

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MARIANE GARCIA ORQIS BARCELLOS

**LÃ OVINA DE DESCARTE FUNCIONALIZADA COM NANOPARTÍCULAS DE
OURO FITOGÊNICAS: SÍNTESE E AVALIAÇÃO CATALÍTICA**

Bagé

2026

MARIANE GARCIA ORQIS BARCELLOS

**LÃ OVINA DE DESCARTE FUNCIONALIZADA COM NANOPARTÍCULAS DE
OURO FITOGÊNICAS: SÍNTESE E AVALIAÇÃO CATALÍTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia
de Materiais da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Mestre em Ciência e
Engenharia de Materiais

Orientador: Flávio André Pavan

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

B2421 Barcellos, Mariane Garcia Orqis
Lã ovina de descarte funcionalizada com nanopartículas de
ouro fitogênicas: síntese e avaliação catalítica / Mariane
Garcia Orqis Barcellos.
83 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, 2026.
"Orientação: Flávio André Pavan".

1. Fibra animal. 2. Suporte biofuncional. 3. Ouro
nanométrico. 4. Baccharis dracunculifolia. 5. Catálise
heterogênea. I. Título.

Mariane Garcia Orqis Barcellos

**LÃ OVINA DE DESCARTE FUNCIONALIZADA COM NANOPARTÍCULAS DE
OURO FITOGÊNICAS: SÍNTESE E AVALIAÇÃO CATALÍTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Dissertação defendida e aprovada em: 12 de maio de 2026.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Flávio André Pavan
Orientador
(Unipampa)

Prof.^a Dr.^a Melody Silvana Garcia Correa
(ITR UTEC)

Prof. Dr. Augusto Cezar Dotta Filho
(Unipampa)



Assinado eletronicamente por **FLAVIO ANDRE PAVAN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/05/2026, às 20:01, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2032316** e o código CRC **C27821F3**.

AGRADECIMENTO

À minha família, que é meu alicerce em todos os momentos, agradeço por todo amor, paciência e apoio incondicional ao longo dessa caminhada. Em especial, ao meu esposo João Tomaz, amor da minha vida, que esteve ao meu lado em cada etapa, sempre com carinho, compreensão e incentivo. Sou profundamente grato por todo o apoio nos momentos mais difíceis e por nunca me deixarem desistir. Aos meus filhos, Henrique e Isabeli, que são a razão de tudo, agradeço por darem sentido a cada esforço, pois é por vocês que sigo em frente e busco sempre ser melhor.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Flávio André Pavan, minha sincera gratidão pela confiança, pela orientação e, principalmente, por acreditar que eu seria capaz. Seus ensinamentos enquanto profissional e pessoa foram além do âmbito acadêmico e levarei comigo por toda a vida.

Aos meus colegas técnicos de laboratório do Campus Bagé, da Unipampa, por toda a amizade e apoio nos momentos em que não estive presente em função das atividades do Mestrado.

À banca examinadora, Prof^a. Dr^a. Melody Silvana Garcia Correa e Prof. Dr. Augusto Cezar Dotta Filho, meu agradecimento pelas relevantes e importantes contribuições dadas a este trabalho.

Aos professores do PPCEM, que contribuíram de forma significativa para a minha formação, deixo meu reconhecimento e gratidão.

À Universidade Federal do Pampa (Unipampa) e ao PPCEM, agradeço pela oportunidade de crescimento, aprendizado e transformação que este período proporcionou.

RESUMO

No Brasil, especialmente na Região Sul, a lã ainda possui relevância; no entanto, o foco da ovinocultura tem se voltado cada vez mais à produção de carne, reduzindo sua valorização. No Rio Grande do Sul, apesar da forte tradição associada a raças como Corriedale e Ideal (*Polwarth*), a atividade vem perdendo espaço diante da concorrência das fibras sintéticas e do maior retorno econômico da carne. Como consequência, o descarte de lã tem se intensificado, sendo frequentemente tratada como resíduo e destinada a práticas inadequadas, como queima ou enterramento, gerando impactos ambientais negativos. Diante desse cenário, este trabalho propõe a valorização da lã de descarte como suporte para a imobilização de nanopartículas de ouro biogênicas, com foco na degradação de contaminantes orgânicos em meio aquoso. A lã apresenta propriedades favoráveis, como elevada porosidade, grande área superficial e a presença de grupos funcionais (amino, carboxila e tiol), que favorecem a fixação das nanopartículas e contribuem para a eficiência catalítica. A ancoragem das nanopartículas de ouro na fibra de lã é racionalizada pela Teoria HSAB (Hard and Soft Acids and Bases), proposta por Ralph G. Pearson, a qual prevê interações preferenciais entre espécies de mesma “maciez”. Nesse sistema, o ouro em escala nanométrica comporta-se como um ácido macio, enquanto os grupos tiol (-SH) da queratina da lã atuam como bases macias. A interação sinérgica do tipo soft-soft favorece a formação de ligações Au-S robustas, promovendo a imobilização eficiente e duradoura das nanopartículas na matriz fibrosa. Consequentemente, observa-se maior estabilidade do material, supressão da lixiviação e aprimoramento do desempenho catalítico. As nanopartículas de ouro foram sintetizadas por via verde, utilizando extrato aquoso de *Baccharis dracunculifolia* DC. A lã ovina funcionalizada com nanopartículas de ouro foi caracterizada por FTIR-ATR, DRX, UV-Vis, MEV e EDX. Posteriormente, o material híbrido Lã@NPs-Au/Extrato atuou como catalisador heterogêneo na redução do azul de metileno, mostrando-se uma alternativa eficiente, de baixo custo e sustentável para o tratamento de águas contaminadas, além de apresentar reutilização por até cinco ciclos sem perda significativa de desempenho.

Palavras-Chave: fibra animal; suporte biofuncional; ouro nanométrico; *Baccharis dracunculifolia* DC; catálise heterogênea.

ABSTRACT

In Brazil, especially in the Southern Region, wool still holds relevance; however, the focus of sheep farming has increasingly shifted toward meat production, reducing its value. In Rio Grande do Sul, despite the strong tradition associated with breeds such as Corriedale and Ideal (Polwarth), the activity has been losing ground due to competition from synthetic fibers and the higher economic return of meat. As a result, wool disposal has intensified, often being treated as waste and subjected to inadequate practices such as burning or burial, generating negative environmental impacts. In this context, the present work proposes the valorization of waste wool as a support for the immobilization of biogenic gold nanoparticles, with a focus on the degradation of organic contaminants in aqueous media. Wool exhibits favorable properties, such as high porosity, large surface area, and the presence of functional groups (amino, carboxyl, and thiol), which promote nanoparticle fixation and contribute to catalytic efficiency. The anchoring of gold nanoparticles onto the wool fiber is rationalized by the HSAB (Hard and Soft Acids and Bases) theory, proposed by Ralph G. Pearson, which predicts preferential interactions between species of similar “softness.” In this system, nanoscale gold behaves as a soft acid, while the thiol (-SH) groups of wool keratin act as soft bases. The synergistic soft–soft interaction favors the formation of robust Au–S bonds, promoting efficient and durable immobilization of the nanoparticles within the fibrous matrix. Consequently, enhanced material stability, suppressed leaching, and improved catalytic performance are observed. The gold nanoparticles were synthesized via a green route using an aqueous extract of *Baccharis dracunculifolia* DC. The wool functionalized with gold nanoparticles was characterized by FTIR-ATR, XRD, UV-Vis, SEM, and EDX. Subsequently, the hybrid material Wool@AuNPs/Extract acted as a heterogeneous catalyst in the reduction of methylene blue, demonstrating an efficient, low-cost, and sustainable alternative for the treatment of contaminated water, as well as reusability for up to five cycles without significant loss of performance.

Keywords: animal fiber; biofunctional support; nanometric gold; *Baccharis dracunculifolia* DC extract; heterogeneous catalysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Cadeia simplificada da indústria da lã ovina.....	18
Figura 2	Estrutura da Fibra da lã	20
Figura 3	Ciclo sustentável da lã para o desenvolvimento de novos produtos tecnológicos	23
Figura 4	Oscilação coletiva de elétrons na superfície de nanopartículas metálicas.....	26
Figura 5	A) Imagem de MET de nanoesferas de ouro, B) Influência do tamanho das mesmas na coloração de suas soluções, C) Espectro de absorção de nanoesferas de ouro em diferentes tamanhos e D) Comprimento de onda máximo de absorção de diferentes diâmetros de na	28
Figura 6	Etapas de formação de NPs-Au pelo método de síntese verde.....	33
Figura 7	<i>Baccharis dracunculifolia</i> DC.....	34
Figura 8	Estruturas químicas dos principais compostos encontrados no extrato aquoso de <i>Baccharis dracunculifolia</i> DC.....	36
Figura 9	Fórmula química estrutural do Azul de metileno	39
Figura 10	Fluxograma das etapas envolvidas no trabalho	42
Figura 11	Mudança de coloração evidenciando a formação das nanopartículas	43
Figura 12	Metodologia de impregnação de NPs-Au em fibra de lã residual: síntese verde	44
Figura 13	Aspecto da lã in-natura (A) e Lã@Au/Extrato (B).....	44
Figura 14	Observação visual da mudança de coloração nas soluções no processo de síntese verde. A: solução 5% (m/v) de extrato aquoso foliar de <i>Baccharis dracunculifolia</i> DC.; B: solução de HAuCl ₄ (2 mM); e C: solução coloidal de NPs-Au	50
Figura 15	Espectro de absorção eletrônica no UV-Vis da solução coloidal de NPs-Au sintetizadas com extrato foliar de <i>Baccharis dracunculifolia</i> DC.....	51
Figura 16	Espectro no infravermelho da (a) lã in natura, (b) lã imobilizada com NPs-Au e (c) Lã + Extrato	53

Figura 17	Mecanismo de imobilização das NPs-Au na superfície da lã.	54
Figura 18	Difratograma de DRX da (a) Lã imobilizada com NPs-Au/Extrato e (b) Lã in natura	55
Figura 19	Imagem de MEV da (a) lã in natura e (b) Lã@NPs-Au/Extrato após sucessivas lavagens (c) EDX lã in natura e (d) EDX Lã@NPs-Au/Extrato	56
Figura 20	Histograma com distribuição do tamanho das NPs-Au suportadas na lã	57
Figura 21	Espectros eletrônicos no UV-Vis da redução do AM com NaBH ₄ e Lã@NPs-Au/Extrato, à temperatura de 25°C	58
Figura 22	Espectros eletrônicos no UV-Vis da redução do AM com NaBH ₄ e lã in natura, à temperatura de 25°C.....	59
Figura 23	Gráfico da regressão linear do logaritmo de absorbância (lnA) versus tempo (t) da redução do AM na presença de Lã@NPs-Au/Extrato	60
Figura 24	Representação esquemática da redução catalítica do corante Azul de metileno (AM) em solução aquosa, na presença de NaBH ₄ e Lã@NPs-Au/Extrato, à temperatura ambiente	61
Figura 25	Percentual de reutilização do material funcionalizado Lã@NPs-Au/Extrato na aplicação catalítica do corante azul de metileno	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Aplicações das nanopartículas	27
Quadro 2	Nanopartículas sintetizadas através da síntese verde mediada por plantas.....	34
Quadro 3	Atribuição das bandas de FTIR da lã e do material funcionalizado (Lã@NPs-Au/Extrato)	54
Quadro 4	Nanopartículas de ouro imobilizadas em diferentes suportes com aplicação em catálise de Azul de Metileno (AM)	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Azul de metileno (do inglês, <i>Methylene blue</i> – MB)
Au	Ouro
Au ³⁺	Ouro iônico
Au ⁰	Ouro reduzido
DRX	Difração de raios X
EDX	Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia
FTIR-ATR	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier modo de refletância total atenuada
HAuCl ₄	Ácido tetracloroáurico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Lã	Lã <i>in natura</i>
Lã@NPs-Au	Fibra de lã ovina funcionalizada com nanopartículas de ouro
MET	Microscopia eletrônica de transmissão
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
m/v	Massa por volume
NaBH ₄	Borohidreto de sódio
nm	Nanômetro
NPs	Nanopartículas
NPs-Au	Nanopartículas de ouro (do inglês, <i>Gold nanoparticles</i> – AuNPs)
pH	Atividade do íon hidroxônio
rpm	Rotações por minuto
RPS	Ressonância plasmônica de superfície (do inglês, <i>Surface plasmon resonance</i> – SPR)
UV	Ultravioleta
UV-Vis	Ultravioleta e visível
λ _{máx}	Comprimento de onda de máxima absorbância

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.1	Origem da fibra da lã	17
3.1.1	Composição química e estrutural da lã ovina	18
3.1.2	Lã de descarte	20
3.1.3	Economia circular.....	22
3.2	Nanotecnologia	24
3.2.1	Nanopartículas metálicas	25
3.2.2	Nanopartículas de ouro	27
3.2.3	Síntese de nanopartículas.....	29
3.2.4	Síntese verde	30
3.2.4.1	Síntese utilizando extrato de plantas.....	32
3.2.5	Alecrim-do-campo (<i>Baccharis dracunculifolia</i> DC.)	34
3.2.6	Imobilização de nanopartículas metálicas em fibra de lã.....	37
3.3	Atividade catalítica de nanopartículas de ouro.....	38
3.3.1	Atividade catalítica de NPs-Au na redução de corantes.....	38
4	METODOLOGIA.....	41
4.1	Reagentes químicos	41
4.2	Materiais.....	41
4.3	Preparação do extrato de <i>Baccharis dracunculifolia</i> DC.	42
4.4	Síntese verde das nanopartículas de ouro.....	42
4.5	Impregnação de NPs-Au na fibra de lã ovina.....	43
4.5	Caracterização da lã e Lã@NPs-Au/Extrato	45
4.6.1	Espectroscopia UV-Vis	45
4.6.2	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	46
4.6.3	Difratometria de raios-X (DRX).....	46

4.6.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	47
4.6.5	Espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDX)	47
4.7	Catálise heterogênea com Lã@NPs-Au/Extrato.....	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1	Síntese biogênica de NPs-Au.....	50
5.2	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	52
5.3	Difratometria de raios-X (DRX)	54
5.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDX)	55
5.5	Aplicação catalítica da Lã@NPs-Au/Extrato	57
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
7	PERSPECTIVAS DE PESQUISA	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Ainda que as fibras sintéticas e vegetais tenham conquistado um espaço crescente na indústria têxtil, a lã ovina continua sendo relevante no Brasil, especialmente no Rio Grande do Sul, onde a criação de raças como a Corriedale está profundamente associada às tradições produtivas regionais. Contudo, uma parcela significativa dessa lã tem sido desvalorizada ao longo do tempo, muitas vezes tratada como resíduo, em razão do maior retorno econômico obtido com a carne ovina e à concorrência com as fibras sintéticas (Szatkowski, 2025).

