



Síntese de Nanopartículas de Prata Mediada pelo Óleo Essencial de Piper Divaricatum

Synthesis of Silver Nanoparticles Mediated by Piper Divaricatum Essential Oil

Caroline Pena Dias

Universidade Federal do Pará - UFPA, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais Ananindeua-PA

Ana Áurea Barreto Maia

Universidade Federal do Pará - UFPA, Faculdade de Engenharia Química Belém-PA

Julia Alves Rodrigues

Universidade Federal do Pará - UFPA, Grupo de Engenharia de Processos da Amazônia Belém - PA

Bruno Marques Viegas

Universidade Federal do Pará - UFPA, Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Belém-PA

José Antônio da Silva Souza

Universidade Federal do Pará - UFPA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia. Belém-PA

Emanuel Negrão Macêdo

Universidade Federal do Pará - UFPA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Belém-PA

Carlos Alberto Brito da Silva Jr

Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais Ananindeua-PA

Alcy Favacho Ribeiro

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Química Ananindeua-PA

Marcos Vinícius da Silva Paula

Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais Ananindeua-PA.

Resumo: As nanopartículas, em especial as de prata (AgNPs), têm recebido uma grande atenção nas últimas décadas devido às suas diversas aplicações tecnológicas. Diferentes métodos têm sido propostos para a sua obtenção; contudo, a maioria destes são demorados e requerem o uso de reagentes químicos de alto custo, frequentemente tóxicos ao meio ambiente. Nesse contexto, a síntese de nanopartículas de prata por rotas verdes tem despertado um crescente interesse, impulsionada pela necessidade de processos sustentáveis e de baixo impacto ambiental. Entre as alternativas, os óleos essenciais, ricos em compostos bioativos, destacam-se por atuarem simultaneamente como agentes redutores e estabilizantes naturais nos processos de síntese. Assim, o presente estudo teve como objetivo sintetizar nanopartículas de prata, utilizando o óleo essencial da espécie *Piper divaricatum* como agente redutor e estabilizante dos íons metálicos. O óleo essencial foi caracterizado por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM), o qual identificou o metil-eugenol e o eugenol como os principais constituintes. A síntese foi realizada com diferentes volumes do óleo essencial (1, 2, 3 e 4 mL), utilizando o nitrato de prata (AgNO_3) como o precursor. As formulações obtidas foram caracterizadas por espectroscopia na região do ultravioleta visível (UV-Vis) ao longo de 120 dias de armazenamento, sendo observadas

intensidades máximas da banda de ressonância plasmônica de superfície (SPR) entre 400 e 500 nm, confirmando a formação das AgNPs. Os resultados demonstraram a viabilidade da síntese verde, indicando o óleo essencial de *Piper divaricatum* como uma matriz eficiente, de baixo custo e ambientalmente sustentável, representando uma alternativa promissora aos agentes redutores convencionais.

Palavras-chave: nanopartículas de prata; óleo essencial; síntese verde.

Abstract: Nanoparticles, particularly silver nanoparticles (AgNPs), have received considerable attention in recent decades due to their diverse technological applications. Various methods have been proposed for their production; however, most of these are time-consuming and require the use of expensive chemical reagents, often toxic to the environment. In this context, the synthesis of silver nanoparticles via green routes has generated growing interest, driven by the need for sustainable processes with low environmental impact. Among the alternatives, essential oils, rich in bioactive compounds, stand out for their simultaneous action as natural reducing and stabilizing agents in the synthesis processes. Therefore, the present study aimed to synthesize silver nanoparticles using the essential oil of the *Piper divaricatum* species as a reducing and stabilizing agent for metal ions. The essential oil was characterized by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), which identified methyl eugenol and eugenol as the main constituents. The synthesis was performed with different volumes of essential oil (1, 2, 3, and 4 mL), using silver nitrate (AgNO_3) as the precursor. The obtained formulations were characterized by ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy over 120 days of storage, with maximum intensities of the surface plasmon resonance (SPR) band between 400 and 500 nm being observed, confirming the formation of AgNPs. The results demonstrated the feasibility of green synthesis, indicating *Piper divaricatum* essential oil as an efficient, low-cost, and environmentally sustainable matrix, representing a promising alternative to conventional reducing agents.

Keywords: silver nanoparticles; essential oil; green synthesis.

INTRODUÇÃO

A nanotecnologia é uma área de amplo crescimento e um dos aspectos mais relevantes para a ciência dos materiais (Zakeri *et al.*, 2021; Selvam *et al.*, 2025). A abordagem principal deste campo de pesquisa envolve o desenvolvimento, a síntese e a modificação de partículas para dimensões em nanoescala (Selvam *et al.*, 2025). O avanço da nanociência e da nanotecnologia permitiu que diversos nanomateriais fossem projetados (Hassan *et al.*, 2022). O tamanho, o formato e a química da superfície desses materiais podem ser criados para melhorar a eficiência das invenções às quais são incorporados (Ang *et al.*, 2025; Sana *et al.*, 2021).

