtenção de AgNPs funcionalizadas, potencialmente mais biocompatíveis e adequadas a aplicações biomédicas.

2.5. Vantagens e desvantagens da síntese verde de nanopartículas metálicas

A síntese verde de nanopartículas metálicas tem se consolidado como uma abordagem promissora e estratégica dentro da nanotecnologia, especialmente por alinhar inovação tecnológica com princípios de sustentabilidade. Diferentemente das rotas químicas convencionais, que frequentemente utilizam agentes redutores e estabilizantes tóxicos, a via verde emprega extratos vegetais ou biomoléculas naturais capazes de atuar simultaneamente como agentes redutores e de “capping”, promovendo a formação e estabilização das nanopartículas em um único sistema reacional. Essa característica reduz etapas do processo, diminui o uso de substâncias perigosas e contribui para maior compatibilidade ambiental (DAKAL *et al.* 2016; IRAVANI, 2011)

Uma das principais vantagens dessa abordagem é a possibilidade de obtenção de nanopartículas funcionalizadas naturalmente por fitoconstituintes presentes no extrato vegetal. Esses compostos podem permanecer adsorvidos à superfície das nanopartículas, conferindo estabilidade coloidal e potencializando propriedades biológicas, como atividade antioxidante e antimicrobiana. Esse efeito sinérgico entre o metal e os metabólitos vegetais representa um diferencial importante, especialmente para aplicações biomédicas e farmacêuticas (AHMED *et al.*, 2016; DAKAL *et al.* 2016).

Além disso, a síntese verde geralmente ocorre sob condições reacionais brandas como temperatura ambiente, pressão atmosférica e meio aquoso, o que reduz o consumo energético e torna o processo economicamente atrativo (IRAVANI, 2011). A simplicidade operacional e o menor impacto ambiental fortalecem essa rota como alternativa viável para produção sustentável de nanomateriais.

Embora existam desafios relacionados à padronização e ao controle preciso das propriedades físico-químicas das nanopartículas, esses aspectos vêm sendo progressivamente superados com o avanço das técnicas de caracterização e com a otimização de parâmetros de síntese (DAKAL *et al.* 2016).

Quanto à escalabilidade, ainda que a transição da escala laboratorial para a industrial exija planejamento e padronização da matéria-prima vegetal, o uso de espécies com cultivo comercial e perfil fitoquímico conhecido representa uma estratégia eficaz para minimizar variações e garantir maior uniformidade do processo. Assim, os desafios identificados não invalidam a rota verde, mas indicam oportunidades de aprimoramento tecnológico.

Portanto, a síntese verde não deve ser vista apenas como alternativa ecológica, mas como uma plataforma multifuncional capaz de gerar nanopartículas com propriedades ajustáveis, maior biocompatibilidade potencial e aplicação ampliada em áreas como medicina, agricultura e meio ambiente. Dentro desse contexto, a escolha dessa via de redução se justifica não apenas por critérios ambientais, mas também por suas vantagens funcionais e estratégicas no desenvolvimento de nanomateriais inovadores.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi sintetizar nanopartículas de prata (AgNPs) por meio de rota biogênica mediada pelo extrato aquoso de *Artemisia absinthium* e caracterizar suas propriedades físico-químicas, visando sua aplicação como agente antimicrobiano.

3.2. Objetivos específicos

Caracterizar o perfil fitoquímico do extrato aquoso de *A. absinthium* e quantificar o teor de fenóis totais e a atividade antioxidante (DPPH).

Otimizar os parâmetros experimentais de síntese (temperatura, proporção metal:extrato e pH), avaliando a influência dessas variáveis no tamanho, estabilidade e morfologia das AgNPs.

Determinar a Concentração Inibitória Mínima (CIM) das AgNPs frente às bactérias *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Equipamentos e Reagentes

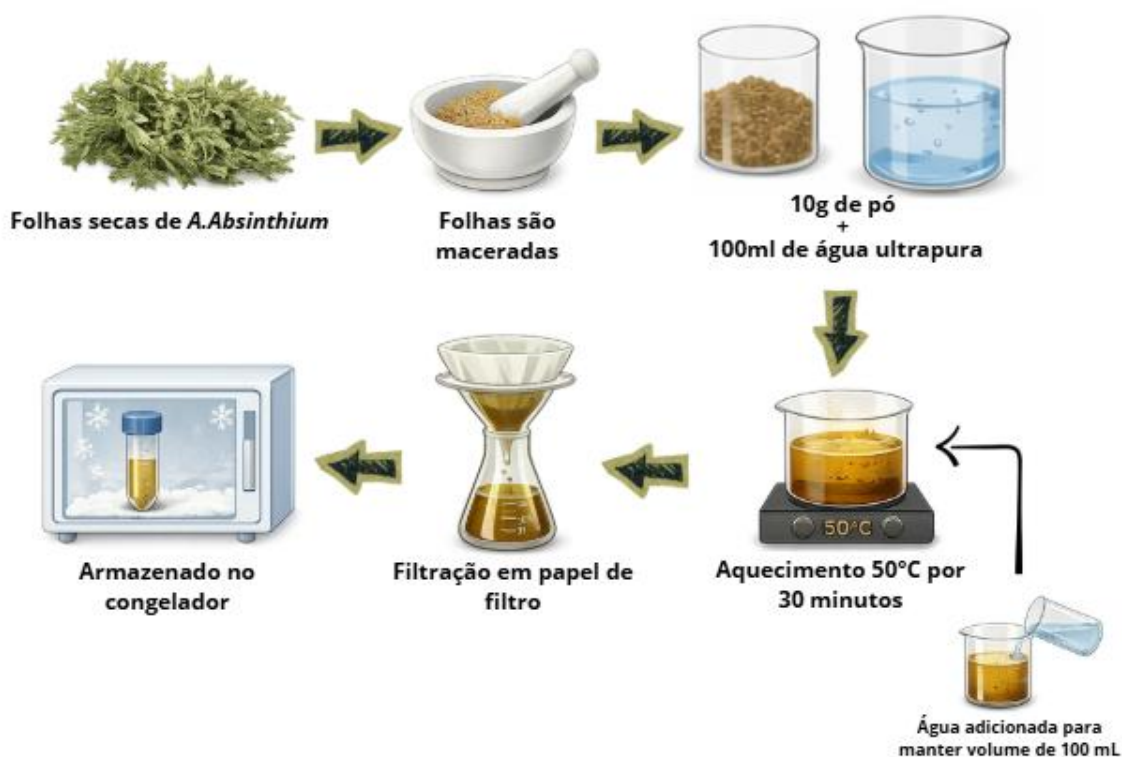
Todos os reagentes e solventes utilizados foram adquiridos de fontes comerciais (Sigma-Aldrich e Synth) e usados sem purificação adicional. Para filtração, utilizou-se papel de filtro Whatman N° 1. As reações foram monitoradas por espectrofotometria UV-Vis em Espectrofotômetro Shimadzu modelo UV-1800, utilizando cubeta 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 (Quimis; Q400AS) com eletrodo de vidro. As análises de Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS) para determinação do tamanho hidrodinâmico, utilizando cubeta de acrílico, e de Espalhamento Eletroforético de Luz (ELS) para determinação do potencial zeta foram realizadas em equipamento Zetasizer Advance Lab (Blue Label) modelo ZSU3100. As análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas em equipamento ZEISS EVO LS15. A Análise de Rastreamento de Nanopartículas (NTA) foi conduzida em equipamento Malvern Panalytical Nanosight Pro com laser de 405 nm, sem controle de temperatura. As análises por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foram realizadas em equipamento Nicolet; NEXUS 670. As nanopartículas foram lavadas por centrifugação em centrífuga DAIKI; Microcentrífuga DT10KD+. A remoção de solventes sob pressão reduzida foi realizada em Rotaevaporador BUCHI R-210 acoplado a uma bomba de vácuo (Brinkmann; B-169 Vacuum Aspirator). A água ultrapura utilizada em todos os experimentos foi obtida por sistema de purificação Merck Millipore; Milli-Q Direct-Q 3 UV.

4.2. Preparação do extrato aquoso de *A. absinthium*

As folhas de *A. absinthium* utilizadas neste estudo foram cultivadas em um cultivo comercial na cidade de Ituberá, no estado da Bahia, e comercializadas na forma seca pela empresa Bioflora. Para a obtenção do extrato, as folhas foram

maceradas até a obtenção de um pó, e 10 g desse material foram misturados a 100 mL de água ultrapura em um béquer. A mistura foi então submetida a aquecimento a 50 °C por um período de 30 minutos. Durante o processo, foi adicionada água ultrapura para manter o volume constante de 100 mL, evitando perdas por evaporação. Em seguida, o extrato foi filtrado em funil contendo papel de filtro. O filtrado foi coletado, transferido para um recipiente adequado com tampa e armazenado em congelador até o momento de uso.

Figura 5 - Fluxograma do processo de obtenção do extrato aquoso de *Artemisia absinthium*, incluindo maceração das folhas secas, preparo da suspensão aquosa (10 g/100 mL), aquecimento a 50 °C por 30 minutos, filtração e armazenamento sob congelamento.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

4.3. Caracterização fitoquímica do extrato

4.3.1. Análises qualitativas

A análise fitoquímica preliminar do extrato aquoso foi realizada por meio de ensaios qualitativos visando à identificação das principais classes de metabólitos secundários, empregando protocolos clássicos de triagem fitoquímica descritos na literatura especializada, conforme metodologias propostas por Harborne (1998), Matos (2009). Em algumas análises fitoquímicas foi utilizado o extrato aquoso previamente obtido e concentrado a vácuo e em outras a reação foi realizada a partir da planta pulverizada.

Todos os ensaios foram realizados em triplicata, à temperatura ambiente. Como controles, foram utilizadas amostras de água submetidas às mesmas condições experimentais e aos mesmos reagentes empregados nas amostras do extrato, bem como o extrato sem a adição dos reagentes. A intensidade das reações foi avaliada visualmente e classificada como ausente (-) ou presente (+).

4.3.1.1. Teste para alcaloides:

Uma alíquota do extrato concentrado foi acidificada com solução de ácido clorídrico a 1% (v/v) e, posteriormente, filtrada utilizando funil contendo algodão, sendo o filtrado empregado nos ensaios de identificação. No teste com o reagente de Dragendorff, a formação de precipitado alaranjado ou avermelhado é considerada indicativa da presença de alcaloides. No teste com o reagente de Mayer, a formação de precipitado branco ou creme indica resultado positivo para essa classe de metabólitos. Já o reagente de Wagner confirma a presença de alcaloides pela formação de precipitado marrom ou castanho-avermelhado.

4.3.1.2. Teste para antraquinonas

A identificação de antraquinonas foi realizada por meio do teste de Bornträger. Inicialmente, uma alíquota de 5 mL do extrato aquoso foi submetida à partição líquido-líquido com 5 mL de clorofórmio em funil de separação, promovendo a transferência de compostos apolares para a fase orgânica. A fase clorofórmica foi então coletada e transferida para um tubo de ensaio, ao qual foram adicionados 2 mL de solução de hidróxido de amônio a 10% (v/v), seguida de leve agitação. O aparecimento de coloração rosa, vermelha ou violácea na fase alcalina é considerado indicativo da presença de derivados antraquinônicos.

4.3.1.3. Teste para esteroides /triterpenoides:

A presença de esteroides e triterpenoides foi avaliada por meio do teste de Liebermann–Burchard. Inicialmente, uma alíquota de 5 mL do extrato aquoso foi submetida à extração líquido-líquido com 5 mL de clorofórmio em funil de separação, sendo a fase orgânica coletada e utilizada no ensaio. A uma alíquota de 2 mL da fase clorofórmica foram adicionados 1 mL de anidrido acético glacial e, posteriormente, 2 a 3 gotas de ácido sulfúrico concentrado pelas paredes do tubo de ensaio. O desenvolvimento de coloração verde-azulada é considerado indicativo da presença de esteroides, enquanto colorações vermelhas, rosada ou púrpura são associadas à presença de triterpenoides e coloração verde-claro ou amarela é considerado indicativo de terpenoides com mistura de esteroides e triterpenoides.

4.3.1.4 Teste para flavonoides:

A identificação de flavonoides foi realizada por meio do teste de Shinoda. A uma alíquota de 2 mL do extrato aquoso foram adicionados pequenos fragmentos de magnésio metálico (aproximadamente 10–20 mg), seguidos da adição de 3 a 5 gotas de ácido clorídrico concentrado. O desenvolvimento de coloração avermelhada, rosada ou alaranjada é considerado indicativo da presença de compostos flavonoides. Essa coloração ocorre devido à redução das estruturas carbonílicas presentes nos flavonoides pelo magnésio em meio ácido, resultando na formação de compostos coloridos característicos.

4.3.1.5. Teste para saponinas:

A presença de saponinas foi avaliada por meio do teste de formação de espuma. Uma alíquota do extrato aquoso foi vigorosamente agitada com água por aproximadamente 30 segundos e, em seguida, mantida em repouso por 15 minutos. A formação de espuma persistente e estável após esse período é considerada indicativa da presença de saponinas.

4.3.1.6. Teste para taninos:

A identificação de taninos foi realizada por meio da adição de 2–3 gotas de solução de cloreto férrico a 1% (m/v) a uma alíquota de 2 mL do extrato aquoso. O desenvolvimento de coloração azul-escura é considerado indicativo da presença de

taninos hidrolisáveis, enquanto coloração verde-escura é associada à presença de taninos condensados.

4.3.1.7. Teste para cumarinas:

A identificação de cumarinas foi realizada por meio de extração líquido-líquido utilizando hexano. Uma alíquota de 2 mL do extrato foi submetida à partição com 2 mL de hexano, sendo a fase orgânica separada e utilizada no ensaio. À fase hexânica foram adicionadas 2–3 gotas de solução de hidróxido de sódio a 10% (m/v). Em seguida, a amostra foi observada sob luz ultravioleta (365 nm). O aparecimento de fluorescência azulada ou azul-esverdeada foi considerado indicativo da presença de cumarinas.

4.4. Determinação de conteúdo fenólico

A determinação do conteúdo fenólico total foi realizada pelo método colorimétrico de Folin–Ciocalteu, com adaptações a partir do método clássico descrito por Singleton e Rossi (1965). Para a construção da curva analítica, foram preparadas soluções padrão de ácido gálico nas concentrações de 0,05; 0,1; 0,125; 0,15 e 0,2 mg/ mL. Foram utilizados no método reagente de Folin–Ciocalteu diluído na proporção 1:2 (v/v) e uma solução de carbonato de sódio a 35% (m/v). Em tubos de ensaio foram adicionados 1 mL do reagente de Folin e 1 mL das soluções padrão ou da amostra, seguidos pela adição de 2 mL da solução de carbonato de sódio e 2 mL de água destilada. O extrato aquoso de *A. absinthium* foi previamente diluído em água destilada (1:19, v/v; fator de diluição 20). As amostras permaneceram ao abrigo da luz por 30 min e foram analisadas em triplicata. A leitura da absorbância para traçar a curva de ácido gálico foi realizada a 765 nm e a absorbância das amostras do extrato foi lida em 700 nm.

O conteúdo fenólico total foi determinado por meio da equação da curva analítica obtida a partir do ácido gálico ($y = ax + b$), com resultados expressos em mg de equivalentes de ácido gálico por grama de amostra seca (mg EAG/g). Para o cálculo, a concentração obtida pela equação foi corrigida pelo fator de diluição e relacionada à massa de amostra utilizada na extração, conforme a Equação (1):

$$CFT = \frac{C \times FD \times V}{m} \quad (1)$$

Em que:

CFT = conteúdo fenólico total (mg EAG/g);

C = concentração média obtida pela curva analítica (mg/mL);

FD = fator de diluição;

V = volume total do extrato (mL);

m = massa da amostra seca utilizada na extração (g).

4.5. Avaliação da atividade antioxidante

A atividade antioxidante das amostras foi avaliada pelo método de sequestro do radical livre 2,2-difenil-1-picril-hidrazil (DPPH), conforme descrito por Brand-Williams, Cuvelier e Berset (1995), com adaptações. Inicialmente, foi preparada uma solução de DPPH na concentração de 0,1 mM em etanol 70% (v/v), a qual foi mantida ao abrigo da luz até o uso. As análises foram realizadas para o extrato de *A. absinthium* e para a quercetina, com o objetivo de comparar a capacidade antioxidante entre as amostras.

A solução estoque de quercetina foi preparada na concentração de 0,1 mg/mL (m/v) em etanol absoluto, enquanto o extrato de *A. absinthium* foi preparado na concentração de 1 mg/mL (m/v) em água ultrapura. A partir dessas soluções, volumes definidos dos extratos foram adicionados à água ultrapura, de modo a obter as concentrações finais desejadas ($\mu\text{g/mL}$), conforme descrito na Tabela 1. Em seguida, foram adicionados 2000 μL da solução de DPPH a cada sistema reacional. As misturas foram homogeneizadas e incubadas ao abrigo da luz por 30 min à temperatura ambiente.

O controle foi preparado com 2000 μL de água ultrapura e 2000 μL da solução de DPPH, sendo analisado em triplicata. O branco foi preparado utilizando as mesmas proporções de extrato e água empregadas nos sistemas reacionais, porém sem adição da solução de DPPH, com o objetivo de verificar possível interferência da absorbância própria do extrato no comprimento de onda de análise. Todas as determinações foram realizadas em triplicata.

