



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE
PERNAMBUCO**

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM FITOPATOLOGIA**

Tese de Doutorado

**Síntese verde de nanopartículas de prata a partir do extrato
de folhas de batata doce e efeito em *Meloidogyne javanica***

Bruno Leonardo Mendes

**Recife – PE
AGOSTO DE 2023**

BRUNO LEONARDO MENDES

**SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA A PARTIR DO EXTRATO
DE FOLHAS DE BATATA DOCE E EFEITO EM *MELOIDOGYNE JAVANICA***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Fitopatologia da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Fitopatologia.

COMITÊ DE ORIENTAÇÃO:

Orientadora: Prof^a. Dr^a Elvira Maria Régis Pedrosa

Coorientadora: Prof^a Dr^a Thaís Ribeiro Santiago

**RECIFE – PE
AGOSTO – 2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M538s Mendes, Bruno Leonardo
 SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA A PARTIR DO EXTRATO DE FOLHAS DE
 BATATA-DOCE E EFEITO EM MELOIDOGYNE JAVANICA / Bruno Leonardo Mendes. - 2023.
 71 f.

 Orientadora: Elvira Maria Regis Pedrosa.
 Coorientadora: Thais Ribeiro Santiago.
 Inclui referências.

 Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em
 Fitopatologia, Recife, 2023.

 1. Biossíntese. 2. Nanotecnologia. 3. produtos naturais. 4. nematologia. 5. nanopartícula. I. Pedrosa,
 Elvira Maria Regis, orient. II. Santiago, Thais Ribeiro, coorient. III. Título

**SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA A PARTIR DO EXTRATO
DE FOLHAS DE BATATA DOCE E EFEITO EM *MELOIDOGYNE JAVANICA***

BRUNO LEONARDO MENDES

Tese defendida e aprovada pela Banca Examinadora em 14/08/2023

ORIENTADORA: PROF.^a DR.^a ELVIRA MARIA REGIS PEDROSA

EXAMINADORES:

Prof.^a Dr.^a Thaís Ribeiro Santiago – Universidade de Brasília

Dr.^a Valéria de Oliveira Faleiro – Embrapa Agrossilvipastoril

Prof.^a Dra.^a Lilian Margarete Paes Guimarães – UFRPE

Prof.^o Dr. Jonas Alberto Rios - UFRPE

RECIFE-PE

AGOSTO-2023

"A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez".

George Bernard Shaw

"Diante da vastidão do tempo e da imensidão do universo, é um imenso prazer dividir um planeta e uma época com você"

Carl Sagan

À minha família. Dedico com estima, na tentativa de diminuir a saudade depois de todos esses anos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal Rural de Pernambuco, especialmente ao Departamento de Agronomia, pelas instalações. Ao Programa de Pós-graduação em Fitopatologia, agradeço a oportunidade pela realização do doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela disponibilidade da bolsa de estudos.

À Professora Dra. Elvira Pedrosa, que orientou com bondade e sabedoria ao longo desses quatro anos e, com toda certeza, fez toda diferença na minha formação. À professora Dra. Thaís Santiago, que aceitou a coorientação em momentos decisivos e auxiliou de forma exemplar ao longo da pesquisa.

À minha família que não mede esforços no apoio incondicional e mesmo de longe vibra com cada conquista.

Ao pessoal do LAFNEMA, em especial a professora Dra. Lilian Guimarães, pela amizade e apoio, ao técnico Maurício, que sempre está disposto a ajudar e ensinar. Agradeço também aos colegas Ivis, Elves, Aline, Liany, Gabriel Elias, Gabriel, Mirella, Lunardi, Joaquim, Danielle, Vitória, René, Gabriela, Thaís, Diego, Ana Karina. Sentirei saudades dos nossos cafés da tarde superanimados. Aos que fizeram pesquisa no LAFNEMA, entre um experimento e outro, onde laços de amizade se formaram. Contem comigo sempre! Aos meus amigos que viraram ‘família’ ao longo desses anos: David, Larissa, Felipe, Jadson, Jackeline. Obrigado!

Aos docentes do PPG-Fitopatologia, que fizeram parte da minha formação.

À Clínica Fitossanitária de Pernambuco (CLIFIPE-UFRPE), ao Centro de Tecnologia e Geociências – UFPE, ao doutorando Igor do Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTag) da UFPE, à Central da Analítica do Departamento de Química Fundamental e aos Laboratórios da UnB, pela disponibilidade dos equipamentos para a caracterização das nanopartículas.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho!

Muito obrigado!!

Sumário

GENERAL ABSTRACT	10
CAPÍTULO 1	11
INTRODUÇÃO GERAL	12
1. NANOTECNOLOGIA NA AGRICULTURA	12
1.1 Nanopartículas de prata na fitopatologia	12
1.2 Nanopartículas de prata no controle de nematoides	14
1.3 Síntese verde de nanopartículas.....	14
1.4 Caracterização das nanopartículas.....	15
2. SCREENING FITOQUÍMICO DE FOLHAS DE BATATA-DOCE	16
3. NEMATOIDES DO GÊNERO <i>MELOIDOGYNE</i> Goeldi, 1887.....	16
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19
CAPÍTULO 2	31
Síntese verde e caracterização de nanopartículas de prata por extrato aquoso de folhas de batata-doce.....	31
RESUMO.....	32
ABSTRACT	33
INTRODUÇÃO.....	34
MATERIAL E MÉTODOS.....	36
Extrato da planta.....	36
Síntese das nanopartículas de prata	36
Caracterização das nanopartículas de prata	36
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
Extrato aquoso	37
Caracterização das AgNPs.....	38
UV-VIS.....	38
FT-IR	40
Características físicas: Potencial zeta, mobilidade eletroforética (DLS), cristalografia (DRX) e MET.....	41
CONCLUSÕES	44
AGRADECIMENTOS	44
REFERÊNCIAS	45
CAPÍTULO 3	50
Atividade nematicida de nanopartículas de prata sintetizadas a partir de folhas de batata-doce contra <i>Meloidogyne javanica</i> em tomateiro	50
RESUMO.....	51

ABSTRACT	52
INTRODUÇÃO.....	53
MATERIAL E MÉTODOS.....	55
Fonte de nematoides:	55
Identificação dos nematoides:	55
Fonte das nanopartículas:	55
Experimentos <i>in vitro</i>	55
Mortalidade de juvenis de segundo estágio:	55
Efeito na embriogênese - eclosão de J2:.....	56
Experimentos <i>in vivo</i>	57
Teste de toxicidade das AgNPs em tomateiro:	57
Fator de Reprodução, índice de massa de ovos e índice de número de galhas:	57
ANÁLISE ESTATÍSTICA:.....	58
RESULTADOS	58
Avaliação da atividade nematicida de diluições de nanopartícula de prata sintetizadas por extrato aquoso de folhas de batata-doce sobre <i>M. javanica</i> <i>in vitro</i> :	58
Teste de toxicidade de AgNPs biossintetizadas em tomateiros cv. Santa Cruz:	61
Avaliação da atividade nematicida de diluições de nanopartícula de prata sintetizadas por extrato aquoso de folhas de batata-doce sobre <i>M. javanica</i> <i>in vivo</i> :	61
DISCUSSÃO	63
CONCLUSÕES	64
AGRADECIMENTOS	64
REFERÊNCIAS	64
CAPÍTULO 4	70
CONCLUSÕES GERAIS.....	70

RESUMO GERAL

Nanopartículas são estruturas com dimensões na escala nanométrica, variando de 1 a 100 nanômetros, altamente versáteis e promissoras para aplicações em diversas áreas, inclusive na agricultura. A síntese verde é um método de produção sustentável que utiliza materiais naturais, como extratos de plantas, para reduzir e estabilizar as nanopartículas. Esse enfoque é de grande interesse na pesquisa científica e tecnológica, pois permite a obtenção de nanomateriais funcionais com menor impacto ambiental, que promove o desenvolvimento de tecnologias mais seguras e sustentáveis. Os fitonematoides, apesar de serem organismos microscópicos, têm um impacto significativo na agricultura e no manejo de culturas agrícolas em todo o mundo. Nematoides do gênero *Meloidogyne* possuem alto grau de polifagia e virulência, por isso é interessante compreender a biologia e ecologia destes microrganismos. Uma vez introduzidos em áreas de cultivo, a erradicação torna-se impossível e economicamente inviável, pois nem sempre os nematicidas químicos são totalmente eficazes, além de possuírem moléculas tóxicas com alto efeito residual. Com isso, é interessante a busca e entendimento de outras práticas de controle, como a inserção de nanopartículas biossintetizadas no manejo integrado de fitonematoides. Este trabalho teve como objetivos a) sintetizar nanopartículas de prata utilizando diferentes concentrações de extrato aquoso de folhas de batata-doce; b) caracterizar as nanopartículas por técnica de espelhamento de luz dinâmica (DSL), espectroscopia entre o ultravioleta e visível (UV-VIS), difração de raio-x (DRX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de transmissão (MET); c) realizar testes *in vitro* do efeito das nanopartículas de prata biossintetizadas sobre a mortalidade e embriogênese de *M. javanica*; d) realizar testes de toxidez das nanopartículas de prata biossintetizadas em plantas de tomate e d) realizar testes em casa de vegetação sobre o efeito direto das nanopartículas de prata biossintetizadas sobre o fator de reprodução (FR) e número de galhas (NG) em plantas de tomateiro inoculadas com *M. javanica*. O extrato aquoso de folhas de batata-doce sintetizou nanopartículas estáveis (potencial zeta de $-20,7 \pm 6,03$ mV), com tamanho aproximado de 43 nm, com cristalografia cúbica e formato levemente esférico. A análise UV-VIS confirmou a ressonância plasmônica de superfície de AgNPs, por meio do pico de absorbância em 450 nm. A análise de FTIR identificou os grupos químicos dos ácidos carboxílicos como possíveis responsáveis pela redução e estabilização das nanopartículas de prata. As AgNPs não apresentaram toxicidade para tomateiros. Nos testes *in vitro* as AgNPs apresentaram efeito nematicida, com mortalidade de 78% num tempo de 72 horas de exposição. A embriogênese também foi afetada pelas AgNPs, com redução gradual da eclosão de J2, a partir do aumento das concentrações das nanopartículas. Os índices de galhas (IG) e índice de massa de ovos (IMO) também foram afetados, com redução dos índices a partir da aplicação de AgNPs. No experimento *in vivo*, as AgNPs apresentaram Fator de Reprodução <1 , impedindo a multiplicação dos nematoides. A atividade nematicida das nanopartículas de prata sintetizadas a partir do extrato aquoso de folhas de batata-doce foi equivalente ao nematicida Vertimec® 18EC. Como resultado, elas podem vir a ser utilizadas no manejo integrado de *M. javanica* como uma possível alternativa ao controle químico.

Palavras-chaves: Biossíntese, *Ipomoea batatas*, *Meloidogyne javanica*, Nanotecnologia, Produtos naturais, Nematologia

GENERAL ABSTRACT

Nanoparticles are structures with nanoscale dimensions, ranging from 1 to 100 nanometers, highly versatile and promising for applications in various fields, including agriculture. Green synthesis is a sustainable production method that uses natural materials, such as plant extracts, to reduce and stabilize nanoparticles. This approach is of great interest in scientific and technological research as it allows obtaining functional nanomaterials with lower environmental impact, promoting the development of safer and more sustainable technologies. Plant-parasitic nematodes, despite being microscopic organisms, have a significant impact on agriculture and the management of agricultural crops worldwide. Nematodes of the genus *Meloidogyne* have a high degree of polyphagy and virulence, making it important to understand the biology and ecology of these microorganisms. Once introduced into cultivation areas, eradication becomes impossible and economically unfeasible, as chemical nematicides are not always fully effective and may contain toxic molecules with high residual effects. Therefore, it is interesting to explore and understand other control practices, such as the insertion of biosynthesized nanoparticles in the integrated management of plant-parasitic nematodes. This study aimed to: a) synthesize silver nanoparticles using different concentrations of sweet potato leaf aqueous extract; b) characterize the nanoparticles using dynamic light scattering (DLS), ultraviolet-visible spectroscopy (UV-VIS), X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and transmission electron microscopy (TEM); c) perform in vitro tests on the effect of biosynthesized silver nanoparticles on the mortality and embryogenesis of *M. javanica*; d) perform toxicity tests of the biosynthesized silver nanoparticles on tomato plants; and e) conduct greenhouse tests on the direct effect of biosynthesized silver nanoparticles on the reproduction factor (RF) and number of galls (NG) in tomato plants inoculated with *M. javanica*. The sweet potato leaf aqueous extract synthesized stable nanoparticles (zeta potential of -20.7 ± 6.03 mV), with an approximate size of 43 nm, exhibiting cubic crystallization and a slightly spherical shape. UV-VIS analysis confirmed the surface plasmon resonance of AgNPs, with an absorbance peak at 450 nm. FTIR analysis identified carboxylic acid groups as possible responsible for the reduction and stabilization of silver nanoparticles. The AgNPs showed no toxicity to tomato plants. In the in vitro tests, AgNPs exhibited a nematicidal effect, causing 78% mortality after 72 hours of exposure. Embryogenesis was also affected by AgNPs, with a gradual reduction in J2 hatching as nanoparticle concentrations increased. Gall index (GI) and egg mass index (EMI) were also affected, decreasing with AgNPs application. In the in vivo experiment, AgNPs exhibited a Reproduction Factor (RF) <1 , preventing nematode multiplication. The nematicidal activity of the silver nanoparticles synthesized from sweet potato leaf extract was equivalent to the nematicide Vertimec® 18EC. As a result, they may be used in the integrated management of *M. javanica* as a potential alternative to chemical control.

Keywords: Biosynthesis, *Ipomoea batatas*, *Meloidogyne javanica*, Nanotechnology, Natural Products, Nematology.

CAPÍTULO 1



Introdução Geral

SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA A PARTIR DO EXTRATO DE FOLHAS DE BATATA DOCE E EFEITO EM *MELOIDOGYNE JAVANICA*

INTRODUÇÃO GERAL

1. NANOTECNOLOGIA NA AGRICULTURA

A nanotecnologia é definida como o conhecimento científico capaz de manipular e controlar a matéria na escala de 1-100 nanômetros, com propriedades e fenômenos dependentes de tamanho e estrutura distintos daqueles em escalas menores ou maiores (Roco *et al.*, 2000). O uso de nanomateriais pelos seres humanos data de 4500 anos atrás para as mais diferentes aplicações, como por exemplo, o reforço de cerâmicas com nanofibras de amianto (Heiligtag; Niederberger, 2013) e o emprego de nanomateriais de chumbo que eram utilizados pelos egípcios como cosméticos (Walter *et al.*, 2006).

Nanopartículas são definidas como qualquer material com uma ou mais dimensões na escala entre 1-100 nanômetros (Sekhon, 2014). Essa definição é válida para qualquer nanopartícula, seja ela naturalmente ou sinteticamente formada, com diversos tamanhos, formas e estruturas. O desenvolvimento da nanotecnologia resultou na produção de nanopartículas com muitas aplicações em diferentes campos, como a indústria alimentícia, medicina, têxtil e, mais recentemente, a agricultura (Gupta *et al.*, 2015; Mohammad; Ahmad; Zaidi, 2022). Nas últimas décadas, a nanotecnologia emergiu como a sexta tecnologia revolucionária após a Revolução Industrial em meados dos anos 1700 e a Revolução Verde, nos anos 60 (NAAS, 2013), onde o setor agrícola tem obtido constantes avanços devido à integração da nanotecnologia, fornecendo novas oportunidades no campo da pesquisa científica.

Este campo inovador chamado de “agro-nanotecnologia” tem contribuído, com sucesso, em diversas áreas como genética e melhoramento de plantas (Ahmar *et al.*, 2021; Demirer *et al.* 2021), na promoção de crescimento de plantas (Tortella *et al.*, 2023), *seed priming* (Acharya *et al.*, 2020; Anand *et al.*, 2019), melhora da qualidade do solo (Sekhon, 2014), hidroponia (Witanachchi *et al.*, 2012), fertilizantes (Abdel-Aziz *et al.*, 2018; DeRosa *et al.*, 2010) e na fitopatologia (Elmer; White, 2018; Worrall *et al.*, 2018).

1.1 Nanopartículas de prata na fitopatologia

Pesquisas têm demonstrado que, para evitar um colapso econômico e social, a demanda global por produção de alimentos deverá dobrar até 2050 (Tilman *et al.*, 2011). Doenças de plantas causam perdas anuais de até 40% na produção de alimentos, ou seja,

aproximadamente 413 bilhões de dólares (Flood, 2010), colocando em risco o cenário, já preocupante, da produção cada vez maior e mais exigente em tendências sustentáveis. Com isso, a nanotecnologia se destaca como uma nova arma no arsenal contra esses crescentes desafios no manejo de doenças e na proteção das plantas (R. P. Singh *et al.*, 2021).

Apesar da medicina ser a área que mais recebe aplicações de nanopartículas, o uso no manejo de doenças de plantas é crescente. Na fitopatologia já é comum o emprego de nanopartículas de metaloides, óxidos metálicos, não metais, materiais de carbono e *quantum dots* (Elmer; White, 2018).

A prata é um elemento químico metálico, de símbolo Ag e número atômico 47, é um dos elementos mais conhecidos e utilizados pela humanidade. Devido às propriedades físicas, químicas e biológicas únicas, como alta condutividade elétrica, atividade microbiana e estabilidade físico-química, a prata tem sido utilizada em diversas aplicações na nanotecnologia (Facibeni, 2023). As nanopartículas de prata (AgNPs) foram as primeiras a serem utilizadas no manejo de doenças de plantas, em razão histórica e bem conhecida atividade antimicrobiana (Swathy *et al.*, 2014). As propriedades antimicrobianas de nanopartículas de prata são significativas para uma gama de microrganismos, como bactérias, fungos, vírus e nematoides que causam doenças em plantas (Rathi Sre *et al.*, 2015).

Nanopartículas de prata podem ser inseridas no manejo integrado de fitobactérias, como mostra a pesquisa de Santiago *et al.* (2019), que sintetizaram essas nanopartículas a partir de diferentes concentrações do extrato aquoso de folhas de tomateiro, as encapsularam com quitosana e obtiveram sucesso no controle de *Ralstonia solanacearum* [(Smith 1896) (Yabuuchi *et al.*, 1995)], em concentrações micromolares; e Masum *et al.* (2019), que em estudos *in vitro*, concluíram que nanopartículas de prata biossintetizadas por extrato de plantas do gênero *Phyllanthus*, na concentração de 20 µg/mL possuem considerável atividade contra o patógeno *Acidovorax oryzae* Schaad *et al.*, (2009), bactéria causadora da mancha-marrom do arroz, com sucesso na redução da formação de biofilme, como também na estimulação da secreção de efetores.

Também é relatado o controle de fungos fitopatogênicos por AgNPs. De acordo com Koçer; Özçimen, (2022) nanopartículas de prata biossintetizadas por extrato de macroalgas foram capazes de reduzir o crescimento micelial de *Fusarium oxysporum* (Schltdl.) W.C. Snyder & H.N. Hans, *Botrytis cinerea* Pears. e *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. & Sacc.

Também há um certo potencial do uso de AgNPs em patossistemas virais. Acredita-se que as NPs causem impacto antagônico na interação do vírus com a célula hospedeira, podendo ocorrer até mesmo a destruição da partícula viral antes da replicação (GALDIERO *et al.*, 2011). Há relato do potencial controlador de AgNPs contra Tobacco mosaic virus (Ahsan 2020).

1.2 Nanopartículas de prata no controle de nematoides

Em comparação a outros fitopatógenos, é relativamente pequeno o número de trabalhos científicos envolvendo o uso de nanopartículas na fitonematologia, contudo, nos últimos anos, os estudos vêm crescendo, especialmente com nematoides do gênero *Meloidogyne*. Ghareeb *et al.* (2022) sintetizaram nanopartículas de prata por extrato de algas e registraram, *in vitro*, mortalidade de 87,5% de *Meloidogyne incognita* após 12 horas, mostrando ser mais eficaz, na mortalidade, em comparação ao trabalho de Elkobrosy *et al.* (2023) em que a mortalidade foi de 57,62% após 48 horas de exposição de juvenis de segundo estágio (J2) de *M. incognita*, a nanopartículas de prata biossintetizadas com extrato de folhas de figueira. Esses resultados divergentes estão atrelados ao fato de que as propriedades das nanopartículas dependem, principalmente, dos atributos físicos e químicos dos extratos usados como agentes redutores.

AgNPs podem ser eficazes contra nematoides de outros gêneros. Contudo, vale ressaltar, que é pequena a quantidade de trabalhos investigando o modo de ação das NPs em nematoides.