A lã é uma fibra natural rica em queratina, o que lhe confere propriedades únicas, como elevada elasticidade, resistência mecânica, capacidade de absorção de umidade sem encharcamento, além de bom isolamento térmico e resistência ao fogo (Sun *et al.*, 2023). Além disso, sua estrutura porosa também favorece interações com diferentes substâncias, ampliando seu potencial de utilização (Midolo *et al.*, 2024).

Essas características tornam a lã um material altamente versátil, com aplicações que vão além do setor têxtil, alcançando áreas como isolamento térmico e acústico, sistemas de filtragem e uso como suporte em processos tecnológicos, incluindo catálise e remoção de contaminantes (Porubská; Koóšová; Braniša, 2024). Além disso, sua composição química permite modificações que possibilitam a incorporação de novas funcionalidades, expandindo suas possibilidades de aplicações em áreas como nanotecnologia e engenharia de materiais (Tummino *et al.*, 2024).

Nesse cenário, a combinação entre a fibra de lã ovina e nanopartículas metálicas, em especial nanopartículas de ouro (AuNPs) obtidas através de rotas sustentáveis (“síntese verde”), surge como uma estratégia promissora para o desenvolvimento de materiais híbridos com propriedades catalíticas aprimoradas (Iravani, 2011; Mahmud *et al.*, 2017). Esses materiais demonstram potencial para atuar na degradação de poluentes orgânicos e em reações de interesse ambiental, conciliando eficiência catalítica e sustentabilidade (Sun *et al.*, 2023). Nesse contexto, a fotossíntese ganha destaque ao empregar extratos vegetais simultaneamente como agentes redutores e estabilizantes, eliminando a necessidade de utilização de reagentes tóxicos e condições reacionais rigorosas, diretrizes alinhadas aos princípios da Química Verde (Anastas; Eghbali, 2010). Dessa forma, a associação entre substratos naturais de baixo custo e nanomateriais obtidos por rotas biogênicas

configura uma alternativa inovadora e sustentável para o desenvolvimento de plataformas catalíticas funcionais com significativa aplicabilidade ambiental (Nasrollahzadeh *et al.*, 2021).

A integração entre lã ovina e nanotecnologia surge como uma alternativa promissora para a valorização de um recurso natural abundante, ao mesmo tempo em que incentiva o reaproveitamento de resíduos. No Rio Grande do Sul, a ovinocultura associada à raça Corriedale também representa um elemento de forte identidade cultural, sendo parte importante das tradições e da economia local.

Dessa forma, ao atribuir um novo valor à lã, especialmente aquela considerada de descarte, por meio de aplicações inovadoras, reforça e fortalece a conexão entre tradição e desenvolvimento tecnológico. Nesse sentido, o presente trabalho propõe a utilização da lã de descarte da raça Corriedale como suporte para a imobilização de nanopartículas de ouro de origem biogênica, com foco na degradação do corante azul de metileno em meio aquoso.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho propõe a funcionalização da fibra de lã ovina por meio da redução biogênica de íons Au^{3+} a nanopartículas de ouro metálico (Au^0), utilizando extrato aquoso de *Baccharis dracunculifolia* DC. como agente biorredutor.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Caracterizar o material obtido por meio da aplicação das técnicas de Espectroscopia de Absorção no UV-Vis, Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR-ATR), Difração de Raios X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia (EDX).
- Avaliar o desempenho catalítico da lã funcionalizada com nanopartículas de ouro na degradação do corante tiazínico azul de metileno em meio aquoso, na presença de NaBH_4 ;
- Analisar a estabilidade e a reutilização do catalisador, verificando sua eficiência em ciclos sucessivos.

3 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Origem da fibra da lã

A lã é uma fibra natural de origem animal, biodegradável e biocompatível, reconhecida pelos atributos únicos que a distinguem de outras matérias-primas têxteis. Entre essas características, destacam-se a capacidade de isolamento térmico, a resistência e a versatilidade de uso, sendo a lã ovina a mais amplamente explorada. No mundo, existem mais de 200 raças de ovelhas, cada uma produzindo fibras com características próprias, como variações de diâmetro, comprimento e resistência, fatores que influenciam diretamente sua qualidade e aplicação (Kulkarni *et al.*, 2024).

No Brasil, o estado do Rio Grande do Sul se destaca como o principal produtor de lã, tendo registrado uma produção superior a 7 milhões de toneladas em 2024 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2024). Ainda assim, tanto no cenário nacional quanto global, vem sendo observada uma redução contínua na produção e na qualidade da fibra comercializada. Este declínio é atribuído, principalmente, à crescente competitividade das fibras sintéticas e à maior rentabilidade da criação de ovinos voltada para a produção de carne, direcionando assim o foco da cadeia produtiva (Szatkowski, 2025).

A classificação da lã na indústria têxtil baseia-se, sobretudo, na finura da fibra, sendo o diâmetro o parâmetro determinante para definir sua qualidade e valor de mercado. Fibras mais finas são destinadas a aplicações nobres, enquanto aquelas com maior diâmetro apresentam menor valor comercial e menor aceitação industrial (Midolo *et al.*, 2025). Como resultado, uma parcela significativa da lã produzida não atende aos padrões exigidos pelo setor, sendo classificada como resíduo ou subproduto de baixo valor agregado (Sun *et al.*, 2023).

O processamento da lã envolve etapas sucessivas, como tosquia, classificação, seleção, lavagem, cardagem, fiação e acabamento (Figura 1), durante as quais são gerados consideráveis volumes de subprodutos e fibras residuais. Esses materiais por apresentarem variações em sua qualidade são descartados como subproduto de baixo valor agregado, armazenados ou geralmente incinerados, podendo provocar danos ambientais aos ecossistemas (Sun *et al.*, 2023). Mesmo rebanhos destinados à produção de carne e leite contribuem para esse excedente

(Midolo *et al.*, 2024), uma vez que a tosquia anual é indispensável para o bem-estar dos animais, tornando inevitável a geração contínua de lã de baixa qualidade.

Figura 1 - Cadeia simplificada da indústria da lã ovina



Fonte: Autora (2026)

Diante desse contexto, é crescente a busca por estratégias que promovam o reaproveitamento desses resíduos através do desenvolvimento de novos materiais tecnológicos seguros e sustentáveis (Zhang *et al.*, 2020). Nessa proposta, a lã residual vem sendo explorada em diferentes áreas, com destaque para a construção civil, onde suas propriedades de isolamento térmico e acústico são valorizadas (Parlato; Porto; Valenti, 2022; Midolo *et al.*, 2024; Yousif; Salih, 2025). Além disso, estudos recentes também apontam seu potencial em aplicações na agricultura (Camilli *et al.*, 2025; Ruiz-Díaz *et al.*, 2026), na adsorção de poluentes (Ammar *et al.*, 2026; Ghafar *et al.*, 2017; Yin *et al.*, 2024), entre outros. Essas perspectivas reforçam o papel da lã residual não apenas como um resíduo, mas como um recurso estratégico para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis.

3.1.1 Composição química e estrutural da lã ovina

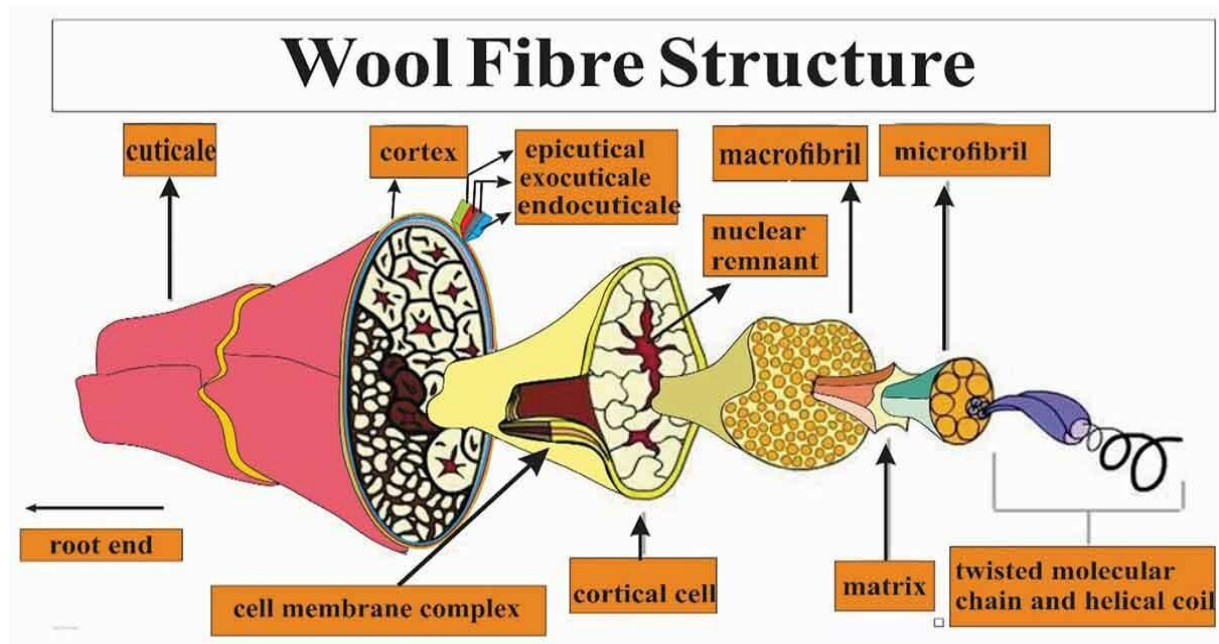
A lã é um biomaterial amplamente utilizado desde a antiguidade, cuja relevância se mantém atual devido à sua composição e propriedades únicas. Constituída majoritariamente por queratina, uma proteína fibrosa e insolúvel (Mura *et al.*, 2015), cuja elevada concentração de aminoácidos com grupos funcionais reativos, como tióis, carboxilas e hidroxilas, conferem à lã uma superfície molecularmente ativa ao atuarem como sítios ativos para ligações (Zhou *et al.*, 2025), ampliando seu

potencial de aplicação em processos tecnológicos (Mura *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2025).

A estrutura da fibra está diretamente relacionada à organização das cadeias polipeptídicas, nas quais a cisteína se destaca como um dos principais aminoácidos encontrados na queratina da lã. A elevada concentração desse composto favorece a formação de ligações dissulfeto ($-S-S-$), responsáveis por conferir resistência mecânica, estabilidade térmica e durabilidade ao material (Mura *et al.*, 2015). Além disso, a presença de grupos amina ($-NH_2$), carboxila ($-COOH$) e hidroxila ($-OH$) possibilitam a formação de ligações de hidrogênio e interações iônicas, reforçando a coesão estrutural da queratina (Sun *et al.*, 2023).

Do ponto de vista estrutural, a fibra de lã apresenta uma organização composta por cutícula, córtex e, eventualmente, medula (Figura 2). A cutícula, camada mais externa, é formada por células sobrepostas que funcionam como uma barreira protetora. Essa região é recoberta por uma fina camada lipídica rica em lanolina, que confere caráter hidrofóbico à superfície e contribui para a resistência à umidade (McKittrick *et al.*, 2012). Abaixo dela, encontra-se o córtex, que representa cerca de 90% da fibra e é responsável pelas propriedades mecânicas, elasticidade e isolamento térmico, devido à capacidade de retenção de ar em sua estrutura interna. Na matriz da lã é observada a maior concentração de enxofre, proveniente principalmente da cisteína. Esse aminoácido também está associado à capacidade de absorção de umidade, além de contribuir para propriedades como resistência ao fogo e comportamento antiestático (Kulkarni *et al.*, 2024).