Tabela 1 - Condições experimentais utilizadas no ensaio de atividade antioxidante pelo método do DPPH.

Quercetina	Extrato <i>A. absinthium</i>
------------	------------------------------

Conc. (µg/mL)	Vol. (µL)	Água (µL)	DPPH(µL)	Conc. (µg/mL)	Vol. (µL)	Água (µL)	DPPH(µL)
0,5	10	1990	2000	62,5	125	1875	2000
1,0	20	1980	2000	75,0	150	1850	2000
1,5	30	1970	2000	87,5	175	1825	2000
2,0	40	1960	2000	100,0	200	1800	2000
2,5	50	1950	2000	112,5	225	1775	2000
3,0	60	1940	2000	125,0	250	1750	2000

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

A atividade antioxidante foi expressa como porcentagem de inibição do radical DPPH, calculada conforme a Equação (2).

$$\%Inibição = \frac{A_c - (A_E - A_B)}{A_c} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

A_c = absorbância do controle;

A_E = absorbância do sistema contendo extrato;

A_B = absorbância do branco.

O valor de CI_{50} (concentração necessária para inibir 50% do radical DPPH) foi estimado por interpolação linear entre os dois pontos mais próximos da inibição de 50%, utilizando a Equação (3). A interpolação foi realizada considerando os dados corrigidos pelo branco. A curva de inibição foi construída no software OriginPro 2025 (OriginLab Corporation, EUA) para fins de visualização, mas o cálculo do IC_{50} foi feito pela interpolação linear.

$$CI_{50} = X_1 + \frac{(50 - Y_1) \times (X_2 - X_1)}{Y_2 - Y_1} \quad (3)$$

onde:

CI_{50} = concentração interpolada que corresponde a 50% de inibição;

X_1 = concentração abaixo de 50% de inibição;

X_2 = concentração acima de 50% de inibição;

4.6. Síntese verde de AgNPs

4.6.1. Metodologia geral

Uma solução de nitrato de prata (AgNO_3) 1 mM foi preparada pela solubilização de 0,0017 g do sal em 100 mL de água ultrapura. O extrato aquoso de *A. absinthium* e a solução de AgNO_3 foram misturados em diferentes proporções para a síntese das AgNPs. As reações foram conduzidas sob agitação magnética ou em cuba ultrassônica (frequência de 40 kHz), com aquecimento a 40 °C. As sínteses foram realizadas em frascos de vidro com capacidade de 10 mL, pela mistura do extrato vegetal com a solução de AgNO_3 . Cada reação foi preparada com volume final de 5 mL, variando-se a proporção entre os volumes do extrato e da solução de AgNO_3 , com o objetivo de avaliar a influência da concentração de compostos redutores presentes no extrato sobre a formação das nanopartículas. Testes preliminares utilizando as proporções extrato: AgNO_3 de 1:01, 1:02, 1:03, 1:04, 1:05, 1:06, 1:07, 1:08 e 1:09, conforme realizado por ALI *et al.* (2016), indicaram a formação de AgNPs por análise visual e espectrofotometria UV-Vis, apenas na proporção 1:09. Dessa forma, proporções contendo maior volume de nitrato de prata foram também preparadas (Tabela 2).

Tabela 2 - Proporções entre o extrato aquoso de *A. absinthium* e a solução de AgNO_3 1 mM utilizadas na síntese verde de AgNPs.

Extrato: AgNO_3	Extrato (μL)	AgNO_3 (μL)
1:09	500	4500
1:19	250	4750
1:39	125	4875
1:49	100	4900
1:99	50	4950

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

As sínteses das AgNPs foram acompanhadas por espectrofotometria UV-Vis sendo o monitoramento realizado retirando-se alíquotas de 3 mL da cuba ultrassônica a cada 30 minutos, sem diluição, transferindo-as diretamente para cubeta de quartzo, utilizada nas análises. As leituras foram efetuadas no intervalo de 200 a 700 nm, para a identificação da banda de plasmon característica das AgNPs entre 400 e 450 nm.

4.6.2. Síntese com controle de pH

O pH do extrato foi medido em pHmetro equipado com eletrodo de vidro, e em seguida, sob agitação magnética, uma solução de NaOH (0,1 mM) foi adicionada gota a gota, com monitoramento contínuo do pH, até atingir o valor de pH 8. Após atingir pH 8, o extrato foi imediatamente utilizado na síntese das nanopartículas, seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente para as amostras sem controle de pH. Para o controle de pH foram escolhidas as proporções 1:09 e 1:19 que após a síntese foram denominadas por 1:09pH e 1:19pH.

4.7. Caracterização das nanopartículas de prata

A caracterização das nanopartículas de prata foi realizada por meio das técnicas de Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS), Espalhamento de Luz Eletroforético (ELS) para determinação do potencial zeta, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios X (EDX) e Análise de Rastreamento de Nanopartículas (NTA).

4.7.1. Análise por DLS

Para as análises de DLS, as amostras obtidas após a síntese foram utilizadas sem diluição. Cada amostra foi cuidadosamente homogeneizada e transferida para cubetas específicas, sendo as leituras realizadas em equipamento de DLS acoplado a analisador de potencial zeta, sob temperatura controlada (25 °C). O software do equipamento fornece automaticamente os valores de diâmetro hidrodinâmico médio, índice de polidispersão (PDI) e potencial zeta, parâmetros utilizados para avaliar o tamanho médio, a distribuição e a estabilidade coloidal das nanopartículas.

4.7.2. Análise por MEV e EDX

Para a análise morfológica, as amostras foram previamente lavadas com água ultrapura por centrifugação. Sendo o processo de centrifugação consistido de uma centrifugação a 3000 rpm por 10 min, reservando-se o sobrenadante e descartando o precipitado. Em seguida, o sobrenadante foi novamente centrifugado a 10000 rpm por 15 min. O precipitado obtido foi ressuspenso em água ultrapura, homogeneizado e submetido a mais duas etapas de centrifugação nas mesmas condições, totalizando

três ciclos de lavagem. Após a última centrifugação, o precipitado foi ressuspenso em pequena quantidade de água ultrapura e uma gota da suspensão foi depositada sobre um substrato de silício. As amostras foram deixadas para secagem em dessecador por 24 h.

Após a secagem completa, os substratos foram fixados em *stubs* metálicos e recobertos com uma fina camada de ouro por *sputtering*. A análise foi realizada em microscópio eletrônico de varredura, sob vácuo e tensão de aceleração adequada para a observação da superfície. As micrografias permitem a avaliação da morfologia e distribuição das nanopartículas de prata sintetizadas.

A composição elementar das nanopartículas de prata foi analisada por espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDX), acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV). O preparo das amostras foi realizado conforme descrito para a análise por MEV.

A técnica de EDX baseia-se na detecção dos raios X característicos emitidos pelos elementos presentes na amostra quando submetida à incidência de um feixe de elétrons, permitindo a identificação qualitativa dos elementos químicos constituintes do material analisado. Os espectros obtidos foram utilizados para confirmar a presença de prata e identificar outros elementos presentes na superfície das nanopartículas.

4.7.3. Análise por NTA

Para a análise por rastreamento de nanopartículas (NTA), as amostras foram previamente diluídas em água ultrapura até obtenção de concentração adequada para o rastreamento individual das partículas, conforme recomendado para a técnica de NTA. Foram utilizados fatores de diluição de 50 para as amostras 1:09pH, 1:09pHc e 1:19pHc, e fator de diluição de 500 para a amostra 1:19pH, de modo a manter a concentração de partículas dentro da faixa ideal de detecção do equipamento. Após homogeneização 1 mL de cada amostra diluída foi transferido para a célula do equipamento para realização das medições.

As análises foram realizadas utilizando equipamento de análise de rastreamento de nanopartículas equipado com laser de 405 nm. Para cada amostra foram capturados cinco vídeos, com duração de 11,5 segundos cada, totalizando 750 frames por captura, a uma taxa de aquisição de aproximadamente 65 frames por

segundo. As análises foram conduzidas a temperatura média de 27 °C, utilizando vazão de 3 µL/min.

Os vídeos obtidos foram analisados pelo software do próprio equipamento (NTA 2.0), que realiza o rastreamento individual do movimento browniano das partículas, permitindo determinar o diâmetro hidrodinâmico equivalente, a distribuição de tamanho e a concentração de partículas por mL. Os valores de concentração reportados pelo software já se encontram corrigidos automaticamente considerando os fatores de diluição informados durante a análise.

4.8. Ensaios biológicos

A Concentração Inibitória Mínima (CIM) foi determinada pelo método de microdiluição em caldo, conforme as diretrizes do CLSI (2012). Para isso, foram utilizadas microplacas de 96 poços contendo caldo Mueller–Hinton (MH) e uma suspensão bacteriana ajustada para 10^5 UFC/mL. Foram utilizadas as cepas ATCC 25923 da *S. aureus* e ATCC 25922 da *E. coli*.

S. aureus 2592

A atividade antimicrobiana das AgNPs foi avaliada para as formulações 1:09pHc e 1:19pHc, previamente lavadas e centrifugadas, conforme descrito anteriormente. O extrato vegetal foi avaliado nas proporções 1:09 e 1:19, correspondentes às mesmas concentrações final do extrato utilizada nas formulações, porém com a substituição da solução de nitrato de prata por água.

As formulações de AgNPs foram avaliadas em três concentrações, a partir da adição de 50, 25 e 12,5 µL de soluções estoque. A concentração dessas soluções foi de 0,132 mg/mL para a formulação 1:09pHc e de 0,152 mg/mL para a formulação 1:19pHc. A concentração final para cada volume usado das soluções estoque foi determinada com base no volume final de cada poço (200 µL). O mesmo foi feito para a solução de nitrato de prata de concentração inicial 1 mM.

O controle de crescimento consistiu em caldo MH inoculado com a suspensão bacteriana e suplementado com DMSO em volume equivalente ao utilizado na maior concentração de extrato testada. O controle negativo consistiu em caldo MH isolado e caldo MH contendo DMSO no mesmo volume correspondente.

As microplacas foram incubadas a 37 °C por 24 horas. O crescimento bacteriano foi avaliado pela adição de brometo de tiazolil azul de tetrazólio (MTT) em concentração final de 1 mg/mL em cada poço, seguida de incubação por 2 horas a 37

°C. A CIM foi determinada por meio da medição da absorbância a 540 nm em leitor de micro-placas Biotek e pelo cálculo da viabilidade celular. Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Extrato aquoso das folhas da *A. absinthium*

5.1.1. Preparo do extrato

O extrato aquoso das folhas da *A. absinthium* foi obtido como uma solução homogênea com coloração marrom-escura intensa e aroma característico e marcante da planta após extração a quente com água ultrapura. O extrato recém-preparado apresentou estabilidade quando armazenado sob refrigeração a 4 °C, sem alterações perceptíveis na coloração, no odor ou formação de sedimentos ao longo do período de observação (Figura 5). Uma parcela do extrato foi seca sob pressão reduzida para determinar o rendimento do extrato bruto que foi de 0,024g/mL. Em termos de porcentagem em relação à massa seca das folhas o rendimento da extração foi de 24,3%. A escolha da água como solvente no preparo do extrato baseou-se na capacidade da água aquecida de extrair preferencialmente fitoconstituintes mais polares, especialmente aqueles com maior potencial redutor, como os compostos fenólicos. A estabilidade físico-química do extrato aquoso depende principalmente do pH, da concentração de compostos fenólicos e das condições de armazenamento, fatores que podem influenciar diretamente a eficiência do extrato no processo posterior de formação das AgNPs (KHALIL *et al.* 2021; DAKAL *et al.* 2016).

A extração foi realizada utilizando água a 50 °C, com o objetivo de minimizar possíveis processos de degradação térmica dos compostos presentes no extrato vegetal em maiores temperaturas. Essa estratégia visa preservar metabólitos secundários potencialmente envolvidos na síntese e de outras moléculas que possam atuar como agentes estabilizantes ou de capeamento das nanopartículas formadas. Compostos fenólicos, flavonoides, proteínas e polissacarídeos entre outros compostos presentes em extratos vegetais são frequentemente apontados como responsáveis tanto pela redução de íons metálicos quanto pela estabilização coloidal das nanopartículas (IRAVANI, 2011; AHMED *et al.*, 2016).

Em contraste, Ali *et al.* (2016) utilizaram uma metodologia distinta para a preparação do extrato aquoso de *A. absinthium*, na qual as folhas foram aquecidas em água a 100 °C por 5 minutos. Embora temperaturas mais elevadas possam aumentar a eficiência da extração de determinados compostos devido à maior ruptura de estruturas celulares e aumento da difusão de metabólitos, tais condições também podem promover a degradação, oxidação ou transformação estrutural de compostos termossensíveis. Essas alterações podem modificar significativamente o perfil químico do extrato vegetal, influenciando a disponibilidade de espécies redutoras e de moléculas capazes de atuar como agentes de estabilização (SULTANA *et al.*, 2009; DAI; MUMPER, 2010). Dessa forma, diferenças nas condições de extração, especialmente na temperatura empregada, podem resultar em variações importantes na composição química do extrato e, conseqüentemente, no processo de obtenção das nanopartículas bem como em suas características físico-químicas.

Em outro trabalho Balciunaitiene *et al.* (2021) utilizaram o extrato hidroetanólico das folhas da *A. absinthium* para a síntese de AgNPs, o qual foi preparado por maceração durante 24 h, sem aquecimento usando etanol 70%. O uso de etanol 70% pode alterar significativamente o perfil químico do extrato em comparação com extratos aquosos, uma vez que esse solvente favorece a extração de compostos com diferentes polaridades. Conseqüentemente, essa diferença no sistema de extração pode influenciar as propriedades redutoras do extrato vegetal. Outro fator relevante a ser considerado é que, nos trabalhos que utilizaram *A. absinthium* para a síntese verde de AgNPs, as plantas foram cultivadas em regiões geográficas distintas, sob condições climáticas diferentes. Apesar de não haver indicação do local de cultivo da planta é possível observar pelas afiliações dos autores que no trabalho de Ali *et al.* (2016) a planta é originária dos EUA enquanto a planta usada no trabalho de Balciunaitiene *et al.* (2021) foi comprada em farmácia pública em Kaunas, Lituânia. Essas variações ambientais podem influenciar diretamente o perfil fitoquímico das plantas, resultando em diferenças na composição dos metabólitos secundários quando comparadas à planta utilizada no presente estudo, que foi cultivada no estado da Bahia.

5.1.2. Triagem fitoquímica do extrato

A triagem fitoquímica do extrato aquoso de *A. absinthium* incluiu a avaliação de diversas classes de metabólitos secundários. No entanto, foram detectadas apenas

algumas dessas classes no extrato analisado, incluindo flavonoides, taninos, terpenoides e saponinas (Tabela 3).

Tabela 3 - Resultados da triagem fitoquímica qualitativa do extrato aquoso de *Artemisia absinthium*.

Fitoquímico	Reagente	Indicação positiva	Resultado
Flavonoide	Shinoda (Mg metálico + HCl)	Coloração avermelhada, rosada ou alaranjada	+
Alcaloide	Dragendorff, Mayer, Wagner	Formação de precipitado: alaranjado branco/creme/ marrom	-
Terpenoide	Liebermann–Burchard	Coloração verde-clara ou amarela	+
Saponina	Formação de Espuma	Espuma persistente	+
Tanino	Cloreto férrico 1%	Coloração azul-escura ou verde-escura	+
Antraquinona	Bornträger	Coloração rosa, vermelha ou violácea	inconclusivo
Cumarina	NaOH a 10% (m/v)	Fluorescência azulada ou verde intensa	-

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

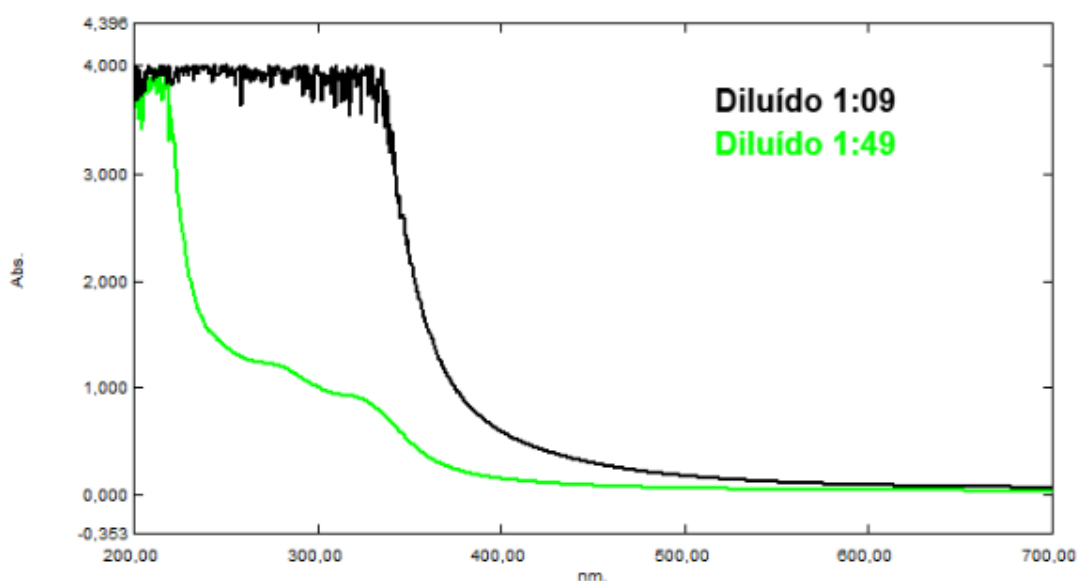
As classes de compostos identificadas são amplamente relatadas em extratos vegetais e exercem tanto funções biológicas quanto papel relevante na síntese verde de nanopartículas metálicas, atuando nos processos de redução e estabilização (Tabela 3) (MITTAL *et al.*, 2013; AHMED *et al.*, 2016; MARSLIN *et al.*, 2018). De modo geral, compostos fenólicos, como flavonoides e taninos, e terpenoides oxigenados destacam-se como os principais responsáveis pela redução dos íons metálicos, enquanto outros fitoconstituintes, como as saponinas, contribuem predominantemente para a estabilização coloidal devido ao seu efeito surfactante.