1.3 Síntese verde de nanopartículas

A “química verde” tem sido mundialmente estudada nos últimos 20 anos (Metzger, 2003) e está diretamente ligada com o desenvolvimento sustentável, definido como o desenvolvimento que atende às necessidades do presente, que consegue ser mantido em equilíbrio para gerações futuras, sendo minimamente nocivo ao meio-ambiente e socialmente aceito (Robert *et al.*, 2005). O desenvolvimento sustentável tem pressionado as indústrias de base química e física, devido à preocupação com evidências de poluição e uso indevido de recursos naturais (Omer, 2008).

A síntese de nanopartículas metálicas por métodos químicos data aos séculos 14 e 13 a.C., quando egípcios e mesopotâmicos fabricavam vidro usando metais, o que pode ser considerado o início da era das NPs metálicas (Schaming; Remita, 2015). As nanopartículas podem ser sintetizadas por uma gama heterogênea de materiais, mas apenas alguns são

amplamente utilizados, pois o meio ambiente pode correr riscos se exposto diretamente a esses materiais, devido à grande toxidez. Nanopartículas metálicas e de óxidos metálicos, dióxido de titânio, prata, óxido de zinco, magnésio, cálcio, cobre, óxido de cobre, alumínio, níquel e ferro são as mais utilizadas nas indústrias e, conseqüentemente, acabam sendo mais estudadas em outras áreas, como a agricultura (Rastogi *et al.*, 2017).

É crescente o número de pesquisas dedicadas à síntese de nanopartículas metálicas empregando métodos químicos, físicos e de síntese verde (Horwat *et al.*, 2011). Os métodos químicos e físicos estão gradualmente sendo substituídos por métodos de síntese verde (Alsammarraie *et al.*, 2018) por serem mais caros e necessitarem de equipamentos e técnicas muito energéticas (Baruwati *et al.*, 2009; Horwat *et al.*, 2011; Saiqa Ikram, 2015) e apresentarem uso e efeito residual de compostos químicos tóxicos (Hoag *et al.*, 2009). Em contraposição, a síntese verde utiliza materiais naturais e ecológicos, que tendem à sustentabilidade, o que não apenas reduz o consumo de energia, mas também evita o uso de reagentes tóxicos e nocivos.

Atualmente, a síntese verde utiliza principalmente extratos com função de redução, como extratos de folhas (Abdelbaky *et al.*, 2022; Chirumamilla *et al.*, 2023; Lomelí-Rosales *et al.*, 2022), flores (J *et al.*, 2022; Safdar *et al.*, 2023), raízes (Francis *et al.*, 2020; Fulekar *et al.*, 2018), cascas (Anupong *et al.*, 2023; Pagar *et al.*, 2023; Sachin *et al.*, 2023) e sementes (He *et al.*, 2023) de diversas plantas, e também microrganismos como fungos, bactérias e algas (Arsiya *et al.*, 2017; Hamk *et al.*, 2023; Ogunleye *et al.*, 2023; Shobha *et al.*, 2023). Contudo, a síntese verde pode ter algumas desvantagens, como matérias-primas que podem não estar disponíveis em determinado momento (Turunc *et al.*, 2017), o tempo da síntese ser muito longo (Subramaniyam *et al.*, 2015) e a qualidade do produto final ser altamente homogêneo e formar partículas maiores que 100 nm (Gao *et al.*, 2016), porém, as pesquisas tem avançado e as metodologias têm sido cada vez mais aprimoradas.

1.4 Caracterização das nanopartículas

Nanopartículas são materiais com dimensões nanométricas (1-100 nm), que apresentam diferentes propriedades físicas, químicas e biológicas. Após a síntese, é crucial realizar a caracterização para melhor entendimento dos atributos físicos e químicos das nanopartículas, como morfologia, forma e tamanho (dynamic light scattering (DLS) e microscopia eletrônica), topografia e cristalografia (difração em Raio-x); óptica (espectroscopia entre o ultravioleta-

visível (UV-VIS), química (Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)), física (cor e pH) e elétrica (potencial zeta e índice de polidispersividade) (Kumar, Dixit 2017).

As nanopartículas são suscetíveis às condições ambientais e podem mudar seu estado de agregação, estado de oxidação e precipitação de fases secundárias em diferentes condições ambientais, onde os parâmetros físicos e químicos em diferentes ambientes influenciam a estabilidade das nanopartículas. Portanto, as nanopartículas podem se comportar de maneira diferente em diferentes condições (Levard *et al.*, 2012), conseqüentemente, sua disponibilidade e reatividade no meio ambiente são afetadas, sendo por isso de grande importância a caracterização dos nanomateriais.

2. SCREENING FITOQUÍMICO DE FOLHAS DE BATATA-DOCE

Ipomoea batatas (L.) Lam., da família Convolvulaceae, popularmente conhecida como batata-doce é uma das mais importantes raízes alimentícias e desempenha importante papel nutricional, pois possui considerável rentabilidade econômica em plantios em diversos países (Shih *et al.*, 2009). Batatais produzem folhas em grandes quantidades, uma parte se destina às ramas que servirão para o replantio e a outra parte se destina à alimentação animal. As folhas da batata-doce são ricas em vitamina B, β -caroteno, ferro, cálcio, zinco e, normalmente, no campo, a batata-doce é mais tolerante a doenças e pragas em relação a outros vegetais folhosos cultivados nos trópicos (Ishiguro *et al.*, 2002; Odongo *et al.*, 2015; Pace *et al.*, 1985; Woolfe, 1992; Yoshimoto *et al.*, 2003).

Groppa *et al.*, (2011) mostraram resultados positivos para triterpenos/esteroides, alcaloides, antraquinonas, cumarinas, flavonoides, saponinas, taninos e ácidos fenólicos em extratos de folhas de batata-doce roxa. Otake *et al.*, (1992) classificaram antocianinas importantes presentes nas folhas de batata-doce e as identificaram como compostos da classe dos ácidos cafeicos. Ishida, (2000) identificaram altos teores de polifenóis, ácido cafeico, ácido clorogênico e fibras solúveis, e concluíram que as folhas de batata-doce possuem complexa composição química.

3. NEMATOIDES DO GÊNERO MELOIDOGYNE Goeldi, 1887

A produção agrícola mundial está constantemente em risco devido à incidência de patógenos, que reduzem a produção de alimentos e afetam as plantas de forma direta ou indireta ocasionando grandes perdas econômicas (Sikora *et al.*, 2021). Essas perdas são estimadas em

cerca de 20 a 40% de toda produtividade de alimentos do mundo (Oerke, 2006; Savary *et al.*, 2012).

Fitonematoides são os patógenos que mais causam danos em plantas ao redor do mundo (Abd-Elgawad; Askary, 2015), afetam o crescimento das plantas e causam perdas agrícolas de aproximadamente 15% da produção, o que corresponde a 157 bilhões de dólares anuais (S. Singh *et al.*, 2015). Nematoides do gênero *Meloidogyne* spp., mais conhecidos como nematoides das galhas, são os mais importantes nematoides em termos econômicos e científicos, pois são altamente virulentos, polípagos, possuem alta taxa reprodutiva, possuem curto tempo de geração (aproximadamente 28 dias para completar um ciclo) e, ao longo do tempo, coevoluíram com as plantas e desenvolveram um sistema complexo e interespecífico de infecção, nos mais variados ambientes, o que dificulta o controle em campo (Affokpon *et al.*, 2011; Palomares-Rius *et al.*, 2014; Perry *et al.*, 2009).

A maturidade sexual de nematoides do gênero *Meloidogyne* mostra um dimorfismo distinto (Castagnone-Sereno *et al.*, 2013). As fêmeas possuem corpos distendidos em forma globosa e os machos são vermiformes e móveis (Eisenback; Triantaphyllou, 2020). Estes nematoides apresentam diferentes estratégias reprodutivas, variando entre anfigimixia e partenogênese meiótica facultativa (onde há variabilidade genética) ou partenogênese mitótica obrigatória. A maioria das espécies é partenogenética e os machos são formados apenas em condições desfavoráveis, por exemplo, quando há maior densidade populacional, alterações extremas do clima e limitação de alimento. *Meloidogyne incognita* e *M. javanica* são exemplos desses nematoides, que são espécies partenogenéticas mitóticas obrigatórias (Castagnone-Sereno *et al.*, 1993), ou seja, todos os indivíduos são clones.

O juvenil de primeiro estágio (J1) se desenvolve dentro do ovo e sofre uma ecdise para se tornar o juvenil de segundo estágio (J2), que eclode do ovo. O J2 é a única fase infectiva, sendo atraído pela raiz da planta hospedeira por quimiotatismo (Zuckerman, 1984). Após a atração para a raiz hospedeira, o J2 inicia a relação de parasitismo e penetra na raiz usando o estilete, que possui ação espoliadora e injetora, introduzindo enzimas hidrolíticas no interior das células das raízes (Béra-Maillet *et al.*, 2000; Hussey, 1989; Jones; Goto, 2011; Perry; Moens, 2011). A degradação da parede celular por essas enzimas juntamente com a ação mecânica do estilete permite que o J2 penetre no sistema radicular e migre para a região do córtex, onde estabelece o sítio de alimentação (Davis *et al.*, 2008; Gheysen; Fenoll, 2002; Huang *et al.*, 2005;) em células multinucleadas e hipertrofiadas, chamadas de “células gigantes” (Abad; Williamson, 2010; Huettel, 1986; Truong *et al.*, 2015). Estas células são a única fonte

de alimento do nematoide (Favery *et al.*, 2016; Mejías *et al.*, 2019; Rodiuc *et al.*, 2014). O J2 permanece dentro da galha e, após três ecdises, chega a fase adulta (Abad; Williamson, 2010).

Nos estádios J3 e J4, os nematoides não se alimentam porque são desprovidos do estilete (Jones *et al.*, 2013; Moens *et al.*, 2009;). Os machos deixam a raiz e migram para a rizosfera ou próximo às fêmeas que estão inseridas nas raízes, com a região da vulva exposta (James *et al.*, 2019), onde depositam os ovos em uma matriz gelatinosa composta por glicoproteínas, que os protege das condições externas. Massas de ovos podem ser encontradas na superfície ou dentro das raízes com galhas. Em regiões tropicais, são depositados aproximadamente 500 ovos por fêmea (Jones *et al.*, 2013; Moens *et al.*, 2009; Perry *et al.*, 2010) que se separam da matriz gelatinosa e completam a embriogênese em aproximadamente 15 dias, recomeçando um novo ciclo de vida.

Se nematoides do gênero *Meloidogyne* forem introduzidos em áreas de cultivo, a erradicação torna-se impossível e economicamente inviável, pois nem sempre os nematicidas são totalmente eficazes, além de possuírem moléculas químicas tóxicas e alto efeito residual. Com isso, é interessante a busca e entendimento de outras práticas de controle, como a introdução da nanotecnologia, por meio da inserção de nanopartículas biossintetizadas no manejo integrado de fitonematoides.

Este trabalho teve como objetivos a) sintetizar nanopartículas de prata utilizando diferentes concentrações de extrato aquoso de folhas de batata-doce; b) caracterizar as nanopartículas por técnica de espelhamento de luz dinâmica (DSL), espectroscopia entre o ultravioleta e visível (UV-VIS), difração de raio-x (DRX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de transmissão (MET); c) realizar testes *in vitro* do efeito das nanopartículas de prata biossintetizadas sobre a mortalidade e embriogênese de *M. javanica*; d) realizar testes de toxidez das nanopartículas de prata biossintetizadas em plantas de tomate e d) realizar testes em casa de vegetação sobre o efeito direto das nanopartículas de prata biossintetizadas sobre o fator de reprodução (FR) e número de galhas (NG) em plantas de tomateiro inoculadas com *M. javanica*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbassy, M. A., Abdel-Rasoul, M. A., Nassar, A. M. K., & Soliman, B. S. M. (2017). Nematicidal activity of silver nanoparticles of botanical products against root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 50(17–18), 909–926. <https://doi.org/10.1080/03235408.2017.1405608>
- Abdel-Aziz, H., Hasaneen, M. N., & Omar, A. (2018). Effect of foliar application of nano chitosan NPK fertilizer on the chemical composition of wheat grains. *Egyptian Journal of Botany*, 0(0), 0–0. <https://doi.org/10.21608/ejbo.2018.1907.1137>
- Abdelbaky, A. S., Abd El-Mageed, T. A., Babalghith, A. O., Selim, S., & Mohamed, A. M. H. A. (2022). Green Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles Using Pelargonium odoratissimum (L.) Aqueous Leaf Extract and Their Antioxidant, Antibacterial and Anti-inflammatory Activities. *Antioxidants*, 11(8), 1444. <https://doi.org/10.3390/antiox11081444>
- Acharya, P., Jayaprakasha, G. K., Crosby, K. M., Jifon, J. L., & Patil, B. S. (2020). Nanoparticle-Mediated Seed Priming Improves Germination, Growth, Yield, and Quality of Watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in Texas. *Scientific Reports*, 10(1), 5037. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61696-7>
- Affokpon, A., Coyne, D. L., Htay, C. C., Agbèdè, R. D., Lawouin, L., & Coosemans, J. (2011). Biocontrol potential of native Trichoderma isolates against root-knot nematodes in West African vegetable production systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(3), 600–608. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.029>
- Ahmar, S., Mahmood, T., Fiaz, S., Mora-Poblete, F., Shafique, M. S., Chattha, M. S., & Jung, K.-H. (2021). Advantage of Nanotechnology-Based Genome Editing System and Its Application in Crop Improvement. *Frontiers in Plant Science*, 12, 663849. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.663849>
- Ahsan, T. (2020). Biofabrication of silver nanoparticles from *Pseudomonas fluorescens* to control tobacco mosaic virus. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30(1), 66. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00268-3>
- Alharbi, N. S., Alsubhi, N. S., & Felimban, A. I. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles using medicinal plants: Characterization and application. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 15(3), 109–124. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.06.012>
- Alsammarrarie, F. K., Wang, W., Zhou, P., Mustapha, A., & Lin, M. (2018). Green synthesis of silver nanoparticles using turmeric extracts and investigation of their antibacterial activities. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 171, 398–405. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.07.059>
- Amendola, V., Bakr, O. M., & Stellacci, F. (2010). A Study of the Surface Plasmon Resonance of Silver Nanoparticles by the Discrete Dipole Approximation Method: Effect of Shape, Size, Structure, and Assembly. *Plasmonics*, 5(1), 85–97. <https://doi.org/10.1007/s11468-009-9120-4>

- Anand, A., Kumari, A., Thakur, M., & Koul, A. (2019). Hydrogen peroxide signaling integrates with phytohormones during the germination of magnetoprimed tomato seeds. *Scientific Reports*, 9(1), 8814. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45102-5>
- Ansari, M., Ahmed, S., Abbasi, A., Hamad, N. A., Ali, H. M., Khan, M. T., et al. (2023). Green Synthesized Silver Nanoparticles: A Novel Approach for the Enhanced Growth and Yield of Tomato against Early Blight Disease. *Microorganisms*, 11(4), 886. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11040886>
- Anupong, W., On-uma, R., Jutamas, K., Joshi, D., Salmen, S. H., Alahmadi, T. A., & Jhanani, G. K. (2023). Cobalt nanoparticles synthesizing potential of orange peel aqueous extract and their antimicrobial and antioxidant activity. *Environmental Research*, 216, 114594. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114594>
- Arsiya, F., Sayadi, M. H., & Sobhani, S. (2017). Green synthesis of palladium nanoparticles using *Chlorella vulgaris*. *Materials Letters*, 186, 113–115. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.09.101>
- Ayaz Ahmed, K. B., Subramaniam, S., Veerappan, G., Hari, N., Sivasubramanian, A., & Veerappan, A. (2014). β -Sitosterol- D -glucopyranoside isolated from *Desmostachya bipinnata* mediates photoinduced rapid green synthesis of silver nanoparticles. *RSC Adv.*, 4(103), 59130–59136. <https://doi.org/10.1039/C4RA10626A>
- Baruwati, B., Polshettiwar, V., & Varma, R. S. (2009). Glutathione promoted expeditious green synthesis of silver nanoparticles in water using microwaves. *Green Chemistry*, 11(7), 926. <https://doi.org/10.1039/b902184a>
- Carneiro, R. M. D. G., Castagnone-Sereno, P., & Dickson, D. W. (1997). Variability among four populations of *Meloidogyne javanica* from Brazil. *Variability among four populations of Meloidogyne javanica from Brazil*, 21(4), 319–326. <https://doi.org/1164-5571/98/04/>
- Castagnone-Sereno, P., Danchin, E. G. J., Perfus-Barbeoch, L., & Abad, P. (2013). Diversity and Evolution of Root-Knot Nematodes, Genus *Meloidogyne* : New Insights from the Genomic Era. *Annual Review of Phytopathology*, 51(1), 203–220. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102300>
- Chakravarty, A., Ahmad, I., Singh, P., Ud Din Sheikh, M., Aalam, G., Sagadevan, S., & Ikram, S. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles using fruits extracts of *Syzygium cumini* and their bioactivity. *Chemical Physics Letters*, 795, 139493. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2022.139493>
- CHARCHAR, J. M., GIORDANO, L. B., & BOITEUX, L. S. (2003). Metodologia para seleção de hortaliças com resistência a nematóides: Famílias Convolvulaceae e Solanaceae/*Meloidogyne* spp. COMUNICADO TÉCNICO, 21.
- Chen, J., Li, Q. X., & Song, B. (2020). Chemical Nematicides: Recent Research Progress and Outlook. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(44), 12175–12188. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02871>

- Chirumamilla, P., Dharavath, S. B., & Taduri, S. (2023). Eco-friendly Green Synthesis of Silver Nanoparticles from Leaf Extract of *Solanum khasianum*: Optical Properties and Biological Applications. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 195(1), 353–368. <https://doi.org/10.1007/s12010-022-04156-4>
- Chitwood, D. J. (2003). Nematicides. In J. R. Plimmer, D. W. Gammon, & N. A. Ragsdale (Eds.), *Encyclopedia of Agrochemicals* (p. agr171). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/047126363X.agr171>
- Cosgrove, T. (Ed.). (2005). *Colloid Science: Principles, Methods and Applications* (1st ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781444305395>
- D. Howland, A., & Quintanilla, M. (2023). Plant-Parasitic Nematodes and their Effects on Ornamental Plants: A Review. *Journal of Nematology*, 55(1), 20230007. <https://doi.org/10.2478/jofnem-2023-0007>
- Das, R., Nath, S. S., Chakdar, D., Gope, G., & Bhattacharjee, R. (2010). Synthesis of silver nanoparticles and their optical properties. *Journal of Experimental Nanoscience*, 5(4), 357–362. <https://doi.org/10.1080/17458080903583915>
- De Mello Donegá, C. (Ed.). (2014). *Nanoparticles: Workhorses of Nanoscience*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44823-6>
- Demirer, G. S., Silva, T. N., Jackson, C. T., Thomas, J. B., W. Ehrhardt, D., Rhee, S. Y., et al. (2021). Nanotechnology to advance CRISPR–Cas genetic engineering of plants. *Nature Nanotechnology*, 16(3), 243–250. <https://doi.org/10.1038/s41565-021-00854-y>
- DeRosa, M. C., Monreal, C., Schnitzer, M., Walsh, R., & Sultan, Y. (2010). Nanotechnology in fertilizers. *Nature Nanotechnology*, 5(2), 91–91. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.2>
- Desaeger, J. A., & Watson, T. T. (2019). Evaluation of new chemical and biological nematicides for managing *Meloidogyne javanica* in tomato production and associated double-crops in Florida. *Pest Management Science*, 75(12), 3363–3370. <https://doi.org/10.1002/ps.5481>
- Ditta, A. (2012). How helpful is nanotechnology in agriculture? *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 3(3), 033002. <https://doi.org/10.1088/2043-6262/3/3/033002>
- Ebone, L. A., Kovalski, M., & Deuner, C. C. (2019). Nematicides: history, mode, and mechanism action. *Plant Science Today*, 6(2), 91–97. <https://doi.org/10.14719/pst.2019.6.2.468>
- Eisenback, J. D., & Triantaphyllou, H. H. (2020). Root-Knot Nematodes: *Meloidogyne* Species and Races. In W. R. Nickle (Ed.), *Manual of Agricultural Nematology* (1st ed., pp. 191–274). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003066576-6>
- Elkobrosy, D., Al-Askar, A. A., El-Gendi, H., Su, Y., Nabil, R., Abdelkhalek, A., & Behiry, S. (2023a). Nematocidal and Bactericidal Activities of Green Synthesized Silver

Nanoparticles Mediated by *Ficus sycomorus* Leaf Extract. *Life*, 13(5), 1083.
<https://doi.org/10.3390/life13051083>

Elkobrosy, D., Al-Askar, A. A., El-Gendi, H., Su, Y., Nabil, R., Abdelkhalek, A., & Behiry, S. (2023b). Nematocidal and Bactericidal Activities of Green Synthesized Silver Nanoparticles Mediated by *Ficus sycomorus* Leaf Extract. *Life*, 13(5), 1083.
<https://doi.org/10.3390/life13051083>

Elmer, W., & White, J. C. (2018). The Future of Nanotechnology in Plant Pathology. *Annual Review of Phytopathology*, 56(1), 111–133. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050108>

Elsharkawy, M. M., Al-Askar, A. A., Behiry, S. I., Abdelkhalek, A., Saleem, M. H., Kamran, M., & Derbalah, A. (2022). Resistance induction and nematocidal activity of certain monoterpenes against tomato root-knot caused by *Meloidogyne incognita*. *Frontiers in Plant Science*, 13, 982414. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.982414>

Facibeni, A. (2023). *SILVER NANOPARTICLES synthesis, properties, and applications*. S.I.: JENNY STANFORD PUB.