Entre os nanomateriais, as nanopartículas metálicas, especialmente as de prata (AgNPs) surgiram como um grande campo de interesse para pesquisadores, pois a modificação de sua morfologia e tamanho podem resultar em propriedades físico-químicas excepcionais como atividade óptica, catalítica, condutividade elétrica e térmica otimizada, alta atividade antimicrobiana e, até, um comportamento magnético específico (Bruna *et al.*, 2021; Ang *et al.*, 2025; Fahin *et al.*, 2024; Carrapiço *et al.*, 2025; Zinivovskaia *et al.*, 2025). Essas características promissoras tornaram as AgNPs aplicáveis a diferentes setores industriais, como nas áreas

da informática, eletrônica, biotecnologia, embalagens de alimentos e na medicina (Zinicovskaia *et al.*, 2025; Sena *et al.*, 2021; Pervaiz *et al.*, 2023; Sana *et al.*, 2021).

Tradicionalmente, as nanopartículas de prata podem ser obtidas pelos métodos físicos e químicos que, embora eficazes no desenvolvimento de nanomateriais, são geralmente caros, demorados e potencialmente tóxicos para o meio ambiente, o que reduz o seu uso em larga escala (Zakeri *et al.*, 2021; Bindhu, Sathe, Umadevi, 2015; Melo *et al.*, 2020). Diante desse cenário, a síntese verde surge como uma alternativa sustentável às sínteses convencionais, uma vez que reduz a produção de resíduos indesejáveis e, conseqüentemente, evita a poluição (Sena *et al.*, 2021; Bindhu, Sathe, Umadevi, 2015). É um método considerado economicamente viável e ecologicamente correto, fundamentado nos princípios da Química Verde, em que se empregam agentes redutores de recursos vegetais, bem como extratos de plantas e óleos essenciais (Maciel *et al.*, 2020). Em geral, essas matrizes são ricas em flavonoides, terpenos, alcaloides, fenólicos e sacarídeos, capazes de reduzir e estabilizar os íons metálicos favorecendo a formação das nanopartículas de prata (Guimarães, Amarante, Oliveira, 2021).

Na literatura, encontram-se diversos relatos sobre diferentes espécies vegetais e óleos essenciais, que são destaque por serem fonte de compostos bioativos (André *et al.*, 2018) e por apresentarem excelentes propriedades antibacterianas, antifúngicas, antivirais, antiinflamatórias e antioxidantes (Burt, 2004; Zhang *et al.*, 2021; Rehman, 2021). Dentre elas, citam-se *Origanum vulgare* (Rosa *et al.*, 2020), *Myristica fragrans* (Vilas, Philip, Mathew, 2014), *Azadirachta indica* (Nazeruddin *et al.*, 2014) *Rosmarinus officinalis* L. (Amaral *et al.*, 2019), *Syzygium aromaticum* L. (Costa *et al.*, 2011), e *Piper divaricatum* (Monteiro *et al.*, 2024).

No que se refere à espécie *Piper divaricatum*, pertencente à família Piperaceae, diversos estudos reportam inúmeros benefícios e aplicações do seu óleo essencial, incluindo atividades antioxidantes, bactericidas e fungicidas (Souza *et al.*, 2019; Monteiro *et al.*, 2024). No entanto, até o momento, não há relatos sobre sua utilização na produção de nanopartículas. Assim, o presente estudo teve como objetivo realizar a síntese de nanopartículas de prata mediada pelo óleo essencial de *Piper divaricatum*, investigando sua atuação como agente redutor e estabilizante natural no contexto da síntese verde.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram: nitrato de prata P.A. (AgNO₃) e acetona 99,5% P.A (C₃H₆O), adquiridos da Neon Comercial; hidróxido de sódio (NaOH), obtido da Qhemis; e água destilada, produzida no Laboratório de Química da Universidade Federal do Pará-Campus Universitário de Ananindeua (LabQuím/UFPA).

Coleta e Processamento do Material Botânico

A espécie *Piper divaricatum* foi coletada na Cidade Universitária Prof. José da Silveira Netto, no campus Guamá da Universidade Federal do Pará (UFPA), seguindo as técnicas descritas por Rotta, Carvalho e Zonta (2008). As folhas e ramos finos foram dispostos em bandejas e secos em estufa a 40 °C, com ventilação constante, por cinco dias. Após a secagem, o material foi triturado em moinho de facas e acondicionado adequadamente para a etapa de extração.

Extração do Óleo Essencial de *Piper divaricatum*

A extração do óleo essencial foi realizada por arraste a vapor, utilizando-se um aparelho de vidro do tipo Clevenger, acoplado a um sistema de refrigeração, que manteve a temperatura da água de condensação entre 10 e 15 °C, por um período contínuo de 3 horas. O óleo obtido foi centrifugado por 4 minutos a 4.000 rpm (Centrilab, 80-2B), desidratado com sulfato de sódio anidro (Na₂SO₄) e centrifugado novamente sob as mesmas condições. Em seguida, foi armazenado em frascos de vidro âmbar, na ausência de oxigênio, devidamente etiquetado e conservado sob refrigeração (5-10 °C).