Embora a triagem fitoquímica tenha indicado a presença de terpenoides, apenas aqueles com grupos funcionais oxigenados, como hidroxilas e carbonilas, participam de forma mais efetiva nos processos redox, devido à maior capacidade de interação com íons metálicos. Em contrapartida, terpenos não oxigenados apresentam baixa polaridade e limitada capacidade de transferência de elétrons, o que reduz sua participação direta na redução de íons metálicos em meio aquoso (IRAVANI, 2011; MASHWANI *et al.*, 2016).

A análise espectroscópica do extrato por UV–Vis também forneceu evidências adicionais da presença de compostos fenólicos (Figura 6). Para essa análise o extrato puro foi diluído em água na proporção 1:09 e na proporção 1:49 com a finalidade de

mostrar características do extrato em maior e menor concentração. Na menor concentração foi possível observar bandas geralmente associadas a sistemas aromáticos conjugados presentes em compostos fenólicos e flavonoides. Em particular, flavonoides apresentam duas regiões típicas de absorção: a banda II, entre aproximadamente 240–280 nm, associada ao sistema benzoico do anel A, e a banda I, entre 300–380 nm, relacionada ao sistema cinamoico do anel B. Essas bandas espectrais são atribuídas às transições eletrônicas $\pi \rightarrow \pi^*$ e $n \rightarrow \pi^*$ de sistemas aromáticos conjugados, sendo frequentemente observadas em extratos vegetais ricos em compostos fenólicos (DAI; MUMPER, 2010; IGNAT *et al.*, 2011).

Figura 6 - Espectro de UV-vis do extrato aquoso da *A. absinthium*.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Nesse contexto, a determinação do conteúdo de compostos fenólicos totais e a avaliação da atividade antioxidante do extrato tornam-se relevantes, pois fornecem indicativos adicionais da capacidade redutora do sistema, a qual pode estar diretamente relacionada à formação das AgNPs. Dessa forma, a quantificação desses compostos, associada à avaliação da atividade antioxidante, pode ser utilizada como um indicativo indireto da capacidade redutora de extratos vegetais. Essa abordagem é particularmente relevante quando se comparam diferentes cultivares de uma mesma espécie vegetal, uma vez que fatores genéticos, condições ambientais e práticas de cultivo podem influenciar significativamente a produção de metabólitos secundários e,

consequentemente, em seu potencial redutor (DAI; MUMPER, 2010; IGNAT *et al.*, 2011; PANDEY *et al.*, 2020).

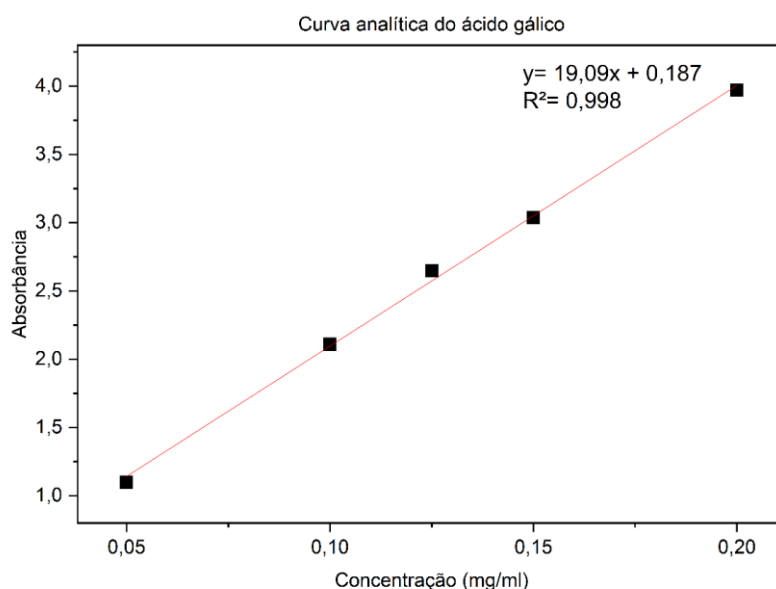
Ali *et al.* (2016) que também utilizaram extrato da *A. absinthium* para a síntese de AgNPs não realizaram a prospecção fitoquímica, determinação de conteúdo fenólico ou atividade antioxidante do extrato utilizado. Entretanto, inúmeros trabalhos sobre propriedades biológicas dos extratos de *A. Absinthium* relatam a composição fitoquímica de seus extratos como no trabalho de Liu *et al.* (2023) que identificaram por HPLC-MS mais de 90 compostos no extrato da planta com destaque para os flavonoides e derivados de ácidos químicos.

Outro estudo realizado por Bora e Sharma (2011), sobre a composição fitoquímica do gênero *Artemisia* é consistente com a prospecção fitoquímica realizada em nosso estudo, identificando as mesmas classes de fitoconstituintes. Entretanto, por se tratar de uma análise qualitativa, não é possível comparar as proporções relativas dos constituintes entre extratos obtidos por metodologias distintas e a partir de plantas provenientes de diferentes origens.

5.1.3. Determinação do conteúdo fenólico

A curva analítica construída com ácido gálico apresentou excelente linearidade na faixa de concentração avaliada, conforme apresentado na Figura 7. A equação obtida foi $y = 19,09x + 0,187$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,998$.

Figura 7 - Curva analítica do ácido gálico utilizada para determinação do conteúdo fenólico total.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

As absorbâncias obtidas para o extrato da *A. absinthium* foram convertidas em concentração por meio da equação da curva analítica, e os valores das triplicatas 1, 2 e 3 encontram-se apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de absorbância e concentração obtidos para o extrato de *A. absinthium*.

Extrato amostra	Absorbância	Concentração (mg/mL)
1	1,862	0,08774
2	1,862	0,08774
3	1,875	0,08842

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

O conteúdo fenólico total determinado para o extrato foi de $17,59 \pm 0,08$ mg EAG/g, indicando presença relevante de compostos fenólicos que atuam como agentes redutores e na estabilização das partículas formadas, contribuindo para o controle do crescimento e da dispersão coloidal.

Valores superiores foram reportados por Hbika *et al.* (2022), que observaram $31,534 \pm 0,408$ mg EAG/g para extrato aquoso da mesma espécie. Lee *et al.* (2013) relataram 134,47 mg/100 g de matéria seca para extrato aquoso de folhas de *A. absinthium*, o que corresponde a aproximadamente 1,34 mg/g, valor inferior ao obtido neste trabalho.

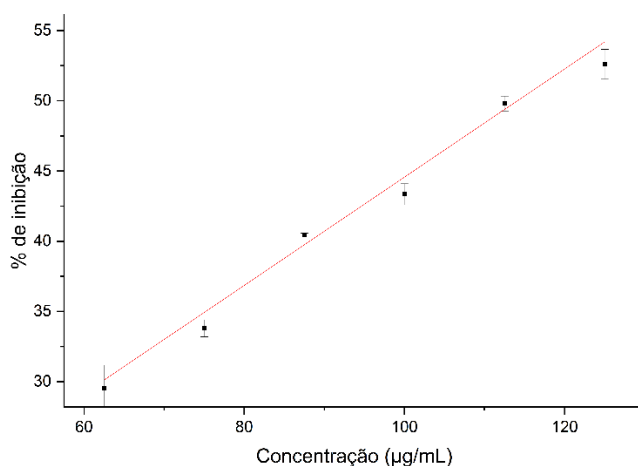
Em comparação com o presente estudo, Balciunaitiene *et al.* (2021) relataram teor fenólico total de $10,88 \pm 0,62$ mg EAG/g para o extrato de *A. absinthium*, valor inferior ao obtido neste trabalho ($17,59 \pm 0,08$ mg EAG/g). Essa comparação deve ser interpretada com cautela, uma vez que os autores utilizaram extração com etanol 70% (v/v), enquanto neste estudo foi empregado extrato aquoso. Em geral, extratos hidroetanólicos favorecem a extração de compostos de polaridade intermediária; entretanto, isso não implica necessariamente maior ou menor teor de fenólicos totais, pois a composição do extrato depende também de outros fatores. No caso do extrato de *A. absinthium* utilizado neste estudo, o maior valor observado pode estar relacionado à eficiência do sistema aquoso na extração de compostos fenólicos com potencial redutor.

5.1.4. Determinação da atividade antioxidante (DPPH)

A atividade antioxidante do extrato de *A. absinthium* e da quercetina foi avaliada pelo método de sequestro do radical DPPH. Os resultados foram expressos como porcentagem de inibição em função da concentração, expressos como média $\pm$ desvio padrão ($n = 3$). A partir das curvas de inibição, os valores de CI_{50} foram determinados por interpolação linear.

O extrato apresentou aumento gradual da porcentagem de inibição com o incremento da concentração, com valores variando de aproximadamente 29 a 53%, conforme apresentado na Figura 8. O CI_{50} foi estimado por interpolação linear, resultando no valor de $113,39 \pm 0,58$ μ g/mL.

Figura 8 - Curva de inibição do radical DPPH pelo extrato de *A. absinthium*. Os valores representam média $\pm$ desvio padrão ($n = 3$).

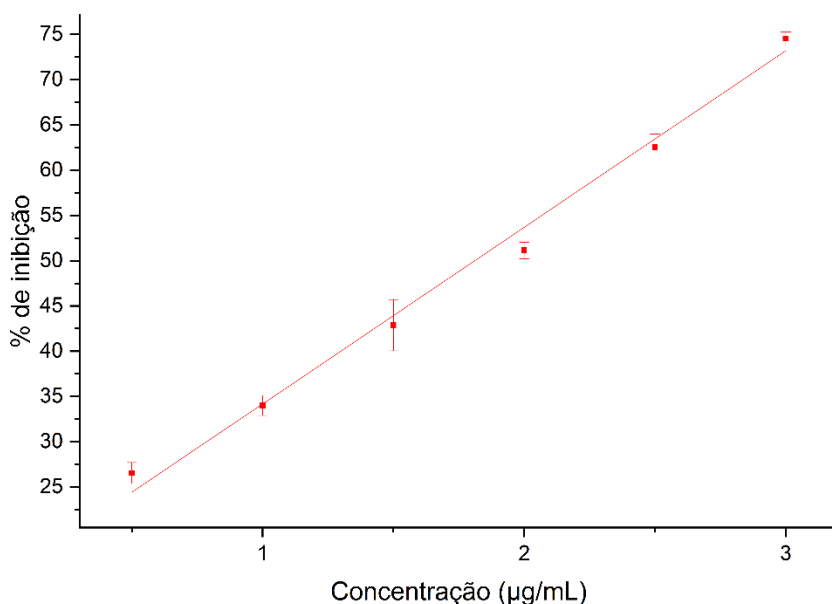


Fonte: Elaborada pela autora (2026)

A quercetina apresentou atividade antioxidante dependente da concentração, com valores de inibição variando de aproximadamente 26 a 74%, conforme apresentado na Figura 9. O CI_{50} foi determinado por interpolação linear resultando no valor de $1,93 \mu\text{g/mL} \pm 0,90$, que se encontra de acordo com valores descritos na literatura que variam de 1,3 a $2,0 \mu\text{g/mL}$ (TIAN *et al.*, 2021; KARAMI *et al.*, 2023).

A quercetina é um flavonoide caracterizada pela presença de grupos hidroxila fenólicos e sistema conjugado que favorece a estabilização do radical formado após a doação de hidrogênio (HASSANPOUR; DOROUDI, 2023) sua estrutura determina sua conhecida atividade antioxidante e por isso foi usada como parâmetro de composto antioxidante nesse estudo. Considerando que o CI_{50} corresponde à concentração necessária para reduzir em 50% o radical DPPH, valores menores indicam maior atividade antioxidante (BRAND-WILLIAMS; CUVELIER; BERSSET, 1995). Nesse contexto, o menor CI_{50} observado para a quercetina, composto puro, confirma sua maior atividade antioxidante em comparação ao extrato da *A. absinthium* que é uma mistura de muitos compostos.

Figura 9 - Curva de inibição do radical DPPH pela quercetina. Os valores representam média $\pm$ desvio padrão ($n = 3$).



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

De acordo com classificações propostas na literatura, valores de CI_{50} entre 101 e 150 $\mu\text{g/mL}$ são geralmente considerados indicativos de atividade antioxidante moderada, enquanto valores inferiores entre 100 e 50 $\mu\text{g/mL}$ indicam atividade forte e valores inferiores a 50 $\mu\text{g/mL}$ indicam atividade muito forte (MUSA *et al.* 2025). Dessa forma, de acordo com o CI_{50} de $113,39 \pm 0,53 \mu\text{g/mL}$ o extrato avaliado apresentou atividade antioxidante moderada usando DPPH, o que é consistente com o perfil antioxidante frequentemente observado em extratos vegetais brutos. O valor de CI_{50} obtido é consistente com o reportado por Karami *et al.* (2023), que utilizando o mesmo método para avaliar a atividade antioxidante do extrato aquoso da *A. absinthium* obtiveram um CI_{50} de $115,0 \pm 30,6 \mu\text{g/mL}$.

A atividade antioxidante observada para o extrato aquoso da *A. absinthium* reforça seu potencial como agente redutor na síntese verde de AgNPs. O valor de CI_{50} pode ser considerado como um marcador para exemplares de *A. absinthium* cultivadas sobre diferentes condições ambientais para aplicação na síntese de nanopartículas metálicas assim como o conteúdo fenólico (VANLALVENI *et al.*, 2021; FAHIM *et al.*, 2024).

5.2. Síntese verde e caracterização das AgNPs

A síntese das AgNPs foi realizada utilizando o extrato aquoso de *A. absinthium* como agente redutor e estabilizante natural. Inicialmente, foram realizados pré-testes

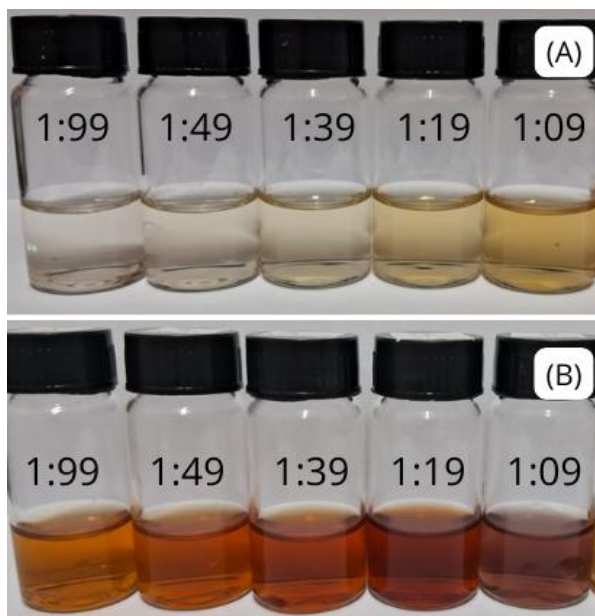
utilizando agitação magnética à temperatura ambiente para a síntese partindo-se das proporções 1:01; 1:02; 1:03; 1:04; 1:05; 1:06; 1:07; 1:08, 1:09. Entretanto, foi constatada a formação das AgNPs após 12 horas de reação somente na proporção 1:09 à temperatura ambiente pela mudança gradual na coloração da solução de amarelo-claro, para marrom. Essa alteração de cor está associada à ressonância de plasmons de superfície localizada (Localized Surface Plasmon Resonance – LSPR), fenômeno óptico característico resultante da oscilação coletiva dos elétrons na superfície das nanopartículas metálicas quando excitadas pela radiação luminosa, sendo considerado um indicativo da formação e dispersão coloidal das AgNPs (IRAVANI, 2011; KELLY *et al.*, 2003). Essa formulação foi submetida a análise por espectrofotometria na região do ultravioleta-visível (UV-Vis) e foi constatada uma banda larga no intervalo de 420 a 440 nm. Devido à essa baixa velocidade de formação das AgNPs a via de síntese por agitação magnética foi descartada. Assim, as sínteses subsequentes foram conduzidas exclusivamente em cuba ultrassônica com aquecimento controlado, mantido a 40°C, visando favorecer a dispersão, a homogeneidade e a aceleração da reação de formação das nanopartículas.