Feldheim, D. L., & Foss, C. A. (Eds.). (2002). *Metal nanoparticles: synthesis, characterization, and applications*. New York: Marcel Dekker.

Flood, J. (2010). The importance of plant health to food security. *Food Security*, 2(3), 215–231. <https://doi.org/10.1007/s12571-010-0072-5>

Francis, T., Rajeshkumar, S., Roy, A., & Lakshmi, T. (2020). Anti-inflammatory and Cytotoxic Effect of Arrow Root Mediated Selenium Nanoparticles. *Pharmacognosy Journal*, 12(6), 1363–1367. <https://doi.org/10.5530/pj.2020.12.188>

François Eya'ane Meva, E. R. A. M., Marcelle, L. S., Cecile, O. E., Agnes, A. N., Djiopang, Y. S., Fanny, A. E. M., et al. (2016). Unexplored vegetal green synthesis of silver nanoparticles: A preliminary study with *Corchorus olitorus* Linn and *Ipomea batatas* (L.) Lam. *African Journal of Biotechnology*, 15(10), 341–349.
<https://doi.org/10.5897/AJB2015.14962>

Fu, Z., Tu, Z., Zhang, L., Wang, H., Wen, Q., & Huang, T. (2016). Antioxidant activities and polyphenols of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves extracted with solvents of various polarities. *Food Bioscience*, 15, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2016.04.004>

Fulekar, J., Dutta, D. P., Pathak, B., & Fulekar, M. H. (2018). Novel microbial and root mediated green synthesis of TiO₂ nanoparticles and its application in wastewater remediation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 93(3), 736–743.
<https://doi.org/10.1002/jctb.5423>

Galdiero, S., Falanga, A., Vitiello, M., Cantisani, M., Marra, V., & Galdiero, M. (2011). Silver Nanoparticles as Potential Antiviral Agents. *Molecules*, 16(10), 8894–8918.
<https://doi.org/10.3390/molecules16108894>

- Gao, J.-F., Li, H.-Y., Pan, K.-L., & Si, C.-Y. (2016). Green synthesis of nanoscale zero-valent iron using a grape seed extract as a stabilizing agent and the application for quick decolorization of azo and anthraquinone dyes. *RSC Advances*, 6(27), 22526–22537. <https://doi.org/10.1039/C5RA26668H>
- Gaumet, M., Vargas, A., Gurny, R., & Delie, F. (2008). Nanoparticles for drug delivery: The need for precision in reporting particle size parameters. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 69(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2007.08.001>
- Ghareeb, R. Y., Alfay, H., Fahmy, A. A., Ali, H. M., & Abdelsalam, N. R. (2020). Utilization of *Cladophora glomerata* extract nanoparticles as eco-nematicide and enhancing the defense responses of tomato plants infected by *Meloidogyne javanica*. *Scientific Reports*, 10(1), 19968. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77005-1>
- Ghareeb, R. Y., Shams El-Din, N. G. E.-D., Maghraby, D. M. E., Ibrahim, D. S. S., Abdel-Megeed, A., & Abdelsalam, N. R. (2022a). Nematicidal activity of seaweed-synthesized silver nanoparticles and extracts against *Meloidogyne incognita* on tomato plants. *Scientific Reports*, 12(1), 3841. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06600-1>
- Ghareeb, R. Y., Shams El-Din, N. G. E.-D., Maghraby, D. M. E., Ibrahim, D. S. S., Abdel-Megeed, A., & Abdelsalam, N. R. (2022b). Nematicidal activity of seaweed-synthesized silver nanoparticles and extracts against *Meloidogyne incognita* on tomato plants. *Scientific Reports*, 12(1), 3841. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06600-1>
- Groppa, F., Pochapski, M., Fosquiera, E., Esmerino, L., Dos Santos, E., Farago, P., & Santos, F. (2011). Phytochemical screening, antioxidant, and antimicrobial activities of the crude leaves' extract from *Ipomoea batatas* (L.) Lam. *Pharmacognosy Magazine*, 7(26), 165. <https://doi.org/10.4103/0973-1296.80682>
- Gupta, V. K., Sharma, G. D., Tuohy, M. G., & Gaur, R. (Eds.). (2015). *The handbook of microbial bioresources*. Wallingford, Oxfordshire ; Boston, MA: CAB International.
- Hamk, M., Akçay, F. A., & Avcı, A. (2023). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Bacillus subtilis* ZBP4 and their antibacterial potential against foodborne pathogens. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 53(3), 255–264. <https://doi.org/10.1080/10826068.2022.2076243>
- He, M., Ai, Y., Hu, W., Guan, L., Ding, M., & Liang, Q. (2023). Recent Advances of Seed-Mediated Growth of Metal Nanoparticles: from Growth to Applications. *Advanced Materials*, 2211915. <https://doi.org/10.1002/adma.202211915>
- Heiligt, F. J., & Niederberger, M. (2013). The fascinating world of nanoparticle research. *Materials Today*, 16(7–8), 262–271. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.07.004>
- Hinsch, J. J., Liu, J., White, J. J., & Wang, Y. (2022). The Role of Steps on Silver Nanoparticles in Electrocatalytic Oxygen Reduction. *Catalysts*, 12(6), 576. <https://doi.org/10.3390/catal12060576>

- Hoag, G. E., Collins, J. B., Holcomb, J. L., Hoag, J. R., Nadagouda, M. N., & Varma, R. S. (2009). Degradation of bromothymol blue by 'greener' nano-scale zero-valent iron synthesized using tea polyphenols. *Journal of Materials Chemistry*, 19(45), 8671. <https://doi.org/10.1039/b909148c>
- Horwat, D., Zakharov, D. I., Endrino, J. L., Soldera, F., Anders, A., Migot, S., et al. (2011). Chemistry, phase formation, and catalytic activity of thin palladium-containing oxide films synthesized by plasma-assisted physical vapor deposition. *Surface and Coatings Technology*, 205, S171–S177. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.12.021>
- Ishida, H. (2000). Nutritive evaluation on chemical components of leaves, stalks and stems of sweet potatoes (*Ipomoea batatas* L.). *Food Chemistry*, 68(3), 359–367. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00206-X](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00206-X)
- J, C. N., S, R., & S, H. (2022). Mimosa elengi Flower-Mediated Green Silver Nanoparticles Control *Staphylococcus aureus* and *Acinetobacter baumannii*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 194(7), 3066–3081. <https://doi.org/10.1007/s12010-022-03882-z>
- Jiang, Y., Zhou, P., Zhang, P., Adeel, M., Shakoor, N., Li, Y., et al. (2022). Green synthesis of metal-based nanoparticles for sustainable agriculture. *Environmental Pollution*, 309, 119755. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119755>
- Kalaiselvi, D., Sundararaj, P., Premasudha, P., & Hafez, S. L. (2017). Nematicidal activity of green synthesized silver nanoparticles using plant extracts against root-knot nematode *Meloidogyne incognita*, 27(1), 81–94.
- Karssen, G., Wesemael, W., & Moens, M. (2013). Root-knot nematodes. In R. N. Perry & M. Moens (Eds.), *Plant nematology* (2nd ed., pp. 73–108). UK: CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780641515.0073>
- Koçer, A. T., & Özçimen, D. (2022). Eco-friendly synthesis of silver nanoparticles from macroalgae: optimization, characterization and antimicrobial activity. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02506-0>
- Kumar, A., & Dixit, C. K. (2017). Methods for characterization of nanoparticles. In *Advances in Nanomedicine for the Delivery of Therapeutic Nucleic Acids* (pp. 43–58). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100557-6.00003-1>
- Levard, C., Hotze, E. M., Lowry, G. V., & Brown, G. E. (2012). Environmental Transformations of Silver Nanoparticles: Impact on Stability and Toxicity. *Environmental Science & Technology*, 46(13), 6900–6914. <https://doi.org/10.1021/es2037405>
- Lomelí-Rosales, D. A., Zamudio-Ojeda, A., Reyes-Maldonado, O. K., López-Reyes, M. E., Basulto-Padilla, G. C., Lopez-Naranjo, E. J., et al. (2022). Green Synthesis of Gold and Silver Nanoparticles Using Leaf Extract of *Capsicum chinense* Plant. *Molecules*, 27(5), 1692. <https://doi.org/10.3390/molecules27051692>

- Luo, D., Mu, T., & Sun, H. (2021a). Profiling of phenolic acids and flavonoids in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves and evaluation of their anti-oxidant and hypoglycemic activities. *Food Bioscience*, 39, 100801. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100801>
- Luo, D., Mu, T., & Sun, H. (2021b). Profiling of phenolic acids and flavonoids in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves and evaluation of their anti-oxidant and hypoglycemic activities. *Food Bioscience*, 39, 100801. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100801>
- Machado, A. C. Z., Lemes, C. F. C., Silva, S. A., Shigueoka, L. H., Dorigo, O. F., Deuner, C. C., & Ribeiro, N. R. (2022). Variant *Meloidogyne javanica* populations from Brazil could impact the breeding programs and the management in soybean fields. *Tropical Plant Pathology*, 47(3), 442–449. <https://doi.org/10.1007/s40858-022-00492-2>
- Masum, Md. M. I., Siddiqa, Mst. M., Ali, K. A., Zhang, Y., Abdallah, Y., Ibrahim, E., et al. (2019). Biogenic Synthesis of Silver Nanoparticles Using *Phyllanthus emblica* Fruit Extract and Its Inhibitory Action Against the Pathogen *Acidovorax oryzae* Strain RS-2 of Rice Bacterial Brown Stripe. *Frontiers in Microbiology*, 10, 820. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00820>
- Mehta, B. K., Chhajlani, M., & Shrivastava, B. D. (2017). Green synthesis of silver nanoparticles and their characterization by XRD. *Journal of Physics: Conference Series*, 836, 012050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/836/1/012050>
- Meinhart, A. D., Damin, F. M., Caldeirão, L., De Jesus Filho, M., Da Silva, L. C., Da Silva Constant, L., et al. (2019). Study of new sources of six chlorogenic acids and caffeic acid. *Journal of Food Composition and Analysis*, 82, 103244. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103244>
- Metzger, J. O. (2003). Book Review: Handbook of Green Chemistry and Technology. Edited by James Clark and Duncan Macquarrie. *Angewandte Chemie International Edition*, 42(6), 601–602. <https://doi.org/10.1002/anie.200390172>
- Mock, J. J., Barbic, M., Smith, D. R., Schultz, D. A., & Schultz, S. (2002). Shape effects in plasmon resonance of individual colloidal silver nanoparticles. *The Journal of Chemical Physics*, 116(15), 6755–6759. <https://doi.org/10.1063/1.1462610>
- Mohammad, Z. H., Ahmad, F., Ibrahim, S. A., & Zaidi, S. (2022). Application of nanotechnology in different aspects of the food industry. *Discover Food*, 2(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s44187-022-00013-9>
- Mukhopadhyay, S. S. (2014). Nanotechnology in agriculture: prospects and constraints. *Nanotechnology, Science and Applications*, 63. <https://doi.org/10.2147/NSA.S39409>
- Nayab, D.-, & Akhtar, S. (2023). Green synthesized silver nanoparticles from eucalyptus leaves can enhance shelf life of banana without penetrating in pulp. *PLOS ONE*, 18(3), e0281675. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281675>

- Nguyen, H. C., Chen, C.-C., Lin, K.-H., Chao, P.-Y., Lin, H.-H., & Huang, M.-Y. (2021). Bioactive Compounds, Antioxidants, and Health Benefits of Sweet Potato Leaves. *Molecules*, 26(7), 1820. <https://doi.org/10.3390/molecules26071820>
- Odake, K., Terahara, N., Saito, N., Toki, K., & Honda, T. (1992). Chemical structures of two anthocyanins from purple sweet potato, *Ipomoea batatas*. *Phytochemistry*, 31(6), 2127–2130. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(92\)80378-R](https://doi.org/10.1016/0031-9422(92)80378-R)
- Ogunleye, G. E., Adebayo-Tayo, B. C., & Oyinlola, K. A. (2023). Biological evaluation of extracellular mycosynthesized silver nanoparticles by *Trichoderma asperellum*. *BioMetals*, 36(1), 97–109. <https://doi.org/10.1007/s10534-022-00463-9>
- Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2265–2300. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.05.001>
- Pagar, K., Chavan, K., Kasav, S., Basnet, P., Rahdar, A., Kataria, N., et al. (2023). Bio-inspired synthesis of CdO nanoparticles using Citrus limetta peel extract and their diverse biomedical applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 82, 104373. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104373>
- Palomares-Rius, J. E., Cantalapiedra-Navarrete, C., & Castillo, P. (2014). Cryptic species in plant-parasitic nematodes. *Nematology*, 16(10), 1105–1118. <https://doi.org/10.1163/15685411-00002831>
- Pavia, D. L., Lampman, G. M., & Kriz, G. S. (2001). *Introduction to spectroscopy: a guide for students of organic chemistry* (3rd ed.). Fort Worth: Harcourt College Publishers.
- Periakaruppan, R., Romanovski, V., Thirumalaisamy, S. K., Palanimuthu, V., Sampath, M. P., Anilkumar, A., et al. (2023). Innovations in Modern Nanotechnology for the Sustainable Production of Agriculture. *ChemEngineering*, 7(4), 61. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7040061>
- Perry, Roland N., Moens, M., & Starr, J. L. (Eds.). (2009). *Root-knot nematodes*. Cambridge, MA: CABI North American Office.
- Rani, K., Devi, N., Banakar, P., Kharb, P., & Kaushik, P. (2022). Nematicidal Potential of Green Silver Nanoparticles Synthesized Using Aqueous Root Extract of *Glycyrrhiza glabra*. *Nanomaterials*, 12(17), 2966. <https://doi.org/10.3390/nano12172966>
- Rastogi, A., Zivcak, M., Sytar, O., Kalaji, H. M., He, X., Mbarki, S., & Brestic, M. (2017). Impact of Metal and Metal Oxide Nanoparticles on Plant: A Critical Review. *Frontiers in Chemistry*, 5, 78. <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00078>
- Rathi Sre, P. R., Reka, M., Poovazhagi, R., Arul Kumar, M., & Murugesan, K. (2015). Antibacterial and cytotoxic effect of biologically synthesized silver nanoparticles using aqueous root extract of *Erythrina indica* lam. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 135, 1137–1144. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.08.019>

Roco, M. C., Williams, R. S., & Alivisatos, P. (Eds.). (2000). *Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report*. Dordrecht: Springer Netherlands.
<https://doi.org/10.1007/978-94-015-9576-6>

Sachin, Jaishree, Singh, N., Singh, R., Shah, K., & Pramanik, B. K. (2023). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using lychee peel and its application in anti-bacterial properties and CR dye removal from wastewater. *Chemosphere*, 327, 138497.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138497>

Safdar, M., Aslam, S., Akram, M., Khaliq, A., Ahsan, S., Liaqat, A., et al. (2023). Bombax ceiba flower extract mediated synthesis of Se nanoparticles for antibacterial activity and urea detection. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(3), 80.
<https://doi.org/10.1007/s11274-022-03513-z>

Saiqa Ikram, S. A. (2015). Silver Nanoparticles: One Pot Green Synthesis Using *Terminalia arjuna* Extract for Biological Application. *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, 06(04). <https://doi.org/10.4172/2157-7439.1000309>

Santiago, T. R., Bonatto, C. C., Rossato, M., Lopes, C. A. P., Lopes, C. A., G Mizubuti, E. S., & Silva, L. P. (2019). Green synthesis of silver nanoparticles using tomato leaf extract and their entrapment in chitosan nanoparticles to control bacterial wilt. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(9), 4248–4259. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9656>

Santos, J., Santos, M., Thesing, A., Tavares, F., Griep, J., & Rodrigues, M. (2016). Ressonância de plasmon de superfície localizado e aplicação em biossensores e células solares. *Química Nova*. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20160126>

Sasser, J. N., Eisenback, J. D., Carter, C. C., & Triantaphyllou, A. C. (1983). The International Meloidogyne Project-Its Goals and Accomplishments. *Annual Review of Phytopathology*, 21(1), 271–288. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.21.090183.001415>

Schaming, D., & Remita, H. (2015). Nanotechnology: from the ancient time to nowadays. *Foundations of Chemistry*, 17(3), 187–205. <https://doi.org/10.1007/s10698-015-9235-y>

Sekhon, B. (2014). Nanotechnology in agri-food production: an overview. *Nanotechnology, Science and Applications*, 31. <https://doi.org/10.2147/NSA.S39406>

Shende, S., Rajput, V. D., Gade, A., Minkina, T., Fedorov, Y., Sushkova, S., et al. (2022). Metal-Based Green Synthesized Nanoparticles: Boon for Sustainable Agriculture and Food Security. *IEEE Transactions on NanoBioscience*, 21(1), 44–54.
<https://doi.org/10.1109/TNB.2021.3089773>

Shih, M.-C., Kuo, C.-C., & Chiang, W. (2009). Effects of drying and extrusion on colour, chemical composition, antioxidant activities and mitogenic response of spleen lymphocytes of sweet potatoes. *Food Chemistry*, 117(1), 114–121.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.03.084>

Shobha, B., Ashwini, B. S., Ghazwani, M., Hani, U., Atwah, B., Alhumaidi, M. S., et al. (2023). Trichoderma-Mediated ZnO Nanoparticles and Their Antibiofilm and Antibacterial Activities. *Journal of Fungi*, 9(2), 133. <https://doi.org/10.3390/jof9020133>

Silva, J. A. L., SEDIYAMA, T., & CECOM, P. R. (1999). Avaliação da resistência de 22 variedades e linhagens americanas e nacionais de soja à *Heterodera glycines*, raça 3. *Avaliação da resistência de 22 variedades e linhagens americanas e nacionais de soja à Heterodera glycines*, raça 3., 23(2), 15–19.