Composição do Óleo Essencial por Cromatografia Gasosa Acoplada à Espectrometria de Massas (CG-EM)

A composição química do óleo essencial foi investigada por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG/EM) em sistema (Shimadzu Qp Plus-2010, Tóquio, Japão) equipado com coluna capilar de sílica DB-5MS (30 m x 0,25 mm; 0,25 µm de espessura do filme) nas seguintes condições operacionais: gás de arraste: hélio, em velocidade linear de 36,5 cm·s⁻¹; tipo de injeção: sem divisão de fluxo (2 µL de óleo em 0,5 ml de hexano); temperatura do injetor: 250°C, programa de temperatura da fonte de íons e outras partes 220°C. O filtro de quadrupolo varreu na faixa de 39 a 500 daltons.s⁻¹. A ionização foi obtida pela técnica de impacto eletrônico a 70 eV. A identificação dos componentes voláteis foi baseada no Índice de retenção Linear (IR), e no padrão de fragmentação observado nos espectros de massas por comparação destes com amostras autênticas existentes nas bibliotecas do sistema de dados (NIST-11, FFNSC-2) e da literatura (Adams, 2007). Os IR foram obtidos utilizando a série homóloga de n-alcanos.

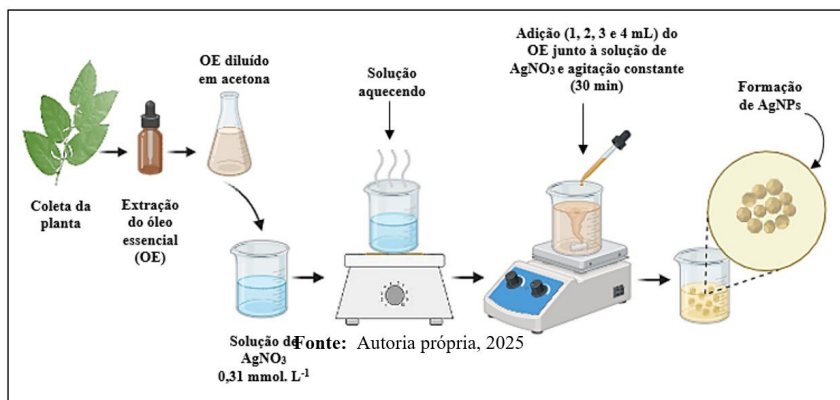
Síntese de AgNPs

A síntese de AgNPs foi realizada pelo método verde conforme a metodologia descrita por Maciel *et al.* (2020), com modificações. Para a síntese, o óleo essencial foi previamente diluído em acetona na proporção de 0,5:85 (v/v). Em seguida, preparou-se uma solução de nitrato de prata (AgNO₃) na concentração de 0,31 mmol. L⁻¹, com pH ajustado para 8, utilizando hidróxido de sódio (NaOH) a 0,1 mol. L⁻¹.

Na sequência, foram transferidas quatro alíquotas de 30 mL da solução de AgNO_3 para uma chapa de aquecimento (THELGA), onde permaneceram até atingir o ponto de ebulição (100°C). Ainda quentes, as soluções foram levadas rapidamente a um agitador magnético (INTLLAB), no qual foram adicionados, gota a gota, diferentes volumes do óleo essencial (1, 2, 3 e 4 mL, respectivamente), para cada amostra. As soluções permaneceram sob agitação vigorosa por 30 minutos, observando-se a mudança de coloração de incolor para amarelo levemente acastanhado, indicando a formação de AgNPs. Ao final do processo, as amostras foram acondicionadas em frascos envoltos em papel alumínio, a fim de evitar a degradação pela luz, e armazenadas em ambiente refrigerado ($\pm 6^\circ\text{C}$). A Figura 1 ilustra as etapas realizadas no processo de síntese.

Caracterização de AgNPs por Espectroscopia na Região do Ultravioleta Visível (UV-Vis)

Figura 1– Sequência experimental utilizada no processo de síntese.



Fonte: autoria própria, 2025.

As amostras produzidas foram caracterizadas por espectroscopia na região do ultravioleta-visível (UV-Vis), por meio de um espectrofotômetro (SHIMADZU, modelo UV-1800, Tóquio, Japão), operando em modo de varredura, na faixa de comprimento de onda de 300 a 800 nm, utilizando água destilada como branco. As leituras foram realizadas à temperatura ambiente ($25 \pm 2^\circ\text{C}$), em cubetas de quartzo de caminho óptico de 1 cm, com o auxílio do software (UVProbe 2.43).

As formulações, preparadas com diferentes volumes de óleo essencial, foram analisadas individualmente ao longo dos tempos de armazenamento (0, 30, 60, 90 e 120 dias), a fim de verificar a estabilidade das nanopartículas quanto à tendência agregativa. As codificações atribuídas seguiram o modelo $\text{AgNPs}(\text{x})\text{OE-t}(\text{y})$, em que x representa o volume de óleo essencial adicionado e y o tempo de análise, conforme descrito na Seção 3.3.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Composição Química do Óleo Essencial

A composição química do óleo essencial da espécie *Piper divaricatum*, obtida por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG/EM), está apresentada na Tabela 1. A análise permitiu a identificação, quantificação e classificação dos constituintes químicos presentes no óleo essencial.