Figura 2 - Estrutura da Fibra da lã



Fonte: Allafi *et al.* (2020)

A medula, quando presente, ocupa a região central da fibra e é menos comum em lãs de maior qualidade. Sua formação está relacionada ao processo de queratinização e à presença de espaços preenchidos por ar, sendo uma característica indesejável que reduz o valor comercial da fibra por comprometer propriedades ópticas e dificultar processos como o tingimento (Amarilho-Silveira; Brondani; Lemes, 2015).

Em conjunto, essa arquitetura molecular complexa e as propriedades funcionais singulares tornam a lã um material de alto desempenho, cuja aplicação vai além do setor têxtil tradicional (Allafi *et al.*, 2020). Essas características abrem novas possibilidades de uso, especialmente no desenvolvimento de materiais funcionais e inovações tecnológicas voltadas à sustentabilidade e à inovação (Khan *et al.*, 2022).

3.1.2 Lã de descarte

A lã acompanha a trajetória das civilizações humanas desde seus primórdios, tendo sido uma das primeiras matérias-primas comercializadas em escala internacional para fins têxteis. No entanto, ao longo das últimas décadas, sua relevância econômica foi sendo progressivamente reduzida, principalmente em função do avanço das fibras sintéticas e da mudança no comportamento do consumidor, que

passou a privilegiar materiais mais leves, uniformes e de menor custo (Rajabinejad; Bucîşcanu; Maier, 2019). Ainda assim, a lã mantém um papel importante na indústria têxtil, sendo reconhecida por suas propriedades naturais e pela diversidade de aplicações (Sun *et al.*, 2023).

Apesar de todo seu potencial, a lã é um dos resíduos agrícolas que desperta preocupações em função da destinação das fibras que não atendem aos padrões industriais de qualidade. Embora não seja, em essência, um resíduo, uma parcela significativa da produção mundial não é absorvida pelo mercado (Szczecina *et al.*, 2025), gerando dificuldades logísticas e econômicas já nas etapas iniciais da cadeia produtiva (Midolo *et al.*, 2025). Isso ocorre porque apenas as fibras mais finas, que representam uma fração limitada da produção, atendem às exigências da indústria têxtil. O restante, em grande parte constituído por fibras mais grossas ou de menor qualidade, acaba acumulando-se sem uma destinação clara, configurando um passivo relevante (Rajabinejad; Bucîşcanu; Maier, 2019).

A classificação da lã é baseada principalmente no diâmetro da fibra, expresso em micrômetros (μm), parâmetro determinante no valor comercial e aplicabilidade da fibra. Sendo assim, quanto menor o diâmetro, maior será a maciez e o valor comercial. Em contrapartida, fibras mais grossas apresentam menor aceitação e são frequentemente subutilizadas (Midolo *et al.*, 2025). Como consequência, resíduos como lã bruta rejeitada, fibras curtas e subprodutos do beneficiamento tornam-se abundantes ao longo de todo o processo produtivo (Abou-Taleb; El-Sayed, 2024).

A complexa estrutura formada por queratina, uma proteína estrutural altamente resistente, faz com que a degradação da lã no ambiente seja lenta, dificultando assim seu manejo e descarte. Diante disso, práticas como o envio para aterros ou a incineração ainda são empregadas, apesar dos impactos ambientais associados. O descarte em aterros pode favorecer a contaminação do solo e a disseminação de patógenos, como o antraz, levando à restrição dessa prática em diversos países (Sun *et al.*, 2023). Já a incineração, embora reduza o volume do resíduo, contribui para a poluição do ar ao emitir compostos contendo enxofre, elevando assim os custos operacionais da cadeia produtiva da lã (Tummino *et al.*, 2024).

Além dos impactos diretos, o acúmulo de lã residual também compromete a qualidade ambiental das paisagens, especialmente em áreas rurais. Sua elevada carga orgânica favorece a atividade microbiana, uma vez que a queratina atua como fonte de nutrientes para bactérias, ampliando os riscos de contaminação do solo, da

água e até mesmo da saúde animal e humana (Parlato *et al.*, 2022; Ghimis *et al.*, 2023).

Diante das limitações de expansão da lã encontradas no setor têxtil tradicional, faz com que se torne necessário reavaliar seu papel na cadeia produtiva. Nesse cenário, a lã residual passa a ser vista não como um problema, mas como um biomaterial de elevado potencial. Por ser um material renovável, biodegradável e funcional, demonstra aplicabilidade em áreas não convencionais, como áreas tecnológicas. Assim, o desenvolvimento de estratégias que busquem aliar a inovação, a sustentabilidade e a viabilidade econômica são essenciais para transformar esse subproduto em um recurso de alto valor agregado (Rajabinejad; Bucișcanu; Maier, 2019).

3.1.3 Economia circular

Diferentemente das fibras vegetais naturais, que devem ser cultivadas especificamente, a lã de ovelha é um subproduto agrícola produzido anualmente através da prática da tosquia, atividade que, apesar de ser indispensável ao bem estar animal, representa um custo para os agricultores, visto que a lã é um resíduo especial que necessita de uma gestão adequada de descarte (Parlato *et al.*, 2022)

Com base nessa realidade, o desafio consiste na transição do modelo atual, que pode ser enquadrado no modelo linear de produção "extrair-produzir-descartar" (Andrews *et al.*, 2015), para uma economia que adote os princípios fundamentais da economia circular, onde ocorre o uso consciente dos recursos naturais, reduzindo a pressão sobre o meio ambiente e proporcionando matérias primas seguras, inovações tecnológicas e novas oportunidades de mercado e de emprego (Savio *et al.*, 2022).

Uma estratégia para contrariar essas dificuldades é apoiar ações que visem aproveitar materiais, como subprodutos ou resíduos, que de outra forma seriam gerenciados como lixo, incentivando a valorização econômica e de baixo impacto (Savio *et al.*, 2022). Dessa forma, a exploração sustentável da lã residual viabiliza uma oportunidade de recuperação significativa desses recursos e propõe uma alternativa para que novos materiais possam ser desenvolvidos, colaborando com a sustentabilidade do sistema produtivo.

Devido às peculiares propriedades físico-químicas da lã, seus subprodutos e resíduos apresentam potencial para serem transformados e combinados com fases ativas, tornando-se materiais eficientes e versáteis à base de queratina (Tummino *et al.*, 2024) (Figura 3), podendo ser utilizados como componente em produtos destinados à construção civil (Parlato *et al.*, 2022; Szczecina *et al.*, 2025); como reforço polimérico em compósitos (Kulkarni *et al.*, 2024), como biofertilizante do solo em aplicações na agricultura (Camilli *et al.*, 2025; Farfán-Flores, 2025), aplicações ambientais como adsorvente de poluentes ambientais (Meenarathi; Agathian; Anbarasan, 2023; Oussadi *et al.*, 2024; Porubská; Koóšová; Braniša, 2024), entre outras possibilidades.

Figura 3 - Ciclo sustentável da lã para o desenvolvimento de novos produtos tecnológicos



Fonte: Autora (2026)

Sendo assim, este estudo propõe uma abordagem baseada na economia circular para o reaproveitamento da lã residual, destacando seu uso como suporte sustentável para a produção e imobilização de nanopartículas com aplicação catalítica. Ao empregar a fibra de lã como matriz funcional, o estudo busca transformar um resíduo de baixo valor em um material tecnológico com alto potencial de aplicação, especialmente em processos ambientais. Essa estratégia não apenas amplia as possibilidades de uso da lã residual, mas também contribui para a geração de

soluções inovadoras e sustentáveis, promovendo ganhos nos âmbitos social, econômico e ambiental, alinhados aos princípios da química verde e do desenvolvimento sustentável.

3.2 Nanotecnologia

A nanotecnologia corresponde a um campo interdisciplinar da ciência que se dedica ao estudo, à síntese e à aplicação de materiais que se encontram na escala de 1 a 1000nm (OECD, 2023), conhecidos como nanomateriais. Nessa faixa de tamanho, os materiais passam a apresentar propriedades distintas daquelas observadas na escala convencional, ampliando significativamente suas possibilidades de aplicações (Ahire *et al.*, 2022). Nessa perspectiva, a nanotecnologia se consolida como a parte aplicada da nanociência, possibilitando a conversão de conhecimentos fundamentais em soluções tecnológicas inovadoras (Roco; Bainbridge, 2002)

Os nanomateriais podem apresentar diferentes formas, incluindo nanopartículas, nanotubos, nanofios e filmes finos. Suas dimensões extremamente reduzidas, comparáveis às de vírus e células (Sanfelice; Pavinatto; Corrêa, 2022), estão diretamente associadas ao surgimento de propriedades físico-químicas diferenciadas (Baig; Kammakakam; Falath, 2021). Um dos principais fatores responsáveis por essas propriedades é o aumento expressivo da razão entre área superficial e volume, uma vez que à medida que o tamanho do material é reduzido à nanoescala, a quantidade de átomos na superfície aumenta, resultando em maior reatividade dos sítios superficiais (Ahire *et al.*, 2022), tornando os nanomateriais especialmente interessantes para aplicações tecnológicas.

Além disso, ao atingir a escala nanométrica, os materiais podem apresentar modificações em suas propriedades ópticas, elétricas e mecânicas (Sanfelice; Pavinatto; Corrêa, 2022). Essas alterações permitem ajustar o desempenho dos materiais para aplicações específicas, especialmente em áreas estratégicas como energia e meio ambiente.

Os nanomateriais podem ser classificados de acordo com o número de dimensões não confinadas à escala nanométrica, variando de 0-D a 3-D, e também quanto à sua origem, podendo ser sintéticos ou naturais (Barbosa, 2018; Khan, Saeed, Khan, 2019; Albrecht; Evans; Raston, 2006). Entre essas classes, os nanomateriais tridimensionais (3-D) se destacam por apresentarem todas as suas dimensões acima

da escala nanométrica, mas que preservam a estrutura nanométrica dos seus constituintes, conferindo a esses materiais propriedades únicas e diferenciadas (Pokropivny; Skorokhod, 2007; Gleiter, 2000). É nessa categoria que se encontram os materiais híbridos em escala nanométrica, também chamados de nanocompósitos híbridos, sistemas avançados formados pela integração de dois ou mais componentes distintos, comumente de natureza orgânica e inorgânica, combinados em nível molecular ou nanoscópico (Zhang *et al.*, 2018). A interação entre essas fases em dimensões tão reduzidas promove efeitos sinérgicos, conferindo ao material propriedades aprimoradas que superam aquelas apresentadas pelos constituintes quando avaliados separadamente (Mir *et al.*, 2018; Saveleva *et al.*, 2019).

Os nanomateriais sintéticos são produzidos em ambientes industriais e laboratoriais, como os nanomateriais de carbono, das nanopartículas metálicas, semicondutoras, cerâmicas e poliméricas (Khan; Saeed; Khan, 2019). Em contrapartida, nanomateriais de origem natural são encontrados tanto em sistemas biológicos, como as proteínas, enzimas e o DNA, como também formados e dispersos na atmosfera por erupções vulcânicas (Albrecht; Evans; Raston, 2006).

Atualmente os nanomateriais já se encontram entre as apostas mais promissoras para o avanço tecnológico em diversas áreas da ciência. Seu potencial se destaca especialmente diante dos grandes desafios contemporâneos da humanidade, como a crise energética e a poluição ambiental (Ahire *et al.*, 2022). Suas propriedades diferenciadas despertam grande interesse na comunidade científica, impulsionando o desenvolvimento de materiais mais eficientes e com maior desempenho (Baig; Kammakakam; Falath, 2021). Nesse contexto, a busca por nanomateriais de alta qualidade tem se intensificado, com foco em aplicações que contribuam para a melhoria das condições ambientais e para o bem-estar da sociedade.

3.2.1 Nanopartículas metálicas

Nanopartículas correspondem a uma classe de materiais que apresentam ao menos uma dimensão na escala nanométrica (Bayda *et al.*, 2019). Nessa escala, pequenas variações de tamanho, forma e composição passam a influenciar de maneira decisiva o comportamento do material, permitindo sua classificação com base nesses parâmetros e ampliando suas possibilidades de aplicação.

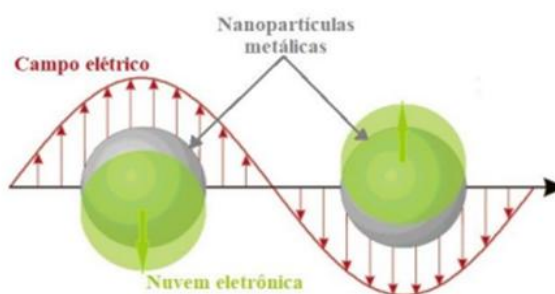
O interesse por essas estruturas cresceu à medida que se compreendeu que, em escala nanométrica, as propriedades físico-químicas podem diferir significativamente daquelas observadas em materiais macroscópicos (Khan; Saeed; Khan, 2019). Essa mudança de comportamento possibilitou o desenvolvimento de materiais com funções específicas, projetados para atender demandas tecnológicas cada vez mais complexas.