Nas formulações iniciais foi constatado que a proporção de extrato se mostrou excessiva e não favoreceu a formação das AgNPs, desta forma novas proporções foram realizadas onde a quantidade de AgNO₃ foi aumentada conforme descrito na tabela 2 no procedimento experimental. Nessas novas proporções (1:09; 1:19; 1:39; 1:49; 1:99) foi possível observar a mudança de coloração e a formação das AgNPs a partir de 30 min de reação em cuba ultrassônica a 40°C. A solução de AgNO₃ foi mantida na concentração de 1 mM, variando apenas o volume utilizado nas sínteses para aumentar a quantidade do precursor metálico. Além disso, a manutenção dessa concentração está de acordo com a maior parte da literatura sobre síntese verde de nanopartículas de prata, na qual soluções de AgNO₃ em torno de 1 mM são amplamente empregadas, favorecendo a formação de nanopartículas com melhor controle de tamanho e estabilidade (IRAVANI, 2011; AHMED *et al.*, 2016).

A Figura 10 mostra a coloração das soluções no início e após 150 min de reação nas diferentes proporções entre extrato e nitrato de prata. As reações foram monitoradas por análises de UV-Vis a cada 30 min. A figura 11 apresenta os espectros de absorção das AgNPs onde é possível observar o crescimento da banda de plasmon 420-440 nm ao longo do tempo de síntese. O tempo máximo considerado mais adequado para a síntese foi de 150 min, pois com 180 min de reação a solução

começa a escurecer e formar um precipitado cinza grudado no frasco devido à formação de prata metálica agregada ou partículas muito grandes (IRAVANI, 2011).

Figura 10 - Foto das diferentes proporções entre extrato e nitrato de prata no início da síntese (A) e após 150 min (B).

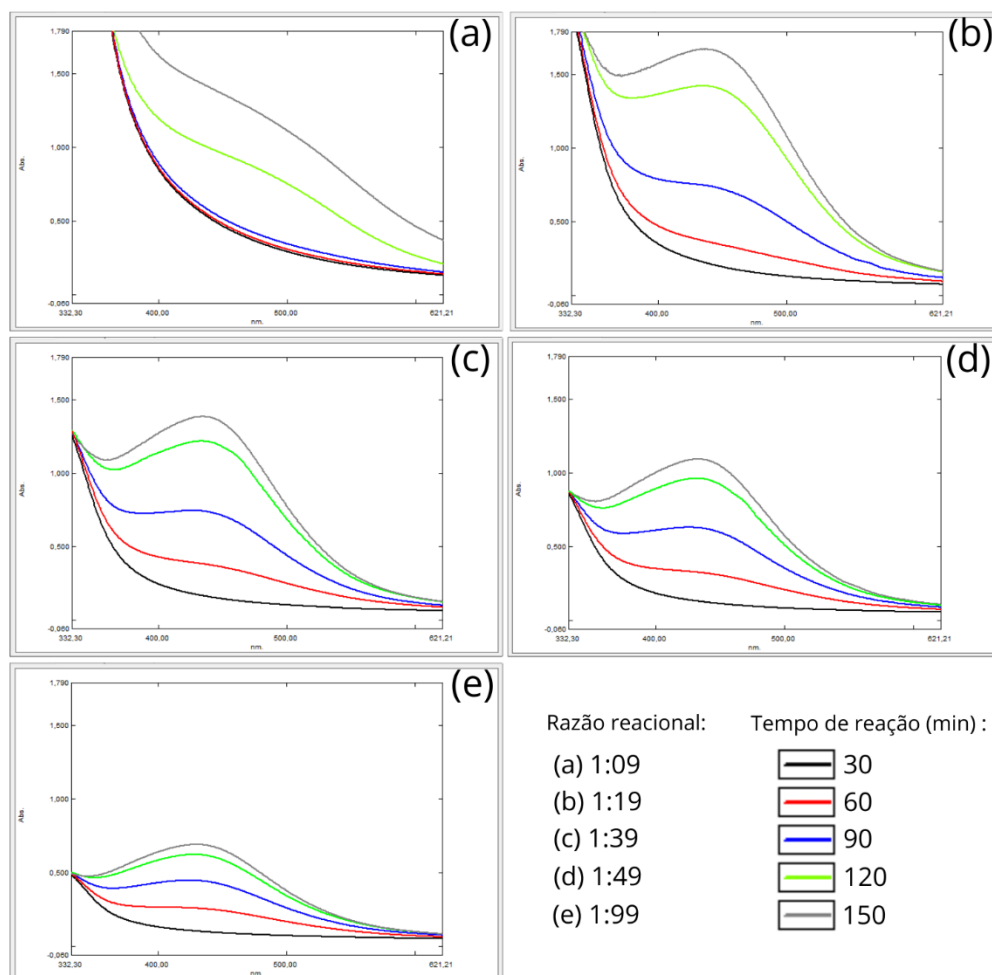


Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Em todas as formulações avaliadas, a banda de absorção das AgNPs foi detectada no intervalo de 420 a 440 nm, valor compatível com o reportado na literatura para morfologia predominantemente esférica (EVANOFF; CHUMANOV, 2005; SHARMA *et al.*, 2009).

Na formulação onde a proporção foi 1:09 a banda de plasmon das AgNPs aparece um pouco mais deslocada do que nas demais formulações, mas isso pode ser devido à maior quantidade de extrato, onde as bandas dos componentes do extrato estão abaixo da banda de plasmon fazendo com esta seja deslocada (Figura 6).

Figura 11 - Espectros de absorção no UV-Vis durante a síntese de AgNPs em função do tempo de síntese para as diferentes formulações.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

As análises de UV-Vis fornecem apenas informações indiretas sobre a formação das nanopartículas, sendo útil principalmente para monitorar a presença e o desenvolvimento da banda de plasmon característica das AgNPs. Dessa forma, essa técnica não permite determinar de forma precisa a morfologia, o tamanho ou a estabilidade coloidal das nanopartículas. Para a obtenção dessas informações outras análises foram realizadas com as formulações a fim de determinar parâmetros de morfologia e estabilidade das AgNPs produzidas e identificar possíveis ações para otimização do processo de síntese.

As formulações foram submetidas a análises de DLS e potencial zeta a fim de determinar o tamanho médio hidrodinâmico das partículas e avaliar a estabilidade coloidal das suspensões obtidas. As análises de espalhamento dinâmico de luz (DLS) indicaram tamanhos hidrodinâmicos variando entre 173,4 e 227,5 nm, enquanto o índice de polidispersão (PDI) apresentou valores entre 0,28 e 0,39, indicando distribuição de tamanho moderadamente ampla (Tabela 5).

Tabela 5 - Resultados de tamanho, índice de Polidispersão e Potencial zeta das formulações analisadas

Formulação	Tamanho (nm)	PDI	Zeta (mV)
1:09	175,70 ± 13	0,3698 ± 0,02	-28,66 ± 0,58
1:19	186,9 ± 5,06	0,31 ± 0,06	-27,94 ± 0,38
1:39	184,1 ± 6,70	0,3555 ± 0,01	-26,84 ± 3,07
1:49	173,4 ± 3,21	0,2864 ± 0,05	-27,36 ± 0,77
1:99	227,5 ± 76,93	0,3912 ± 0,09	-25,35 ± 0,31

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Esse comportamento é comumente relatado para nanopartículas obtidas por síntese verde, em função da diversidade de biomoléculas presentes nos extratos vegetais, as quais participam simultaneamente dos processos de redução e estabilização das partículas. Os valores de potencial zeta variaram entre -25 e -28 mV, indicando estabilidade coloidal moderada, uma vez que valores inferiores a -20 mV já são considerados suficientes para promover repulsão eletrostática e minimizar a agregação entre partículas (BHATTACHARJEE, 2016).

Essa estabilidade pode ser atribuída à adsorção de compostos fitoquímicos na superfície das nanopartículas, atuando como agentes de recobrimento (“capping”) e favorecendo a manutenção da dispersão coloidal (IRAVANI, 2011).

A formulação 1:09 apresentou tamanho médio de 175,70 ± 13 nm, PDI de 0,3698 ± 0,02 e potencial zeta de -28,66 ± 0,58 mV. O valor de PDI próximo de 0,37 sugere uma distribuição de tamanho moderadamente ampla. Por outro lado, o potencial zeta mais negativo entre as formulações analisadas indica boa estabilidade coloidal. As superfícies carregadas negativamente das AgNPs podem ser atribuídas à sua combinação com compostos fenólicos, polissacarídeos carboxilados e a cadeia lateral de alguns resíduos de aminoácidos (FLIEGER *et al.*, 2021; GOKTURK-BAYDAR *et al.*, 2025).

Na formulação 1:19, observou-se tamanho médio de 186,9 ± 5,06 nm, com PDI de 0,31 ± 0,06 e potencial zeta de -27,94 ± 0,38 mV. O aumento discreto do tamanho em relação à formulação anterior pode estar associado à maior disponibilidade de íons prata no sistema, favorecendo o crescimento das partículas após a nucleação inicial. Entretanto, o PDI ligeiramente menor indica uma distribuição de tamanho um pouco

mais homogênea. O potencial zeta permaneceu próximo de -28 mV, sugerindo estabilidade coloidal semelhante à formulação 1:09, com repulsão eletrostática suficiente para minimizar processos de agregação.

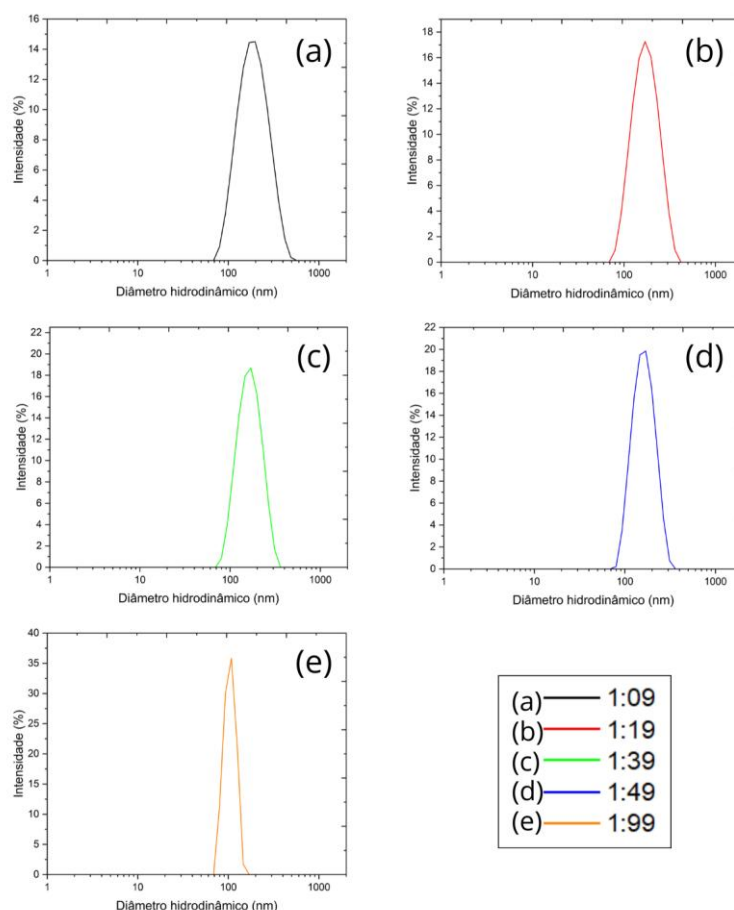
A terceira formulação 1:39 apresentou tamanho médio de $184,1 \pm 6,70$ nm, PDI de $0,3555 \pm 0,01$ e potencial zeta de $-26,84 \pm 3,07$ mV. O tamanho hidrodinâmico manteve-se próximo ao observado nas formulações anteriores, indicando que o aumento da proporção de nitrato de prata não promoveu alterações expressivas no diâmetro médio das partículas. Entretanto, o PDI mais elevado em comparação à formulação 1:19 sugere maior heterogeneidade de tamanho, possivelmente decorrente da formação simultânea de núcleos com diferentes taxas de crescimento durante o processo de síntese. O potencial zeta permaneceu dentro da faixa considerada de estabilidade coloidal moderada, embora ligeiramente menos negativo.

Para a formulação 1:49 os resultados mostraram tamanho médio de $173,4 \pm 3,21$ nm e PDI de $0,2864 \pm 0,05$, indicando uma distribuição de tamanho relativamente homogênea e potencial zeta de $-27,36 \pm 0,77$ mV. A comparação entre essa formulação e as demais formulações com menor quantidade de extrato não apresentam diferenças estatísticas significativas nos parâmetros avaliados de acordo com os desvios observados para cada parâmetro, com exceção do PDI.

A última formulação na proporção 1:99 apresentou maior tamanho médio ($227,5 \pm 76,93$ nm) e o maior PDI ($0,3912 \pm 0,09$) entre as amostras analisadas. Além disso, o elevado desvio padrão indica significativa variabilidade na distribuição de tamanhos, sugerindo maior heterogeneidade do sistema coloidal. Esse comportamento pode estar relacionado ao excesso relativo de íons prata em relação às moléculas redutoras e estabilizantes do extrato vegetal, o que pode favorecer processos de crescimento descontrolado das partículas ou mesmo agregação parcial. O potencial zeta foi o menos negativo entre as formulações ($-25,35 \pm 0,31$ mV), indicando estabilidade coloidal ainda moderada, porém inferior às demais amostras.

Em síntese verde, existe normalmente uma faixa ótima da proporção extrato:metal onde há redutores suficientes e há moléculas de capping suficientes (EKER *et al*, 2025). Essa faixa costuma ocorrer nas menores proporções de AgNO_3 . Apesar da formulação 1:49 ter apresentado menor índice de polidispersão, as formulações 1:09 e 1:19 foram selecionadas para dar continuidade ao estudo. Pois apresentaram os outros parâmetros com valores semelhantes à formulação 1:49, mas com menores proporções relativas do precursor metálico.

Figura 12- Distribuição de tamanho hidrodinâmico por intensidade (DLS) das nanopartículas de prata obtidas por síntese verde em diferentes proporções metal:extrato.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Todas as formulações obtidas apesar de apresentarem nanopartículas relativamente estáveis os tamanhos estão acima de 100 nm o que para aplicações biológicas pode não ser o tamanho mais adequado (BEHZADI *et al.*, 2017). Desta forma, a síntese foi novamente realizada, porém agora com controle de pH para as proporções metal:extrato de 1:09 e 1:19, com o pH do extrato sendo alterado para 8.

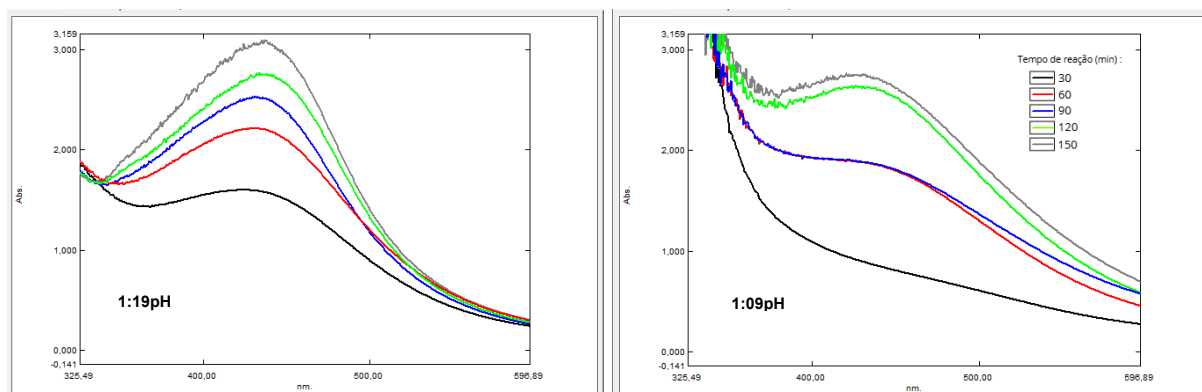
Apesar de muitos trabalhos realizarem as sínteses sem elevar o pH, esse parâmetro exerce papel importante na síntese verde, pois meio alcalino, a desprotonação de grupos funcionais presentes nos metabólitos do extrato vegetal, como as hidroxilas de compostos fenólicos, intensifica a capacidade de doação de elétrons, promovem uma conversão mais rápida de Ag^+ em prata metálica (Ag^0). Como consequência, há redução no tempo de formação das nanopartículas,

acompanhada por maior taxa de nucleação e, frequentemente, pela obtenção de partículas menores e mais uniformes. Em contraste, em condições ácidas, a predominância de grupos protonados diminui o poder redutor do extrato, resultando em uma reação mais lenta e, por vezes, incompleta. Entretanto, valores muito elevados de pH podem prejudicar a estabilidade coloidal, favorecendo a agregação e a formação de precipitados (IRAVANI, 2011; AHMED *et al.*, 2016; DAKAL *et al.* 2016).

As formulações com correção de pH foram renomeadas para 1:09pH e 1:19pH sendo as sínteses monitoradas por análises de UV-vis em intervalos de 30 minutos, observando a evolução da banda de plasmon entre 420-450 nm. A amostra 1:19pH apresentou formação de banda de plasmon intensa e bem definida já nos primeiros 30 minutos de reação (Figura 13) (POCHAPSKI *et al.* 2021).

Na formulação 1:09pH (Figura 13), foi possível observar também a formação da banda de plasmon entre 420 e 450 nm, sendo a banda perceptível nos primeiros 30 minutos de reação, embora com menor intensidade e maior largura em relação à a formulação 1:19pH.