Tabela 1– Composição química do óleo essencial de *Piper divaricatum*.

TR	IR	Constituinte	Conc. (%)
10.500	1048	E - beta - Ocimeno	2.01
20.967	1289	Safrol	1.72
23.192	1339	Delta - Elemeno	0.35
24.267	1363	Eugenol	24.74
24.958	1378	alfa - Copaeno	0.26
25.700	1395	beta - Elemeno	6.56
26.383	1411	metil - Eugenol	38.17
26.950	1424	E - Cariofileno	8.34
27.317	1433	Beta - Copaeno	0.22
28.342	1457	alfa - Humuleno	0.28
29.325	1480	gama - Muuroleno	0.24
29.575	1486	Germacreno D	6.74
29.758	1490	Valenceno	0.66
30.200	1500	Biciclogermacreno	4.53
31.242	1526	delta - Cadineno	0.57
31.417	1530	Acetato de Eugenil	4.61

Onde: TR= Tempo de Retenção, IR= Índice de Retenção, Conc= Concentração do composto em %

Fonte: autoria própria, 2025

Foram identificados 16 compostos, sendo os majoritários pertencentes à classe dos fenilpropanóides. Os resultados revelaram uma composição química diversificada, com destaque para o metil-eugenol ($C_{11}H_{14}O_2$ -38,17%) e o eugenol ($C_{10}H_{12}O_2$ -24,74%), que juntos corresponderam a 62,91% da composição total do óleo. A predominância desses dois compostos também foi observada em estudos anteriores, como os realizados por Silva *et al.* (2014), Souza *et al.* (2019) e Monteiro *et al.* (2024), que relatam o metil-eugenol e o eugenol como constituintes mais abundantes do óleo essencial de *Piper divaricatum*.

O eugenol, segundo composto majoritário, é um fenol amplamente relatado na literatura por suas diversas propriedades antioxidantes, analgésicas, anti-inflamatórias e antibacterianas (Ulanowska, Olas, 2021; Wu *et al.*, 2025). Sua estrutura

contém grupos hidroxila (OH), os quais desempenham um papel fundamental na redução de íons metálicos, favorecendo a formação de nanopartículas de prata (Gimena- Muñoz *et al.*, 2023; Maciel *et al.*, 2020).

Formação de AgNPs

A formação das nanopartículas de prata (AgNPs) ocorreu por meio da redução de íons Ag^+ em prata metálica (Ag^0) da solução de nitrato de prata (AgNO_3) a partir da adição do óleo essencial de *Piper divaricatum*. (Maciel *et al.*, 2019). Os óleos essenciais são substâncias utilizadas como agentes redutores naturais para os íons metálicos, em virtude da sua complexa variedade de biomoléculas redutoras (Guimarães, Amarante, Oliveira, 2021). Dessa forma, alguns grupos funcionais presentes nos óleos essenciais podem interagir com diferentes íons, formando ligações que contribuem para o processo de nucleação (aglomeração), originando assim as nanopartículas (Guimarães, Amarante, Oliveira, 2021).

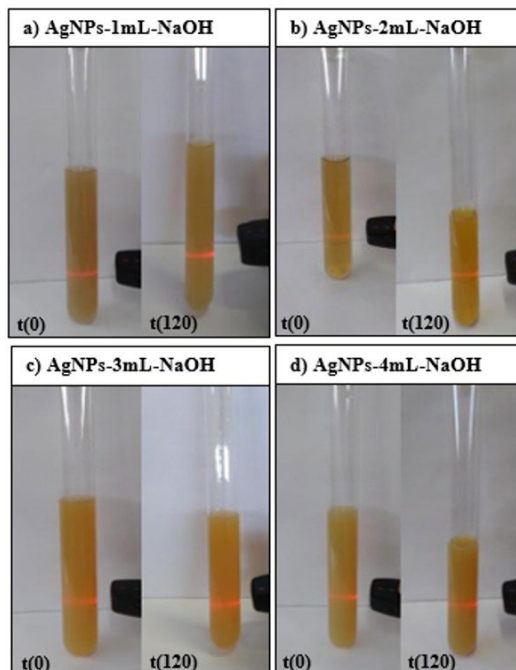
Conforme mencionado anteriormente, o óleo essencial de *Piper divaricatum*, possui um percentual significativo de eugenol em sua composição, e esse composto quando misturado a solução precursora, age como agente redutor, por meio da doação de elétrons da sua estrutura, (Ahmad *et al.*, 2025) o que se tornou evidente após a mudança no aspecto visual das soluções que passaram de incolor para amarelo-acastanhado (Maciel *et al.*, 2019).