Silva, J. D. O., Loffredo, A., Da Rocha, M. R., & Becker, J. O. (2019). Efficacy of new nematicides for managing *Meloidogyne incognita* in tomato crop. *Journal of Phytopathology*, 167(5), 295–298. <https://doi.org/10.1111/jph.12798>

Singh, D., & Gurjar, B. R. (2022). Nanotechnology for agricultural applications: Facts, issues, knowledge gaps, and challenges in environmental risk assessment. *Journal of Environmental Management*, 322, 116033. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116033>

Singh, R. P., Handa, R., & Manchanda, G. (2021). Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of Controlled Release*, 329, 1234–1248. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.051>

Singh, S., Singh, B., & Singh, A. P. (2015). Nematodes: A Threat to Sustainability of Agriculture. *Procedia Environmental Sciences*, 29, 215–216. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.270>

Smitha, S. L., Nissamudeen, K. M., Philip, D., & Gopchandran, K. G. (2008). Studies on surface plasmon resonance and photoluminescence of silver nanoparticles. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 71(1), 186–190. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2007.12.002>

Ssekatawa, K., Byarugaba, D. K., Kato, C. D., Wampande, E. M., Ejobi, F., Nakavuma, J. L., et al. (2021). Green Strategy–Based Synthesis of Silver Nanoparticles for Antibacterial Applications. *Frontiers in Nanotechnology*, 3, 697303. <https://doi.org/10.3389/fnano.2021.697303>

Subramaniam, V., Subashchandrabose, S. R., Thavamani, P., Megharaj, M., Chen, Z., & Naidu, R. (2015). Chlorococcum sp. MM11—a novel phyco-nanofactory for the synthesis of iron nanoparticles. *Journal of Applied Phycology*, 27(5), 1861–1869. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0492-2>

Swathy, J. R., Sankar, M. U., Chaudhary, A., Aigal, S., Anshup, & Pradeep, T. (2014). Antimicrobial silver: An unprecedented anion effect. *Scientific Reports*, 4(1), 7161. <https://doi.org/10.1038/srep07161>

Taira, J., Taira, K., Ohmine, W., & Nagata, J. (2013). Mineral determination and anti-LDL oxidation activity of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves. *Journal of Food Composition and Analysis*, 29(2), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2012.10.007>

- Talank, N., Morad, H., Barabadi, H., Mojab, F., Amidi, S., Kobarfard, F., et al. (2022). Bioengineering of green-synthesized silver nanoparticles: In vitro physicochemical, antibacterial, biofilm inhibitory, anticoagulant, and antioxidant performance. *Talanta*, 243, 123374. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123374>
- Tariq, M., Mohammad, K. N., Ahmed, B., Siddiqui, M. A., & Lee, J. (2022). Biological Synthesis of Silver Nanoparticles and Prospects in Plant Disease Management. *Molecules*, 27(15), 4754. <https://doi.org/10.3390/molecules27154754>
- Tavan, M., Hanachi, P., Mirjalili, M. H., & Dashtbani-Roozbehani, A. (2023). Comparative assessment of the biological activity of the green synthesized silver nanoparticles and aqueous leaf extract of *Perilla frutescens* (L.). *Scientific Reports*, 13(1), 6391. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33625-x>
- Thummaneni, C., Surya Prakash, D. V., Golli, R., & Vangalapati, M. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles and characterization of caffeic acid from *Myristica fragrans* (Nutmeg) against antibacterial activity. *Materials Today: Proceedings*, 62, 4001–4005. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.586>
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260–20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Tortella, G., Rubilar, O., Pieretti, J. C., Fincheira, P., De Melo Santana, B., Fernández-Baldo, M. A., et al. (2023). Nanoparticles as a Promising Strategy to Mitigate Biotic Stress in Agriculture. *Antibiotics*, 12(2), 338. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12020338>
- Turunc, E., Binzet, R., Gumus, I., Binzet, G., & Arslan, H. (2017). Green synthesis of silver and palladium nanoparticles using *Lithodora hispidula* (Sm.) Griseb. (Boraginaceae) and application to the electrocatalytic reduction of hydrogen peroxide. *Materials Chemistry and Physics*, 202, 310–319. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.09.032>
- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., Rehman, H. U., et al. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Science of The Total Environment*, 721, 137778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>
- Vasireddy, R., Paul, R., & Mitra, A. K. (2012). Green Synthesis of Silver Nanoparticles and the Study of Optical Properties. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 2, 8. <https://doi.org/10.5772/52329>
- Vorobyova, V., Vasyliiev, G., & Skiba, M. (2020). Eco-friendly “green” synthesis of silver nanoparticles with the black currant pomace extract and its antibacterial, electrochemical, and antioxidant activity. *Applied Nanoscience*, 10(12), 4523–4534. <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01369-z>
- Walter, P., Welcomme, E., Hallégot, P., Zaluzec, N. J., Deeb, C., Castaing, J., et al. (2006). Early Use of PbS Nanotechnology for an Ancient Hair Dyeing Formula. *Nano Letters*, 6(10), 2215–2219. <https://doi.org/10.1021/nl061493u>

Witanachchi, S., Merlak, M., & Mahawela, P. (2012). NANOTECHNOLOGY SOLUTIONS TO GREENHOUSE AND URBAN AGRICULTURE. *Technology & Innovation*, 14(2), 209–217. <https://doi.org/10.3727/194982412X13462021398056>

Worrall, E., Hamid, A., Mody, K., Mitter, N., & Pappu, H. (2018). Nanotechnology for Plant Disease Management. *Agronomy*, 8(12), 285. <https://doi.org/10.3390/agronomy8120285>

Xi, L., Mu, T., & Sun, H. (2015). Preparative purification of polyphenols from sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves by AB-8 macroporous resins. *Food Chemistry*, 172, 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.039>

Yabuuchi, E., Kosako, Y., Yano, I., Hotta, H., & Nishiuchi, Y. (1995). Transfer of Two *Burkholderia* and An *Alcaligenes* Species to *Ralstonia* Gen. Nov.: Proposal of *Ralstonia pickettii* (Ralston, Palleroni and Doudoroff 1973) Comb. Nov., *Ralstonia solanacearum* (Smith 1896) Comb. Nov. and *Ralstonia eutro*. *Microbiology and Immunology*, 39(11), 897–904. <https://doi.org/10.1111/j.1348-0421.1995.tb03275.x>

Yeshchenko, O. A., Dmitruk, I. M., Alexeenko, A. A., Kotko, A. V., Verdal, J., & Pinchuk, A. O. (2012). Size and Temperature Effects on the Surface Plasmon Resonance in Silver Nanoparticles. *Plasmonics*, 7(4), 685–694. <https://doi.org/10.1007/s11468-012-9359-z>

CAPÍTULO 2



Síntese verde e caracterização de nanopartículas de prata por extrato aquoso de folhas de batata-doce

Síntese verde e caracterização de nanopartículas de prata por extrato aquoso de folhas de batata-doce

RESUMO

Uma das aplicações mais promissoras da nanotecnologia é a síntese e utilização de nanopartículas. No entanto, a síntese tradicional de nanopartículas envolve o uso de reagentes químicos tóxicos e nocivos ao meio ambiente e saúde humana. A síntese verde de nanopartículas de prata surge como uma alternativa sustentável para produzir essas partículas. Além disso, os extratos de plantas, como por exemplo extrato de folhas de batata-doce, podem conter compostos bioativos que atuam como ótimos agentes estabilizadores, proporcionando maior estabilidade e biocompatibilidade às nanopartículas de prata. O presente estudo teve como objetivo (i) sintetizar nanopartículas de prata por diferentes concentrações do extrato aquoso de folhas de batata-doce e (ii) caracterizar as nanopartículas de prata biossintetizadas por meio das técnicas UV-VIS, DLS, Potencial Zeta, PDI, DRX, FTIR, MET. As diferentes concentrações do extrato aquoso de folhas de batata-doce foram capazes de sintetizar nanopartículas de prata, que apresentaram forma esférica, tamanho aproximado de 43 nm, cristalografia cúbica, forte estabilidade coloidal com potencial zeta de $-20,7 \pm 6,03$. Os grupos químicos dos ácidos carboxílicos foram identificados como possíveis responsáveis pela redução e estabilização das nanopartículas de prata. O estudo mostrou que o extrato aquoso de folhas de batata-doce foi um ótimo soluto precursor de nanopartículas de prata. Esses resultados evidenciam o potencial de extratos vegetais como agentes redutores de nanopartículas numa abordagem eco-friendly, com perspectivas promissoras para o desenvolvimento de métodos de síntese sustentável, podendo assim ampliar o uso da nanotecnologia em diversas áreas, como a agricultura.

Palavras-chaves: Biossíntese, *Ipomoea batatas*, Nanotecnologia, Produtos naturais

26 **ABSTRACT**

27 One of the most promising applications of nanotechnology is the synthesis and utilization of
28 nanoparticles. However, traditional nanoparticle synthesis involves the use of toxic and harmful
29 chemical reagents to the environment and human health. Green synthesis of silver nanoparticles
30 emerges as a sustainable alternative to produce these particles. Additionally, plant extracts, such
31 as sweet potato leaf extract, may contain bioactive compounds that act as excellent stabilizing
32 agents, providing greater stability and biocompatibility to silver nanoparticles. The present
33 study aimed to (i) synthesize silver nanoparticles using different concentrations of sweet potato
34 leaf aqueous extract and (ii) characterize the biosynthesized silver nanoparticles using UV-VIS,
35 DLS, Zeta potential, PDI, XRD, FTIR, and TEM techniques. The different concentrations of
36 sweet potato leaf aqueous extract were capable of synthesizing silver nanoparticles, which
37 exhibited a spherical shape, an approximate size of 43 nm, cubic crystallization, and strong
38 colloidal stability with a zeta potential of -20.7 ± 6.03 . The chemical groups of carboxylic acids
39 were identified as possible responsible for the reduction and stabilization of silver
40 nanoparticles. The study showed that sweet potato leaf aqueous extract was an excellent
41 precursor solute for silver nanoparticles. These results demonstrate the potential of plant
42 extracts as reducing agents for nanoparticles in an eco-friendly approach, with promising
43 prospects for the development of sustainable synthesis methods, thus expanding the use of
44 nanotechnology in various areas, including agriculture.

45

46 **Keywords:** Biosynthesis, *Ipomoea batatas*, Nanotechnology, Natural Products.

47 INTRODUÇÃO

48 A nanotecnologia é uma área inovadora que se concentra na manipulação e controle de
49 materiais em escala nanométrica. Nessa escala, os materiais exibem propriedades únicas e
50 diferentes de suas contrapartes em macroescala, o que permite a criação de novos materiais com
51 características excepcionais (De Mello Donegá, 2014). No entanto, o uso de nanopartículas
52 também apresenta desafios, especialmente em relação à segurança e ao impacto ambiental. Por
53 isso, é fundamental continuar pesquisando e compreendendo os efeitos dessas partículas, a fim
54 de garantir seu uso sustentável.

55 A síntese verde de nanopartículas de prata é um processo inovador e ambientalmente
56 sustentável que tem ganhado destaque na área da nanotecnologia. Diferentemente das sínteses
57 tradicionais que utilizam compostos químicos nocivos, esse método emprega extratos de
58 plantas como agentes redutores e estabilizadores para a formação das nanopartículas (Alharbi
59 *et al.*, 2022; Ansari *et al.*, 2023; Elkobrosy *et al.*, 2023b; Ssekatawa *et al.*, 2021; Talank *et al.*,
60 2022). A caracterização de nanopartículas é uma etapa essencial para compreender suas
61 propriedades e funcionalidades. Várias técnicas analíticas são empregadas nesse processo,
62 como espectroscopia de UV-VIS, espalhamento de luz dinâmica (DLS), potencial zeta, índice
63 de polidispersão (PdI), difração de raios-x (DRX), microscopia eletrônica de transmissão
64 (MET) e espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) (Kumar; Dixit,
65 2017). O uso conjunto dessas técnicas de caracterização possibilita uma análise abrangente das
66 propriedades físico-químicas e estruturais das nanopartículas, contribuindo para o avanço de
67 diversas aplicações em diversas áreas (Feldheim; Foss 2002).

68 A batata-doce (*Ipomoea batatas* [L.] Lam.) é considerada uma das principais culturas
69 alimentares do mundo. É amplamente produzida e consumida no Brasil, maior produtor da
70 América Latina, que detém o 16º lugar no ranking de produção mundial, com 805,4 mil
71 toneladas de tubérculos e R\$ 886,6 milhões em valor de produção (IBGE, 2020). As folhas são
72 amplamente utilizadas como alimento devido ao alto rendimento, tolerância à seca e à
73 capacidade de crescer em diferentes climas e sistemas agrícolas (Taira *et al.*, 2013). As folhas
74 também são conhecidas como uma das fontes mais importantes de polifenóis (Fu *et al.*, 2016)
75 com diversos constituintes, entre eles, os derivados do ácido cafeico e ácido clorogênico (Xi *et al.*
76 *et al.*, 2015) que podem atuar como compostos redutores e estabilizadores em processos de síntese
77 verde de nanopartículas de prata.

78 O objetivo do presente trabalho foi: (i) sintetizar nanopartículas de prata por diferentes
79 concentrações do extrato aquoso de folhas de batata-doce e (ii) caracterizar as nanopartículas
80 de prata biossintetizadas por meio das técnicas UV-VIS, DLS, Potencial Zeta, PDI, DRX, FTIR,
81 MET.

MATERIAL E MÉTODOS

Extrato da planta. Folhas saudáveis de batata-doce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam. cultivar BRS Rubissol) (Fig.1A) foram coletadas de ramas com 30 dias de idade, cultivadas em casa de vegetação em Recife, Pernambuco, Brasil. As folhas foram lavadas em solução surfactante de Triton X-100 diluída mil vezes, seguida de tripla lavagem com água destilada esterilizada e dispostas em bancada para secagem em temperatura ambiente. As folhas foram maceradas e imersas em 100 mL de água bidestilada esterilizada a 90 °C por 10 minutos. A solução foi filtrada duas vezes em papel filtro qualitativo 80g, o volume foi ajustado para 100 mL e a solução de coloração amarelo escuro foi utilizada para a produção das nanopartículas de prata. Para a análise de Infravermelho com Transformada de Fourier e Difractometria de Raio-X, utilizou a folha em pó. Para isso, 10 g de folhas foram secas em estufa, a 40 °C, por três dias e moídas num almofariz com auxílio de pistilo de porcelana. O pó resultante da moagem foi armazenado num tubo Falcon em dessecador até o momento das análises.

Síntese das nanopartículas de prata

Foram utilizadas cinco concentrações de extrato aquoso (3,12 mg. mL⁻¹; 6,25 mg. mL⁻¹; 12,5 mg. mL⁻¹; 25 mg. mL⁻¹ e 50 mg. mL⁻¹) que foram utilizadas como soluções precursoras para a formação de nanopartículas de prata. Nitrato de prata (AgNO₃) foi usado como sal metálico numa solução aquosa com concentração final de 1 mM para a síntese de AgNPs. A síntese ocorreu na proporção de 1:1.

Caracterização das nanopartículas de prata

As nanopartículas sintetizadas a partir das concentrações 3,12; 6,25; 12,5; 25 e 50 mg. mL⁻¹ do extrato aquoso de folhas de batata-doce foram nomeadas de AgNP1, AgNP2, AgNP3, AgNP4 e AgNP5, respectivamente.

Caracterização usando espectrofotometria entre UV-VIS: Após a mudança de coloração (amarelo escuro para marrom escuro), aproximadamente 30 minutos de reação, as AgNPs sintetizadas foram avaliadas no comprimento de onda na faixa de 300 a 800 nm. Dessa forma, 150 µL de cada amostra foram pipetados em poços de microplaca e lidas com auxílio do Multiskan SkyHigh™ (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, EUA) à 30°C. A absorbância das AgNPs foi monitorada em densidade óptica de 450 nm.

Caracterização usando espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier:

Os grupos funcionais químicos das biomoléculas presentes na folha de batata-doce, que podem

ter sido responsáveis pela produção de AgNPs, foram analisadas em um PerkinElmer Spectrum 400 (PerkinElmer, Waltham, MA, EUA). Assim sendo, 300 mL da suspensão de AgNPs foram centrifugados a 5000 rpm por 45 minutos, o *pellet* formado nos tubos foi ressuspenso em água ultrapura três vezes e deixado por três dias em dessecador de vidro. A análise foi realizada no modo pastilha de KBr, de maneira que, aproximadamente, 5 mg do pó de AgNP foi misturado em pó de KBr, colocada em um molde de compressão e posteriormente analisada em *wavenumber* entre 4000 e 400 cm^{-1} . Os dados foram analisados com o software Spectragryph v1.2.16.1.

Caracterização usando ZetaSizer: As medições de Espalhamento de Luz Dinâmica (DLS), Potencial Zeta e índices de polidispersividade foram realizadas em Zetasizer Nano Series Nano-ZS (Malvern Panalytical, Malvern, Reino Unido) com um laser He-Ne operando em 633 nm e o ângulo de dispersão foi ajustado para 173° para a detecção por retrodispersão.

Caracterização usando microscopia eletrônica de transmissão: A técnica de microscopia eletrônica de transmissão foi utilizada para determinar o formato, dispersão e tamanho das nanopartículas. As imagens foram obtidas por meio de microscópio JEM 1011 (JEOL USA, Inc, Peabody, MA) operando em 100 kV.

Caracterização usando Difratometria de Raio-X: Para determinar a estrutura cristalina do material, foi utilizado um difratômetro Bruker D2 PHASER (Bruker Corporation, Billerica, MA, EUA). Centrifugou-se a amostra por 5000 rpm por 45 minutos, recolhendo o *pellet* e o deixando secar em estufa a 60 °C por três dias. A amostra foi deixada em dessecador de vidro até o momento da análise. Aproximadamente 1,5 g de pó de AgNP foi analisado levando em consideração a Lei de Bragg, em que o comprimento de onda do raio-x foi de $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$, a uma distância interplanar do ângulo de dispersão de 2θ , em uma faixa de 5-80°, com velocidade de 40/min. Os dados foram analisados por meio do *software* Profex 5.1.1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Extrato aquoso: O extrato aquoso das folhas, em todas as concentrações, apresentou a coloração amarelo escuro e pH 6,2 (Fig. 1B). Essa coloração deve estar associada à presença de diversos compostos, incluindo flavonoides, carotenoides e, principalmente, antocianinas, encontradas em abundância nas folhas de batata-doce. Embora as antocianinas sejam conhecidas pela sua capacidade de produzir cores vermelhas, roxas, azuis e arroxeadas, essas moléculas são muito sensíveis às mudanças de pH e temperatura (Nguyen *et al.*, 2021). Meva *et al.* (2016) sintetizaram nanopartículas de prata utilizando extrato aquoso de folhas de batata-

doce e obtiveram extrato na coloração amarelo escuro, concluindo que a síntese ocorre mais rápido e o coloide fica mais estável quando o extrato aquoso se encontra com pH ácido em torno de 6,0 – 6,5. Nesse estudo o extrato aquoso apresentou a mesma coloração e pH 6,2, ou seja, condições ideais para a síntese de nanopartículas de prata.

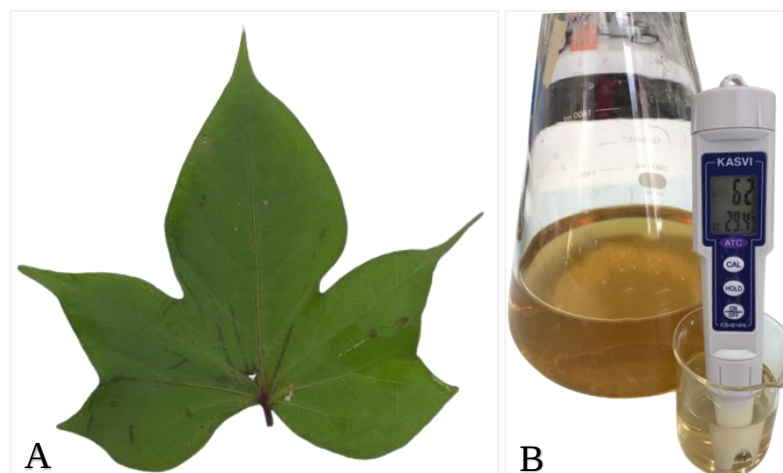


Figura 1. (A) Folha de batata-doce BRS Rubissol. (B) Extrato aquoso das folhas de batata-doce de cor amarelo escuro e pH a 6.2.

Caracterização das AgNPs: A caracterização das AgNPs nos fornecem informações detalhadas sobre suas propriedades físicas, químicas e estruturais, e é fundamental para compreender e controlar seu comportamento e desempenho em diferentes aplicações. Assim, no presente estudo, UV-vis espectroscopia, FTIR, potencial zeta, DLS, DRX e MET foram utilizados para caracterizar as nanopartículas sintetizadas pelo extrato aquoso de folhas de batata-doce.

UV-VIS. Ressonância plasmônica de superfície é um fenômeno óptico que ocorre quando a luz atinge a interface entre um material e um meio condutor (Santos *et al.*, 2016). É sabido que a presença de AgNPs é indicada pela coloração marrom escura devido às ressonâncias plasmônicas de superfície das partículas. As AgNPs foram produzidas em nosso estudo pela exposição de diferentes concentrações de extrato aquoso da folha de batata-doce à uma solução de AgNO_3 . Durante 30 minutos de incubação, os íons Ag foram completamente reduzidos, em todas as concentrações (Fig. 2).