Figura 13 - Espectros de absorção no UV-Vis durante a síntese de AgNPs para a formulação 1:19pH e 1:09pH em função do tempo de síntese.



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Essas duas novas formulações, 1:09pH e 1:19pH, foram também submetidas a análises de DLS e os resultados comparados aos das formulações 1:09 e 1:19 onde o pH não foi alterado (Tabela 6).

Tabela 6- Resultados de tamanho, índice de Polidispersão e Potencial Zeta das formulações 1:09, 1:19, 1:09pH e 1:19pH.

Formulações	Tamanho (nm)	PDI	Potencial Zeta (mV)
-------------	--------------	-----	---------------------

1:09	175,70 ± 13	0,3698 ± 0,02	-28,66 ± 0,58
1:19	186,9 ± 5,06	0,31 ± 0,06	-27,94 ± 0,38
1:09pH	47,71 ± 3,887	0,1683 ± 0,01	-28,76 ± 2,82
1:19pH	51,40 ± 3,062	0,2046 ± 0,02	-28,75 ± 1,05

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

É possível observar que nas formulações 1:09 e 1:19 sintetizadas sem ajuste de pH os tamanhos médios das AgNPs foram muito maiores do 100 nm, com índices de polidispersão variando entre 0,28 e 0,39, indicando uma distribuição relativamente ampla, mas com partículas relativamente estáveis de acordo com o potencial zeta (Tabela 6). A síntese das AgNPs em pH 8,00, mostrou uma redução significativa no tamanho médio das nanopartículas, para as duas formulações, com tamanhos médios foi 47,71 ± 3,887 e 51,40 ± 3,062, respectivamente para as formulações 1:09pH e 1:19pH. Outro parâmetro que mudou consideravelmente foi o PDI, com valores muito menores do que os obtidos para as formulações sem ajuste de pH (Tabela 6). Os valores de potencial zeta permaneceram próximos a -28 mV, sugerindo que a estabilidade eletrostática foi mantida mesmo após a modificação do pH.

Esse comportamento está de acordo com os resultados descritos por Miranda *et al.* (2022), que ao alcalinizarem o extrato de *Spinacia oleracea* obtiveram uma redução considerável no tamanho médio e no índice de polidispersão das AgNPs obtidas. De modo semelhante, a revisão de Kaabipour e Hemmati (2021) também destaca que o aumento do pH favorece a formação de nanopartículas menores e mais bem distribuídas, uma vez que a desprotonação de grupos funcionais potencializa a capacidade redutora e estabilizadora dos compostos fenólicos. Dessa forma, os resultados obtidos neste trabalho corroboram com a literatura, confirmando que o controle do pH é um fator determinante na morfologia e estabilidade coloidal de AgNPs sintetizadas por rotas verdes.

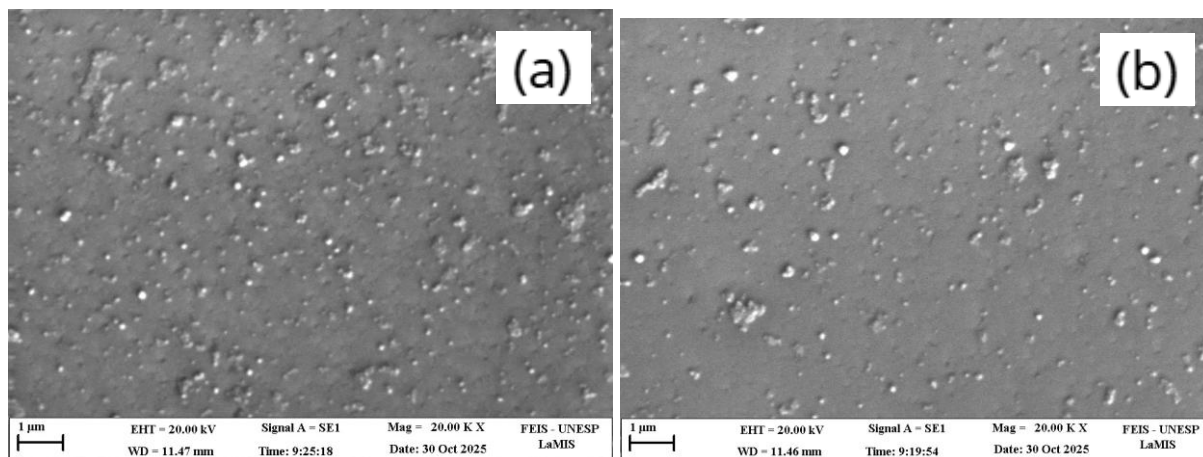
Além das análises por DLS essas 4 formulações também foram submetidas a análises por MEV a fim de observar a morfologia das nanopartículas obtidas.

As Figuras 14 a 15 apresentam as micrografias correspondentes às formulações 1:09, 1:19, 1:09pH e 1:19pH, respectivamente.

As micrografias eletrônicas de varredura (MEV) das AgNPs obtidas das formulações 1:09, 1:19, 1:09pH e 1:19pH (todas após centrifugação), revelaram morfologia predominantemente esférica. Não foram observadas diferenças

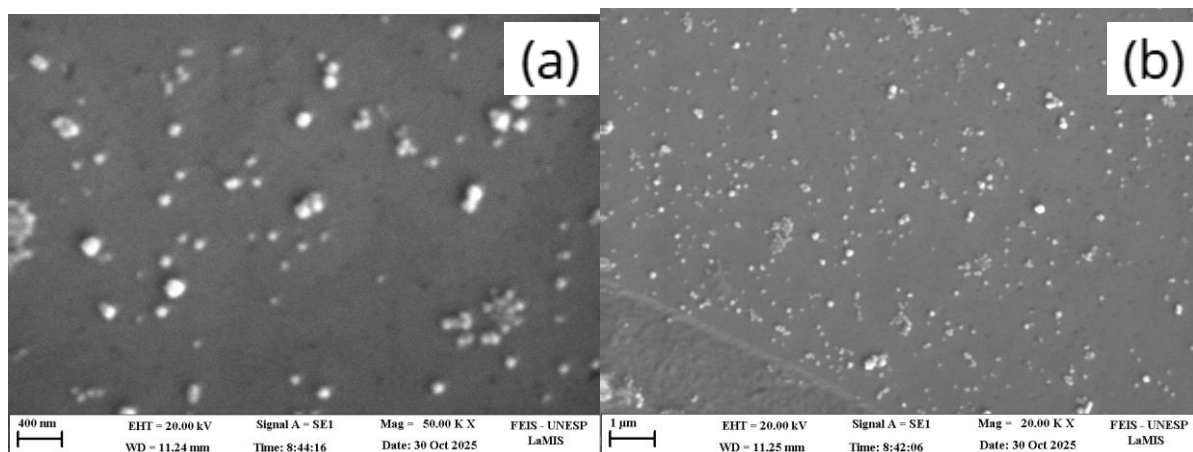
morfológicas evidentes entre as amostras com e sem ajuste de pH, indicando que a variação desse parâmetro não promoveu alterações detectáveis na forma das nanopartículas nas condições avaliadas.

Figura 14 - Micrografia obtida por MEV da formulação 1:19 (a) e 1:19pH (b).



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Figura 15 - Micrografia obtida por MEV da formulação 1:09 (a) e 1:09pH (b)



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Esses resultados estão de acordo com os relatados por Kumar e Yadav (2008), que destacam sobre a influência do pH na morfologia e estabilidade das nanopartículas obtidas por síntese verde. No presente estudo, observou-se que a variação da proporção entre o precursor metálico e o extrato de *A. absinthium*, assim como o pH 8, não alterou significativamente a morfologia das partículas, que se mantiveram predominantemente esféricas e bem distribuídas.

Na metodologia descrita por Ali *et al.* (2016), usando o extrato aquoso da *A. absinthium* não foi realizado o controle de pH e as AgNPs foram obtidas em diferentes tempos de reação (máximo 48h). As análises de DLS realizadas pelos autores revelaram uma ampla faixa de tamanhos hidrodinâmicos, aproximadamente de 5 a 200 nm, com diferentes proporções metal:extrato e avaliaram de modo geral, que os tamanhos hidrodinâmicos médios das AgNPs aumentaram com o aumento da concentração do extrato vegetal. Os valores de potencial zeta para as diferentes proporções metal:extrato avaliadas variaram de -32 a -40 mV e concluíram que a proporção metal:extrato não afeta esse parâmetro de forma considerável.

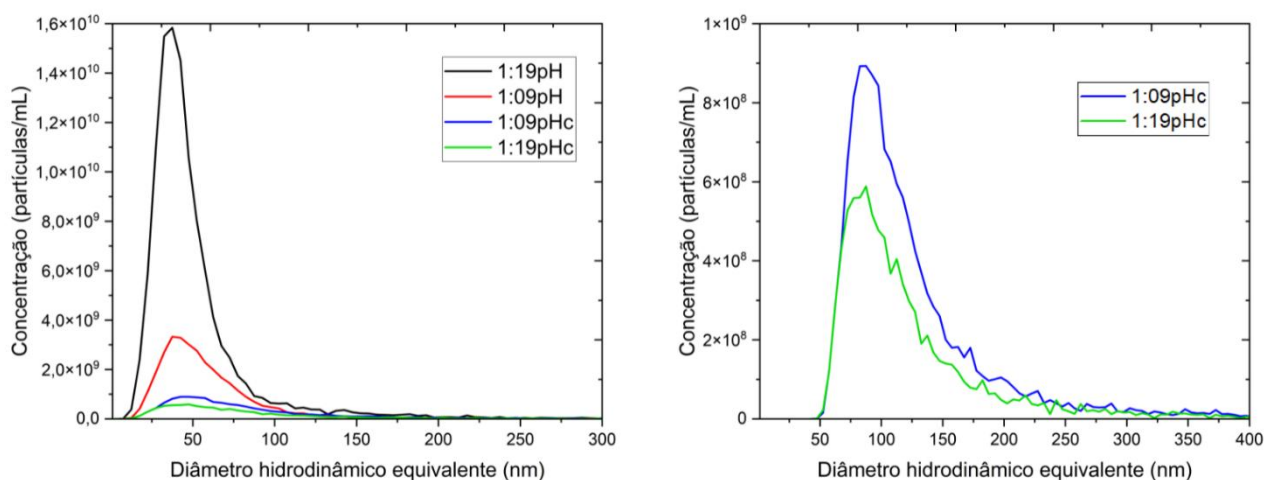
Em outro trabalho também usando o extrato da *A. absinthium*, Balciunaitiene *et al.*, (2021), os autores não ajustaram o pH do extrato, e a síntese foi conduzida à temperatura ambiente por 24 horas, utilizando uma única proporção metal:extrato de 1:6, com AgNO₃ na concentração de 0,35 mM. As AgNPs foram obtidas com tamanhos variando de 20 a 120 nm com tamanho médio de 42 nm, porém os autores não descrevem análises de DLS e de potencial zeta o que dificulta a comparação com os resultados apresentados neste estudo que indicariam a estabilidade da partícula.

Outra análise importante foi realizada por NTA, onde as formulações 1:09pH e 1:19pH sem centrifugação e com centrifugação 1:09pHc e 1:19pHc foram comparadas em relação ao tamanho e à concentração de partículas. Essa comparação foi feita, pois para os ensaios biológicos foram realizados com as formulações submetidas à centrifugação e lavagem para remoção de excesso de extrato vegetal e nitrato residual.

A Figura 16 apresenta a distribuição de tamanho das nanopartículas e a concentração de partículas por mL obtidas para cada formulação. Nesse tipo de gráfico, o valor apresentado no eixo Y não corresponde à concentração total da amostra, mas sim à concentração de partículas presente em cada faixa específica de tamanho. Assim, cada ponto da curva representa quantas partículas existem em determinado diâmetro e a concentração total de partículas/mL corresponde à soma de todas as concentrações ao longo da distribuição.

A comparação entre as amostras permitiu avaliar a eficiência no processo de centrifugação em relação ao tamanho e na quantidade de partículas detectadas pela análise de NTA.

Figura 16 - Distribuição de tamanho hidrodinâmico equivalente e concentração de partículas determinada por NTA para as amostras 1:09pH, 1:19pH e suas respectivas formas centrifugadas (1:09pHc e 1:19pHc).



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Os parâmetros obtidos por NTA para as amostras analisadas estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros de tamanho e concentração obtidos por NTA para as formulações 1:09pH e 1:19pH, 1:09pHc e 1:19pHc

Amostra	d_h	Moda	D_{10}	D_{50}	D_{90}	Partículas/mL	Span
1:09pH	66 ± 4	37,5	30	51	98	$3,27 \times 10^{10} \pm 1,87 \times 10^9$	1,34
1:09 pHc	92 ± 5	47,5	34	66	165	$1,33 \times 10^{10} \pm 2,57 \times 10^9$	2
1:19pH	53 ± 3	37,5	26	42	80	$1,12 \times 10^{11} \pm 9,21 \times 10^9$	1,28
1:19 pHc	110 ± 31	47,5	30	63	172	$8,85 \times 10^9 \pm 1,70 \times 10^9$	2,24

*Valores de d_h (diâmetro hidrodinâmico), moda, D_{10} , D_{50} e D_{90} são dados em nm

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

A análise por NTA revelou diferenças importantes entre as formulações quanto ao tamanho e à distribuição das nanopartículas. De modo geral, observa-se que as formulações sem centrifugação apresentaram menores diâmetros hidrodinâmicos médios quando comparadas às formulações centrifugadas. A formulação 1:19pH apresentou o menor tamanho médio (53 ± 3 nm), enquanto para a formulação 1:19pHc o valor aumentou para 110 ± 31 nm. Para a formulação 1:09pH, o diâmetro médio aumentou de 66 ± 4 nm para 92 ± 5 nm após a centrifugação (1:09pHc). Esse aumento

sugere possível agregação ou seleção de partículas maiores após o processo de centrifugação.

As amostras centrifugadas foram novamente submetidas às análises por DLS a fim de comparar o efeito da centrifugação sobre parâmetros como potencial Zeta e PDI (Tabela 8).

Tabela 8- Resultados de tamanho, índice de Polidispersão e Potencial Zeta das formulações 1:09pHc e 1:19pHc.

Formulações	Tamanho (nm)	PDI	Potencial Zeta (mV)
1:09pHc	164,2 ± 12,52	0,3843 ± 0,005	-30,09 ± 0,1698
1:19pHc	190,7 ± 4,987	0,435 ± 0,016	-33,36 ± 0,60

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Os resultados obtidos por NTA apresentaram diferenças em relação aos valores determinados por DLS, o que é esperado devido às particularidades de cada técnica. O DLS fornece o diâmetro hidrodinâmico médio baseado na intensidade da luz espalhada pelas partículas, sendo altamente sensível à presença de agregados, uma vez que partículas maiores contribuem de forma desproporcional para o sinal obtido. Dessa forma, mesmo pequenas quantidades de agregados podem resultar em aumento significativo do tamanho médio determinado por DLS. Por outro lado, o NTA baseia-se no rastreamento individual das partículas, permitindo obter a distribuição de tamanho e a concentração de forma mais representativa em sistemas polidispersos, uma vez que analisa partícula por partícula (FILIPE *et al.*, 2010; MOURDIKOUDIS *et al.*, 2018).

De modo geral, o DLS é amplamente empregado devido à rapidez da análise e boa reprodutibilidade para sistemas monodispersos, enquanto o NTA apresenta maior capacidade de distinguir populações de partículas com diferentes tamanhos, sendo particularmente útil em sistemas heterogêneos, como aqueles obtidos por síntese verde. Assim, a combinação das duas técnicas fornece uma caracterização mais completa do sistema coloidal, permitindo avaliar tanto a média global do tamanho hidrodinâmico quanto a distribuição real das partículas presentes na suspensão (BHATTACHARJEE, 2016; MOURDIKOUDIS *et al.*, 2018).

Nesse contexto, diferenças observadas entre os valores obtidos por DLS e NTA são comuns e refletem as diferenças metodológicas entre as técnicas, não sendo

indicativas de inconsistência experimental. Enquanto o DLS tende a superestimar o tamanho médio devido ao peso da intensidade de espalhamento, o NTA fornece uma estimativa mais realista da distribuição de tamanho em sistemas polidispersos.

Em relação à distribuição de tamanho através da análise por NTA, os valores de D10, D50 e D90 indicam que as formulações sem centrifugação (1:09pH e 1:19pH) apresentam distribuições mais estreitas. A formulação 1:19pH apresentou menores valores de D50 (42 nm) e D90 (80 nm), evidenciando população de partículas mais uniforme. Em contraste, as formulações centrifugadas apresentaram distribuições mais amplas, com destaque para 1:19pHc, que apresentou D90 de 172 nm, indicando maior heterogeneidade após o processo de purificação. Esse comportamento está de acordo com os resultados obtidos por DLS, que também evidenciaram aumento do tamanho médio e do índice de polidispersidade após a centrifugação, sugerindo possível agregação ou seleção de partículas maiores durante o processo de lavagem.