Vilas, Philip e Mathew (2016) ao sintetizarem nanocristais de prata a partir da adição do óleo essencial das folhas de *Coleus aromaticus*, observaram o surgimento de uma coloração amarelo-claro na solução precursora. De maneira semelhante, Bidan, Al-Ali (2024) relataram que, durante a avaliação do potencial terapêutico antibacteriano e anticâncer com o uso de nanopartículas de prata, a cor da solução foi alterada de verde para acinzentado após a redução e estabilização proporcionadas pelo óleo essencial de *Jasminum sambac*.

Aspectos semelhantes também foram analisados no estudo de Selvam *et al.* (2025) que observaram a mudança de cor da solução de incolor para turva durante a redução dos íons de prata. Segundo os autores, este fenômeno é atribuído a ativação da vibração da ressonância plasmônica de superfície (SPR), característica comumente observada em nanopartículas de prata (Bidan, Al-Ali, 2024; Vilas, Philip e Mathew, 2016; Selvam *et al.*, 2025).

Após a síntese (tempo zero, t-0) e ao longo de 120 dias de armazenamento, foi retroprojetado um feixe de luz por meio de um laser, nas quatro amostras de nanopartículas de prata produzidas com os diferentes volumes do óleo essencial. Observou-se que o feixe luminoso atravessou com facilidade as amostras durante todo o período avaliado, como mostram as figuras 2 (a-d). Esse comportamento se deve ao espalhamento da luz incidente do laser pelas nanopartículas em suspensão, caracterizando o fenômeno conhecido como efeito Tyndall, típico de sistemas coloidais (Santos, Matos, Mazali, 2022; Golani, Parnaik, Phanse, 2024).

Figura 2 – Retroprojeção do feixe luminoso nas amostras de AgNPs (a-d).



Fonte: autoria própria, 2025.

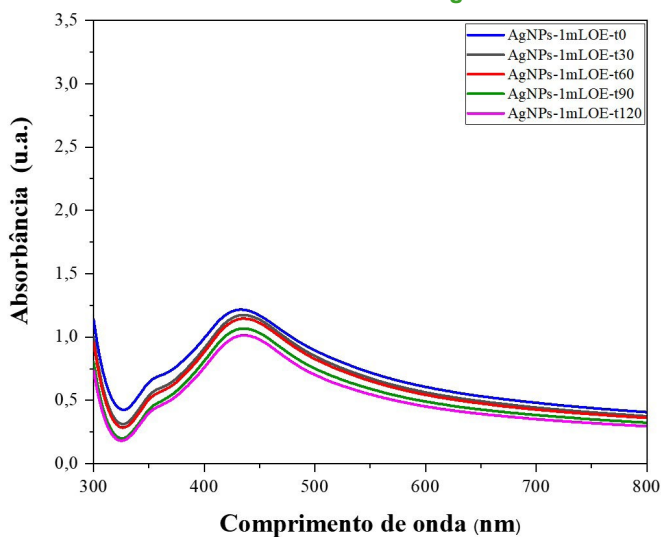
Espectroscopia UV-Vis

A análise por espectroscopia UV-Vis confirmou a formação de nanopartículas de prata (AgNPs) por meio da observação da banda plasmônica de superfície (SPR). As figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam os espectros UV-Vis das amostras obtidas com diferentes volumes de óleo essencial (1, 2, 3 e 4 mL), ao longo do período de armazenamento de 120 dias.

As bandas SPR foram identificadas entre 419 e 440 nm em todas as amostras sintetizadas, valores que estão de acordo com os valores reportados por Liaqat *et al.* (2022) e Ansari *et al.* (2023), além de estar em consonância com a literatura que indica a formação de AgNPs na faixa de 400 a 500 nm (Bamal *et al.*, 2021).

Para a amostra sintetizada com 1 mL de óleo essencial, observaram-se bandas SPR localizadas entre 433 a 436 nm nos diferentes tempos avaliados. Inicialmente, a banda apresentou uma alta intensidade e um leve alargamento no tempo zero, seguido de uma discreta redução da intensidade ao longo do armazenamento e pouca variação no comprimento de onda. Esse comportamento sugere boa estabilidade coloidal frente à aglomeração, embora o alargamento inicial possa ter indicado alguma polidispersividade entre as partículas (Maciel *et al.*, 2020; Ashraf *et al.*, 2016).

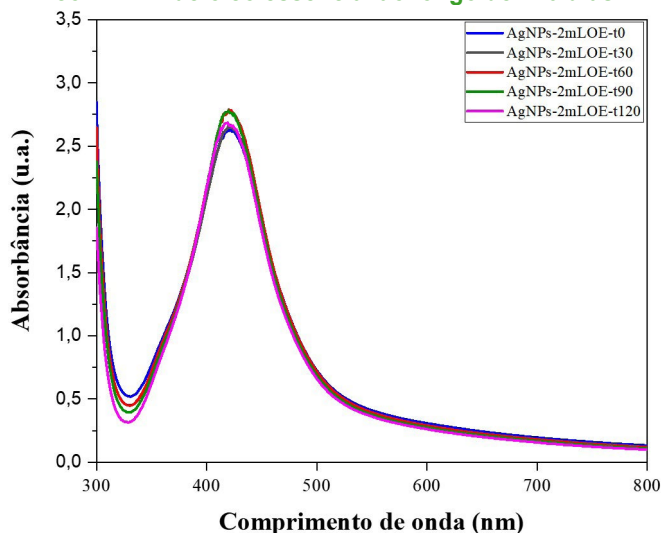
Figura 3 – Espectroscopia UV-vis para amostra de AgNPs sintetizada com 1 mL de óleo essencial ao longo de 120 dias.