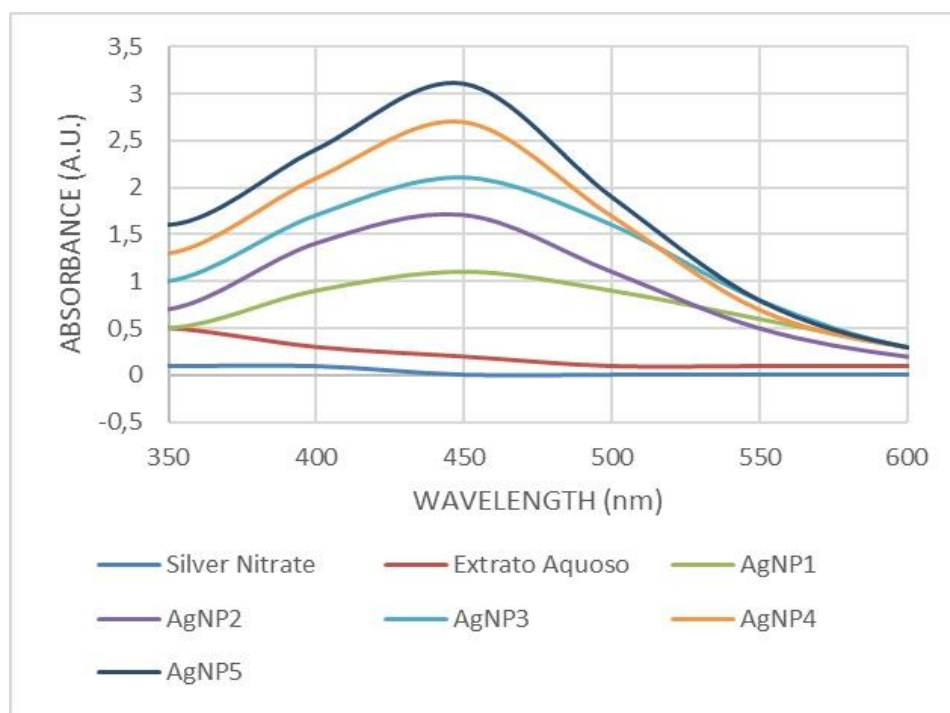


Figura 2. Mudança de coloração durante e redução de AgNO_3 em nanopartículas de prata (AgNPs) usando extrato aquoso de folhas de batata-doce. Suspensões marrom escuro de nanopartículas de prata sintetizadas após 30 minutos.

A observação visual da mudança de coloração confirmou a formação de nanopartículas. Em 450 nm, foi detectado um pico distinto no espectro de absorção UV-VIS de AgNPs biossintetizadas por todas as concentrações do extrato de folhas de *I. batatas*, indicando a presença de nanopartículas (Fig. 3). Quando o tamanho das partículas de prata é na escala de nanômetros, o comprimento de onda de ressonância plasmônica tende a ficar na região de aproximadamente 450 nm (Amendola *et al.* 2010; Smitha *et al.* 2008; Yeshchenko *et al.* 2012). Houve um aumento da absorbância com o aumento da concentração do extrato aquoso de folhas de batata-doce. Isso pode ter ocorrido porque à medida que a concentração do extrato aquoso aumenta, mais moléculas estão disponíveis para interagir na redução de íons de prata. Essas interações podem levar a um aumento na quantidade total de massa adsorvida na superfície das partículas de prata, como resultado, a ressonância plasmônica é afetada, levando a um aumento na absorbância da luz (Das *et al.*, 2010; Mock *et al.*, 2002; Vasireddy *et al.*, 2012).

Ressalta-se que o aumento da concentração pode eventualmente atingir um ponto de saturação, onde a capacidade de adsorção da superfície das nanopartículas é limitada. Nesse ponto, o aumento na concentração do extrato aquoso pode não resultar em um aumento proporcional na absorbância, ocorrendo assim a instabilidade do sistema coloidal. Em nosso trabalho, concentrações acima de 50 mg.mL^{-1} do extrato aquoso de folhas de batata-doce saturaram o sistema, causaram precipitação da suspensão e apresentavam fracos picos de absorbância em escalas diferentes de 450 nm. A solução de nitrato de prata e o extrato aquoso das folhas não apresentaram picos de absorbância. Após 24 h de reação, os picos mantiveram forte intensidade. A formação de AgNPs foi muito rápida e elas permaneceram estáveis na cor

191 marrom escuro e nos picos de 450 nm de absorbância, em temperatura ambiente, por sete meses,
 192 indicando que o extrato aquoso de folhas de batata-doce são bons estabilizadores.



193

194 Figura 3. Espectro no intervalo UV-VIS das AgNPs sintetizadas em diferentes concentrações
 195 de extrato aquoso de folhas de batata-doce.

196 **FT-IR.** Os espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) foram usados para
 197 caracterizar as biomoléculas responsáveis pela redução de íons de prata em AgNPs derivados
 198 de folhas de *I. batatas*. A Figura 4-A, referente à análise da amostra do extrato de folhas de

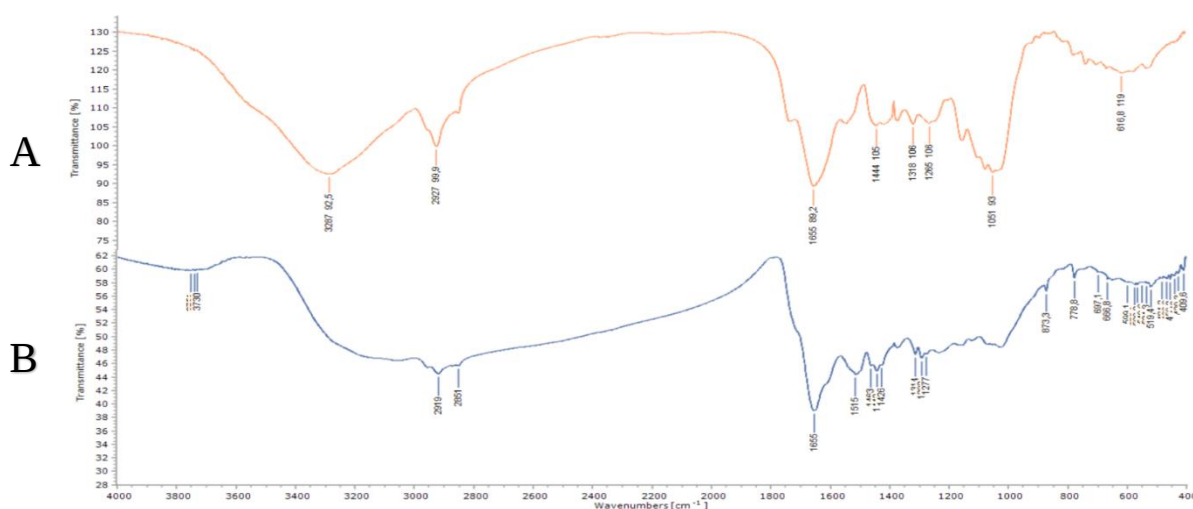


Figura 4. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR). (A) grupos funcionais associados ao extrato de folhas de batata-doce e (B) AgNPs sintetizadas a partir do extrato aquoso das folhas de batata-doce.

199 batata-doce, indicou vários picos distintos: 3287, 2927, 1655, 1444, 1318, 1265, 1051 e 617
 200 cm^{-1} . O pico 3287 cm^{-1} está relacionado ao estiramento de ligações O-H em grupos hidroxila

de polissacarídeos, como celulose e hemicelulose, que são componentes estruturais das plantas. O pico de 2927 cm^{-1} é típico de ligações C-H assimétricas em grupos metil (CH_3) e metileno (CH_2) presentes em moléculas orgânicas. Em 1655 cm^{-1} houve um pico que indicou a presença de ligações C=O (carbonila), como em grupos cetona ou aldeídos. Os picos na região conhecida como “*fingerprint*” indicaram: 1444 cm^{-1} , 1318 cm^{-1} , 1265 cm^{-1} , 1051 cm^{-1} e 617 cm^{-1} , estão associados a vibrações de flexão (deformação angular) de grupos metileno (CH_2), anéis aromáticos, grupos alcoólicos e podem ser encontrados em lipídios, polissacarídeos e compostos fenólicos.

O espectro FT-IR das AgNPs sintetizadas (Fig. 4-B) mostra supressão nas bandas 2919 cm^{-1} e 2851 cm^{-1} e a ocorrência de banda em 3750 cm^{-1} , relacionada com vibrações de estiramento de ligações de hidrogênio O-H. Essa região é conhecida como região de estiramento de hidroxila e é comumente observada em compostos que contêm grupos hidroxila, como álcoois e ácidos carboxílicos (Pavia *et al.*, 2001). Folhas de batata-doce possuem ácidos carboxílicos e álcoois em sua constituição, como o ácido cafeico, ácido clorogênico, álcool oleanólico e álcool beta-sitosterol (Luo *et al.*, 2021a, 2021b; Meinhart *et al.*, 2019; Nguyen *et al.*, 2021). Esses compostos já foram relatados com a capacidade de redução e estabilização de nanopartículas de prata (Ayaz Ahmed *et al.*, 2014; Tavan *et al.*, 2023; Thummaneni *et al.*, 2022; Vorobyova *et al.*, 2020) e podem estar relacionados a esses atributos neste trabalho.

Características físicas: Potencial zeta, mobilidade eletroforética (DLS), cristalografia (DRX) e MET. O DLS permitiu determinar o diâmetro hidrodinâmico (HD) das partículas suspensas por meio do espalhamento de luz, e a distribuição e a uniformidade dos tamanhos das partículas foi analisada ao determinar o Índice de Polidispersão (PdI). A mobilidade eletroforética permitiu a determinação do potencial Zeta das partículas. O HD (*Z-average*) para cada uma das AgNps está representado na tabela 1.

Extrato aquoso de folhas de batata-doce sintetizou nanopartículas de prata em escala nanométrica $< 100\text{ nm}$ (Fig. 5) estáveis. Geralmente, uma suspensão que apresenta um potencial zeta inferior a $\pm 20\text{ mV}$ é considerada instável e resultará na sedimentação das partículas fora da solução na ausência de outros fatores (Cosgrove, 2005). Nesse trabalho o potencial zeta foi de $-20,7 \pm 6,03$, indicando forte estabilidade coloidal. Diferentes concentrações do extrato aquoso de folhas de batata-doce sintetizaram nanopartículas com PdI entre 0,1 e 0,3, indicando uma distribuição de tamanhos das partículas relativamente homogênea. O tamanho uniforme das nanopartículas é essencial para garantir um desempenho consistente e controlado dos materiais em suas diferentes aplicações (Gaumet *et al.*, 2008).

Tabela 1. Tamanho das nanopartículas (nm), índice de polidispersão (PDI) e potencial zeta de nanopartículas de prata (AgNPs) produzidas por diferentes concentrações de extrato aquoso de folhas de batata-doce.

NANOPARTÍCULAS	TAMANHO (nm)	PDI	ZETA (mV)
AGNP-1	54,27 ± 21,10	0,151	-18,7 ± 7,71
AGNP-2	37,39 ± 15,81	0,179	-22,0 ± 7,63
AGNP-3	52,59 ± 22,26	0,179	-20,2 ± 6,52
AGNP-4	29,86 ± 14,65	0,241	-21,4 ± 6,17
AGNP-5	29,0 ± 14,41	0,247	-20,7 ± 6,03

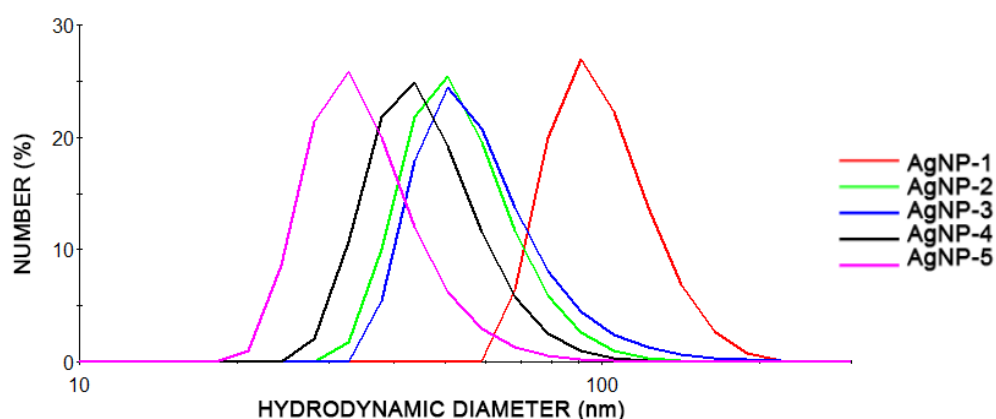


Figura 5. Diâmetro hidrodinâmico das nanopartículas de prata (AgNPs) sintetizadas por diferentes concentrações do extrato aquoso de folhas de batata-doce.

Várias reflexões Bragg foram observadas com valores 2θ de $38,11^\circ$; $44,29^\circ$; $64,43^\circ$; $77,38^\circ$, os quais em conjunto podem ser indexadas para as facetas 111, 200, 220 e 311 dos índices de Miller, que correspondem inteiramente com o metal prata, respectivamente (Fig. 6). O padrão DRX mostra claramente que as nanopartículas de prata sintetizadas por extrato aquoso de folhas de *I. batatas* são de natureza cristalina de face centrada cúbica, possuem alto nível de pureza, formato esférico e possuem tamanho aproximado de 43 nm (Fig. 7). Os índices de Miller são números inteiros que descrevem os planos cristalinos em um cristal e são usados para identificar e caracterizar os planos de difração observados em um padrão de difração de raios-X de uma partícula (Hinsch *et al.*, 2022). O tamanho médio cristalino das nanopartículas de prata foi encontrado como sendo de 43 nm. O valor do espaçamento interplanar entre os átomos foi calculado utilizando a Lei de Bragg (Mehta *et al.*, 2017).

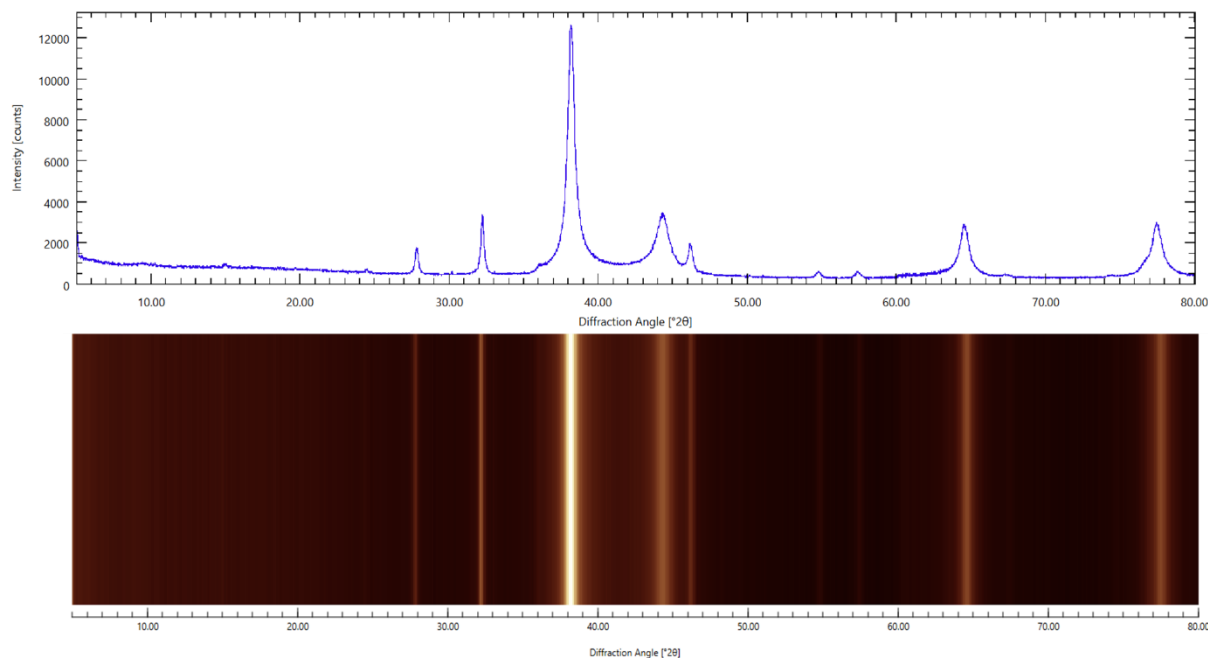


Figura 6. Difratoograma de nanopartículas de prata (AgNPs) sintetizadas por extrato aquoso de folhas de batata-doce e gráfico de intensidade dos índices de Miller.

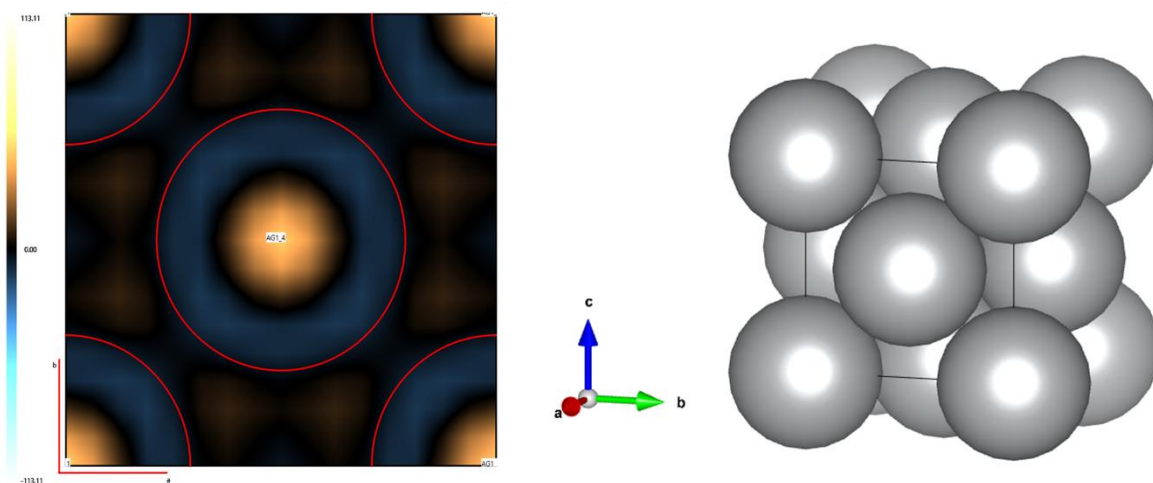


Figura 7. Mapa de densidade eletrônica de íons de prata da nanopartícula e esquema representando a cristalografia da nanopartícula de prata (AgNP) biossintetizada por extrato aquoso de *Ipomoea batatas*.

Caracterização adicional sobre tamanho, forma e agrupamento das nanopartículas foi realizada por meio da microscopia eletrônica de transmissão. As nanopartículas apresentaram o padrão de formato (esféricas), tamanho (~ 40 nm) e não apresentavam grandes agrupamentos

265 (Figura 8). Essas características são bem comuns em nanopartículas de prata sintetizadas por
266 extratos vegetais (Chakravarty *et al.*, 2022; Nayab; Akhtar, 2023).

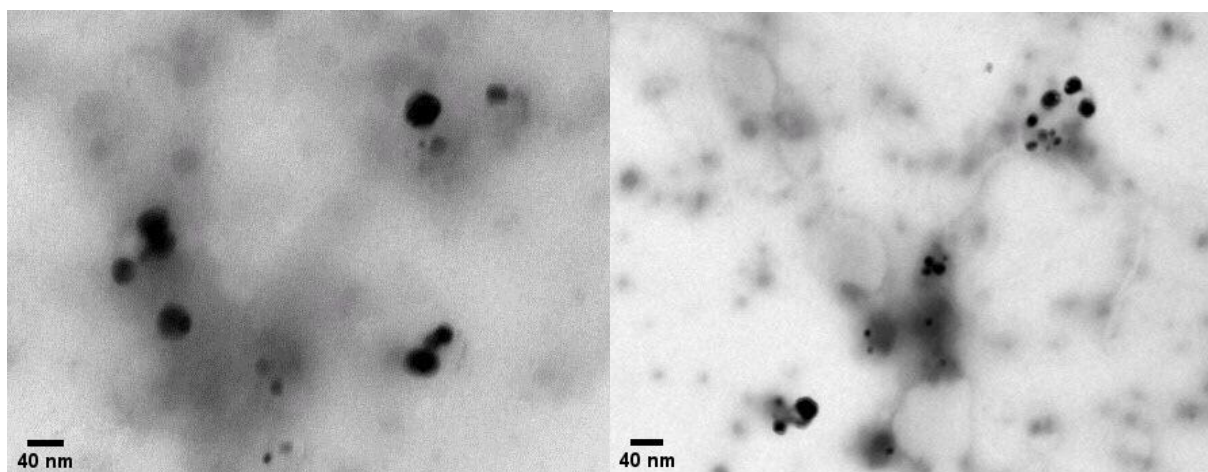


Figura 8. Microscopia Eletrônica de Transmissão de nanopartículas de prata (AgNPs) sintetizadas por extrato aquoso de folhas de batata-doce na concentração 50 mg/mL.

267 Esses resultados evidenciam o potencial de extratos vegetais como agentes redutores
268 de nanopartículas numa abordagem *eco-friendly*, com perspectivas promissoras para o
269 desenvolvimento de métodos de síntese sustentáveis, podendo assim ampliar o uso da
270 nanotecnologia em diversas áreas, como a agricultura.