Entre os diferentes tipos de nanopartículas, destacam-se as metálicas, de óxidos metálicos, à base de carbono, poliméricas e os pontos quânticos (Alvaréz-Chimal *et al.*, 2025). Dentre elas, as nanopartículas metálicas ocupam posição de destaque, principalmente devido às suas propriedades ópticas e eletrônicas diferenciadas, que favorecem aplicações em áreas como catálise, sensores e dispositivos avançados (Baig; Kammakakam; Falath; 2021).

Ao serem encontradas em estado coloidal, as nanopartículas apresentam propriedades físico-químicas específicas, sendo diretamente associadas aos seus fenômenos superficiais. A elevada área superficial/volume intensifica a reatividade, enquanto o confinamento quântico contribui para a modulação de suas propriedades eletrônicas (Raota, 2018). Esses efeitos são determinantes para o desempenho dos nanomateriais em diferentes aplicações.

Um dos fenômenos mais característicos das nanopartículas metálicas é a ressonância plasmônica de superfície (SPR, do inglês *surface plasmon resonance*), fenômeno que ocorre quando a radiação eletromagnética presente nas regiões do visível e do ultravioleta interage com a superfície de um metal, induzindo a oscilação coletiva dos seus elétrons livres (Figura 4). Esse efeito confere propriedades ópticas únicas às nanopartículas e depende de fatores como tamanho, forma, natureza do metal e meio de dispersão (Scuro, 2021; Barbosa, 2018).

Figura 4 - Oscilação coletiva de elétrons na superfície de nanopartículas metálicas



Fonte: Kelly *et al.* (2003) adaptado por Andrade (2024)

A existência de elétrons livres para condução em superfície, é condição essencial para a manifestação do fenômeno, o que explica a predominância de estudos com metais como ouro, prata, platina e cobre, materiais que exibem bandas de SPR particularmente intensas e ajustáveis (Cavalcante, 2014).

Em função dessas características, nanopartículas metálicas têm sido amplamente exploradas em diferentes áreas do conhecimento, destacando-se pelo seu potencial em aplicações tecnológicas e ambientais (Tabela 1), onde a combinação entre alta reatividade e propriedades ajustáveis representa uma vantagem significativa.

Quadro 1 - Aplicações das nanopartículas

Material	Aplicação	Referências
Nanopartículas de ouro	Catálise	Selvarani <i>et al.</i> , 2025
Nanopartículas de prata	Antibacteriano	Kumari <i>et al.</i> , 2025
Nanopartículas de paládio	Biomedicina	Lakkakula <i>et al.</i> , 2024
Nanopartículas de prata/ouro	Sensores	Subekin <i>et al.</i> , 2024
Nanopartículas de paládio	Agronômica	Koçak <i>et al.</i> , 2024

Fonte: Autora (2025).

3.2.2 Nanopartículas de ouro

O ouro, elemento químico de número atômico 79, é um metal que apresenta coloração dourada, aspecto brilhante, elevada resistência à corrosão e notável maleabilidade e ductilidade (Junqueira; Silva; Guerra, 2012). Com o avanço da tecnologia, o ouro passou a despertar novos interesses, principalmente por ser inerte e biocompatível (Figueira, 2011), o que o torna um material particularmente versátil para a obtenção de nanopartículas com múltiplas aplicações (Kalimuthu *et al.*, 2020).

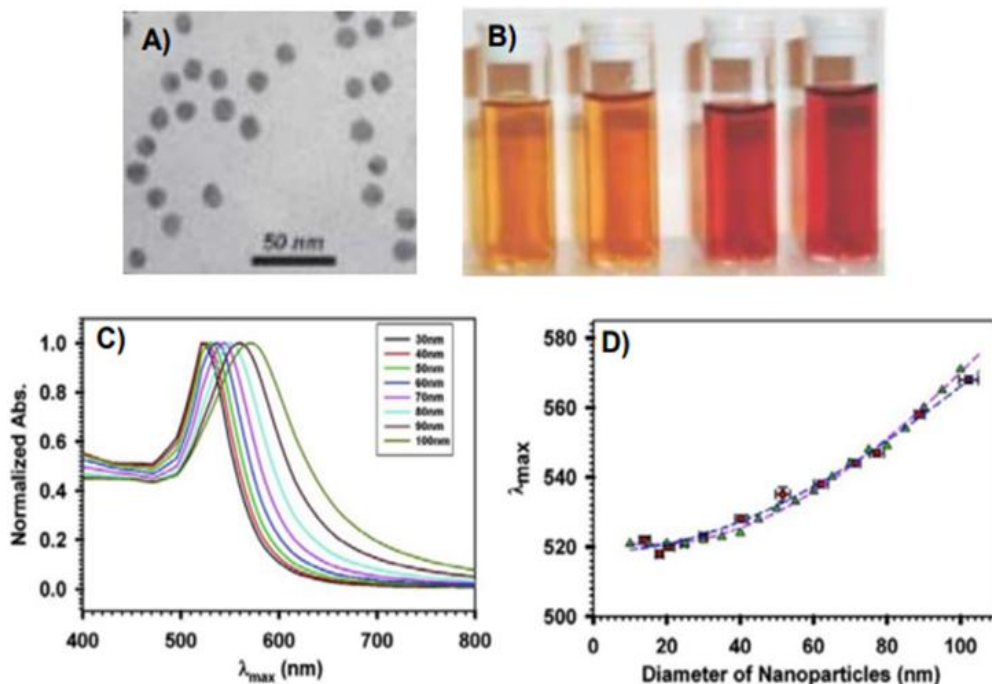
Entre as nanopartículas metálicas existentes, as nanopartículas de ouro (NPs-Au) são uma das mais pesquisadas para aplicações biológicas devido às suas propriedades físico-químicas desejáveis, como síntese fácil, modificação de superfície, biocompatibilidade, não toxicidade e grande razão superfície/volume e ajuste de tamanho (Patil *et al.*, 2023).

As nanopartículas de ouro (NPs-Au) se destacam entre os nanomateriais mais estudados na atualidade, principalmente em áreas que exigem materiais estáveis, funcionalizáveis e de baixa toxicidade. Sua facilidade de síntese, aliada à

possibilidade de modificação superficial e ao controle de tamanho e forma, permite ajustar suas propriedades para diferentes finalidades (Patil *et al.*, 2023). Essas características explicam o crescente interesse em aplicações que vão desde sensores químicos e dispositivos optoeletrônicos até sistemas de detecção biológica, além de usos com atividade catalítica e antimicrobiana (Bansal *et al.*, 2020; Arcos Rosero *et al.*, 2024; Feng; Jia; Cui, 2024; Selvarani *et al.*, 2025).

A modificação do ouro do seu estado a granel para a escala nanométrica confere ao metal uma mudança em suas características físicas e químicas (Zein; Sharrouf; Selting, 2020), como é o caso do fenômeno observado na alternância de cor das NPs-Au. Enquanto o ouro em estado maciço exibe coloração amarela, nanopartículas de pequenas dimensões podem apresentar tonalidades avermelhadas ou arroxeadas, sendo essa variação determinada diretamente pelo tamanho e morfologia das partículas (Figura 5). Esse fenômeno está associado à ressonância plasmônica de superfície, que, para nanopartículas de ouro em torno de 20 nm, resulta em um pico de absorção próximo de 520 nm (Cao *et al.*, 2014; Njoki *et al.*, 2007).

Figura 5 - A) Imagem de MET de nanoesferas de ouro, B) Influência do tamanho das mesmas na coloração de suas soluções, C) Espectro de absorção de nanoesferas de ouro em diferentes tamanhos e D) Comprimento de onda máximo de absorção de diferentes diâmetros de na



Fonte: Adaptado de Nascimento (2019)

A síntese de NPs-Au tradicionalmente enfrenta o desafio fundamental da instabilidade coloidal decorrente da elevada energia superficial que faz com que essas estruturas apresentem a tendência natural de formarem aglomerados (Bansal *et al.*, 2020). Em dispersão aquosa, essas partículas comportam-se como um colóide liofóbico, tendo pouca afeição pelo meio dispersante. Na tentativa de contornar esse problema, são empregadas uma série de técnicas ou abordagens baseadas em técnicas como estabilização com citrato de sódio, surfactantes, polieletrólitos e ligantes, os quais atuam mediante mecanismos de repulsão eletrostática (Fonseca, 2022).

Do ponto de vista eletrônico, o comportamento singular do ouro em escala nanométrica está relacionado a efeitos relativísticos que promovem a contração do orbital 6s, conferindo ao elemento uma eletronegatividade incomum para metais (Pyykkö, 2012). Essa característica contribui para a elevada estabilidade das NPs-Au, que apresentam baixa tendência à oxidação (Fonseca, 2022). Além disso, suas propriedades ópticas, elétricas e até magnéticas diferem significativamente das de outros metais, comportamento atribuído ao fenômeno de ressonância plasmônica de superfície desse material. Quando em escala nano, a ressonância plasmônica das nanopartículas se manifesta não apenas na região do visível, mas pode se estender até a região do infravermelho próximo (NIR, do inglês *Near Infra-Red*) (Nascimento, 2019), onde a absorção pelos tecidos do corpo humano é reduzida. Um comportamento oposto é observado na maioria dos metais, onde os convencionais exibem ressonância restrita à região ultravioleta (UV) e os demais metais nobres na região da luz visível (Netto-Ferreira, 2015), limitando assim suas aplicações em tecnologias de imageamento e terapia profundas.

3.2.3 Síntese de nanopartículas

A síntese de nanopartículas pode ser realizada através de diferentes rotas, que variam conforme o objetivo e a aplicação desejada. De modo geral, essas estratégias são classificadas em duas abordagens principais: *top-down* e *bottom-up* (Chan *et al.*, 2020). Na abordagem *top-down*, materiais de maiores dimensões são fragmentados até atingirem a escala nanométrica por meio de processos físicos ou mecânicos. Em contrapartida, a abordagem *bottom-up* baseia-se na construção das nanopartículas a

partir de átomos ou moléculas, utilizando rotas químicas ou biológicas (Khan; Saeed; Khan, 2019).

Entre as diferentes possibilidades, a síntese por via química tem sido amplamente utilizada, sobretudo devido ao seu alto rendimento, baixo custo relativo, facilidade operacional e boa reprodutibilidade, características que favorecem sua aplicação inclusive em escala industrial (Khan; Saeed; Khan, 2019). Apesar dessas vantagens, os métodos químicos tradicionais apresentam limitações importantes, como o uso de reagentes potencialmente tóxicos que trazem riscos à saúde e contribuem com a degradação ambiental a longo prazo (Kirubakaran *et al.*, 2025). Já os métodos físicos apresentam condições operacionais severas, como elevadas temperaturas e pressões, gerando um incremento nos custos e geração de impactos ambientais significativos (Pandit *et al.*, 2022; Kirubakaran *et al.*, 2025).

Diante dessas importantes limitações, tem crescido o interesse e estudos sobre rotas alternativas mais sustentáveis. Nesse contexto, a síntese verde tem se destacado como uma abordagem promissora para a obtenção de nanopartículas, especialmente a partir da redução de sais metálicos, como os de ouro. Nessa estratégia, materiais de origem biológica atuam simultaneamente como agentes redutores e estabilizantes, eliminando ou reduzindo a necessidade de compostos químicos nocivos (Scurro, 2021). Essa característica torna o processo mais seguro, economicamente viável e alinhado aos princípios da química verde.

3.2.4 Síntese verde

Em resposta às limitações ambientais associadas aos métodos físicos e químicos convencionais, vêm sendo estudadas e propostas abordagens que permitem a formação de nanopartículas sem o uso de reagentes tóxicos ou agentes estabilizantes sintéticos (Banjara *et al.*, 2024). Nesse cenário, a denominada “nanotecnologia verde” tem se destacado como uma alternativa mais segura e sustentável, ao utilizar materiais de origem natural, como extratos vegetais, bactérias, algas, vírus e fungos, na obtenção de nanomateriais estáveis (Rattanakit *et al.*, 2025). Essa abordagem encontra respaldo nos princípios da Química Verde, formulados por Anastas e Eghbali (2010), que preconizam o desenvolvimento de processos químicos que minimizem a geração de resíduos, eliminem o uso de substâncias perigosas e promovam a eficiência energética e o uso de matérias-primas renováveis. A síntese

verde de nanopartículas se alinha diretamente a esses princípios, ao substituir rotas sintéticas convencionais por processos biogênicos de menor impacto ambiental e maior segurança operacional (Iravani, 2011).