Fonte: autoria própria, 2025.

A amostra obtida com 2 mL de óleo essencial apresentou bandas de absorção simétricas e estreitas, localizadas em 421 nm (t-0), 420 nm (t-30, t-60, t-90) e 419 nm (t-120). A ausência de deslocamentos significativos, associada à manutenção da intensidade, indicam maior estabilidade coloidal e maior uniformidade na distribuição do tamanho das nanopartículas, em comparação à amostra com 1 mL de óleo (Maciel *et al.*, 2020; Fahim *et al.*, 2024).

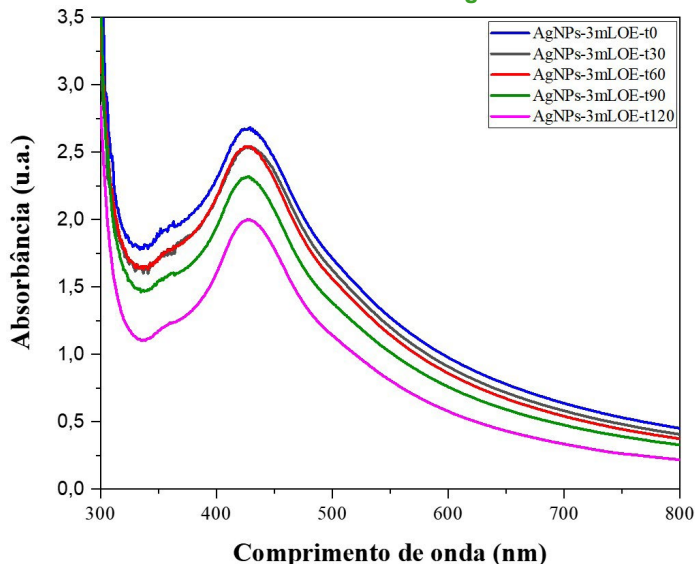
Figura 4 – Espectroscopia UV-vis para amostra de AgNPs sintetizada com 2 mL de óleo essencial ao longo de 120 dias.



Fonte: autoria própria, 2025.

Na síntese realizada com 3 mL de óleo essencial, as bandas plasmônicas apresentaram perfil simétrico e elevada intensidade no tempo zero. Observou-se um declínio gradual na intensidade ao longo dos 120 dias, o que pode estar relacionado a uma possível aglomeração ou coalescência das nanopartículas (Maciel *et al.*, 2020). Os picos de absorbância mantiveram-se estáveis em 427 a 428 nm.

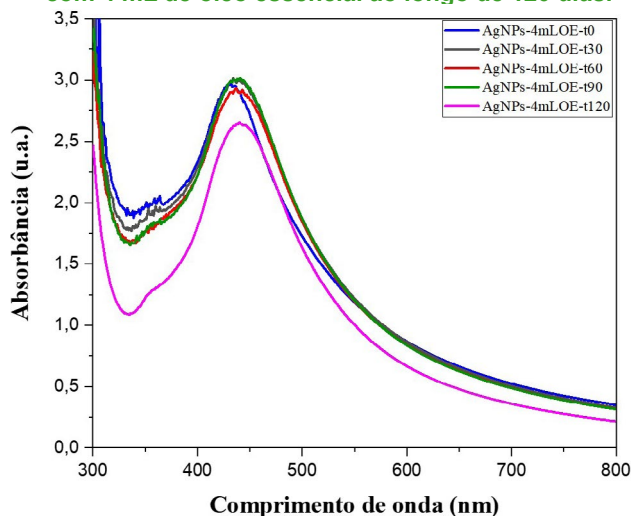
Figura 5 – Espectroscopia UV-vis para amostra de AgNPs sintetizada com 3 mL de óleo essencial ao longo de 120 dias.



Fonte: autoria própria, 2025.

Por fim, a amostra sintetizada com 4 mL de óleo essencial apresentou bandas SPR intensas, levemente alargadas, na faixa de 435 a 440 nm. Observou-se o deslocamento dos picos para menores e, posteriormente, para maiores comprimentos de onda ao longo do tempo. Esse comportamento pode ser atribuído a uma diminuição inicial no tamanho das partículas, seguida por um crescimento gradual durante o período de armazenamento (Vijayanaghavan *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2024).