271 CONCLUSÕES

272 O extrato aquoso de folhas de batata-doce agiu como agente redutor e estabilizador de
273 nanopartículas de prata. A síntese ocorreu em tempo rápido e formou nanopartículas com
274 tamanho de aproximadamente 40 nanômetros, com cristalografia cúbica e alta estabilidade
275 coloidal. Compostos químicos presentes na folha de batata-doce, pertencentes aos grupos metil,
276 cetona e aldeídos, podem ter sido responsáveis pela capacidade de redução e estabilização das
277 nanopartículas, contudo, testes químicos mais precisos devem ser realizados a fim de investigar
278 com precisão a química envolvida nesses processos.

279

280 AGRADECIMENTOS

281 Esta pesquisa foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível
282 Superior (CAPES). Agradecemos a instituição pela bolsa de estudo. Ao Laboratório de
283 Tecnologia de Aglomerantes e à Central Analítica do Departamento de Química Fundamental
284 da Universidade Federal de Pernambuco, pela disponibilidade dos equipamentos para a
285 realização da Difração de raios-x e Infravermelho, respectivamente.

286

REFERÊNCIAS

- Alharbi, N. S., Alsubhi, N. S., & Felimban, A. I. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles using medicinal plants: Characterization and application. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 15(3), 109–124. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.06.012>
- Amendola, V., Bakr, O. M., & Stellacci, F. (2010). A Study of the Surface Plasmon Resonance of Silver Nanoparticles by the Discrete Dipole Approximation Method: Effect of Shape, Size, Structure, and Assembly. *Plasmonics*, 5(1), 85–97. <https://doi.org/10.1007/s11468-009-9120-4>
- Ansari, M., Ahmed, S., Abbasi, A., Hamad, N. A., Ali, H. M., Khan, M. T., et al. (2023). Green Synthesized Silver Nanoparticles: A Novel Approach for the Enhanced Growth and Yield of Tomato against Early Blight Disease. *Microorganisms*, 11(4), 886. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11040886>
- Ayaz Ahmed, K. B., Subramaniam, S., Veerappan, G., Hari, N., Sivasubramanian, A., & Veerappan, A. (2014). β -Sitosterol- D -glucopyranoside isolated from *Desmostachya bipinnata* mediates photoinduced rapid green synthesis of silver nanoparticles. *RSC Adv.*, 4(103), 59130–59136. <https://doi.org/10.1039/C4RA10626A>
- Bykkam, S., Ahmadipour, M., Narisngam, S., Kalagadda, V. R., & Chidurala, S. C. (2015). RETRACTED: Extensive Studies on X-Ray Diffraction of Green Synthesized Silver Nanoparticles. *Advances in Nanoparticles*, 04(01), 1–10. <https://doi.org/10.4236/anp.2015.41001>
- Chakravarty, A., Ahmad, I., Singh, P., Ud Din Sheikh, M., Aalam, G., Sagadevan, S., & Ikram, S. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles using fruits extracts of *Syzygium cumini* and their bioactivity. *Chemical Physics Letters*, 795, 139493. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2022.139493>
- Cosgrove, T. (Ed.). (2005). *Colloid Science: Principles, Methods and Applications* (1st ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781444305395>
- Das, R., Nath, S. S., Chakdar, D., Gope, G., & Bhattacharjee, R. (2010). Synthesis of silver nanoparticles and their optical properties. *Journal of Experimental Nanoscience*, 5(4), 357–362. <https://doi.org/10.1080/17458080903583915>

324

325 De Mello Donegá, C. (Ed.). (2014). *Nanoparticles: Workhorses of Nanoscience*. Berlin,
326 Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44823-6>

327

328 Elkobrosy, D., Al-Askar, A. A., El-Gendi, H., Su, Y., Nabil, R., Abdelkhalek, A., & Behiry,
329 S. (2023). Nematocidal and Bactericidal Activities of Green Synthesized Silver Nanoparticles
330 Mediated by Ficus sycomorus Leaf Extract. *Life*, 13(5), 1083.
331 <https://doi.org/10.3390/life13051083>

332

333 Fatimah, I., & Afrid, Z. H. V. I. (2019). Characteristics and antibacterial activity of green
334 synthesized silver nanoparticles using red spinach (*Amaranthus Tricolor* L.) leaf extract.
335 *Green Chemistry Letters and Reviews*, 12(1), 25–30.
336 <https://doi.org/10.1080/17518253.2019.1569729>

337 Fatimah, I., & Indriani, N. (2018). Silver Nanoparticles Synthesized Using Lantana Camara
338 Flower Extract by Reflux, Microwave and Ultrasound Methods. *Chemistry Journal of*
339 *Moldova*, 13(1), 95–102. <https://doi.org/10.19261/cjm.2017.461>

340

341 Feldheim, D. L., & Foss, C. A. (Eds.). (2002). *Metal nanoparticles: synthesis,*
342 *characterization, and applications*. New York: Marcel Dekker.

343

344 François Eya'ane Meva, E. R. A. M., Marcelle, L. S., Cecile, O. E., Agnes, A. N., Djiopang,
345 Y. S., Fanny, A. E. M., et al. (2016). Unexplored vegetal green synthesis of silver
346 nanoparticles: A preliminary study with Corchorus olitorus Linn and Ipomea batatas (L.)
347 Lam. *African Journal of Biotechnology*, 15(10), 341–349.
348 <https://doi.org/10.5897/AJB2015.14962>

349

350 Fu, Z., Tu, Z., Zhang, L., Wang, H., Wen, Q., & Huang, T. (2016). Antioxidant activities and
351 polyphenols of sweet potato (Ipomoea batatas L.) leaves extracted with solvents of various
352 polarities. *Food Bioscience*, 15, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2016.04.004>

353

354 Gaumet, M., Vargas, A., Gurny, R., & Delie, F. (2008). Nanoparticles for drug delivery: The
355 need for precision in reporting particle size parameters. *European Journal of Pharmaceutics*
356 *and Biopharmaceutics*, 69(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2007.08.001>

357

358 Hertl, N., Krüger, K., & Bünermann, O. (2022). Electronically Nonadiabatic H Atom
359 Scattering from Low Miller Index Surfaces of Silver. *Langmuir*, 38(46), 14162–14171.
360 <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02140>

361

- Hinsch, J. J., Liu, J., White, J. J., & Wang, Y. (2022). The Role of Steps on Silver Nanoparticles in Electrocatalytic Oxygen Reduction. *Catalysts*, 12(6), 576. <https://doi.org/10.3390/catal12060576>
- Ishida, H. (2000). Nutritive evaluation on chemical components of leaves, stalks and stems of sweet potatoes (*Ipomoea batatas* L.). *Food Chemistry*, 68(3), 359–367. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00206-X](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00206-X)
- Kumar, A., & Dixit, C. K. (2017). Methods for characterization of nanoparticles. In *Advances in Nanomedicine for the Delivery of Therapeutic Nucleic Acids* (pp. 43–58). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100557-6.00003-1>
- Luo, D., Mu, T., & Sun, H. (2021b). Profiling of phenolic acids and flavonoids in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves and evaluation of their anti-oxidant and hypoglycemic activities. *Food Bioscience*, 39, 100801. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100801>
- Mehta, B. K., Chhajlani, M., & Shrivastava, B. D. (2017). Green synthesis of silver nanoparticles and their characterization by XRD. *Journal of Physics: Conference Series*, 836, 012050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/836/1/012050>
- Meinhart, A. D., Damin, F. M., Caldeirão, L., De Jesus Filho, M., Da Silva, L. C., Da Silva Constant, L., et al. (2019). Study of new sources of six chlorogenic acids and caffeic acid. *Journal of Food Composition and Analysis*, 82, 103244. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103244>
- Mittal, A. K., Bhaumik, J., Kumar, S., & Banerjee, U. C. (2014). Biosynthesis of silver nanoparticles: Elucidation of prospective mechanism and therapeutic potential. *Journal of Colloid and Interface Science*, 415, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.10.018>
- Mock, J. J., Barbic, M., Smith, D. R., Schultz, D. A., & Schultz, S. (2002). Shape effects in plasmon resonance of individual colloidal silver nanoparticles. *The Journal of Chemical Physics*, 116(15), 6755–6759. <https://doi.org/10.1063/1.1462610>
- Nayab, D., & Akhtar, S. (2023). Green synthesized silver nanoparticles from eucalyptus leaves can enhance shelf life of banana without penetrating in pulp. *PLOS ONE*, 18(3), e0281675. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281675>

- Nguyen, H. C., Chen, C.-C., Lin, K.-H., Chao, P.-Y., Lin, H.-H., & Huang, M.-Y. (2021). Bioactive Compounds, Antioxidants, and Health Benefits of Sweet Potato Leaves. *Molecules*, 26(7), 1820. <https://doi.org/10.3390/molecules26071820>
- Pavia, D. L., Lampman, G. M., & Kriz, G. S. (2001). *Introduction to spectroscopy: a guide for students of organic chemistry* (3rd ed.). Fort Worth: Harcourt College Publishers.
- Santos, J., Santos, M., Thesing, A., Tavares, F., Griep, J., & Rodrigues, M. (2016). Ressonância de plasmon de superfície localizado e aplicação em biossensores e células solares. *Química Nova*. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20160126>
- Smitha, S. L., Nissamudeen, K. M., Philip, D., & Gopchandran, K. G. (2008). Studies on surface plasmon resonance and photoluminescence of silver nanoparticles. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 71(1), 186–190. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2007.12.002>
- Ssekatawa, K., Byarugaba, D. K., Kato, C. D., Wampande, E. M., Ejobi, F., Nakavuma, J. L., et al. (2021). Green Strategy–Based Synthesis of Silver Nanoparticles for Antibacterial Applications. *Frontiers in Nanotechnology*, 3, 697303. <https://doi.org/10.3389/fnano.2021.697303>
- Suárez, S., Mu, T., Sun, H., & Añón, M. C. (2020). Antioxidant activity, nutritional, and phenolic composition of sweet potato leaves as affected by harvesting period. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 178–188. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1716796>
- Taira, J., Taira, K., Ohmine, W., & Nagata, J. (2013). Mineral determination and anti-LDL oxidation activity of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves. *Journal of Food Composition and Analysis*, 29(2), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2012.10.007>
- Talank, N., Morad, H., Barabadi, H., Mojab, F., Amidi, S., Kobarfard, F., et al. (2022). Bioengineering of green-synthesized silver nanoparticles: In vitro physicochemical, antibacterial, biofilm inhibitory, anticoagulant, and antioxidant performance. *Talanta*, 243, 123374. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123374>
- Tavan, M., Hanachi, P., Mirjalili, M. H., & Dashtbani-Roozbehani, A. (2023). Comparative assessment of the biological activity of the green synthesized silver nanoparticles and aqueous

- 435 leaf extract of *Perilla frutescens* (L.). *Scientific Reports*, 13(1), 6391.
 436 <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33625-x>
 437
- 438 Thummaneni, C., Surya Prakash, D. V., Golli, R., & Vangalapati, M. (2022). Green synthesis
 439 of silver nanoparticles and characterization of caffeic acid from *Myristica fragrans* (Nutmeg)
 440 against antibacterial activity. *Materials Today: Proceedings*, 62, 4001–4005.
 441 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.586>
 442
- 443 Universitas Brawijaya, Pulungan, M. H., Santoso, E. F. S. M., & Universitas Brawijaya.
 444 (2020). Ice Cream Cup Production Using Purple Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L. Poir) as a
 445 Substitute Ingredient. *Industria: Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri*, 9(3), 184–
 446 194. <https://doi.org/10.21776/ub.industria.2020.009.03.3>
 447
- 448 Vasireddy, R., Paul, R., & Mitra, A. K. (2012). Green Synthesis of Silver Nanoparticles and
 449 the Study of Optical Properties. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 2, 8.
 450 <https://doi.org/10.5772/52329>
 451
- 452 Vorobyova, V., Vasyliiev, G., & Skiba, M. (2020). Eco-friendly “green” synthesis of silver
 453 nanoparticles with the black currant pomace extract and its antibacterial, electrochemical, and
 454 antioxidant activity. *Applied Nanoscience*, 10(12), 4523–4534.
 455 <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01369-z>
 456
- 457 Wibowo, A., Tajalla, G. U. N., Marsudi, M. A., Cooper, G., Asri, L. A. T. W., Liu, F., et al.
 458 (2021). Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Extract of Cilembu Sweet Potatoes
 459 (*Ipomoea batatas* L var. Rancing) as Potential Filler for 3D Printed Electroactive and Anti-
 460 Infection Scaffolds. *Molecules*, 26(7), 2042. <https://doi.org/10.3390/molecules26072042>
 461
- 462 Xi, L., Mu, T., & Sun, H. (2015). Preparative purification of polyphenols from sweet potato
 463 (*Ipomoea batatas* L.) leaves by AB-8 macroporous resins. *Food Chemistry*, 172, 166–174.
 464 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.039>
 465
- 466 Yeshchenko, O. A., Dmitruk, I. M., Alexeenko, A. A., Kotko, A. V., Verdal, J., & Pinchuk,
 467 A. O. (2012). Size and Temperature Effects on the Surface Plasmon Resonance in Silver
 468 Nanoparticles. *Plasmonics*, 7(4), 685–694. <https://doi.org/10.1007/s11468-012-9359-z>
 469
- 470 Zheng, W., & Clifford, M. N. (2008). Profiling the chlorogenic acids of sweet potato
 471 (*Ipomoea batatas*) from China. *Food Chemistry*, 106(1), 147–152.
 472 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.05.053>

CAPÍTULO 3
**Atividade nematocida de nanopartículas de prata sintetizadas a partir de folhas de
batata-doce contra *Meloidogyne javanica* em tomateiro**

Atividade nematicida de nanopartículas de prata sintetizadas a partir de folhas de batata-doce contra *Meloidogyne javanica* em tomateiro

RESUMO

Os fitonematoídeos têm impacto mundialmente relevante na agricultura e no manejo de culturas agrícolas. Os nematoídeos do gênero *Meloidogyne*, são particularmente notáveis por prejudicar drasticamente o sistema radicular, impedindo a absorção de água e nutrientes, levando perdas substanciais para os agricultores. Uma alternativa versátil e promissora para o manejo desses patógenos é a síntese verde de nanopartículas, pois permitem a obtenção de nanomateriais funcionais com menor impacto ambiental, promovendo o desenvolvimento de tecnologias mais seguras e sustentáveis. O objetivo deste trabalho foi (i) verificar a toxicidade das suspensões de nanopartículas de prata (AgNPs) sintetizadas por extrato de folhas de batata-doce em tomateiro; (ii) avaliar o efeito *in vitro* de AgNPs na mortalidade e eclosão de juvenis de segundo estágio (J2) de *M. javanica*; (iii) avaliar o efeito de AgNPs na reprodução do nematoídeo em tomateiro. A suspensão de AgNPs utilizada resultou da síntese verde de 25 mg. mL⁻¹ de folha de batata-doce. Para os testes *in vitro*, a amostra foi diluída para 1, 5, 25, 50, 100 e 200 µmol.L⁻¹, sendo as duas melhores diluições dos testes *in vitro* usadas para os testes *in vivo*. As AgNPs não foram tóxicas para tomateiros e apresentaram efeito nematicida *in vitro* de 70% na mortalidade de J2. O aumento das concentrações de AgNPs aumentou a mortalidade e diminuiu a eclosão dos juvenis ao longo de 24, 48 e 72 horas. A aplicação de AgNPs em tomateiro reduziu os índices de galhas e de massa de ovos e a reprodução do nematoídeo (FR < 1), sem promover efeito tóxico. O extrato aquoso de folhas de batata-doce não teve efeito nematicida, mas quando associado às AgNPs apresentou resultado equivalente ao nematicida Vertimec® 18EC, destacando-se como uma possível alternativa ao controle químico no manejo integrado de *M. javanica*. Mais estudos devem ser realizados para entender o comportamento dessas nanopartículas no meio ambiente.

Palavras-chaves: *Ipomoea batatas*, Nanotecnologia, Nematoídeo das galhas, *Solanum lycopersicum*

528 **ABSTRACT**

529 Plant-parasitic nematodes have globally relevant impacts on agriculture and the management
530 of agricultural crops. Nematodes of the genus *Meloidogyne* are particularly notable for
531 drastically impairing the root system, hindering water and nutrient absorption, leading to
532 substantial losses for farmers. A versatile and promising alternative for managing these
533 pathogens is the green synthesis of nanoparticles, as it allows obtaining functional
534 nanomaterials with lower environmental impact, promoting the development of safer and more
535 sustainable technologies. The objective of this work was to (i) assess the toxicity of silver
536 nanoparticle (AgNPs) suspensions synthesized using sweet potato leaf extract on tomato plants;
537 (ii) evaluate the in vitro effect of AgNPs on the mortality and hatching of second-stage juveniles
538 (J2) of *M. javanica*; and (iii) evaluate the effect of AgNPs on nematode reproduction in tomato
539 plants. The AgNPs suspension used resulted from the green synthesis of 25 mg. mL⁻¹ of sweet
540 potato leaf. For in vitro tests, the sample was diluted to 1, 5, 25, 50, 100, and 200 µmol.L⁻¹,
541 with the two most effective dilutions from the in vitro tests used for in vivo tests. AgNPs were
542 non-toxic to tomato plants and exhibited an in vitro nematicidal effect of 70% on J2 mortality.
543 Increasing concentrations of AgNPs increased J2 mortality and decreased hatching rates over
544 24, 48, and 72 hours. Application of AgNPs on tomato plants reduced gall and egg mass indices,
545 and nematode reproduction (RF < 1), without inducing toxic effects. Sweet potato leaf aqueous
546 extract had no nematicidal effect, but when associated with AgNPs, it yielded results equivalent
547 to the nematicide Vertimec® 18EC, proving to be a potential alternative to chemical control in
548 the integrated management of *M. javanica*. Further studies should be conducted to understand
549 the behavior of these nanoparticles in the environment.

550

551 **Keywords:** Ipomoea batatas, Nanotechnology, Root-knot nematode, *Solanum lycopersicum*.

INTRODUÇÃO

Os nematoides parasitas de plantas são patógenos cosmopolitas que possuem ampla gama de hospedeiros e causam perdas anuais de safra em torno de US\$ 100 bilhões no mundo (D. Howland; Quintanilla, 2023; Ghareeb *et al.*, 2020). Os nematoides endoparasitas sedentários, pertencentes ao gênero *Meloidogyne* Goeldi, 1887, são os mais prejudiciais, pois parasitam quase todos os grupos de plantas de importância agrícola no Brasil (Machado *et al.*, 2022; Sasser *et al.*, 1983). A espécie *Meloidogyne javanica* está amplamente distribuída nas áreas produtivas do Brasil causando inúmeros prejuízos (Carneiro *et al.*, 1997). Se este fitonematoide for introduzido na área de cultivo, a erradicação se torna difícil e economicamente inviável, pois os nematicidas químicos sintéticos são caros, tóxicos e poluentes, além de ter possibilidade do nematoide adquirir resistência (Ghareeb *et al.*, 2022b; J. A. L. Silva *et al.*, 1999).

O tomate (*Solanum lycopersicum*) é a hortaliça mais importante do mundo, mas é frequentemente infectado por *Meloidogyne* spp., o que limita a quantidade e qualidade na produção dos frutos (Desaeger; Watson, 2019; Elsharkawy *et al.*, 2022; J. D. O. Silva *et al.*, 2019). As perdas de safra, na cultura do tomateiro, atribuída aos nematoides das galhas foram estimadas em até 61% em todo o mundo (Karssen *et al.*, 2013). Com isso, é interessante a busca por práticas alternativas de controle de fitonematoides, como a introdução da nanotecnologia no manejo integrado.

A nanotecnologia tem emergido como uma promissora abordagem na agricultura para o controle eficaz de doenças e pragas (D. Singh; Gurjar, 2022). Por meio da manipulação de materiais em escala nanométrica, como nanopartículas metálicas, é possível desenvolver formulações altamente eficazes. Essa abordagem inovadora tem o potencial de reduzir significativamente o uso de pesticidas convencionais, minimizando os impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana, enquanto aumenta a produtividade e a sustentabilidade das práticas agrícolas (Ditta, 2012; Mukhopadhyay, 2014; Periakaruppan *et al.*, 2023; Usman *et al.*, 2020).

No entanto, é fundamental conduzir pesquisas contínuas para garantir a segurança e eficácia dessas tecnologias, assegurando que a nanotecnologia na agricultura seja uma ferramenta viável e responsável para enfrentar os desafios fitossanitários deste século. Com isso, é crescente o número de pesquisas envolvendo a biossíntese de nanopartículas metálicas

584 utilizando extratos vegetais ou microrganismos como agentes redutores e estabilizadores,
585 tornando a nanotecnologia mais *eco-friendly* e segura para aplicações na agricultura (Jiang *et*
586 *al.*, 2022; Shende *et al.*, 2022).