A síntese verde baseia-se na capacidade de biomoléculas presentes nesses sistemas atuarem simultaneamente como agentes redutores e estabilizantes, simplificando o processo e reduzindo impactos ambientais (Osman *et al.*, 2024). Essa multifuncionalidade é particularmente relevante no contexto da Química Verde, pois elimina etapas sintéticas intermediárias e dispensa o uso de solventes orgânicos e catalisadores nocivos, contribuindo para a redução do número de operações e da quantidade de resíduos gerados ao longo do processo (Iravani, 2011). No entanto, a eficiência dessa abordagem depende de diversos parâmetros experimentais. Fatores como temperatura, pH, concentração de íons metálicos, volume do extrato biológico e tempo de reação influenciam diretamente as etapas de nucleação, crescimento e estabilização das nanopartículas (Ahmad *et al.*, 2024), exigindo controle rigoroso para garantir a reprodutibilidade e a qualidade dos nanomateriais obtidos.

Diversos estudos têm demonstrado a viabilidade dessa estratégia utilizando diferentes fontes biológicas. Extratos de plantas são amplamente empregados devido à sua riqueza em compostos bioativos (Mohamed *et al.*, 2025; Dheyab *et al.*, 2025a; Scuro *et al.*, 2025), enquanto algas também se mostram promissoras pela sua composição química diversificada (Aragão *et al.*, 2019; Rafee *et al.*, 2025; Almeida *et al.*, 2025). Além disso, microrganismos como bactérias e fungos têm sido explorados com sucesso na produção de nanopartículas, ampliando o leque de possibilidades dentro dessa abordagem (Xing *et al.*, 2023).

Assim sendo, a síntese verde consolida-se como uma estratégia de crescente relevância no desenvolvimento de nanomateriais funcionais, conciliando eficiência sintética, versatilidade de fontes biológicas e alinhamento aos princípios da sustentabilidade química, o que a posiciona como uma das rotas mais promissoras para a nanotecnologia aplicada.

Assim sendo, a síntese verde vem se consolidando como uma estratégia de crescente relevância no desenvolvimento de nanomateriais funcionais, conciliando eficiência, versatilidade de fontes biológicas e alinhamento aos princípios da sustentabilidade química, o que a posiciona como uma das rotas mais promissoras para a nanotecnologia aplicada.

3.2.4.1 Síntese utilizando extrato de plantas

A síntese verde de nanopartículas mediada por extratos vegetais vem se consolidando como uma estratégia eficiente e sustentável, tendo as plantas como as principais fontes para a obtenção de nanomateriais (Oliveira; Lenzi, 2023). Esse destaque decorre da sua simplicidade operacional, baixo custo e potencial capacidade de aplicação em larga escala (Osman *et al.*, 2024).

Nessa abordagem, diferentes partes vegetais, como folhas, raízes, sementes, cascas, flores e frutos, são utilizadas como fontes de compostos bioativos capazes de reduzir sais metálicos, como os de ouro, enquanto estabiliza as nanopartículas formadas simultaneamente (Dheyab *et al.*, 2025b; Edo *et al.*, 2025). Essa abordagem amplia o aproveitamento dos recursos naturais e reduz a dependência de insumos químicos convencionais.

A síntese verde de nanopartículas mediada por extratos vegetais vem se consolidando como uma estratégia eficiente e alinhada aos princípios da sustentabilidade, com as plantas figurando entre as principais fontes para a obtenção de nanomateriais (Oliveira; Lenzi, 2023). Esse destaque decorre da simplicidade do processo, do baixo custo e da possibilidade de aplicação em larga escala (Osman *et al.*, 2024).

Nesse contexto, diferentes partes vegetais, como folhas, raízes, sementes, cascas, flores e frutos, são utilizadas como fontes de compostos bioativos capazes de reduzir sais metálicos, como os de ouro, enquanto promovem simultaneamente a estabilização das nanopartículas formadas (Dheyab *et al.*, 2025b; Edo *et al.*, 2025).

Além disso, as metodologias baseadas em plantas apresentam vantagens operacionais por tratarem-se de processos rápidos que permitem a obtenção de nanopartículas com boa estabilidade, além do controle de forma e tamanho, características essenciais para aplicações tecnológicas (Verma *et al.*, 2022). A eficiência dessa abordagem está diretamente relacionada à composição química dos tecidos vegetais, que são ricos em fitoquímicos, como flavonoides, alcaloides, terpenoides, saponinas, taninos e compostos fenólicos (Edo *et al.*, 2025). Esses compostos atuam tanto na redução dos íons metálicos quanto na estabilização das nanopartículas, evitando sua agregação e favorecendo maior uniformidade (Singh *et al.*, 2021; Mohammadzadeh *et al.*, 2022).

De maneira geral, o processo de formação das nanopartículas envolve etapas bem definidas (Figura 6). Inicialmente, ocorre uma reação de oxirredução, na qual os metabólitos presentes no extrato vegetal convertem os íons Au^{3+} em ouro metálico (Au^0). Em seguida, os átomos formados se agrupam, dando origem a núcleos estáveis, etapa conhecida como nucleação. Posteriormente, esses núcleos crescem por meio da interação entre partículas, formando estruturas de maior dimensão. A estabilização coloidal final é alcançada pelo recobrimento das nanopartículas por compostos do próprio extrato, que atuam como uma barreira contra a aglomeração irreversível (Turkevich; Stevenson; Hillier, 1951; Fonseca, 2022; Scuro, 2021).

Figura 6 - Etapas de formação de NPs-Au pelo método de síntese verde



Fonte: Autora (2026)

Como em qualquer processo de síntese, fatores como composição do extrato vegetal, pH, temperatura, concentração de íons metálicos, quantidade de extrato e tempo de reação influenciam diretamente essas etapas, sendo determinantes para o controle das propriedades finais (Ahmad *et al.*, 2024; Álvarez-Chimal *et al.*, 2025).

Nesse cenário, o uso de extratos vegetais como agentes redutores representa uma estratégia promissora e versátil, já demonstrada por diversos estudos que relatam o sucesso de diferentes espécies vegetais na síntese de nanopartículas (Tabela 2). Enquanto abordagens iniciais se concentravam em plantas amplamente conhecidas, pesquisas mais recentes têm direcionado atenção a espécies menos exploradas, cujas particularidades bioquímicas podem contribuir para o aprimoramento da estabilidade, da morfologia e da bioatividade das nanopartículas (Oliveira; Lenzi, 2023). Essas investigações reforçam o potencial dos recursos botânicos como alternativas sustentáveis e inovadoras frente aos métodos convencionais.

Quadro 2 - Nanopartículas sintetizadas através da síntese verde mediada por plantas

Autor/Ano	Planta Utilizada	Nanopartícula	Aplicação
Selvarani <i>et al.</i> (2025)	<i>Ruta graveolens</i>	Ouro	Redução catalítica de poluentes
Velmani <i>et al.</i> (2025)	<i>Pandanus dubius</i>	Prata	Atividade antimicrobiana e antioxidante
Albadawi <i>et al.</i> (2024)	<i>Psidium guajava</i>	Prata	Controle de pesticidas
Adraoui <i>et al.</i> (2023)	<i>Crocus sativus L.</i>	Óxido de zinco	Fotocatálise e antimicrobiana
Alsamhary (2023)	<i>Moringa oleifera</i>	Cobre	Remediação ambiental e antimicrobiana

Fonte: Autora (2025)

3.2.5 Alecrim-do-campo (*Baccharis dracunculifolia* DC.)

Baccharis dracunculifolia (Figura 7), conhecido popularmente como alecrim-do-campo, vassoura ou vassourinha, é um arbusto perene pertencente à família Asteraceae, sendo nativo da América do sul onde se encontra amplamente distribuído em campos secos e áreas alteradas da Argentina, Brasil, Bolívia, Paraguai e Uruguai (Armstrong *et al.*, 2024).

Figura 7 – *Baccharis dracunculifolia* DC



Fonte: Autora (2025)

Apresenta uma destacada relevância no setor agroindustrial, sendo a considerada a principal matéria-prima utilizada pelas abelhas para a produção da própolis verde na região Sudeste do Brasil (Olivares-Pinto; Barbosa; Fernandes,

2022). Somado a isso, suas propriedades bioativas com atuação anti-inflamatória, antioxidante, antibacteriana, antiulcerativa e antimoduladora (Bachiega *et al.*, 2013; Boeing *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022; Minteguiaga *et al.*, 2021; Zanela *et al.*, 2021) permitem sua utilização na medicina alternativa e complementar para o tratamento de diversas doenças humanas (Iurckevicz *et al.*, 2021).

As propriedades medicinais encontradas na planta estão associadas aos diversos compostos fitoquímicos presentes em seus extratos, assim como em seus óleos essenciais (Iurckevicz *et al.*, 2021). Entre esses constituintes, os compostos fenólicos encontrados em sua maioria são do tipo flavonoides (quercetina, kaempferol, apigenina, naringenina e aromadendrina) e ácidos fenólicos (artepilina C, drupanina, ácido ferúlico, ácido cafeico e ácido dicafeoilquínico) (Barbosa *et al.*, 2023) (Figura 8), embora a maioria dos efeitos biológicos esteja ligada a terpenos, como diterpenos e triterpenos (Armstrong *et al.*, 2024; Bonin *et al.*, 2020; Minteguiaga *et al.*, 2021).

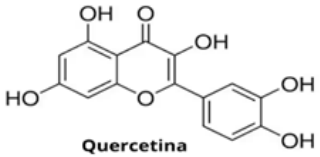
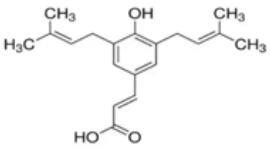
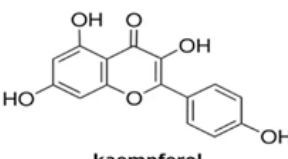
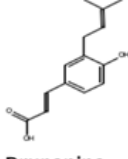
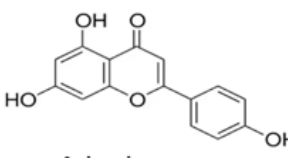
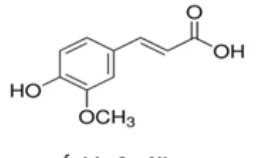
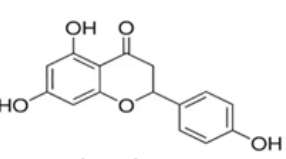
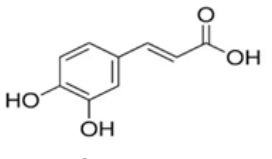
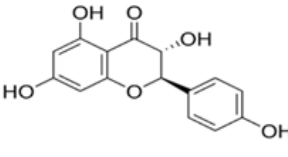
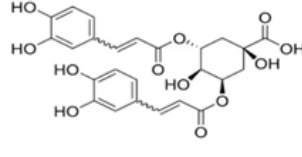
Os fitoquímicos presentes nos extratos vegetais desempenham papel determinante na síntese de nanopartículas metálicas por abordagens sustentáveis, atuando de forma integrada na redução e estabilização dessas estruturas. Compostos como flavonoides, fenóis, taninos e terpenoides (Mehra *et al.*, 2025) possuem grupos funcionais capazes de transferir elétrons, promovendo a conversão de íons metálicos em suas formas reduzidas e possibilitando a formação de nanopartículas. Paralelamente, essas biomoléculas podem se adsorver à superfície das partículas recém-formadas, criando uma camada protetora que limita a agregação e favorece a estabilidade do sistema (Edo *et al.*, 2025). Essa dupla atuação não apenas viabiliza a síntese por rotas mais ecológicas, mas também permite maior controle sobre o tamanho, a morfologia e a dispersão das nanopartículas, aspectos fundamentais para sua aplicação em diferentes áreas tecnológicas.

A espécie *Baccharis dracunculifolia* DC. está entre as mais estudadas dentro do gênero *Baccharis*, no que se refere às características fitoquímicas e propriedades farmacológicas. Apesar desse reconhecimento, as pesquisas voltadas à sua aplicação em nanotecnologia ainda são limitadas. Contudo, as pesquisas já realizadas nessa área apontam resultados promissores e evidenciam seu potencial para aplicação e desenvolvimento de novos produtos tecnológicos.

Até o presente momento, não foram encontrados registros na literatura que relatem a utilização do extrato de alecrim-do-campo (*Baccharis dracunculifolia* DC.) na síntese de nanopartículas metálicas, em especial o ouro. Embora diversos extratos

vegetais já tenham sido explorados como agentes redutores em rotas de síntese verde, o potencial desta espécie específica continua inexplorado para essa finalidade. Nesse sentido, o presente estudo assume caráter inovador ao explorar, de forma inédita, o potencial fitoquímico do alecrim-do-campo na obtenção de nanopartículas de ouro, contribuindo para o avanço do conhecimento científico e para o desenvolvimento de estratégias mais sustentáveis na área de nanomateriais.

Figura 8 - Estruturas químicas dos principais compostos encontrados no extrato aquoso de *Baccharis dracunculifolia* DC

FLAVONOIDES	ÁCIDOS FENÓLICOS
 Quercetina	 Artepilina C
 kaempferol	 Drupanina
 Apigenina	 Ácido ferúlico
 Naringenina	 Ácido cafeico
 Aromadendrina	 Ácido dicafeoilquínico

Fonte: Autora (2026).