Os valores de Span reforçam essa tendência, uma vez que as formulações não centrifugadas apresentaram menor polidispersidade, especialmente 1:19pH (Span = 1,28), enquanto as formulações centrifugadas apresentaram aumento da dispersão de tamanhos, com 1:19pHc apresentando o maior valor (Span = 2,24). Esse comportamento indica que o processo de centrifugação pode modificar a distribuição original das partículas, seja pela remoção seletiva de frações menores, seja por alterações nas interações interparticulares durante a etapa de purificação.

A análise por NTA revelou uma concentração da ordem de 10^9 partículas/mL, para as formulações de AgNPs centrifugadas e da ordem de 10^{10} a 10^{11} partículas/mL para as formulações não centrifugadas. A aquisição dos dados foi realizada com aproximadamente 65 partículas por frame, valor que se encontra dentro da faixa recomendada pela literatura (20–100 partículas/frame), considerada ideal para o rastreamento individual das partículas e para a obtenção de resultados confiáveis. Nessa condição, evita-se o fenômeno de “particle crowding”, que pode ocorrer em amostras excessivamente concentradas e comprometer a acurácia da contagem, bem como limitações associadas a amostras muito diluídas, que reduzem a robustez estatística dos dados (GRIFFITHS *et al.*, 2020). A diminuição da concentração do número de partículas após etapas de purificação é frequentemente observada em sistemas coloidais, uma vez que partículas menores ou fracamente estabilizadas podem permanecer no sobrenadante descartado ou não redispersar completamente após a centrifugação (VAUTHIER; BOUCHEMAL, 2009; DOMINGOS *et al.*, 2009).

Em relação ao processo de centrifugação, as partículas maiores e agregados tendem a sedimentar mais facilmente, enquanto partículas menores permanecem dispersas. Assim, perdas das frações mais finas durante a coleta do sobrenadante ou uma redispersão ineficiente após a centrifugação podem resultar em um sistema enriquecido em partículas maiores (VAUTHIER; BOUCHEMAL, 2009;). A combinação desses processos pode resultar nas alterações da distribuição de tamanho detectadas a partir das análises realizadas por NTA e DLS (DOMINGOS *et al.*, 2009; ZIELIŃSKA *et al.*, 2020).

Apesar do aumento do diâmetro hidrodinâmico médio após a centrifugação, as partículas apresentaram valores de potencial zeta mais negativos, indicando manutenção da estabilidade coloidal. Para a formulação 1:19pHc foi obtido potencial zeta de $-33,36 \pm 0,6$ mV e para a formulação 1:09pHc de $-30,09 \pm 0,6$ mV. Valores de potencial zeta com magnitude superior a 30 mV, em módulo, são geralmente associados a sistemas coloidais estáveis devido ao aumento da repulsão eletrostática entre as partículas (BHATTACHARJEE, 2016).

Esse aumento da magnitude do potencial zeta pode estar relacionado à remoção de impurezas e metabólitos livres do extrato vegetal durante a etapa de lavagem, resultando em superfície de partícula mais definida e com maior densidade de carga (IRAVANI, 2011; AHMED *et al.*, 2016).

Entretanto, embora os dados de NTA e DLS indiquem aumento do tamanho médio e da polidispersidade após a centrifugação, os valores mais negativos de potencial zeta indicam que o processo de centrifugação pode promover alterações na distribuição de tamanho, mas também alterou a química de superfície das nanopartículas, influenciando de maneira distinta os parâmetros físico-químicos do sistema.

As análises por EDX confirmaram a presença de prata nas duas formulações avaliadas, evidenciada pelo pico característico de 3 keV, típico de prata metálica. A composição elementar indicou teores de prata de 7,3% (Figura 17) e 7,75% (Figura 18), respectivamente, para as formulações 1:19pHc e 1:09pHc. Entretanto, a elevada porcentagem de silício detectada está associada ao substrato utilizado na análise, o que influencia diretamente os valores obtidos. Como o EDX fornece dados de composição relativa com base em todos os elementos presentes na região analisada, a predominância de Si (~70%) resulta na diluição da fração percentual de prata. Dessa forma, os valores obtidos não representam a composição real das nanopartículas,

mas sim a contribuição conjunta do material de suporte e dos demais componentes do sistema. (GOLDSTEIN *et al.*, 2018, KEERTHIRATHNA *et al.*, 2025).

Comparando as duas formulações avaliadas neste trabalho, a porcentagem de Ag apresentou valores muito próximos, onde as pequenas diferenças na porcentagem de Ag obtidas pelas análises de EDX são comuns em síntese verde, pois a técnica analisa regiões pontuais da amostra e pode sofrer influência da heterogeneidade da deposição das partículas sobre o suporte (MUSTAPHA *et al.*, 2022).

Outras diferenças foram verificadas nos teores de carbono e oxigênio. A formulação 1:09pHc apresentou maior porcentagem de C (23,13%) e O (3,35%) em comparação à formulação 1:19pHc (21,39% de C e 1,14% de O). Esse resultado indica, a princípio, maior quantidade relativa de biomoléculas provenientes do extrato vegetal adsorvidas na superfície das nanopartículas na condição 1:09pHc (AHMED *et al.*, 2016; MUSTAPHA *et al.*, 2022). A maior contribuição relativa de compostos orgânicos na formulação 1:09pHc pode estar relacionada à maior disponibilidade de biomoléculas capazes de interagir com a superfície das nanopartículas, promovendo estabilização coloidal, visto que nessa proporção o extrato está em maior proporção do que na outra (IRAVANI, 2011; AHMED *et al.*, 2016).

Assim, a presença consistente de Ag nas duas formulações confirma a formação de nanopartículas de prata. A composição elementar obtida está de acordo com o perfil normalmente descrito para AgNPs sintetizadas por rota verde, nas quais o espectro EDX reflete simultaneamente a presença do metal e dos compostos orgânicos responsáveis pela estabilização coloidal (IRAVANI, 2011; MUSTAPHA *et al.*, 2022). A técnica de EDX apresenta caráter semi-quantitativo, fornecendo a composição elementar relativa da amostra, calculada a partir da contribuição de todos os elementos detectados no volume de interação do feixe de elétrons. Assim, os valores obtidos não representam a composição real isolada de um componente específico, sendo fortemente influenciados pela presença de outros elementos, como o material de suporte e espécies adsorvidas. Desta forma, a comparação da porcentagem de prata obtida neste estudo com demais estudos da literatura fica comprometida. Em alguns estudos a proporção de Ag chega a valores de 20 a 30%, porem ao comparar o EDX o pico da prata metálica em 3,0eV é o majoritário sem a alta interferência do suporte (ALI *et al.*, 2022).

Figura 17 - Espectro de EDX e composição elementar das AgNPs da formulação 1:19pHc



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Figura 18 - Espectro de EDX e composição elementar das AgNPs da formulação 1:09pHc



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

A determinação quantitativa da eficiência de conversão de Ag^+ em Ag^0 pode ser realizada por técnicas analíticas mais precisas, como ICP-OES, ICP-MS ou espectrometria de absorção atômica (AAS), mas no presente estudo não foram realizadas devido às limitações instrumentais. No entanto, a formação das

nanopartículas foi confirmada por meio de técnicas complementares, como UV-Vis, DLS/NTA, potencial zeta e EDX, que, em conjunto, fornecem evidências consistentes da redução dos íons prata e da formação de um sistema coloidal estável.

Além disso, o objetivo principal deste estudo não foi a quantificação absoluta da conversão de prata, mas a avaliação das propriedades físico-químicas e da atividade biológica das nanopartículas sintetizadas. Dessa forma, as análises realizadas foram consideradas adequadas para sustentar as conclusões propostas, sobre a síntese verde realizada e as características das AgNPs obtidas.

5.3. Estabilidade das nanopartículas de prata

A estabilidade coloidal das nanopartículas é um parâmetro importante para avaliar a eficiência da síntese verde, pois está relacionada à capacidade dos metabólitos presentes no extrato vegetal de atuar como agentes estabilizantes, reduzindo a tendência de agregação das partículas ao longo do tempo. A manutenção da estabilidade é um fator relevante para aplicações biológicas, uma vez que alterações no tamanho e na distribuição das partículas podem influenciar suas propriedades físico-químicas e sua interação com sistemas biológicos.

Com o objetivo de avaliar a estabilidade das formulações obtidas, a distribuição de tamanho e a concentração de partículas foram monitoradas por meio da técnica de Análise de Rastreamento de Nanopartículas (NTA) ao longo do período de armazenamento. Os resultados obtidos para as formulações 1:09pH e 1:19pH (sem centrifugação) são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Distribuição de tamanho e concentração de partículas por NTA das formulações de AgNPs armazenadas por até 75 dias.

Amostra	Tempo (Dias)	d_h	Moda	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	Partículas/mL	Span
1:09pH	15	81 ± 6	62,5	30	66	143	$3,61 \times 10^9 \pm 1,73 \times 10^8$	1,71
	45	74 ± 2	57,5	37	63	115	$2,46 \times 10^{10} \pm 4,43 \times 10^8$	1,25
	75	83,5 ±	57,5	36	65	132	$1,48 \times 10^{10} \pm 5,74 \times 10^8$	1,48
1:19pH	15	46 ± 2	32,5	25	39	65	$1,92 \times 10^9 \pm 1,01 \times 10^9$	1,71
	45	48 ± 2	37,5	25	39	65	$1,59 \times 10^{11} \pm 1,10 \times 10^{10}$	1,02
	75	47 ± 1	37,5	27	40	67	$1,31 \times 10^{11} \pm 7,52 \times 10^9$	1,01

*Valores de dh (diâmetro hidrodinâmico), moda, D10, D50 e D90 são dados em nm

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

A distribuição de tamanho permaneceu na escala nanométrica durante todo o período de armazenamento, indicando estabilidade adequada das formulações. Para a amostra 1:09pH, os valores de D50 variaram de 66 nm no tempo inicial para 63 nm após 45 dias e 65 nm após o período final de armazenamento, demonstrando pequena variação no tamanho médio das partículas. A amostra 1:19pH apresentou elevada estabilidade, com valores de D50 praticamente constantes (39–40 nm) e distribuição de tamanho estreita, conforme indicado pelos baixos valores de span (~1,0). Esses resultados indicam que os metabólitos presentes no extrato de *Artemisia absinthium* atuam como agentes estabilizantes eficientes, contribuindo para a manutenção da estabilidade coloidal das AgNPs ao longo do tempo e reduzindo a ocorrência de agregação significativa.

A estabilidade apresentada indica que as formulações possuem potencial para aplicação em ensaios biológicos, uma vez que a manutenção das características físico-químicas ao longo do tempo contribui para maior confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados experimentais.

5.4. Ensaios de atividade antimicrobiana

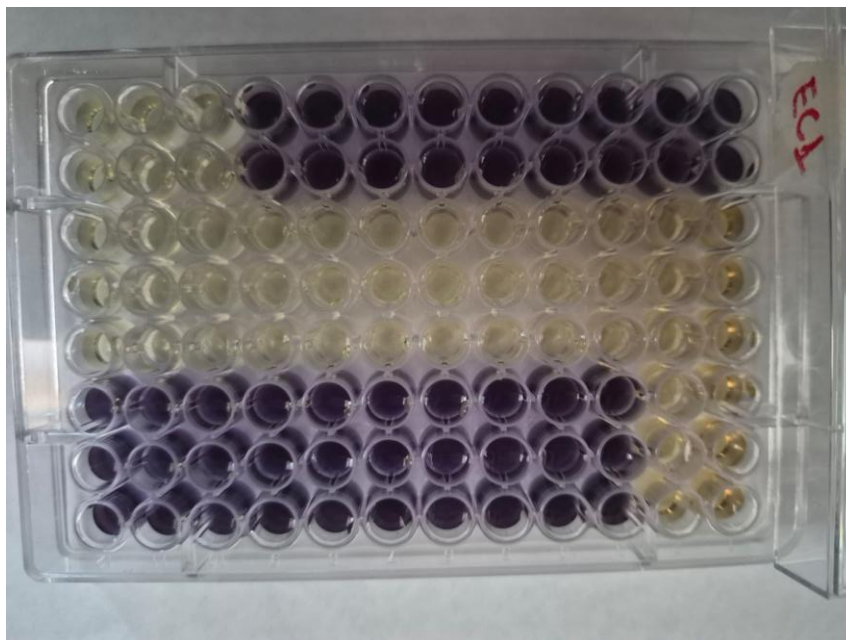
Os ensaios de atividade antimicrobiana foram realizados com as formulações 1:09pHc e 1:19pHc, utilizando a técnica de microdiluição em caldo. Como método complementar para confirmação da viabilidade bacteriana, empregou-se o ensaio com MTT. Nesse teste, o MTT (brometo de 3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difeniltetrazólio) atua como indicador do metabolismo celular, sendo reduzido por enzimas desidrogenases presentes em células viáveis, com participação de cofatores redutores como NADH e NADPH. Essa redução converte o MTT de sua forma original amarelada em formazana insolúvel de coloração roxa/violácea. Assim, quanto mais intensa a coloração roxa no poço da placa de cultura, maior é a atividade metabólica e, conseqüentemente, a viabilidade bacteriana; por outro lado, a diminuição ou ausência dessa coloração indica inibição do crescimento microbiano (GRELA *et al.*, 2018).

Nesses ensaios, as AgNPs das formulações previamente descritas foram avaliadas quanto à atividade antimicrobiana frente às bactérias *Staphylococcus*

aureus (*S. aureus*) e *Escherichia coli* (*E. coli*). A figura 19 mostra uma das placas utilizadas para os ensaios biológicos onde os poços com cor roxa indicam alta viabilidade das bactérias enquanto a cor clara indica ausência de atividade bacteriana.

Os resultados dos ensaios para as soluções avaliadas contra as cepas bacterianas foram expressos como porcentagem de viabilidade bacteriana em função da concentração, comparando-se a viabilidade do controle negativo. Portanto quanto maior a viabilidade bacteriana menor o efeito da solução testada. Esses resultados podem ser utilizados para determinação da concentração inibitória mínima (CIM) que é considerada como a menor concentração capaz de inibir completamente o crescimento bacteriano visível, sendo caracterizada pela ausência de atividade metabólica detectável no ensaio de MTT (VEIGA *et al.*, 2029).

Figura 19 - Foto de placa de cultura usada no ensaio antimicrobiano. Cor violeta (controle negativo) indica atividade bacteriana e amarelo claro (controle positivo) ausência de atividade bacteriana.



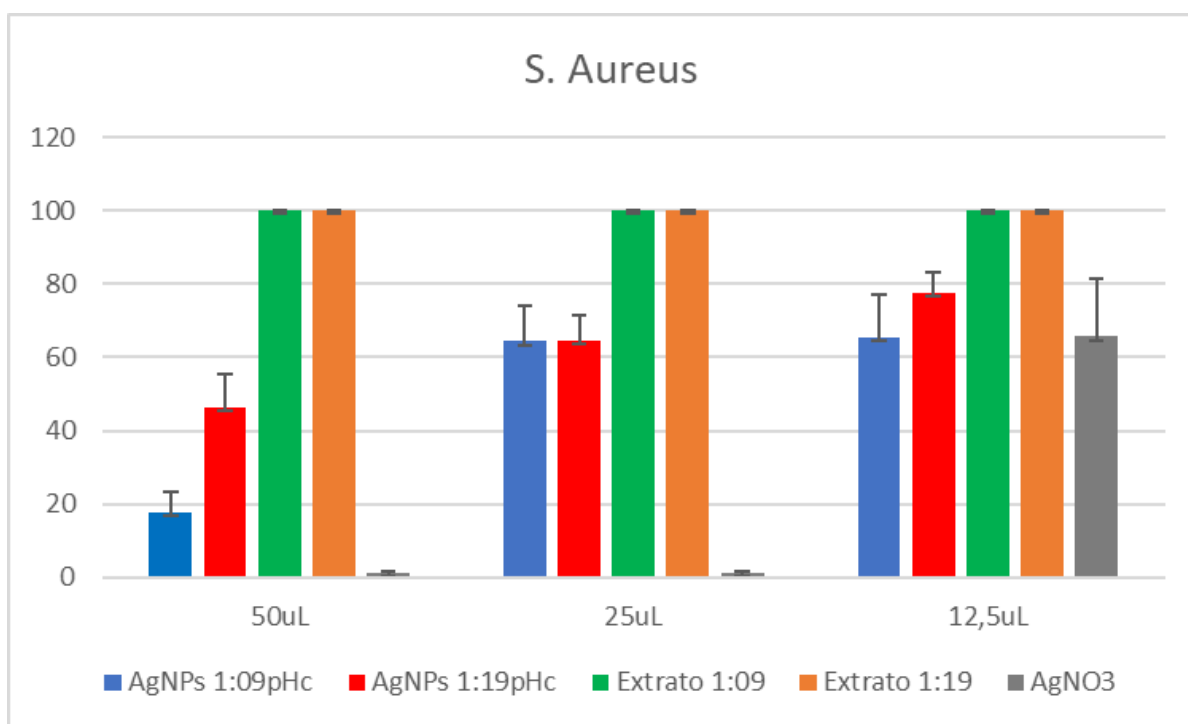
Fonte: Elaborada pela autora (2026)

A figura 20 mostra os resultados dos ensaios de viabilidade (%) da bactéria *S. aureus* em função das concentrações das duas formulações de AgNPs, nitrato de prata e extrato. Para o controle positivo gentamicina não houve crescimento bacteriano nas concentrações avaliadas.