587 Não há estudos sobre o efeito nematicida de nanopartículas de prata (AgNPs)
588 sintetizadas por extrato de folhas de batata-doce. O objetivo deste trabalho foi (i) verificar a
589 toxicidade das suspensões de AgNPs biossintetizadas em plantas de tomate; (ii) avaliar o efeito
590 in vitro de AgNPs na mortalidade e eclosão de juvenis de segundo estágio (J2) de *M. javanica*;
591 (iii) avaliar a reprodução de *M. javanica* em plantas de tomateiro.

592 MATERIAL E MÉTODOS

593 Fonte de nematoides:

594 Em outubro de 2021, raízes de batata-doce com sintomas de meloidoginose foram coletadas de
595 uma plantação no município de Rio Tinto, Paraíba, Brasil (6°46'26.1"S 35°06'26.4"W) onde as
596 perdas, resultantes à infecção de *Meloidogyne* spp., se aproximaram a 90%. As raízes foram
597 levadas ao Laboratório de Fitonematologia da Universidade Federal Rural de Pernambuco,
598 Recife, Brasil, onde fêmeas com massas de ovos foram separadas da raiz com auxílio de uma
599 agulha, transferidas para tubos contendo solução de hipoclorito de sódio a 1% e submetida a
600 vórtex por 30 segundos. Em seguida, a suspensão foi vertida em vasos de 500 mL de capacidade
601 contendo uma muda de tomateiro cultivar Santa Cruz KADA Gigante com 25 dias de idade,
602 transplantada em solo autoclavado (121°C por 2 horas). Foram inoculados, no total, 10 vasos
603 com tomateiros, que foram deixados em casa de vegetação para multiplicação do inóculo.

604

605 Identificação dos nematoides:

606 Os nematoides foram identificados a partir do padrão perineal das fêmeas e por meio da
607 eletroforese da isoenzima esterase.

608 Fonte das nanopartículas:

609 A suspensão de nanopartículas de prata utilizada nesse estudo foi a amostra AgNP-4, resultante
610 da síntese verde utilizando 25 mg. mL⁻¹ de folha de batata-doce. Essas nanopartículas, de
611 tamanho aproximado de 40 nm, estavam estáveis e possuíam cristalografia cúbica com formato
612 levemente esférico. Para a realização dos testes *in vitro*, a amostra foi diluída para: 1 µmol.L⁻¹;
613 5 µmol.L⁻¹; 25 µmol.L⁻¹; 50 µmol.L⁻¹; 100 µmol.L⁻¹ e 200 µmol.L⁻¹, com código AgNP D1,
614 AgNP D2, AgNP D3, AgNP D4, AgNP D5 e AgNP D6, respectivamente. As duas melhores
615 diluições dos testes *in vitro* foram escolhidas para a realização dos testes *in vivo*.

616 Experimentos *in vitro*

617 Mortalidade de juvenis de segundo estágio:

618 A mortalidade dos J2 foi determinada em placas de cultura de células com 24 poços com volume
619 de trabalho de 5 mL. Os tratamentos consistiram em T1. Água destilada esterilizada (controle
620 negativo); T2. Nematicida Vertimec® 18EC Syngenta (controle positivo); T3. Extrato aquoso

da folha de batata-doce na maior concentração utilizada na síntese (50 mg.mL⁻¹); T4. AgNP 1 µmol.L⁻¹; T5. AgNP 5 µmol.L⁻¹; T6. AgNP 25 µmol.L⁻¹; T7. AgNP 50 µmol.L⁻¹; T8. AgNP 100 µmol.L⁻¹ e T9. AgNP 200 µmol.L⁻¹. Em cada poço foram pipetados 2 mL da suspensão de cada tratamento e 1 mL de suspensão contendo aproximadamente 100 J2. A avaliação ocorreu após 24, 48 e 72 horas de exposição ao tratamento. As placas foram vedadas e ficaram em câmara BOD sob temperatura constante de 25 graus. O J2 foi considerado morto quando estava imóvel e foi considerado vivo quando estava móvel. A porcentagem de nematoides mortos foi calculada pela fórmula:

$$Mortalidade (\%) = \left[\frac{(n^{\circ} J2 \text{ vivos na água} - n^{\circ} J2 \text{ vivos tratamentos})}{n^{\circ} J2 \text{ vivos na água}} \right] \times 100$$

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, com nove tratamentos e cinco repetições, com cada unidade experimental constituída por uma placa.

Efeito na embriogênese - eclosão de J2:

A eclosão de J2 foi determinada em placas de cultura de células com 24 poços com volume de trabalho de 5 mL. Os tratamentos consistiram em T1. Água destilada esterilizada (controle negativo); T2. Nematicida Vertimec® 18EC Syngenta (controle positivo); T3. Extrato aquoso da folha de batata-doce na maior concentração utilizada na síntese (50 mg.mL⁻¹); T4. AgNP 1 µmol.L⁻¹; T5. AgNP 5 µmol.L⁻¹; T6. AgNP 25 µmol.L⁻¹; T7. AgNP 50 µmol.L⁻¹; T8. AgNP 100 µmol.L⁻¹ e T9. AgNP 200 µmol.L⁻¹. Em cada poço foram pipetados 2 mL da suspensão de cada tratamento e 1 mL de suspensão contendo aproximadamente 100 ovos. A avaliação ocorreu após 24, 48 e 72 horas de exposição ao tratamento. As placas foram vedadas e ficaram em câmara BOD sob temperatura constante de 25 graus. Foi contabilizado o número de J2 que eclodiram em cada poço, por meio da fórmula:

$$Eclosão \text{ de } J2 (\%) = \left[\frac{(n^{\circ} J2 \text{ na água} - n^{\circ} J2 \text{ tratamentos})}{n^{\circ} J2 \text{ na água}} \right] \times 100$$

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com nove tratamentos e cinco repetições.

648 Experimentos *in vivo*

649 Teste de toxicidade das AgNPs em tomateiro:

650 Mudas de tomateiro cv. Santa Cruz KADA foram transplantadas para vasos contendo substrato
651 autoclavado de solo e areia na proporção 1:1. Três testes foram realizados: a) 15 mL de
652 suspensão de nanopartícula recém-sintetizada, sem diluição, foi borrifada em toda a planta com
653 idade de 45 dias; b) 15 mL de suspensão de nanopartícula, sem diluição, foi irrigada diretamente
654 no substrato; c) 15 mL de suspensão de nanopartícula, sem diluição, foi borrifada em todo
655 tomateiro que posteriormente foi guardado em câmara úmida em saco plástico transparente de
656 10 litros, a fim formar um “microclima”. O teste foi realizado em triplicata para verificação de
657 efeito tóxico da suspensão de nanopartículas nos tecidos das plantas.

658 Fator de Reprodução, índice de massa de ovos e índice de número de galhas:

659 Mudas de tomateiro cv. Santa Cruz Kada foram transplantadas 35 dias após a semeadura para
660 vasos de 1 Litro, contendo substrato autoclavado composto de uma mistura de solo e areia na
661 proporção 1:1. Foi transplantada uma muda por vaso e estes ficaram dispostos em casa de
662 vegetação aclimatando por um período de sete dias. Foi realizada a inoculação de 2500 ovos+J2
663 extraídos de raízes de tomateiros mantidos em casa de vegetação como plantas multiplicadoras.
664 Os tratamentos consistiram em T1. Água destilada esterilizada (controle negativo); T2.
665 Nematicida Vertimec® 18EC Syngenta (controle positivo); T3. Extrato aquoso da folha de
666 batata-doce na maior concentração utilizada na síntese (50 mg.mL⁻¹); T4. AgNP D5 100
667 µmol.L⁻¹; T5. AgNP D6 200 µmol.L⁻¹. Foram utilizados três modos de aplicação: H1.
668 Tratamentos + suspensão de nematoides ao mesmo tempo; H2. suspensão de nematoides e 24
669 horas depois a aplicação dos tratamentos; H3. Aplicação dos tratamentos e 24 horas depois a
670 suspensão de nematoides. A suspensão de cada tratamento consistiu em 50 mL, referente à
671 capacidade de campo de cada vaso. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente
672 casualizado, com cinco tratamentos e nove repetições.

673 Quarenta e cinco dias após a inoculação foi realizada a quantificação de nematoides
674 presentes nas raízes através do método de extração proposto por Coolen; D’Herde (1972). A
675 reprodução do nematoide foi avaliada pelo fator de reprodução (FR), determinado por meio do
676 quociente entre a população final (quantificada) e a população inicial (inoculada) do nematoide
677 (Oostenbrink, 1966). O índice de massa de ovos (IMO) foi determinado colorindo-se as massas
678 de ovos com fucsina ácida (Taylor; Sasser, 1978) e utilizando-se a escala de 1 a 5, proposta por

Charchar *et al.*, (2003). Para o índice de galhas (IG) também se utilizou a escala de 1 a 5, de acordo com Charchar *et al.*, (2003).

ANÁLISE ESTATÍSTICA:

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com testes de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk) e homogeneidade da variância. Para os dados dos testes *in vitro* (mortalidade e eclosão de J2), foi realizado teste F, seguido de análise de regressão longitudinal (repetição no tempo) quando verificado diferença estatística. As diferenças entre as médias foram testadas para significância a $p < 0.05$ utilizando o teste de Tukey. Todas as análises foram realizadas utilizando o software R *version* 4.3.1.

RESULTADOS

Avaliação da atividade nematicida de diluições de nanopartícula de prata sintetizadas por extrato aquoso de folhas de batata-doce sobre *M. javanica* in vitro:

A mortalidade de J2 variou significativamente com as concentrações de AgNPs (1, 5, 25, 50, 100 e 200 $\mu\text{mol.L}^{-1}$) e o período de exposição (24, 48 e 72 horas). O percentual de J2 mortos é apresentado pela regressão longitudinal polinomial de ordem dois com significância estatística ($p \leq 0,05$) que explica 85,85% da variabilidade da variável dependente (Figura 1-A). O coeficiente de regressão para as concentrações de AgNPs indica uma relação positiva com o percentual de mortalidade de J2, sugerindo que o aumento das concentrações da suspensão de nanopartículas de prata está associado ao aumento proporcional da mortalidade de J2 ao longo de 24, 48 e 72 horas, conforme mostra o gráfico de linhas (Figura 1-B).

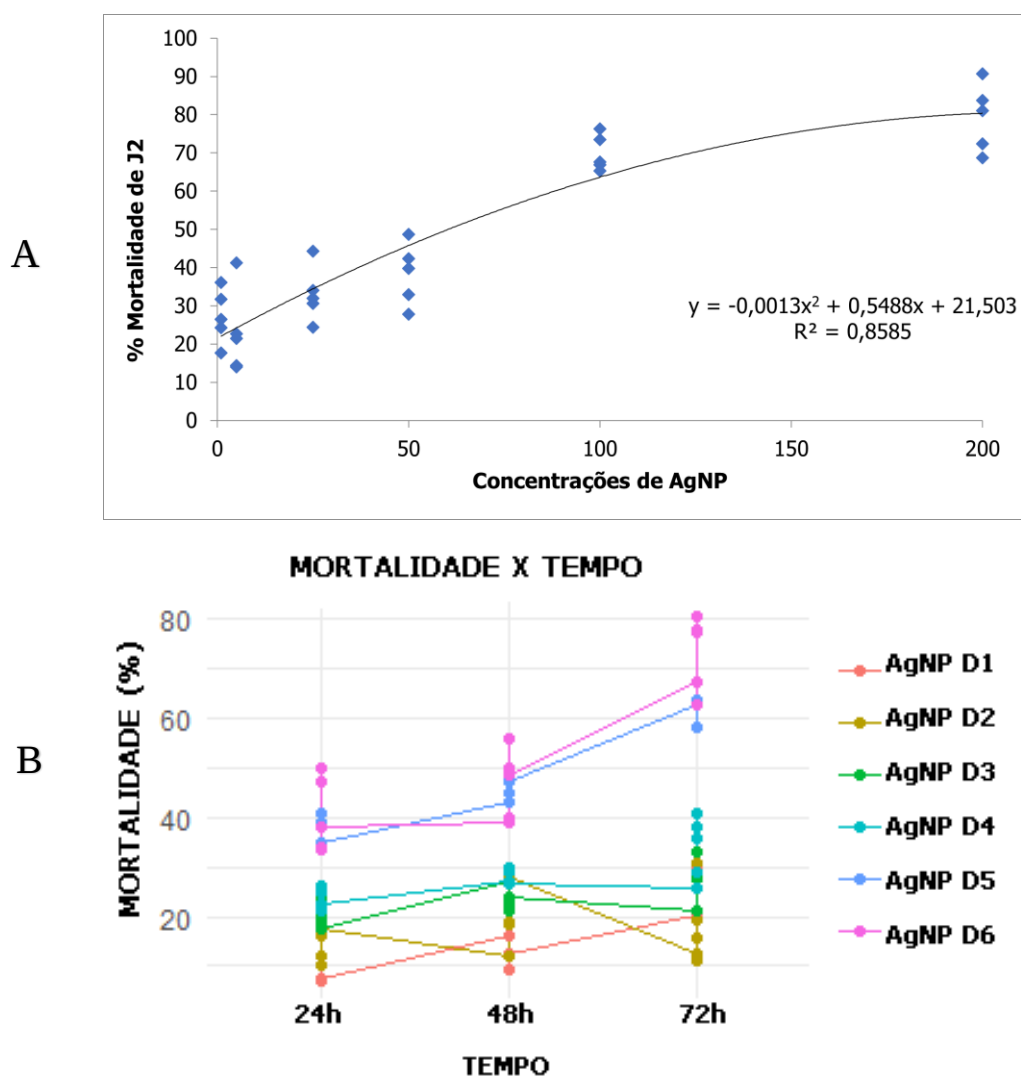


Fig. 1- Análise de regressão longitudinal da porcentagem de mortalidade de J2 de *M. javanica* em relação a concentrações de nanopartículas de prata (AgNPs) sintetizadas por extrato aquoso de folhas de batata-doce. A) Gráfico de regressão mostrando comportamento polinomial positivo. B) Gráfico de linhas mostrando o comportamento das variáveis dependentes e independentes em função do tempo de 24, 48 e 72 horas.

Vale ressaltar que o extrato aquoso de folhas de batata-doce na maior concentração utilizada na síntese verde (50 mg.mL⁻¹) não teve efeito nematicida significativo, pois não apresentou diferença estatística com o tratamento controle negativo (água destilada esterilizada) nas primeiras 24 horas. Contudo, nas 48 e 72 horas, se assemelhou à primeira diluição de AgNP (1 µmol.L⁻¹). O nematicida Vertimec® 18EC foi responsável por 78,73% da mortalidade de J2. As concentrações AgNP D5 e AgNP D6 não diferiram estatisticamente do nematicida em 24 e 72 horas, indicando a eficácia desses tratamentos em relação ao controle positivo (Tabela 1).

Tabela 1 - Efeito das diferentes concentrações de nanopartículas de prata (AgNP) e extrato aquoso de folhas de batata-doce (EA) na mortalidade de juvenis do segundo estágio de *Meloidogyne javanica* após 24, 48 e 72 horas de exposição.

Tratamento	Tempo de exposição e mortalidade (%)		
	24 horas	48 horas	72 horas
água	1,33 f	7,41 f	9,11 e
Vertimec® 18EC	46,22 a	61,19 a	78,73 a
Extrato Aquoso	5,83 ef	16,35 de	26,87 cd
AgNP 1 $\mu\text{mol.L}^{-1}$	10,67 de	13,11 e	24,77 cd
AgNP 5 $\mu\text{mol.L}^{-1}$	15,17 cd	20,04 de	17,86 d
AgNP 25 $\mu\text{mol.L}^{-1}$	20,18 bc	23,43 cd	29,78 c
AgNP 50 $\mu\text{mol.L}^{-1}$	24,03 b	28,47 c	33,85 c
AgNP 100 $\mu\text{mol.L}^{-1}$	37,76 a	44,66 b	63,01 b
AgNP 200 $\mu\text{mol.L}^{-1}$	40,56 a	46,64 b	73,21 ab

*Dados são médias de cinco repetições. Médias com a mesma letra, em cada coluna, não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Mortalidade % = [(Número total de J2 vivos no controle—Número total de J2 vivos nos tratamentos) / número total de J2 vivos no controle] $\times$ 100.

A eclosão de J2 durante o período de 24, 48 e 72 horas foi significativamente ($p \leq 0,05$) afetada pelas concentrações de AgNP (1 $\mu\text{mol.L}^{-1}$; 5 $\mu\text{mol.L}^{-1}$; 25 $\mu\text{mol.L}^{-1}$; 50 $\mu\text{mol.L}^{-1}$; 100 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ e 200 $\mu\text{mol.L}^{-1}$), conforme apresentado na regressão longitudinal polinomial de ordem três (Figura 2). O coeficiente de regressão para as concentrações de AgNPs foi negativo, indicando uma relação negativa com o percentual de eclosão de J2. Isso sugere que o aumento das concentrações da suspensão de nanopartículas de prata está associado à diminuição proporcional da eclosão de J2 ao longo de 24, 48 e 72 horas.

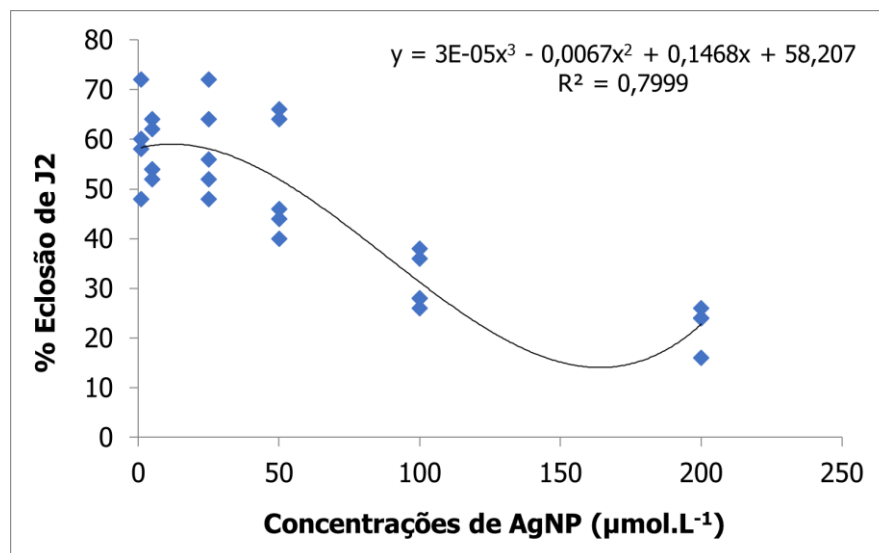


Figura 2. Análise de regressão longitudinal da porcentagem de eclosão de juvenis do segundo estágio (J2) de *Meloidogyne javanica* em relação às concentrações de nanopartículas de prata (AgNP) sintetizadas por extrato aquoso de folhas de batata-doce.

Teste de toxicidade de AgNPs biossintetizadas em tomateiros cv. Santa Cruz:

Não houve toxidez em tomateiros cv. Santa Cruz causada pela aplicação de nanopartículas de prata biossintetizadas por extrato aquoso de folhas de batata-doce.

Avaliação da atividade nematicida de diluições de nanopartícula de prata sintetizadas por extrato aquoso de folhas de batata-doce sobre *M. javanica* in vivo:

A Tabela 2 mostra o efeito das duas melhores concentrações de AgNP nos testes in vitro (AgNP D5 100 µmol.L⁻¹ e AgNP D6 200 µmol.L⁻¹) no fator de reprodução em tomateiros infectados com *M. javanica* após 45 dias, comparado ao Vertimec® 18EC e extrato aquoso de folhas de batata-doce, em três diferentes modos de aplicação (H1, H2 e H3). Além do tratamento controle negativo (água destilada esterilizada), os nematoides se multiplicaram livremente nas plantas onde foi aplicado o extrato aquoso das folhas de batata-doce, apresentando FR>1 nos três modos de aplicação para esse tratamento. Em contrapartida, os FR dos tratamentos AgNP D5 e AgNP D6 se mostraram <1, inibindo a multiplicação do nematoide, e não diferiram estatisticamente no modo de aplicação H1, enquanto AgNP D6 foi mais eficaz nos modos de aplicação H2 e H3. Contudo, o nematicida Vertimec® 18EC foi o tratamento que mais reduziu a multiplicação de *M. javanica* em tomateiros.