3.2.6 Imobilização de nanopartículas metálicas em fibra de lã

Nos últimos anos, a aplicação da nanotecnologia na obtenção de materiais têxteis multifuncionais tem se destacado como uma estratégia promissora para o desenvolvimento de sistemas híbridos. Esses materiais são projetados para preservar as características intrínsecas das fibras, ao mesmo tempo em que incorporam propriedades funcionais avançadas de forma integrada (D'Agostino *et al.*, 2026; Haji; Nasiriboroumand, 2022).

Nesse contexto, a lã imobilizada deixa de atuar apenas como suporte estrutural e passa a desempenhar um papel ativo, especialmente devido às suas propriedades catalíticas. Essa atuação contribui para a intensificação de reações químicas e para o aumento da eficiência dos processos, ampliando sua aplicabilidade em sistemas que demandam elevado desempenho. Como consequência, observa-se a redução do tempo reacional e uma utilização mais eficiente dos reagentes.

A incorporação dessas características catalíticas confere à lã imobilizada um caráter estratégico, transformando-a de um material passivo em um componente funcional de alto valor agregado dentro do sistema. Alinhada a essa abordagem, a síntese verde de nanopartículas metálicas pode ser realizada diretamente na superfície ou no interior das fibras de lã, utilizando compostos bioativos provenientes de extratos vegetais como agentes redutores e estabilizantes (Sadeghi-Kiakhani; Hashemi; Norouzi, 2024, 2025). Essa rota sintética se destaca por reduzir a dependência de reagentes químicos convencionais, minimizar a geração de resíduos potencialmente tóxicos e permitir a condução do processo em condições operacionais mais brandas e ambientalmente compatíveis (Das *et al.*, 2024).

Durante esse processo, os compostos bioativos atuam como doadores de elétrons, promovendo a redução dos íons metálicos nas etapas de biorredução, além de contribuírem para o encapsulamento e a estabilização dos nanomateriais formados (Das *et al.*, 2024). A queratina presente na lã favorece a formação de um sistema estável, no qual as nanopartículas permanecem firmemente ancoradas à fibra (Tang *et al.*, 2017).

Essa ação combinada entre os constituintes vegetais e a estrutura proteica da lã resulta em uma distribuição mais homogênea das nanopartículas, o que se reflete diretamente na melhoria do desempenho funcional e na estabilidade do material desenvolvido.

3.3 Atividade catalítica de nanopartículas de ouro

Por muito tempo, o ouro em sua forma macroscópica foi considerado pouco relevante para aplicações catalíticas. No entanto, a evolução da nanotecnologia revelou que, em escala nanométrica, esse material apresenta propriedades significativamente distintas, como elevada área superficial, dimensões reduzidas e forte interação com radiação nas regiões do visível e ultravioleta, fatores que ampliam seu potencial catalítico.

Nesse cenário, as nanopartículas de ouro (NPs-Au) passaram a ser reconhecidas como sistemas catalíticos altamente eficientes, destacando-se pela estabilidade, seletividade química e propriedades optoeletrônicas ajustáveis. Essas características, atuando de forma integrada, permitem sua aplicação em uma ampla variedade de processos, incluindo reações de oxidação, hidrogenação e transformações energéticas.

Além disso, aspectos estruturais como alta cristalinidade, grande área de contato e presença de contornos de grão ativos contribuem para seu desempenho superior em comparação ao ouro em massa. Como resultado, as NPs-Au demonstram elevada versatilidade catalítica, sendo empregadas tanto em reações químicas diversas quanto em aplicações ambientais, com destaque para a degradação e detecção de poluentes, como corantes orgânicos.

3.3.1 Atividade catalítica de NPs-Au na redução de corantes

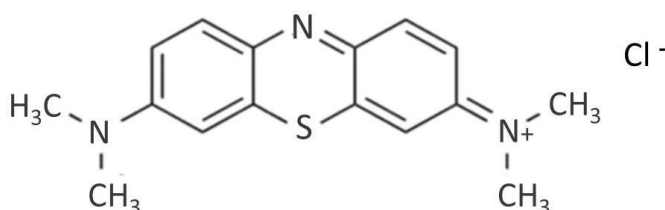
A água é um recurso essencial para a manutenção da vida, porém sua contaminação tem se intensificado nas últimas décadas, configurando um dos principais desafios ambientais da atualidade (La *et al.*, 2026). A intensificação da urbanização e das atividades industriais tem ampliado a descarga de contaminantes provenientes de fontes industriais, agrícolas e domésticas. Entre esses poluentes, destacam-se metais pesados, pesticidas e corantes sintéticos, que representam riscos significativos aos ecossistemas aquáticos e à saúde humana (Afsheen *et al.*, 2026).

Dentre esses poluentes, os corantes industriais são particularmente preocupantes devido ao seu uso generalizado e à persistência ambiental derivada de sua estabilidade química, sendo um dos principais agentes químicos que tornam a

água imprópria para consumo (Khan *et al.*, 2024). A presença de corantes em ambientes aquáticos pode causar impactos significativos, como a redução da penetração de luz, afetando processos fotossintéticos, além de apresentar toxicidade para organismos aquáticos (Afsheen *et al.*, 2026). Sua estabilidade química dificulta processos naturais de degradação, favorecendo o acúmulo em corpos d'água e comprometendo a qualidade da água para consumo (Khan *et al.*, 2024).

Entre os corantes mais utilizados, destaca-se o cloreto de tetrametilitionina, conhecido popularmente como azul de metileno (AM), um corante tiazínico catiônico de fórmula molecular $C_{16}H_{18}ClN_3S$ (Figura 9). Trata-se de um sólido altamente solúvel em água e etanol, formando soluções de coloração azul intensa (Silva, 2019). Embora seja amplamente empregado em indústrias têxteis e de papel, sua presença no ambiente é preocupante devido à toxicidade, potencial carcinogenicidade, elevada estabilidade química e resistência à degradação (Khan *et al.*, 2024). Além dos impactos ambientais, a exposição ao azul de metileno pode causar efeitos adversos à saúde humana, incluindo distúrbios neurológicos e oculares, bem como complicações respiratórias e gastrointestinais (Muthuganesh *et al.*, 2025).

Figura 9 - Fórmula química estrutural do Azul de metileno



Fonte: Autora (2026)

Diante desse cenário, o tratamento de efluentes contendo corantes torna-se essencial. Nesse sentido, a degradação catalítica utilizando nanopartículas metálicas, especialmente nanopartículas de ouro, tem se mostrado uma abordagem eficiente e promissora. Esse método permite a conversão de poluentes orgânicos em espécies menos tóxicas, contribuindo para a remediação ambiental (Fonseca, 2022). Em vista disso, é de suma importância que efluentes contendo azul de metileno sejam tratados adequadamente, pois se trata de um corante catiônico de alta reatividade, tornando-se resíduos causadores de diversos impactos negativos ao meio ambiente (Silva, 2019).

A atuação catalítica dessas nanopartículas está associada à sua elevada área superficial e à capacidade de mediar reações de transferência de elétrons, geralmente na presença de agentes redutores, como o boroidreto de sódio (NaBH_4). Essa combinação acelera a degradação do corante, aumentando a eficiência do processo (Khan *et al.*, 2024; Ullah *et al.*, 2025). Assim, o uso de nanomateriais catalíticos se destaca como uma alternativa estratégica para o tratamento de águas contaminadas, alinhando eficiência tecnológica e sustentabilidade ambiental.

4 METODOLOGIA

4.1 Reagentes químicos

Foram utilizados reagentes de grau analítico, incluindo ácido tetracloroáurico trihidratado ($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, Sigma-Aldrich), borohidreto de sódio (NaBH_4 , 95%, Sigma-Aldrich) e Azul de metileno ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, Vetec).

Amostras de água de córrego urbano do município de Bagé foram utilizadas nos estudos catalíticos. Para o preparo das soluções, foi utilizada água destilada.

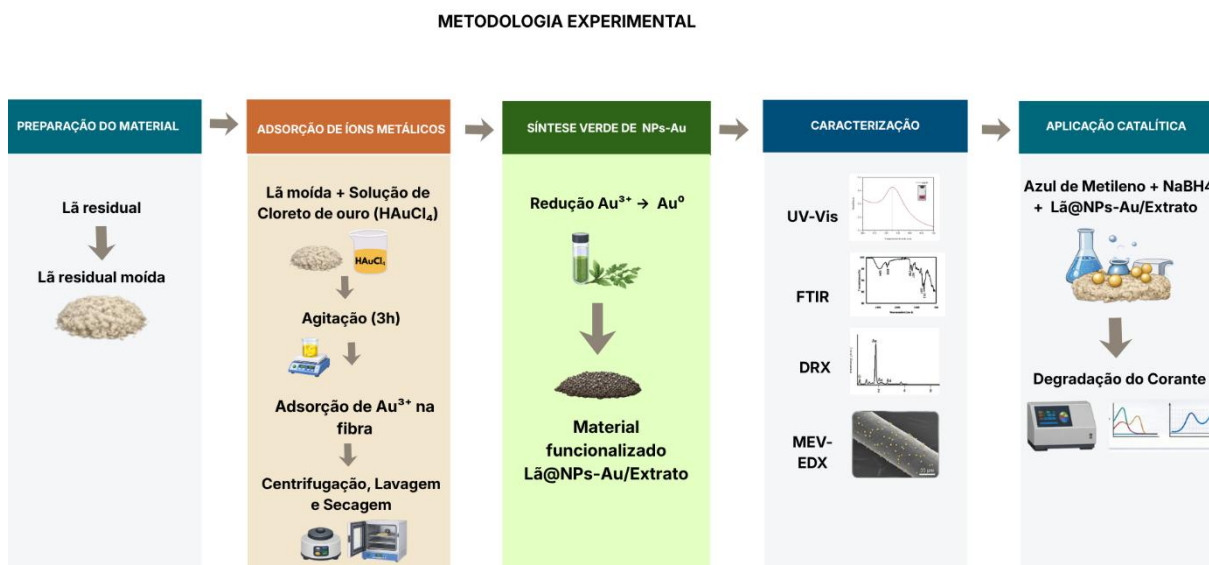
4.2 Materiais

Folhas de *Baccharis dracunculifolia* DC foram coletadas no campus da Universidade Federal do Pampa, em Bagé, sul do Brasil ($31^\circ 18' 18.5''\text{S}$ $54^\circ 03' 50.3''\text{W}$). Imediatamente após a colheita, as folhas foram encaminhadas ao Laboratório de Materiais e Meio Ambiente, onde foram lavadas com água destilada e secas em estufa a 60°C por 24 horas. Após a secagem, o material foi armazenado em frascos até sua utilização.

A lã ovina descartada da espécie Corriedale foi fornecida pela empresa Paramount Lansul S.A. Antes do processo de moagem, o material foi submetido à remoção manual de impurezas, seguida de lavagem com detergente neutro e água quente (100°C), visando à remoção de gorduras. Posteriormente, a lã foi cortada em pequenos pedaços e moída por congelamento com nitrogênio líquido, sendo, em seguida, peneirada em malha de 100 mesh.

A figura 10 mostra uma abordagem geral das etapas envolvidas no trabalho em questão.

Figura 10 - Fluxograma das etapas envolvidas no trabalho



Fonte: Autora (2026)

4.3 Preparação do extrato de *Baccharis dracunculifolia* DC

Para a obtenção do extrato de *Baccharis dracunculifolia* DC., empregou-se o método de infusão. Inicialmente, 5 g do material foliar seco foram adicionados a 100 mL de água destilada previamente aquecida a 80 °C, em béquer. A mistura foi mantida em repouso, ao abrigo da luz, por 1 hora, com agitação manual a cada 15 minutos.

Ao término do período de infusão, o sistema foi submetido à filtração para a separação do extrato, o qual foi utilizado imediatamente.

4.4 Síntese verde das nanopartículas de ouro

Como etapa preliminar à imobilização de nanopartículas de ouro em fibras de lã, este estudo teve como objetivo verificar o potencial redutor do extrato de *Baccharis dracunculifolia* DC na síntese de NPs-Au, utilizando a abordagem de síntese verde. Para isso, 5,0 mL de extrato aquoso foliar foram adicionados a 10,0 mL de solução aquosa 2 mM de ácido tetracloroáurico ($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), resultando em um meio reacional ácido ($\text{pH} \approx 4$), inerente à própria solução precursora. A reação foi conduzida sob agitação (150 rpm) e temperatura constante (25 °C). A formação das NPs-Au foi evidenciada pela mudança de coloração da solução, de dourada para vermelho-escura (Figura 11). A formação das NPs-Au foi confirmada por espectroscopia no UV-

Vis, com base na banda de ressonância plasmônica característica das nanopartículas de ouro.