A formulação 1:09pHc promoveu redução de 82% da viabilidade bacteriana na concentração de 33 µg/mL, conforme observado pela alteração de coloração no ensaio de MTT. Entretanto, não foi observada inibição completa da atividade metabólica bacteriana, não sendo possível determinar a concentração inibitória mínima (CIM). Esses resultados indicam um efeito antimicrobiano parcial, possivelmente dependente da concentração. Vale ressaltar que em termos de concentração, as concentrações utilizadas neste estudo são realmente muito pequenas considerando outros artigos sobre atividade antimicrobiana de AgNPs (RAI; YADAV; GADE, 2009; DURÁN *et al.*, 2007).

A formulação 1:19pHc apresentou comportamento semelhante, com redução de 53% da viabilidade bacteriana na concentração de 38 µg/mL, porém com menor eficácia em comparação à formulação 1:09pHc. Assim como observado anteriormente, não houve inibição total da atividade metabólica bacteriana (Figura 20).

Figura 20 - Porcentagem de viabilidade de *S. aureus* em função das concentrações de AgNPs, nitrato de prata e extrato, determinada por ensaio de MTT



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Contra *E. coli*, observou-se maior atividade antimicrobiana das AgNPs, uma vez que ambas as formulações promoveram ausência de crescimento bacteriano na maior concentração avaliada. Entretanto, nas menores concentrações foi observada

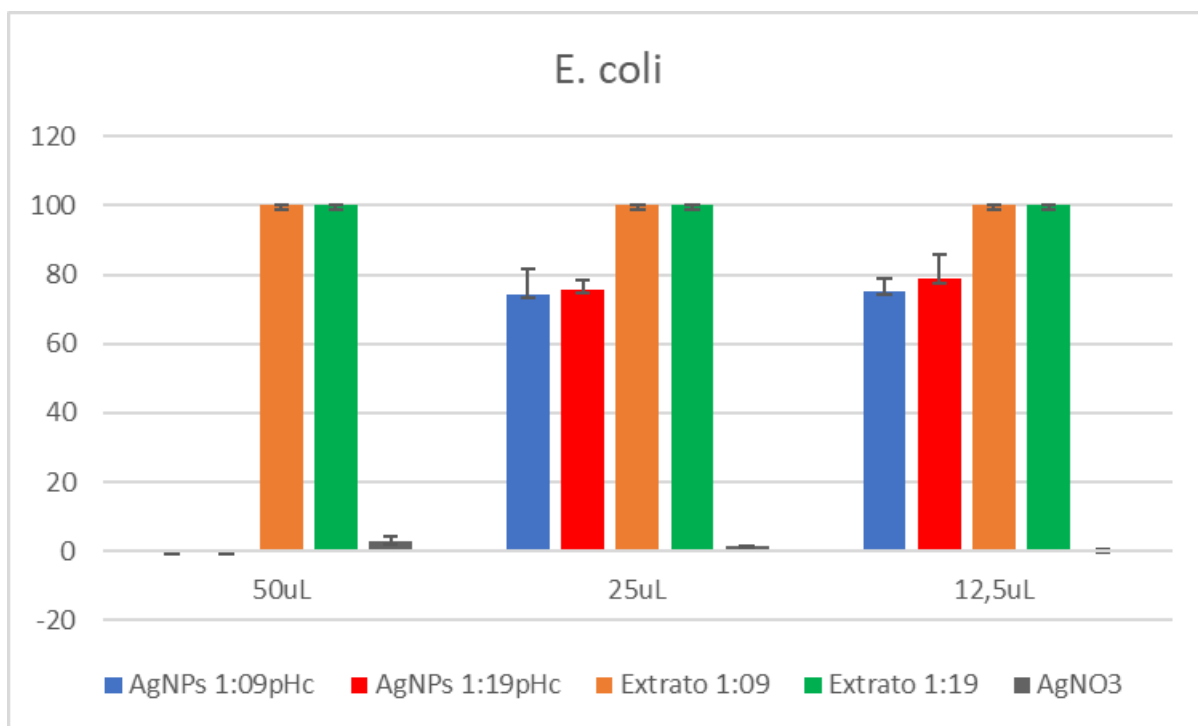
manutenção da atividade metabólica celular, indicando ausência de efeito inibitório significativo nessas condições. Dessa forma, a CIM foi determinada como 33 µg/mL (50 µL) para a formulação 1:09pHc e 38 µg/mL (50 µL) para a formulação 1:19pHc (Figura 21).

O nitrato de prata apresentou concentração inibitória mínima (CIM) em 21,23 µg/mL (25 µL) frente à cepa de *S. aureus* (Figura 20) e de 10,62 µg/mL (12,5 µL) frente à *E. coli* (Figura 21).

As AgNPs utilizadas neste estudo foram previamente submetidas a etapas de centrifugação e lavagem, visando a remoção de íons prata livres e resíduos do precursor. Dessa forma, embora não se possa descartar completamente a presença de traços residuais de Ag⁺, esses procedimentos reduzem significativamente essa possibilidade, indicando que a atividade antimicrobiana observada está majoritariamente associada às propriedades intrínsecas das nanopartículas. Nesse contexto, as AgNPs podem atuar tanto pela liberação gradual de íons prata quanto por mecanismos adicionais, como interação direta com a superfície bacteriana e indução de estresse oxidativo.

Quanto ao extrato não houve redução da atividade microbiana frente às duas cepas testadas (Figuras 21 e 22) em nenhuma concentração avaliada. Estudos com extratos aquosos de *A. absinthium* indicam que essa forma de extração (água) pode apresentar atividade antimicrobiana, embora geralmente menos pronunciada quando comparada a extratos orgânicos, devido à menor extração de compostos bioativos hidrofóbicos. Além disso, os efeitos antimicrobianos do extrato aquoso tendem a ser observados apenas em concentrações mais elevadas, superiores às utilizadas no presente estudo, o que pode justificar a ausência de atividade nas condições avaliadas (FIAMENGOS *et al.*, 2011; KARABEGOVIC *et al.*, 2011).

Figura 21 - Porcentagem de viabilidade de *E.coli* em função das concentrações de AgNPs, nitrato de prata e extrato, determinada por ensaio de MTT



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Esses resultados estão em concordância com a literatura (EKER *et al.*, 2025; VANLALVENI *et al.*, 2021)), que descreve elevada atividade antimicrobiana de AgNPs obtidas por síntese verde a partir de diferentes extratos vegetais, frequentemente superior à dos extratos isolados. Tal efeito é atribuído à elevada área superficial das nanopartículas e à possível presença de compostos fitoquímicos adsorvidos em sua superfície, que podem contribuir para a estabilidade e potencializar a atividade biológica, sendo a eficácia observada dependente da concentração e das características físico-químicas das nanopartículas.

Adicionalmente, a comparação dos resultados obtidos com dados da literatura é dificultada por limitações metodológicas frequentemente observadas em estudos envolvendo AgNPs. Em muitos trabalhos, não há descrição clara das etapas de purificação das nanopartículas, como processos de centrifugação e lavagem, o que impossibilita avaliar a contribuição de íons prata livres (Ag^+) residuais na atividade antimicrobiana observada. Além disso, raramente são realizados ensaios comparativos utilizando o nitrato de prata nas mesmas concentrações empregadas na síntese, o que compromete a distinção entre os efeitos atribuídos às nanopartículas e aqueles decorrentes exclusivamente dos íons prata. Outro fator limitante refere-se à padronização da dose, uma vez que a determinação precisa da massa de AgNPs utilizada nos ensaios nem sempre é reportada ou realizada de forma adequada. Essa

limitação é particularmente relevante em estudos baseados em métodos de difusão em ágar (halo de inibição), nos quais a difusão da amostra no meio pode influenciar significativamente os resultados, dificultando comparações diretas com ensaios quantitativos, como a microdiluição em caldo.

Entretanto, em um estudo realizado por Alahmad *et al.* (2022), os dados puderam ser comparados. Os autores obtiveram AgNPs a partir do extrato de *Hypericum perforatum* L., com tamanhos médios variando entre 20 e 40 nm e potencial zeta de -19 mV, as quais apresentaram atividade antimicrobiana contra cepas de *S. aureus*, mas não contra *E. coli*. Os autores reportaram CIM de 12,5 µg/mL frente à *S. aureus*. Em contraste, no presente estudo, as AgNPs obtidas a partir de *A. absinthium* apresentaram maiores valores de tamanho médios, potencial zeta mais negativo e apresentaram maior atividade contra *E. coli*. Embora os autores tenham utilizado a técnica de NTA para a caracterização das nanopartículas, não foi reportada a concentração de partículas (partículas/mL) da formulação empregada nos ensaios antimicrobianos, o que limita a comparação direta em relação ao número de partículas. A atividade das AgNPs pode variar significativamente, uma vez que, embora sejam compostas por prata, as diferenças nos extratos vegetais empregados na síntese influenciam diretamente suas propriedades tanto físico-químicas quanto biológicas (ALAHMAD *et al.* 2022).

Os resultados deste estudo demonstraram que a síntese verde de AgNPs utilizando o extrato aquoso das folhas da *A. absinthium* é uma abordagem eficiente para a obtenção de sistemas com atividade antimicrobiana. O controle do pH mostrou-se um fator determinante no processo sintético, favorecendo a formação de nanopartículas mais estáveis e com menor tamanho médio, evidenciando a influência das condições reacionais nas propriedades finais das AgNPs. Entretanto, o processo de lavagem e centrifugação aumentou o tamanho das partículas, seja por agregação ou lavagem seletiva, o que pode também ter interferido nos resultados da avaliação antimicrobiana.

6. CONCLUSÃO

Neste estudo, AgNPs foram sintetizadas por meio de síntese verde utilizando extrato aquoso de *A. absinthium*, avaliando-se diferentes proporções metal:extrato. As nanopartículas obtidas foram monitoradas por espectroscopia UV-Vis e inicialmente caracterizadas por DLS, sendo que, dentre as formulações avaliadas, as proporções 1:09 e 1:19 foram selecionadas para a etapa de otimização. O controle do pH durante a síntese mostrou-se um fator determinante, resultando em nanopartículas com melhores características morfológicas e maior estabilidade coloidal.

Os tamanhos médios das partículas variaram entre 50 e 60 nm; no entanto, o processo de centrifugação e lavagem, realizado para remoção de resíduos de nitrato e do extrato vegetal, levou à obtenção de partículas com maiores dimensões aparentes (~100 nm), possivelmente devido à agregação ou à seleção de partículas maiores durante essas etapas. Como consequência, observou-se aumento no índice de polidispersidade (PDI) e nos valores de potencial zeta (mais negativo), indicando alterações na estabilidade e na distribuição de tamanho do sistema.

Essas formulações de AgNPs centrifugadas foram avaliadas quanto à atividade antimicrobiana frente a *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*. Os resultados demonstraram que as nanopartículas apresentaram atividade significativa apenas contra *E. coli*, com valores de concentração inibitória mínima (CIM) em torno de 33-38 µg/mL. Para *S. aureus*, embora tenha sido observada redução da viabilidade bacteriana, não foi possível determinar a CIM nas condições avaliadas para nenhuma das formulações. O aumento no tamanho médio das partículas de (~50 para ~100) pode ter influenciado negativamente a atividade biológica observada, uma vez que nanopartículas menores tendem a apresentar maior área superficial e, consequentemente, maior interação com células bacterianas.

Dessa forma, conclui-se que a síntese verde utilizando *A. absinthium* é uma abordagem eficaz para a obtenção de AgNPs com potencial antimicrobiano, sendo a atividade dependente tanto das condições de síntese quanto das características das nanopartículas formadas. Além disso, os resultados evidenciam a importância das etapas de pós-processamento na modulação das propriedades físico-químicas e biológicas dessas nanoestruturas. Considerando a atividade observada, especialmente frente a *E. coli*, essas nanopartículas apresentam potencial aplicação em materiais com propriedades antimicrobianas, como revestimentos, tintas, rejuntas

e superfícies para ambientes suscetíveis à contaminação microbiana, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao controle de microrganismos.

REFERÊNCIAS

- ABAD, M. J. *et al.* **The *Artemisia* L. genus: a review of bioactive essential oils.** *Molecules*, Basel, v. 17, n. 3, p. 2542–2566, 2012. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules17032542>
- ABBAS, R. *et al.* **Silver nanoparticles: synthesis, structure, properties and applications.** *Nanomaterials*, Basel, v. 14, n. 17, p. 1425, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14171425>
- AHMAD, S. *et al.* **Green nanotechnology: a review on green synthesis of silver nanoparticles.** *International Journal of Nanomedicine*, Auckland, v. 14, p. 5087–5107, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2147/IJN.S200254>
- AHMED, S. *et al.* **A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications.** *Journal of Advanced Research*, Cairo, v. 7, n. 1, p. 17–28, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.02.007>
- AKHTER, M. S. *et al.* **Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts.** *Heliyon*, Amsterdam, v. 10, e29766, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29766>
- ALAHMAD, A. *et al.* **Green synthesis of silver nanoparticles using *Hypericum perforatum* L. aqueous extract with the evaluation of its antibacterial activity against clinical and food pathogens.** *Pharmaceutics*, Basel, v. 14, n. 5, p. 1104, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14051104>
- ALBANESE, A.; TANG, P. S.; CHAN, W. C. W. **The effect of nanoparticle size, shape, and surface chemistry on biological systems.** *Annual Review of Biomedical Engineering*, Palo Alto, v. 14, p. 1–16, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-071811-150124>.
- ALI, F. *et al.* **Biosynthesis and characterization of silver nanoparticles using strawberry seed extract and evaluation of their antibacterial and antioxidant**

activities. *Journal of Saudi Chemical Society*, Riyadh, v. 26, n. 6, p. 101558, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2022.101558>

ALI, M. *et al.* **Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using *Artemisia absinthium* extract.** *Materials Science and Engineering C*, Lausanne, v. 58, p. 359–365, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.08.045>.

ALQADI, M. K. *et al.* **pH effect on the aggregation of silver nanoparticles synthesized by chemical reduction.** *Materials Science-Poland*, Warsaw, v. 32, n. 1, p. 107–111, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2478/s13536-013-0166-9>

ALTAMMAR, K. A. *et al.* **A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges.** *Frontiers in Microbiology*, Lausanne, v. 14, 1155622, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1155622>

AMENDOLA, V. *et al.* **Surface plasmon resonance in gold nanoparticles.** *Journal of Physics: Condensed Matter*, Bristol, v. 29, 203002, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa60f3>

AZAD, A. *et al.* **Factors influencing the green synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts: a comprehensive review.** *Pharmaceutical Fronts*, Stuttgart, v. 5, n. 3, p. e117–e131, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0043-1774289>

BALCIUNAITIENE, A. *et al.* **Green synthesis of silver nanoparticles using *Artemisia absinthium*.** *Processes*, Basel, v. 9, n. 8, p. 1304, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9081304>

BANG, J. H.; SUSLICK, K. S. **Applications of ultrasound to the synthesis of nanostructured materials.** *Advanced Materials*, Weinheim, v. 22, n. 10, p. 1039–1059, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200904093>

BEHZADI, S. *et al.* **Cellular uptake of nanoparticles.** *Chemical Society Reviews*, Cambridge, v. 46, p. 4218–4244, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6CS00636A>

BHATTACHARJEE, S. **DLS and zeta potential – what they are and what they are not?** Journal of Controlled Release, Amsterdam, v. 235, p. 337–351, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017>

BILECKA, I.; NIEDERBERGER, M. **Microwave chemistry for inorganic nanomaterials synthesis.** Nanoscale, Cambridge, v. 2, p. 1358–1374, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1039/B9NR00377K>

BORA, K. S.; SHARMA, A. **The genus *Artemisia*: a comprehensive review.** Pharmaceutical Biology, London, v. 49, p. 101–109, 2011. DOI: <https://doi.org/10.3109/13880209.2010.497815>.

BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. **Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity.** LWT – Food Science and Technology, London, v. 28, n. 1, p. 25–30, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)

BREIJYEH, Z.; JUBEH, B.; KARAMAN, R. **Resistance of Gram-negative bacteria to current antibacterial agents and approaches to resolve it.** Molecules, Basel, v. 25, n. 6, p. 1340, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25061340>

BURLEC, A. F. *et al.* **Overview of metal nanoparticles synthesis and biomedical applications.** Pharmaceuticals, Basel, v. 16, p. 1410, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph16101410>

CHANDRAKER, S. K. *et al.* **Plant-mediated synthesis of silver nanoparticles.** Nano Express, Bristol, v. 2, 022008, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/2632-959X/ac0355>

CHOI, S. *et al.* **Antibacterial silver coating via aerosol deposition.** International Journal of Implant Dentistry, Berlin, v. 9, p. 24, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40729-023-00488-w>

DAI, J.; MUMPER, R. J. **Plant phenolics: extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties.** Molecules, Basel, v. 15, p. 7313–7352, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules15107313>

DAKAL, T. C. *et al.* **Mechanistic basis of antimicrobial actions of silver nanoparticles.** *Frontiers in Microbiology*, Lausanne, v. 7, p. 1831, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01831>

DASHORA, A.; RATHORE, K.; RAJ, S.; SHARMA, K. **Synthesis of silver nanoparticles employing *Polyalthia longifolia* leaf extract and antifungal activity.** *Biochemistry and Biophysics Reports*, Amsterdam, v. 31, 101320, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2022.101320>

DOMINGOS, R. F. *et al.* **Characterizing manufactured nanoparticles in the environment: multimethod determination of particle sizes.** *Environmental Science & Technology*, Washington, v. 43, p. 7277–7284, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1021/es900249m>

DHIR, R. *et al.* **Plant-mediated synthesis of silver nanoparticles: unlocking their pharmacological potential – a comprehensive review.** *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Lausanne, v. 11, p. 1324805, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1324805>.