Figura 6 – Espectroscopia UV-vis para amostra de AgNPs sintetizada com 4 mL de óleo essencial ao longo de 120 dias.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que o óleo essencial de *Piper divaricatum* apresentou elevada eficácia como agente redutor e estabilizante na síntese verde de nanopartículas de prata (AgNPs). O segundo composto majoritário identificado, o eugenol, desempenhou um papel fundamental na redução de Ag^+ para Ag^0 . A análise por espectroscopia UV-Vis confirmou não apenas a formação das nanopartículas, mas também revelou diferentes perfis de estabilidade coloidal ao longo dos 120 dias de armazenamento. Entre as formulações avaliadas, o volume de 2 mL apresentou o melhor desempenho, com maior estabilidade e uniformidade no tamanho das partículas, quando comparado aos volumes de 1, 3 e 4 mL, que apresentaram características como alargamento, declínio e deslocamento da banda SPR. Esses achados reforçam o potencial do óleo essencial como uma alternativa verde viável e promissora para a síntese sustentável de nanopartículas metálicas.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, M. U. *et al.* **Exploring in vitro and in silico potential inhibitory effects of eugenol and its analogues for broad range development of antibacterial drugs.** Discover Life, v. 55, n. 5, 3, 2025.
- AMARAL, G. P. *et al.* **Antibacterial and antioxidant effects of Rosmarinus officinalis L. extract and its fractions.** Journal of Traditional and Complementary Medicine, v. 9, ed. 4, p. 383-392, 2019.

ANG, P. C. *et al.* **Green synthesis of spherical and triangular silver nanoparticles by oil palm's lignin derivative.** Surfaces and Interfaces, v. 60, 2025.

ANDRÉ, W. P. P. *et al.* **Óleos essenciais e seus compostos bioativos no controle de nematoides gastrintestinais de pequenos ruminantes.** Acta Scientiae Veterinariae, v. 46, p. 1522, 2018

ANSARI, M. *et al.* **Plant mediated fabrication of silver nanoparticles, process optimization, and impact on tomato plant.** Scientific Reports, n. 18048, 2023.

ASHRAF, J. M. *et al.* **Green synthesis of silver nanoparticles and characterization of their inhibitory effects on AGEs formation using biophysical techniques.** Scientific Reports, n. 20414, 2016.

BAMAL, D. *et al.* **Silver nanoparticles biosynthesis, characterization, antimicrobial activities, applications, cytotoxicity and safety issues: An updated review.** Nanomaterials, v. 11, 2021.

BIDAN, A. K.; AL-ALI, Z. S. A. **Evaluation of cytotoxic potential of silver nanoparticles biosynthesized using essential oils of Jasminum sambac against breast cancer and bacterial cells.** 3 Biotech, v. 14, n. 227, 2024.

BHINDU, M. R.; SATHE, V. G.; UMADEVI, M. S. **SERS activities of green synthesized silver nanoparticles.** Journal of Cluster Science, v. 26, p. 1451-1461, 2015.

BRUNA, T. *et al.* **Silver nanoparticles and their antibacterial applications.** International Journal of Molecular Sciences, v. 22, 2021.

BURT, S. **Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods -a review.** International Journal of Food Microbiology, v. 94, ed. 3, p. 223-253, 2004.

CARRAPIÇO, A. *et al.* **Biosynthesis of silver-based nanoparticles: Critical assessment of antimicrobial assays and diffusion kinetics analysis.** International Biodeterioration & Biodegradation, v. 205, 2025.

COSTA, A. R. T. *et al.* **Ação do óleo essencial de Syzygium aromaticum (L.) Merr. & L. M. Perry sobre as hifas de alguns fungos fitopatogênicos.** Revista Brasileira de Plantas Medicinais, Botucatu, v. 13, n. 2, p. 240-245, 2011.

FAHIM, M. *et al.* **Green synthesis of silver nanoparticles: A comprehensive review of methods, influencing factors, and applications.** JCIS Open, v. 16, 2024.

GIMENA-MUÑOZ, P. F. *et al.* **A review on reinforcements and additives in starch-based composites for food packaging.** Polymer, v. 15, 2023.

GOLANI, M.; PARNAIC, D.; PHANSE, N. **Comparative analysis of the antibacterial activity of silver nanoparticles synthesized from leaf extracts of**

Ocimum sanctum, Coriandrum sativum, Hemidesmus indicus, and Tinospora cordifolia. Brazilian Journal of Science, v. 4, p. 12-22, 2024.

GUIMARÃES, M. L.; AMARANTE, J. F.; OLIVEIRA, H. P. **A importância dos óleos essenciais na síntese verde de nanopartículas metálicas.** Revista Matéria, v. 26, n. 3, 2021.

HASSAN, H. *et al.* **Gold nanomaterials-The golden approach from synthesis to applications.** Materials Science for Energy Technologies, v. 5, p. 375-390, 2022.

LIAQAT, N. *et al.* **Green synthesized silver nanoparticles: Optimization, characterization, antimicrobial activity, and cytotoxicity study by hemolysis assay.** Frontiers in Chemistry, 29 ago. 2022.