Figura 11 - Mudança de coloração evidenciando a formação das nanopartículas



Fonte: Autora (2025)

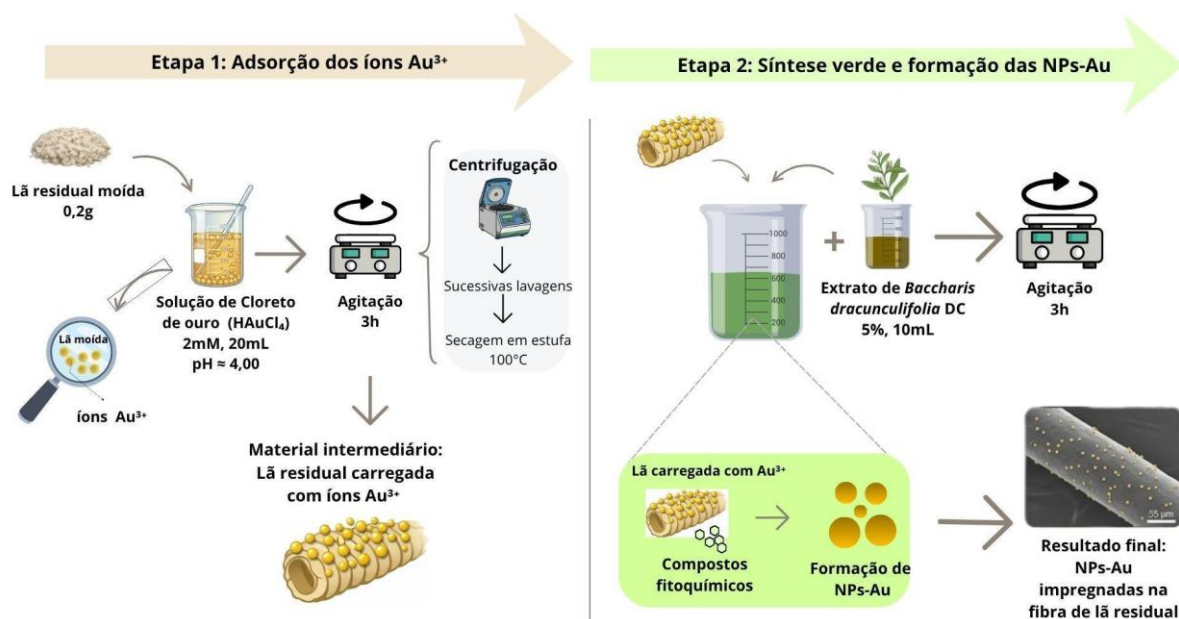
4.5 Impregnação de NPs-Au na fibra de lã ovina

A impregnação das nanopartículas de ouro (NPs-Au) na fibra de lã ovina descartada foi realizada em duas etapas (Figura 12). Inicialmente, 0,2 g de pó de lã de descarte foram dispersos em 20 mL de solução de HAuCl_4 (2 mM), resultando em um meio reacional ácido ($\text{pH} \approx 4$), inerente à própria solução precursora. O sistema foi mantido sob agitação por 3 horas, a fim de promover a adsorção dos íons Au^{3+} na matriz fibrosa.

Após esse período, o material foi submetido à centrifugação, seguido de sucessivas lavagens com água destilada para remoção de espécies não adsorvidas, e posteriormente seco em estufa a 100°C .

Na etapa seguinte, a lã ovina previamente enriquecida com íons Au^{3+} foi submetida ao tratamento com 10 mL de extrato de *Baccharis dracunculifolia* DC a 5%, permanecendo sob agitação mecânica por 3 horas, à temperatura de 25°C . Essa etapa teve como objetivo viabilizar a redução dos íons metálicos adsorvidos, promovendo a formação de nanopartículas de ouro (NPs-Au) por meio de uma abordagem de síntese verde.

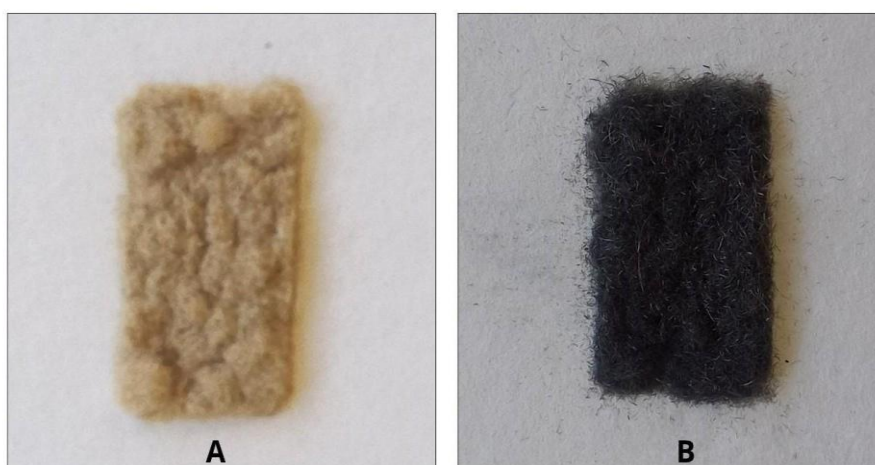
Figura 12 - Metodologia de impregnação de NPs-Au em fibra de lã residual: síntese verde



Fonte: Autora (2026)

Ao término do processo, o material híbrido (Lã@NPs-Au/Extrato), identificado pela coloração castanho-avermelhada, foi separado por centrifugação, seguido de sucessivas lavagens com água destilada para remoção de resíduos não ligados. Posteriormente, o material foi seco em estufa 100°C (Figura 13). O sólido obtido foi então caracterizado por diferentes técnicas e, na sequência, empregado em ensaios catalíticos para avaliação de seu desempenho.

Figura 13 - Aspecto da lã *in-natura* (A) e Lã@Au/Extrato (B)



Fonte: Autora (2025).

Cabe destacar que o processo adotado é simples, de baixo custo e operacionalmente viável, sendo conduzido em temperatura ambiente sem necessidade de aquecimento ou etapas complexas durante a modificação da fibra. Além disso, a presença de grupos funcionais presentes na queratina da lã, aliada aos fitoquímicos presentes no extrato vegetal, permitem a fixação e estabilização das nanopartículas formadas, dispensando a introdução de agentes quelantes ou estabilizantes externos. Essa característica reduz o número de etapas experimentais, minimiza o uso de reagentes adicionais e reforça o caráter sustentável e econômico da metodologia.

O sobrenadante proveniente da etapa de centrifugação foi analisado por espectroscopia UV-Vis, com o intuito de detectar a possível presença de nanopartículas de ouro em solução. A ausência da banda plasmônica característica dessas nanopartículas indica que não houve dispersão significativa no meio líquido, corroborando a eficácia da imobilização das NPs-Au na fibra.

4.6 Caracterização da lã e Lã@NPs-Au/Extrato

A lã *in-natura* e o material funcionalizado (Lã@NPs-Au/Extrato) foram caracterizados por meio das técnicas de Espectroscopia ultravioleta-visível (UV-Vis), Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), Difração de raios X (DRX), Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia (EDX), com o objetivo de obter informações sobre formação, composição química, características morfológicas e distribuição das nanopartículas na matriz fibrosa.

4.6.1 Espectroscopia UV-Vis

O acompanhamento da formação das NPs-Au obtidas por síntese verde, bem como a avaliação da atividade catalítica do material funcionalizado (Lã@NPs-Au/Extrato) na remoção do corante azul de metileno em solução aquosa, foram realizadas por espectroscopia no ultravioleta-visível (UV-Vis), utilizando espectrofotômetro UV-Vis (Agilent, Cary 50 Bio, EUA). A leitura de alíquotas de solução de colóide foi feita em cubetas de quartzo, na faixa de 350-800 nm com intervalo de 1 nm e velocidade de varredura de 240 nm/min. O resultado foi expresso

por meio de gráficos de absorvância (u.a.) versus comprimento de onda (nm), com auxílio do software OriginPro 8.0.

4.6.2 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A identificação dos grupos funcionais presentes na superfície da lã *in-natura*, no material funcionalizado (Lã@NPs-Au/Extrato) e na amostra contendo apenas lã e extrato da planta (Lã+Extrato), foram realizadas por meio de espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). As análises foram conduzidas utilizando um espectrofotômetro Spectrum-Two FTIR (Perkin Elmer, EUA), acoplado a um acessório de refletância total atenuada (ATR-FTIR). Os espectros infravermelhos foram registrados na faixa de número de onda de 400 a 4000 cm^{-1} , com 32 varreduras por espectro e uma resolução de 4 cm^{-1} .

4.6.3 Difratometria de raios-X (DRX)

A caracterização da natureza cristalina e a estimativa do tamanho de cristalito do material funcionalizado (Lã@NPs-Au/Extrato) e da amostra de lã *in-natura* foram realizadas por difração de raios X (DRX). As análises foram conduzidas no Laboratório de Difratometria de Raios X da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, utilizando um difratômetro Siemens (BRUKER AXS), modelo D-5000, equipado com tubo de ânodo fixo de cobre ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), operando a 40 kV e 30 mA, com monocromador de grafite curvado no feixe secundário. As amostras, na forma de pó, foram analisadas no intervalo angular de 10 a 90° (2θ), com passo de 0,05° e tempo de contagem de 1 s por passo, utilizando fendas de divergência e anti-espalhamento de 1° e abertura do detector de 0,6 mm. A equação 1 descrita por Scherrer (1912) foi utilizada para estimar o tamanho médio dos cristalitos das nanopartículas.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

D = tamanho médio do cristalito (nm)

K = constante de Scherrer

λ = comprimento de onda da radiação utilizada (nm)

β = largura a meia altura do pico de difração, em radianos (FWHM)

θ = ângulo de Bragg (graus)

4.6.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As fotomicrografias eletrônicas do material híbrido (Lã@NPs-Au/Extrato) foram obtidas por Microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando equipamento JEOL do Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul, da Universidade Federal do Rio Grande – CEME-Sul/FURG.

As imagens foram capturadas sob uma tensão de aceleração de 15 kV e uma magnificação de 2000x, parâmetros otimizados para a observação detalhada das características morfológicas das amostras. As amostras foram previamente fixadas em suportes metálicos e, quando necessário, metalizadas com uma fina camada condutora para melhorar a qualidade do sinal.

A morfologia das NPs-Au imobilizadas na lã foi analisada através da microscopia eletrônica de varredura (detector BSE). O tamanho das partículas foi determinado com o auxílio do software ImageJ, empregando o diâmetro de Feret como parâmetro de medição, conforme descrito por Zhang e Wang (2023). Foram analisadas 50 partículas para a construção do perfil granulométrico. A distribuição de tamanho foi obtida por meio de histograma com ajuste de curva Gaussiana (Normal), permitindo determinar o diâmetro médio e o desvio padrão.

4.6.5 Espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDX)

A composição elementar do material híbrido (Lã@NPs-Au/Extrato) foi determinada por espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDX) utilizando uma sonda da marca Ultradry acoplada ao um microscópio eletrônico de varredura (MEV). As análises foram realizadas utilizando um detector EDS de estado sólido, operando sob condições de alto vácuo, com tensão de aceleração entre 10 e 20 kV, adequada para a excitação dos elementos presentes na amostra. As amostras foram previamente fixadas em suportes metálicos e, quando necessário, metalizadas com uma fina camada condutora para melhorar a qualidade do sinal. Os espectros obtidos

permitiram a identificação qualitativa e semiquantitativa dos elementos químicos, sendo os resultados expressos em porcentagem em massa e/ou atômica, além da obtenção de mapeamentos elementares para avaliação da distribuição dos elementos na superfície da amostra.

4.7 Catálise heterogênea com Lã@NPs-Au/Extrato

Neste experimento, investigou-se o desempenho catalítico do material funcionalizado (Lã@NPs-Au/Extrato) na redução do corante Azul de Metileno (AM) em amostra real de água (água de rio). O sistema desenvolvido atua como um catalisador heterogêneo, onde a fibra da lã não atua apenas como um suporte para as NPs-Au, mas também facilita a separação do catalisador ao final da reação (Tang *et al.*, 2017). Dessa forma, sua reutilização é facilitada e não depende de etapas adicionais de processamento.

A catálise heterogênea apresenta vantagens significativas em relação à catálise homogênea, como a fácil recuperação e reutilização do catalisador, maior estabilidade operacional e menor geração de resíduos, tornando o processo mais sustentável e economicamente viável.

Para tal, em uma cubeta de quartzo, colocou-se 3 mL de solução do corante AM 10 ppm ($3,13 \times 10^{-5}$ M), 500 μ L de uma solução recentemente preparada de NaBH₄ (0,1 M) e 10 mg de material funcionalizado (Lã@AuNPs/Extrato). O mesmo procedimento foi repetido em amostra de pó de lã residual *in natura* para fins comparativos. A redução dos poluentes pelas NPs-Au depositadas no material funcionalizado foi monitorada em intervalos de tempo, através de espectros de UV-visível na faixa de comprimento de onda de 300- 750 nm.

A cinética da reação foi modelada usando uma abordagem de pseudo-primeira ordem, com a constante de velocidade aparente determinada a partir da Equação 2. Outros modelos cinéticos foram avaliados, entretanto o modelo de pseudo-primeira ordem foi o que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, evidenciado pelos maiores valores de coeficiente de determinação (R^2) e pelos menores erros associados aos parâmetros estimados.

$$\ln = \vec{\epsilon} \left(A_t/A_0 \right) = K_{app} t \quad (Eq.2)$$

Onde A_t , A_0 , K_{app} e t representam a absorbância no tempo t , a absorbância inicial, a constante de velocidade aparente e o tempo necessário para a redução do corante AM na presença de NaBH_4 .