DURÁN, Nelson *et al.* **Efeito antibacteriano de nanopartículas de prata produzidas por processo fúngico em tecidos têxteis e seu tratamento de efluentes.** *Journal Of Biomedical Nanotechnology*, [SL], v. 3, n. 2, p. 203-208, 1 jun. 2007. American Scientific Publishers. <http://dx.doi.org/10.1166/jbn.2007.022>.

EKER, F. *et al.* **Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts.** *International Journal of Molecular Sciences*, Basel, v. 26, p. 6222, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms26136222>

EKER, R.; YILMAZ, E.; DEMIR, M. **Green synthesis of silver nanoparticles and characterization via SEM–EDX analysis.** *Nanomaterials*, Basel, v. 14, p. 1618, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/14/20/1618>

EMAMI, S. A. *et al.* **Inhibitory activity of eleven *Artemisia* species from Iran against *Leishmania major* parasites.** Iranian Journal of Basic Medical Sciences, Mashhad, v. 15, n. 2, p. 807–811, 2012.

EVANOFF, D. D.; CHUMANOV, G. **Synthesis and optical properties of silver nanoparticles.** ChemPhysChem, Weinheim, v. 6, p. 1221–1231, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/cphc.200500113>

FAHIM, M. *et al.* **Green synthesis of silver nanoparticles: a comprehensive review of methods, influencing factors, and applications.** JCIS Open, Amsterdam, v. 16, 100125, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jciso.2024.100125>

FERDOUS, Z.; NEMMAR, A. **Health impact of silver nanoparticles: biodistribution and toxicity.** International Journal of Molecular Sciences, Basel, v. 21, p. 2375, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21072375>

FERREIRA, J. F. S. *et al.* **Flavonoids from *Artemisia annua* L. as antioxidants and their potential synergism with artemisinin against malaria and cancer.** Molecules, Basel, v. 15, n. 5, p. 3135–3170, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules15053135>

FIAMEGOS, Y. C. *et al.* **Antimicrobial and efflux pump inhibitory activity of caffeoylquinic acids from *Artemisia absinthium* against Gram-positive pathogenic bacteria.** PLoS One, San Francisco, v. 6, e18127, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018127>

FILIPE, V.; HAWES, A.; JISKOOT, W. **Critical evaluation of nanoparticle tracking analysis (NTA).** Pharmaceutical Research, New York, v. 27, p. 796–810, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11095-010-0073-2>

FLIEGER, J. *et al.* **Green synthesis of silver nanoparticles using natural extracts.** Molecules, Basel, v. 26, p. 4986, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26164986>

GOLDSTEIN, J. *et al.* **Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis**. 4. ed. New York: Springer, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>

GRELA, E.; KOZŁOWSKA, J.; GRABOWIECKA, A. **Current methodology of MTT assay in bacteria – review**. *Acta Histochemica*, Jena, v. 120, p. 303–311, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acthis.2018.03.007>

GRIFFITHS, D.; CARNELL-MORRIS, P.; WRIGHT, M. **Nanoparticle tracking analysis for multiparameter characterization**. In: *Methods in Molecular Biology*. New York: Humana Press, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0319-2_22

HAJI, B. S. *et al.* ***Citrullus colocynthis* fruit extract mediated green synthesis of silver nanoparticles: the impact of pH, temperature, and silver nitrate concentration**. *E-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, Tokyo, v. 21, p. 61–71, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1380/ejssnt.2023-010>

HARBORNE, J. B. **Phytochemical methods: a guide to modern techniques of plant analysis**. 3. ed. London: Chapman & Hall, 1998.

HASSANPOUR, S. H.; DOROUDI, A. **Review of antioxidant potential of flavonoids**. *Avicenna Journal of Phytomedicine*, Mashhad, v. 13, 2023. DOI: <https://doi.org/10.22038/ajp.2023.21774>

HBIKA, A. *et al.* ***Artemisia absinthium* L. aqueous and ethyl acetate extracts: antioxidant effect and potential activity *in vitro* and *in vivo* against pancreatic α -amylase and intestinal α -glucosidase**. *Pharmaceutics*, Basel, v. 14, n. 3, p. 481, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14030481>.

IGNAT, I.; VOLF, I.; POPA, V. I. **Review of methods for characterization of polyphenolic compounds**. *Food Chemistry*, Amsterdam, v. 126, p. 1821–1835, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.026>

IRAVANI, S. **Green synthesis of metal nanoparticles using plants.** Green Chemistry, Cambridge, v. 13, p. 2638–2650, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1039/C1GC15386B>

ISAH, T. **Stress and defense responses in plant secondary metabolites production.** Biological Research, Santiago, v. 52, p. 39, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40659-019-0246-3>

JANGID, H. *et al.* **Biomedical applications of silver nanoparticles.** Frontiers in Pharmacology, Lausanne, v. 15, 1438227, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1438227>

JARDIM ETNOBOTÂNICO. **Absinto (losna) – *Artemisia absinthium*.** Disponível em: <https://www.jardimetnobotanico.com.br/produtos/absinto-losna-artemisia-absinthium>. Acesso em: 14 mar. 2026.

JEEVANANDAM, J. *et al.* **Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations.** Beilstein Journal of Nanotechnology, Frankfurt, v. 9, p. 1050–1074, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.98>

JOUDEH, N.; LINKE, D. **Nanoparticle classification and physicochemical properties.** Journal of Nanobiotechnology, London, v. 20, p. 262, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01477-8>

KAABIPOUR, S.; HEMMATI, S. **A review on the green and sustainable synthesis of silver nanoparticles and one-dimensional silver nanostructures.** Beilstein Journal of Nanotechnology, Frankfurt, v. 12, p. 102–136, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3762/bjnano.12.9>

KALANTARI, K. *et al.* **Wound dressings functionalized with silver nanoparticles.** Nanoscale, Cambridge, v.12, p. 2268-2291, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9NR08234D>

KARABEGOVIĆ, I. *et al.* **Antioxidant and antimicrobial activity of *Artemisia extracts***. Chinese Journal of Chemical Engineering, Amsterdam, v. 19, p. 504–519, 2011. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(11\)60013-X](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(11)60013-X)

KARAMI, F. *et al.* **Biological activities of *Artemisia absinthium***. BMC Complementary Medicine and Therapies, London, v. 23, p. 372, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12906-023-04121-6>.

KEERTHIRATHNA, L. R. *et al.* **Green synthesis of silver nanoparticles using polysaccharides extracted from *Chnoospora minima***. Biology, Basel, v. 14, p. 904, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology14070904>

KELLY, K. L. *et al.* **Optical properties of metal nanoparticles**. The Journal of Physical Chemistry B, Washington, v. 107, p. 668–677, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp026731y>.

KHALIFA, H. O. *et al.* **Silver nanoparticles as next-generation antimicrobial agents: mechanisms, challenges, and innovations against multidrug-resistant bacteria**. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, Lausanne, v. 15, p. 1599113, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fcimb.2025.1599113>.

KHALIL, M. M. H. *et al.* **Green synthesis of silver nanoparticles using olive leaf extract**. Arabian Journal of Chemistry, Amsterdam, v. 7, p. 1131–1139, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.04.007>.

KHATOON, N. *et al.* **Green synthesized silver nanoparticles from *Quercus incana* and their environmental applications**. Journal of Environmental Chemical Engineering, Amsterdam, v. 12, p. 110345, 2024.

KOSAKOWSKA, O. *et al.* **Intraspecific variability of wormwood (*Artemisia absinthium* L.) occurring in Poland in respect of developmental and chemical traits**. Molecules, Basel, v. 30, n. 14, p. 2915, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules30142915>.

KUMAR, V.; YADAV, S. K. **Plant-mediated synthesis of silver and gold nanoparticles and their applications.** Journal of Chemical Technology & Biotechnology, Hoboken, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.2023>.

LAKHANI, K. G. *et al.* **Plant metabolite-mediated nanoparticle synthesis: sustainable applications in horticultural crops.** Frontiers in Nanotechnology, Lausanne, v. 7, p. 1545413, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnano.2025.1545413>.

LEE, Y. J. *et al.* **Polyphenol composition and antioxidant activity from the vegetable plant *Artemisia absinthium* L.** Australian Journal of Crop Science, Lismore, v. 7, n. 12, p. 1921–1926, 2013.

LIAO, C.; LI, Y.; TJONG, S. C. **Bactericidal and cytotoxic properties of silver nanoparticles.** International Journal of Molecular Sciences, Basel, v. 20, n. 2, p. 449, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20020449>.

LINK, S.; EL-SAYED, M. A. **Shape and size dependence of radiative, non-radiative and photothermal properties of gold nanocrystals.** International Reviews in Physical Chemistry, London, v. 19, n. 3, p. 409–453, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1080/01442350050034180>.

LIU, Z. *et al.* **New evidence for *Artemisia absinthium* as an alternative to classical antibiotics: chemical analysis of phenolic compounds, screening for antimicrobial activity and *in vivo* toxicity.** International Journal of Molecular Sciences, Basel, v. 24, n. 15, p. 12044, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms241512044>.

LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. **Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas.** Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2002. p. 138–139.

MARSLIN, G. *et al.* **Secondary metabolites in the green synthesis of metallic nanoparticles.** Materials, Basel, v. 11, p. 940, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11060940>.

MASHWANI, Z. U. R. *et al.* **Applications of plant terpenoids in the synthesis of colloidal silver nanoparticles.** *Advances in Colloid and Interface Science*, Amsterdam, v. 234, p. 132–141, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.04.008>.

MATOS, F. J. A. **Introdução à fitoquímica experimental.** 3. ed. Fortaleza: Edições UFC, 2009.

MIRANDA, A. *et al.* **pH alteration in plant-mediated green synthesis and its resultant impact on antimicrobial properties of silver nanoparticles (AgNPs).** *Antibiotics*, Basel, v. 11, n. 11, p. 1592, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/antibiotics11111592>.

MITCHELL, M. J. *et al.* **Engineering precision nanoparticles for drug delivery.** *Nature Reviews Drug Discovery*, London, v. 20, p. 101–124, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41573-020-0090-8>.

MITTAL, A. K.; CHISTI, Y.; BANERJEE, U. C. **Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts.** *Biotechnology Advances*, Oxford, v. 31, p. 346–356, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.01.003>

MOGHADDAM, A. B. *et al.* **Nanoparticles biosynthesized by fungi and plants: recent literature review.** *Molecules*, Basel, v. 20, p. 16540–16565, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules200916540>.

MOORE, B. D. *et al.* **Explaining intraspecific diversity in plant secondary metabolites in an ecological context.** *New Phytologist*, London, v. 201, n. 3, p. 733–750, 2014.

MOURDIKOU DIS, S.; PALLARES, R. M.; THANH, N. T. K. **Characterization techniques for nanoparticles: comparison and complementarity upon studying nanoparticle properties.** *Nanoscale*, Cambridge, v. 10, p. 12871–12934, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1039/C8NR02278J>.

MURRAY, C. J. L. *et al.* **Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis.** The Lancet, London, v. 399, p. 629–655, 2022. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02724-0).

MUSA, W. J. A. *et al.* **Evaluation of polyphenolic content and antioxidant activity using DPPH method.** Natural Life Sciences Communications, 2025. DOI: <https://doi.org/10.12982/NLSC.2025.022>.

MUSTAPHA, T. *et al.* **A review on plants and microorganisms mediated synthesis of silver nanoparticles and their applications.** International Journal of Environmental Research and Public Health, Basel, v. 19, p. 674, 2022.

PALADINI, F. *et al.* **Nanotechnology-based approaches against antimicrobial resistance.** Nanomaterials, Basel, v. 15, p. 1405, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano15181405>.

PANDEY, S. *et al.* **Fast and highly efficient catalytic degradation of dyes using carrageenan stabilized silver nanoparticles nanocatalyst.** Carbohydrate Polymers, Amsterdam, v. 230, p. 115597, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115597>.

PIRTARIGHAT, S.; GHANNADNIA, M.; BAGHSHAHI, S. **Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts and antibacterial activity.** Journal of Nanostructure in Chemistry, Berlin, v. 9, p. 1–9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40097-018-0291-4>.

POCHAPSKI, D. J. *et al.* **Zeta potential and colloidal stability predictions for inorganic nanoparticle dispersions.** Langmuir, Washington, v. 37, p. 13379–13389, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c02056>.

RAI, M.; YADAV, A.; GADE, A. **Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials.** Biotechnology Advances, Oxford, v. 27, p. 76–83, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.002>.

RODRIGUES, A. S. *et al.* **Advances in silver nanoparticles: antimicrobial agents and mechanisms of action.** *Frontiers in Microbiology*, Lausanne, v. 15, p. 1440065, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1440065>.

SAINI, R. K.; NILE, S. H.; KEUM, Y. S. **Phytochemicals of *Artemisia* species and their biological activities.** *Food and Chemical Toxicology*, Oxford, v. 171, p. 113652, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.113652>.

SARANYA, S. *et al.* **Green synthesis of metallic nanoparticles using aqueous plant extract and their antibacterial activity.** *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, Tamil Nadu, v. 6, n. 6, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.606.214>.

SELVAM, K.; PRASATH, A. R.; ALANAZI, A. K. **A review of recent developments in green synthesis of silver nanoparticles: antioxidant and antibacterial applications.** *Microscopy Research and Technique*, Hoboken, v. 89, p. 134–147, 2026.

SHAHZADI, S. *et al.* **Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts.** *RSC Advances*, London, v. 15, p. 3858–3903, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4RA07519F>.

SHARMA, V. K.; YNGARD, R. A.; LIN, Y. **Silver nanoparticles: green synthesis and antimicrobial activities.** *Advances in Colloid and Interface Science*, Amsterdam, v. 145, p. 83–96, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.002>.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. **Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagent.** *American Journal of Enology and Viticulture*, Davis, v. 16, p. 144–158, 1965. Disponível em: <https://www.ajevonline.org/content/16/3/144>.

SULTANA, B.; ANWAR, F.; ASHRAF, M. **Effect of extraction solvent/technique on the antioxidant activity of selected medicinal plant extracts.** *Molecules*, Basel, v. 14, p. 2167–2180, 2009.

SZOPA, A.; PAWŁOWSKA, B.; EKIERT, H. ***Artemisia absinthium* L.—importance in the history of medicine, the latest advances in phytochemistry and therapeutical, cosmetological and culinary uses.** *Plants*, Basel, v. 9, n. 9, p. 1063, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9091063>.

TIAN, C. *et al.* **Investigation of antioxidant activities of luteolin, apigenin, quercetin and kaempferol.** *South African Journal of Botany*, Amsterdam, v. 137, p. 257–264, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.10.022>.

TRIFAN, A. *et al.* **Unveiling the phytochemical profile and biological potential of five *Artemisia* species.** *Antioxidants*, Basel, v. 11, n. 5, p. 1017, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox11051017>.

VANLALVENI, C. *et al.* **Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts and their antimicrobial activities: a review of recent literature.** *RSC Advances*, London, v. 11, p. 2804–2837, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0RA09941D>.

VAUTHIER, C.; BOUCHEMAL, K. **Methods for the preparation and manufacture of polymeric nanoparticles.** *Pharmaceutical Research*, New York, v. 26, n. 5, p. 1025–1058, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11095-008-9800-3>

VEIGA, A. *et al.* **Colorimetric microdilution assay: validation of a standard method for determination of MIC, IC50% and IC90% of antimicrobial compounds.** *Journal of Microbiological Methods*, Amsterdam, v. 162, p. 50–61, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2019.05.003>

VIANA, A. V. *et al.* **Potencial antimicrobiano das nanopartículas de prata estabilizadas em curcumina e extrato de folhas de cajueiro (*Anacardium occidentale* L.).** *Research, Society and Development*, Vargem Grande Paulista, v. 10, n. 9, e18364918364, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i9.18364>

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **World health statistics 2023: monitoring health for the SDGs.** Geneva: WHO, 2023. Disponível em: <https://www.who.int/data/gho/publications/world-health-statistics>.

XIN, X. *et al.* **Green synthesis of silver nanoparticles and their antibacterial effects.** *Frontiers in Chemical Engineering*, Lausanne, v. 4, art. 941240, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fceng.2022.941240>.

YANG, X. *et al.* **Gold nanomaterials at work in biomedicine.** *Chemical Reviews*, Washington, v. 115, p. 10410–10488, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00193>.

ZAHOOR, M. *et al.* **A review on silver nanoparticles:** classification, various methods of synthesis, and their potential roles in biomedical applications and water treatment. *Water*, Basel, v. 13, n. 16, art. 2216, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13162216>.

ZHANG, Y. *et al.* **Silver nanocomposite hydrogels for infected wound healing.** *Journal of Nanobiotechnology*, London, v. 21, p. 435, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12951-023-02209-2>.