Tabela 2- Tabela 2- Efeito de duas concentrações de nanopartículas de prata (AgNP) (D5 = 100 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ e D6 = 200 $\mu\text{mol.L}^{-1}$) no fator de reprodução em tomateiros infectados com *Meloidogyne javanica* após 45 dias, comparado ao Vertimec® 18EC e extrato aquoso (EA) de folhas de batata-doce em três modos de aplicação (H1= nematoides e tratamentos aplicados juntos; H2= tratamentos aplicados após 24 horas da inoculação dos nematoides; H3= nematoides inoculados após 24 horas da aplicação dos tratamentos).

Tratamento	Fator de reprodução		
	Modo de aplicação		
	H1	H2	H3
Água	2,73 a	3,68 a	3,26 a
Vertimec® 18EC	0,01 c	0,02 e	0,03 e
EA	2,87 a	2,66 b	2,75 b
AgNP D5	0,57 b	0,57 c	0,60 c
AgNP D6	0,36 b	0,36 d	0,38 d

*Dados são médias de nove repetições. Médias com a mesma letra, em cada coluna, não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A Tabela 3 mostra que AgNP D5 e AgNP D6 não diferiram estatisticamente em relação ao IG e IMO nos três modos de aplicação dos tratamentos. A média de IG e IMO para as duas concentrações de AgNP indicou que as raízes apresentavam até 50 galhas pequenas e 6-15 massas de ovos, respectivamente. O IG do extrato aquoso de folhas de batata-doce não diferiu estatisticamente do controle negativo (água destilada esterilizada), nos três modos de aplicação, apresentando médias indicativas a raízes com mais de 50 galhas pequenas e até 10 galhas grandes. Contudo, este mesmo tratamento diferiu estatisticamente do restante no IMO, com média de índices que indicam raízes com até 30 massa de ovos.

Tabela 3- Efeito de duas concentrações de nanopartículas de prata (AgNP) (D5 = 100 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ e D6 200 $\mu\text{mol.L}^{-1}$) no índice de galhas (IG) e índice de massa de ovos (IMO) em tomateiros infectados com *Meloidogyne javanica* após 45 dias, comparado ao Vertimec 18EC e extrato aquoso (EA) de folhas de batata-doce em três modos de aplicação (H1= nematoides e tratamentos aplicados juntos; H2= tratamentos aplicados após 24 horas da inoculação dos nematoides; H3= nematoides inoculados após 24 horas da aplicação dos tratamentos).

Tratamento	Modos de aplicação					
	H1		H2		H3	
	IG	IMO	IG	IMO	IG	IMO
Água	4,22 a	4,88 a	4,44 a	5,0 a	4,55 a	5,0 a
Vertimec® 18EC	1,77 c	1,11 d	1,77 c	1,11 d	2,0 c	1,33 d
E.A.	4,0 a	4,0 b	4,0 a	4,11 b	4,22 a	4,33 b
AgNP D5	3,44 b	2,33 c	3,33 b	3,11 c	3,33 b	3,33 c
AgNP D6	3,0 b	2,0 c	3,0 b	3,11 c	3,0 b	3,0 c

*Dados são médias de nove repetições. Médias com a mesma letra, em cada coluna, não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

DISCUSSÃO

Tem sido relatado na literatura que os nematicidas químicos sintéticos são prejudiciais ao meio ambiente (Chen *et al.*, 2020; Chitwood, 2003; Ebone *et al.*, 2019). Os resultados do presente estudo mostraram que as AgNPs sintetizadas a partir de folhas de *I. batatas* foram tão eficazes quanto o nematicida comercial Vertimec® 18EC em sua concentração recomendada, na mortalidade de J2 de *M. javanica* após 48 e 72 horas de exposição, embora a eficácia tenha diminuído nas concentrações de diluições mais baixas das AgNPs. Esses resultados promissores se estendem à redução do fator de reprodução, índice de galhas e índice de massa de ovos em tomateiros. Além do mais, o extrato das folhas de batata-doce não demonstrou efeito nematicida, e as AgNPs não mostrou fitotoxicidade, sinalizando favoravelmente o potencial de uso na agricultura.

Os nematicidas químicos geralmente são mais eficazes que outros tratamentos alternativos, porém têm causado inúmeros problemas ambientais devido aos efeitos residuais, além do uso ser restrito e nem sempre recomendado. A ação nematicida de nanopartículas biossintetizadas já foi demonstrada em outros patossistemas (Kalaiselvi *et al.*, 2017; Tariq *et al.*, 2022). Rani *et al.* (2022) observaram a completa inibição da eclosão de J2 após 48 horas e 100% de mortalidade de J2 após 12 horas de exposição de *M. incognita* a nanopartículas de ouro biossintetizadas por extratos de alcaçuz. Nossos resultados corroboram com os resultados de (Abbassy *et al.*, 2017), que testaram o efeito nematicida de nanopartículas de prata biossintetizadas por extratos de *Conyza dioscoridis*, *Melia azedarach*, *Moringa oleífera* e

concluíram que essas AgNPs são eficazes tanto na mortalidade de J2, quanto na interrupção da embriogênese.

CONCLUSÕES

O uso de AgNPs é uma alternativa promissora para o manejo integrado de *M. javanica* em tomateiro. A atividade nematicida das AgNPs sintetizadas a partir de 25 mg. mL⁻¹ do extrato aquoso de folhas de batata-doce varia com a concentração, tempo de exposição e modo de aplicação. Concentrações de 100 e 200 µmol.L⁻¹ de AgNPs aumentam a mortalidade e diminuem a eclosão de *M. javanica* substancialmente, in vitro, de forma equivalente ao nematicida Vertimec® 18EC. Contudo, in vivo, são menos eficientes que o nematicida, apesar de reduzir a multiplicação do nematoide. Mais pesquisas são necessárias para o desenvolvimento de nanopartículas biossintetizadas mais eficientes contra os nematoides e para um melhor entendimento dos efeitos na planta e no ambiente.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Agradecemos a instituição pela bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS

Alharbi, N. S., Alsubhi, N. S., & Felimban, A. I. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles using medicinal plants: Characterization and application. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 15(3), 109–124. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.06.012>

Amendola, V., Bakr, O. M., & Stellacci, F. (2010). A Study of the Surface Plasmon Resonance of Silver Nanoparticles by the Discrete Dipole Approximation Method: Effect of Shape, Size, Structure, and Assembly. *Plasmonics*, 5(1), 85–97. <https://doi.org/10.1007/s11468-009-9120-4>

Ansari, M., Ahmed, S., Abbasi, A., Hamad, N. A., Ali, H. M., Khan, M. T., et al. (2023). Green Synthesized Silver Nanoparticles: A Novel Approach for the Enhanced Growth and Yield of Tomato against Early Blight Disease. *Microorganisms*, 11(4), 886. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11040886>

- 861 Ayaz Ahmed, K. B., Subramaniam, S., Veerappan, G., Hari, N., Sivasubramanian, A., &
 862 Veerappan, A. (2014). β -Sitosterol- D -glucopyranoside isolated from *Desmostachya*
 863 *bipinnata* mediates photoinduced rapid green synthesis of silver nanoparticles. *RSC Adv.*,
 864 4(103), 59130–59136. <https://doi.org/10.1039/C4RA10626A>
- 865
- 866 Bykkam, S., Ahmadipour, M., Narisngam, S., Kalagadda, V. R., & Chidurala, S. C. (2015).
 867 RETRACTED: Extensive Studies on X-Ray Diffraction of Green Synthesized Silver
 868 Nanoparticles. *Advances in Nanoparticles*, 04(01), 1–10.
 869 <https://doi.org/10.4236/anp.2015.41001>
- 870
- 871 Chakravarty, A., Ahmad, I., Singh, P., Ud Din Sheikh, M., Aalam, G., Sagadevan, S., &
 872 Ikram, S. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles using fruits extracts of *Syzygium*
 873 *cumini* and their bioactivity. *Chemical Physics Letters*, 795, 139493.
 874 <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2022.139493>
- 875
- 876 Cosgrove, T. (Ed.). (2005). *Colloid Science: Principles, Methods and Applications* (1st ed.).
 877 Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781444305395>
- 878
- 879 Das, R., Nath, S. S., Chakdar, D., Gope, G., & Bhattacharjee, R. (2010). Synthesis of silver
 880 nanoparticles and their optical properties. *Journal of Experimental Nanoscience*, 5(4), 357–
 881 362. <https://doi.org/10.1080/17458080903583915>
- 882
- 883 De Mello Donegá, C. (Ed.). (2014). *Nanoparticles: Workhorses of Nanoscience*. Berlin,
 884 Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44823-6>
- 885
- 886 Elkobrosy, D., Al-Askar, A. A., El-Gendi, H., Su, Y., Nabil, R., Abdelkhalek, A., & Behiry,
 887 S. (2023). Nematocidal and Bactericidal Activities of Green Synthesized Silver Nanoparticles
 888 Mediated by *Ficus sycomorus* Leaf Extract. *Life*, 13(5), 1083.
 889 <https://doi.org/10.3390/life13051083>
- 890
- 891 Fatimah, I., & Aftrid, Z. H. V. I. (2019). Characteristics and antibacterial activity of green
 892 synthesized silver nanoparticles using red spinach (*Amaranthus Tricolor* L.) leaf extract.
 893 *Green Chemistry Letters and Reviews*, 12(1), 25–30.
 894 <https://doi.org/10.1080/17518253.2019.1569729>
- 895 Fatimah, I., & Indriani, N. (2018). Silver Nanoparticles Synthesized Using *Lantana Camara*
 896 Flower Extract by Reflux, Microwave and Ultrasound Methods. *Chemistry Journal of*
 897 *Moldova*, 13(1), 95–102. <https://doi.org/10.19261/cjm.2017.461>
- 898

- 899 Feldheim, D. L., & Foss, C. A. (Eds.). (2002). *Metal nanoparticles: synthesis,*
900 *characterization, and applications*. New York: Marcel Dekker.
- 901
- 902 François Eya'ane Meva, E. R. A. M., Marcelle, L. S., Cecile, O. E., Agnes, A. N., Djiopang,
903 Y. S., Fanny, A. E. M., et al. (2016). Unexplored vegetal green synthesis of silver
904 nanoparticles: A preliminary study with *Corchorus olitorus* Linn and *Ipomea batatas* (L.)
905 Lam. *African Journal of Biotechnology*, 15(10), 341–349.
906 <https://doi.org/10.5897/AJB2015.14962>
- 907
- 908 Fu, Z., Tu, Z., Zhang, L., Wang, H., Wen, Q., & Huang, T. (2016). Antioxidant activities and
909 polyphenols of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves extracted with solvents of various
910 polarities. *Food Bioscience*, 15, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2016.04.004>
- 911
- 912 Gaumet, M., Vargas, A., Gurny, R., & Delie, F. (2008). Nanoparticles for drug delivery: The
913 need for precision in reporting particle size parameters. *European Journal of Pharmaceutics*
914 *and Biopharmaceutics*, 69(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2007.08.001>
- 915
- 916 Hertl, N., Krüger, K., & Bünermann, O. (2022). Electronically Nonadiabatic H Atom
917 Scattering from Low Miller Index Surfaces of Silver. *Langmuir*, 38(46), 14162–14171.
918 <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02140>
- 919
- 920 Hinsch, J. J., Liu, J., White, J. J., & Wang, Y. (2022). The Role of Steps on Silver
921 Nanoparticles in Electrocatalytic Oxygen Reduction. *Catalysts*, 12(6), 576.
922 <https://doi.org/10.3390/catal12060576>
- 923
- 924 Ishida, H. (2000). Nutritive evaluation on chemical components of leaves, stalks and stems of
925 sweet potatoes (*Ipomoea batatas* L.). *Food Chemistry*, 68(3), 359–367.
926 [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00206-X](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00206-X)
- 927
- 928 Kumar, A., & Dixit, C. K. (2017). Methods for characterization of nanoparticles. In *Advances*
929 *in Nanomedicine for the Delivery of Therapeutic Nucleic Acids* (pp. 43–58). Elsevier.
930 <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100557-6.00003-1>
- 931
- 932 Luo, D., Mu, T., & Sun, H. (2021a). Profiling of phenolic acids and flavonoids in sweet
933 potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves and evaluation of their anti-oxidant and hypoglycemic
934 activities. *Food Bioscience*, 39, 100801. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100801>
- 935

- 936 Luo, D., Mu, T., & Sun, H. (2021b). Profiling of phenolic acids and flavonoids in sweet
937 potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves and evaluation of their anti-oxidant and hypoglycemic
938 activities. *Food Bioscience*, 39, 100801. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100801>
939
- 940 Mehta, B. K., Chhajlani, M., & Shrivastava, B. D. (2017). Green synthesis of silver
941 nanoparticles and their characterization by XRD. *Journal of Physics: Conference Series*, 836,
942 012050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/836/1/012050>
943
944
- 945 Meinhart, A. D., Damin, F. M., Caldeirão, L., De Jesus Filho, M., Da Silva, L. C., Da Silva
946 Constant, L., et al. (2019). Study of new sources of six chlorogenic acids and caffeic acid.
947 *Journal of Food Composition and Analysis*, 82, 103244.
948 <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103244>
949
- 950 Mittal, A. K., Bhaumik, J., Kumar, S., & Banerjee, U. C. (2014). Biosynthesis of silver
951 nanoparticles: Elucidation of prospective mechanism and therapeutic potential. *Journal of*
952 *Colloid and Interface Science*, 415, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.10.018>
953
- 954 Mock, J. J., Barbic, M., Smith, D. R., Schultz, D. A., & Schultz, S. (2002). Shape effects in
955 plasmon resonance of individual colloidal silver nanoparticles. *The Journal of Chemical*
956 *Physics*, 116(15), 6755–6759. <https://doi.org/10.1063/1.1462610>
957
- 958 Nayab, D.-, & Akhtar, S. (2023). Green synthesized silver nanoparticles from eucalyptus
959 leaves can enhance shelf life of banana without penetrating in pulp. *PLOS ONE*, 18(3),
960 e0281675. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281675>
961
- 962 Nguyen, H. C., Chen, C.-C., Lin, K.-H., Chao, P.-Y., Lin, H.-H., & Huang, M.-Y. (2021).
963 Bioactive Compounds, Antioxidants, and Health Benefits of Sweet Potato Leaves. *Molecules*,
964 26(7), 1820. <https://doi.org/10.3390/molecules26071820>
965
- 966 Pavia, D. L., Lampman, G. M., & Kriz, G. S. (2001). *Introduction to spectroscopy: a guide*
967 *for students of organic chemistry* (3rd ed.). Fort Worth: Harcourt College Publishers.
- 968 Santos, J., Santos, M., Thesing, A., Tavares, F., Griep, J., & Rodrigues, M. (2016).
969
- 970 Ressonância de plasmon de superfície localizado e aplicação em biossensores e células
971 solares. *Química Nova*. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20160126>
972

- Smitha, S. L., Nissamudeen, K. M., Philip, D., & Gopchandran, K. G. (2008). Studies on surface plasmon resonance and photoluminescence of silver nanoparticles. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 71(1), 186–190. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2007.12.002>
- Ssekatawa, K., Byarugaba, D. K., Kato, C. D., Wampande, E. M., Ejobi, F., Nakavuma, J. L., et al. (2021). Green Strategy–Based Synthesis of Silver Nanoparticles for Antibacterial Applications. *Frontiers in Nanotechnology*, 3, 697303. <https://doi.org/10.3389/fnano.2021.697303>
- Suárez, S., Mu, T., Sun, H., & Añón, M. C. (2020). Antioxidant activity, nutritional, and phenolic composition of sweet potato leaves as affected by harvesting period. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 178–188. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1716796>
- Taira, J., Taira, K., Ohmine, W., & Nagata, J. (2013). Mineral determination and anti-LDL oxidation activity of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves. *Journal of Food Composition and Analysis*, 29(2), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2012.10.007>
- Talank, N., Morad, H., Barabadi, H., Mojab, F., Amidi, S., Kobarfard, F., et al. (2022). Bioengineering of green-synthesized silver nanoparticles: In vitro physicochemical, antibacterial, biofilm inhibitory, anticoagulant, and antioxidant performance. *Talanta*, 243, 123374. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123374>
- Tavan, M., Hanachi, P., Mirjalili, M. H., & Dashtbani-Roozbehani, A. (2023). Comparative assessment of the biological activity of the green synthesized silver nanoparticles and aqueous leaf extract of *Perilla frutescens* (L.). *Scientific Reports*, 13(1), 6391. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33625-x>
- Thummaneni, C., Surya Prakash, D. V., Golli, R., & Vangalapati, M. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles and characterization of caffeic acid from *Myristica fragrans* (Nutmeg) against antibacterial activity. *Materials Today: Proceedings*, 62, 4001–4005. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.586>
- Universitas Brawijaya, Pulungan, M. H., Santoso, E. F. S. M., & Universitas Brawijaya. (2020). Ice Cream Cup Production Using Purple Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L. Poir) as a Substitute Ingredient. *Industria: Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri*, 9(3), 184–194. <https://doi.org/10.21776/ub.industria.2020.009.03.3>

- 1011 Vasireddy, R., Paul, R., & Mitra, A. K. (2012). Green Synthesis of Silver Nanoparticles and
 1012 the Study of Optical Properties. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 2, 8.
 1013 <https://doi.org/10.5772/52329>
 1014
- 1015 Vorobyova, V., Vasyliiev, G., & Skiba, M. (2020). Eco-friendly “green” synthesis of silver
 1016 nanoparticles with the black currant pomace extract and its antibacterial, electrochemical, and
 1017 antioxidant activity. *Applied Nanoscience*, 10(12), 4523–4534.
 1018 <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01369-z>
 1019
- 1020 Wibowo, A., Tajalla, G. U. N., Marsudi, M. A., Cooper, G., Asri, L. A. T. W., Liu, F., et al.
 1021 (2021). Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Extract of Cilembu Sweet Potatoes
 1022 (*Ipomoea batatas* L var. Rancing) as Potential Filler for 3D Printed Electroactive and Anti-
 1023 Infection Scaffolds. *Molecules*, 26(7), 2042. <https://doi.org/10.3390/molecules26072042>
 1024
- 1025 Xi, L., Mu, T., & Sun, H. (2015). Preparative purification of polyphenols from sweet potato
 1026 (*Ipomoea batatas* L.) leaves by AB-8 macroporous resins. *Food Chemistry*, 172, 166–174.
 1027 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.039>
 1028
- 1029 Yeshchenko, O. A., Dmitruk, I. M., Alexeenko, A. A., Kotko, A. V., Verdal, J., & Pinchuk,
 1030 A. O. (2012). Size and Temperature Effects on the Surface Plasmon Resonance in Silver
 1031 Nanoparticles. *Plasmonics*, 7(4), 685–694. <https://doi.org/10.1007/s11468-012-9359-z>
 1032
- 1033 Zheng, W., & Clifford, M. N. (2008). Profiling the chlorogenic acids of sweet potato
 1034 (*Ipomoea batatas*) from China. *Food Chemistry*, 106(1), 147–152.
 1035 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.05.053>

1036
1037
1038
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048

CAPÍTULO 4



CONCLUSÕES GERAIS

1049 CONCLUSÕES GERAIS

1050 A crescente busca por soluções sustentáveis na agricultura tem impulsionado a pesquisa
1051 e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras, como a síntese verde de nanopartículas. A
1052 possibilidade de utilizar extratos vegetais, como o da folha da batata-doce, como agentes
1053 redutores e estabilizadores, abre portas para uma abordagem mais *eco-friendly* na produção
1054 desse material.

1055 As AgNPs sintetizadas a partir de folhas de batata-doce possuem interessantes
1056 características e propriedades físicas e químicas, e demonstraram atividade nematicida
1057 significativa *in vitro*, apresentando potencial para controle de *M. javanica*. Entretanto, em
1058 condições de casa de vegetação, os resultados foram bem satisfatórios, com eficácia próxima
1059 ao nematicida químico comercialmente utilizado. Além do mais, as AgNPs não foram tóxicas
1060 para tomateiros. Em suma, os resultados obtidos até o momento demonstram o potencial das
1061 AgNPs biossintetizadas por extrato aquoso de folhas de batata-doce como uma alternativa
1062 viável para aprimorar o manejo integrado de fitonematoides e promover a nanotecnologia como
1063 uma aliada na agricultura sustentável. Porém, a continuidade das pesquisas e testes é
1064 fundamental para a otimização das técnicas de síntese e para a compreensão plena dos efeitos
1065 das nanopartículas tanto nas culturas quanto no ecossistema em geral. Ao unir esforços entre a
1066 nanotecnologia e a ciência agrícola, podemos avançar rumo a uma agricultura mais eficiente e
1067 que tenda à sustentabilidade.