MACIEL, M. V. D. B. *et al.* **Syzygium aromaticum L. (Clove) essential oil as a reducing agent for the green synthesis of silver nanoparticles.** Open Journal of Applied Sciences, v. 9, n. 2, p. 45-54, 2019.

MACIEL, M. V. O. B. *et al.* **Green synthesis, características and antimicrobial activity of silver nanoparticles mediated by essential oils as reducing agents.** Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, Santa Catarina, v. 28, 2020.

MELO, A. P. Z. *et al.* **Antibacterial activity, morphology, and physicochemical stability of biosynthesized silver nanoparticles using thyme (Thymus vulgaris) essential oil.** Materials Research Express, v. 7, n. 1, 27 jan. 2020.

MONTEIRO, H. L. *et al.* **Investigation of the anticorrosive activity of Piper divaricatum essential oil on steel in 1 M HCl.** ACS Omega, v. 9, 29 out. 2024.

NAZERUDDIN, G. M. *et al.* **Extracellular biosynthesis of silver nanoparticles using Azadirachta indica leaf extract and its antimicrobial activity.** Journal of Alloys and Compounds, v. 583, p. 272-277, 15 jan. 2014.

PERVAIZ, S. *et al.* **Controlled size oils based green fabrication of silver nanoparticles for photocatalytic and antimicrobial application.** Antibiotics, v. 12, 22, 2023.

REHMAN, A. *et al.* **Biopolymer based nanoemulsion delivery system: An effective approach to boost the antioxidant potential of essential oil in food products.** Carbohydrate Polymers Technology and Applications, v. 2, 2021.

ROSA, C. G. *et al.* **Application in situ of zein nanocapsules loaded with Origanum vulgare Linneus and Thymus vulgaris as a preservative in bread.** Food Hydrocolloids, v. 99, 2020.

SANA, S. S. *et al.* **Recent advances in essential oils-based metal nanoparticles: A review on recent developments and biopharmaceutical applications.** Journal of Molecular Liquids, v. 333, 2021.

SANTOS, E. B.; MATOS, L. C.; MAZALIB, I. **Síntese de nanopartículas de ouro e sensoriamento colorimétrico do sulfatiazol: Uma prática experimental para aulas interdisciplinares.** Química Nova, v. 45, n. 5, p. 630-635, 2022.

SELVAM, S. *et al.* **Kaffir lime's essential oil mediated silver nanoparticles: A potential antibacterial and anticancer agent.** Inorganic Chemistry Communications, v. 173, 2025.

SENA, A. E. C. *et al.* **Síntese, caracterização e análise antimicrobiana de nanopartículas de prata utilizando extrato de Humirianthera ampla como agente redutor.** South American Journal of Basic Education, Technical and Technological, Rio Branco, v. 8, n. 2, 2021.

SILVA, J.A. *et al.* **Atividade antioxidante de Piper arboreum, Piper dilatatum e Piper divaricatum.** Rev. Bras. Pl. Med, Campinas, v. 16, n.3, supl. I, p. 700-706, 2014

Ulanowska, M.; OLAS, B. **Biological properties and prospects for the application of eugenol -A review.** International Journal of Molecular Sciences, v. 22, 2021.

VIJAYARAGHAVAN, K. *et al.* **Biomimetic synthesis of silver nanoparticles by aqueous extract of Syzygium aromaticum.** Materials Letters, v. 75, p. 33-35, 2012.

VILAS, V.; PHILIP, D.; MATHEW, J. **Catalytically and biologically active silver nanoparticles synthesized using essential oil.** Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, v. 132, p. 743-750, 2014.

VILAS, V.; PHILIP, D.; MATHEW, J. **Essential oil mediated synthesis of silver nanocrystals for environmental, anti-microbial and antioxidant applications.** Materials Science and Engineering: C, v. 61, p. 429-436, 1 abr. 2016.

WU, C. *et al.* **Green synthesis approach: Utilizing chrysanthemum extract as reducing and stabilizing agent for the fabrication of silver nanoparticles and their antimicrobial properties study.** Alexandria Engineering Journal, v. 96, p. 149-155, 2024.

WU, J. *et al.* **Antibacterial and preservation properties of eugenol/diatomite modified superamphiphobic polyurethane films with secondary slow-release microstructures.** Food Chemistry, v. 487, 30 set. 2025.

ZAKERI, Z. *et al.* **Synthesis and characterization of antibacterial silver nanoparticles using essential oils of crown imperial leaves, bulbs and petals.** Micro & Nano Letters, v. 16, p. 533-539, 2021.

ZHANG, C. *et al.* **Antioxidant, hepatoprotective and antifungal activities of black pepper (Piper nigrum L.) essential oil.** Food Chemistry, v. 346, 2021.

ZINICOVSCAIA, T. *et al.* **Enrichment of Arthrospira platensis with silver nanoparticles: Effects on nanoparticle uptake and biomass accumulation.** Algal Research, v. 91, 2025.

SOUZA, E. M. *et al.* **Rendimento e composição química do óleo essencial de Piper divaricatum em função da granulometria e método de extração.** Impactos das Tecnologias na Engenharia Química, v. 2, 2019.