A possibilidade de reutilização do material também foi investigada no contexto da aplicação catalítica das nanopartículas de ouro suportadas na lã na redução do azul de metileno. Ao término de cada processo de redução, o catalisador foi submetido à lavagem com água destilada, seco em estufa e empregado novamente nas mesmas condições experimentais de catálise anterior.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

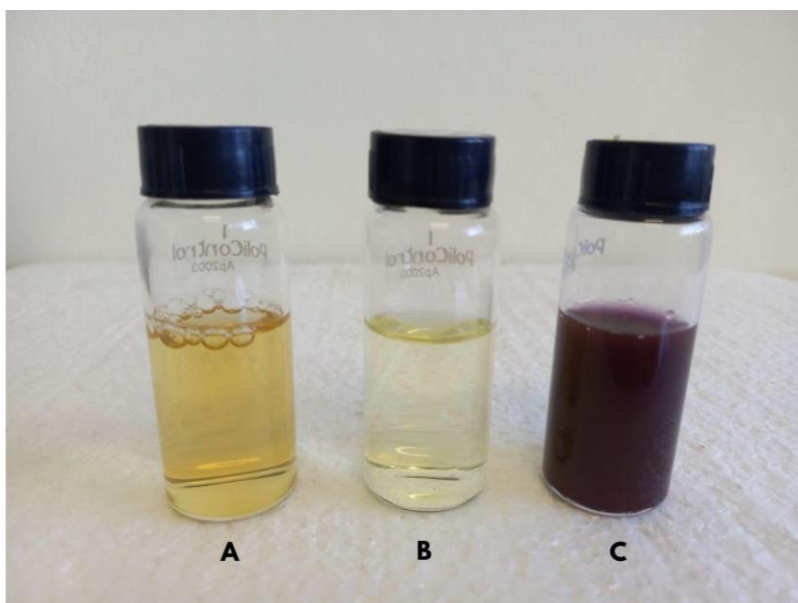
5.1 Síntese biogênica de NPs-Au

O extrato de *Baccharis dracunculifolia* DC. foi investigado quanto à sua capacidade de atuar na síntese de nanopartículas de ouro (NPs-Au) por meio de uma rota de síntese verde. A evidência inicial da redução dos íons Au^{3+} para Au^0 , promovida pelos compostos fitoquímicos presentes no extrato foi obtida por observação visual direta do meio reacional, conforme demonstrado na Figura 14.

Ao adicionar o extrato (de coloração alaranjada) à solução de HAuCl_4 (amarelo-claro), sob agitação, observou-se a formação de uma solução com coloração vermelho-rubi, conforme demonstrado na Figura 14. Essa alteração é característica de sistemas coloidais contendo NPs-Au, indicando a redução dos íons de ouro e a consequente formação das nanopartículas.

Esse resultado evidencia de forma clara o potencial do extrato aquoso de *Baccharis dracunculifolia* DC. como agente redutor na síntese de nanopartículas de ouro, destacando sua eficácia dentro de uma abordagem de síntese verde, simples e ambientalmente amigável.

Figura 14 - Observação visual da mudança de coloração nas soluções no processo de síntese verde. A: solução 5% (m/v) de extrato aquoso foliar de *Baccharis dracunculifolia* DC.; B: solução de HAuCl_4 (2 mM); e C: solução coloidal de NPs-Au

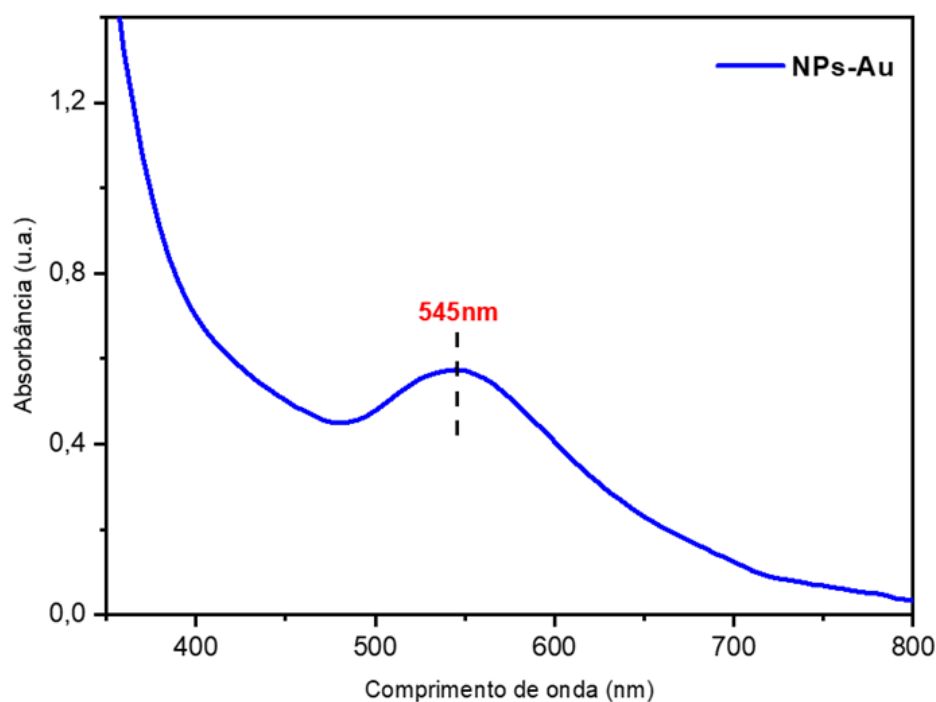


Fonte: Autora (2025)

Em um segundo momento, a formação biogênica das NPs-Au foi corroborada por meio de análise de espectroscopia no UV-Vis, considerando a presença da banda de ressonância plasmônica superficial, característica dessas nanopartículas. Conforme evidenciado no espectro de absorção, a solução coloidal apresentou um pico em torno de 545nm, valor típico para NPs-Au e amplamente descrito na literatura (Cao *et al.*, 2014; Njoki *et al.*, 2007).

Os espectros eletrônicos de absorção na região do Uv-visível do extrato e solução coloidal são demonstrados na Figura 15.

Figura 15 - Espectro de absorção eletrônica no UV-Vis da solução coloidal de NPs-Au sintetizadas com extrato foliar de *Baccharis dracunculifolia* DC



Fonte: Autora (2026).

Esses resultados reforçam a eficiência do extrato aquoso de *Baccharis dracunculifolia* DC. como agente redutor e estabilizante na síntese de nanopartículas de ouro, evidenciando seu potencial em rotas sustentáveis de obtenção de nanomateriais.

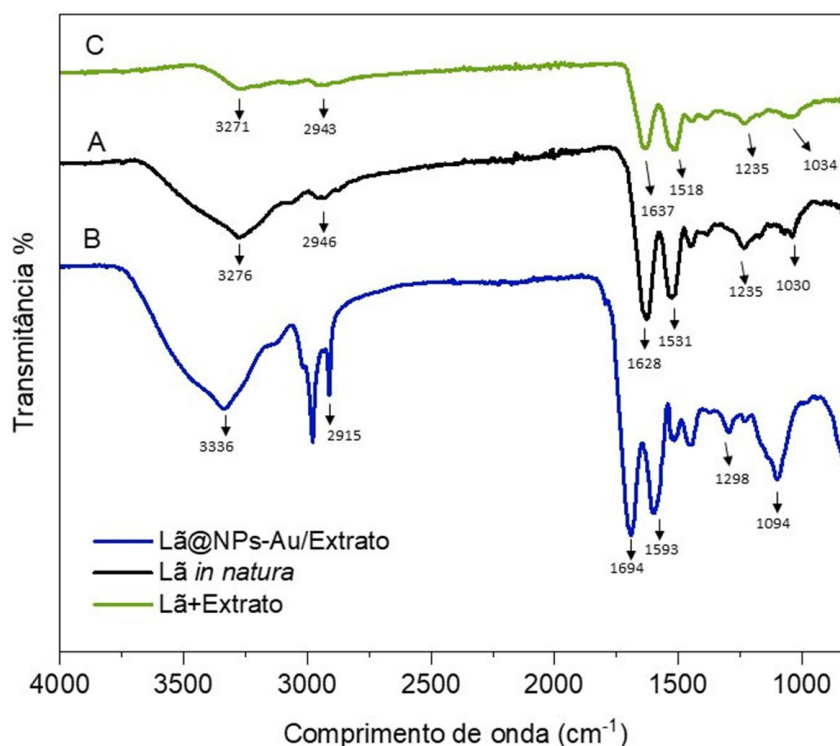
5.2 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi empregada para avaliar a estrutura da fibra de lã antes (Figura 16 – A) e após sua funcionalização com nanopartículas de ouro em conjunto com extrato (Figura 16 – B). Para fins de controle experimental, a amostra Lã+Extrato também foi avaliada (Figura 16 – C). No espectro da lã *in natura* (Figura 16 – A), as bandas localizadas em 1628, 1531 e 1235 cm^{-1} são atribuídas às Amidas I, II e III, respectivamente (Enkhzaya; Shiomori; Oyuntsetseg, 2020; Tang *et al.*, 2017). A banda de Amida I está relacionada principalmente ao estiramento da ligação C=O, enquanto a Amida II é associada à deformação da ligação N–H. Por sua vez, a Amida III envolve, predominantemente, o estiramento C–N e a flexão N–H no plano (Enkhzaya; Shiomori; Oyuntsetseg, 2020; Tang *et al.*, 2017). A presença da banda de Amida I em 1628 cm^{-1} indica a existência de estrutura secundária do tipo α -hélice nas proteínas (Tang *et al.*, 2017) sugerindo uma alta proporção dessa conformação nas amostras de lã analisadas. Além disso, a banda larga observada em torno de 3276 cm^{-1} pode ser atribuída à vibração de estiramento da ligação N–H (Enkhzaya; Shiomori; Oyuntsetseg, 2020).

Após a funcionalização da fibra de lã com NPs-Au/Extrato (Figura 16-B), foram identificados deslocamentos nas bandas características: Amida I (de 1628 para 1694 cm^{-1}), Amida II (de 1531 para 1593 cm^{-1}), Amida III (de 1235 para 1298 cm^{-1}) e na banda larga (de 3276 para 3336 cm^{-1}) (Figura 16). Essas mudanças indicam possíveis interações entre as nanopartículas de ouro e os grupos amino presentes na lã. Adicionalmente, um aumento de intensidade das bandas em 2961 e 2987 cm^{-1} , associado às vibrações de estiramento C–H das cadeias alifáticas, bem como na região de $\sim 1080 \text{ cm}^{-1}$, atribuído à formação de sulfóxidos resultante da oxidação parcial das pontes dissulfeto durante a redução biogênica dos íons Au^{3+} . Esses resultados são consistentes com a interação preferencial entre os grupos tiol (–SH) da cisteína e as nanopartículas de ouro, conforme previsto pela Teoria HSAB (Pearson, 1963; Dreaden *et al.*, 2012), e confirmam a efetiva imobilização das NPs-Au sobre o substrato proteico (Xie *et al.*, 2007).

A amostra Lã+Extrato (Figura 16-A) apresentou perfil espectral muito semelhante ao da lã *in natura*, com absorções pouco pronunciadas em toda a extensão espectral, indicando que o extrato aquoso de *Baccharis dracunculifolia* não promoveu alterações químicas significativas na matriz proteica da fibra.

Figura 16 - Espectro no infravermelho da (a) lã *in natura*, (b) lã imobilizada com NPs-Au e (c) Lã + Extrato



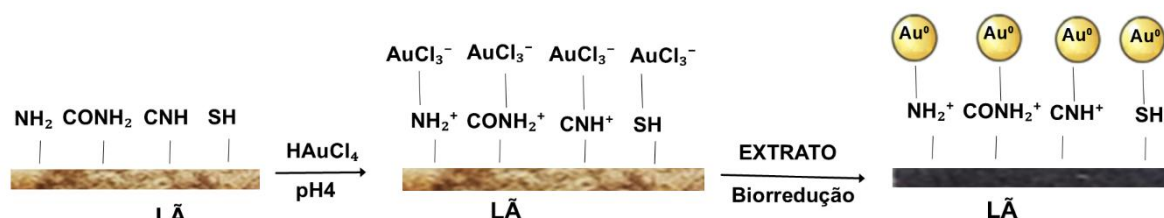
Fonte: Autora (2026)

Com base na análise de infravermelho, propõe-se que a imobilização das nanopartículas de ouro ocorra em duas etapas principais. Inicialmente, os íons Au^{3+} interagem com os grupos funcionais da queratina, especialmente os grupos aminos ($-\text{NH}_2/-\text{NH}-$) das ligações peptídicas. Esse processo é favorecido pelo meio reacional ácido ($\text{pH} \approx 4$), característico da própria solução precursora. Nessas condições, os grupos amino encontram-se majoritariamente protonados ($-\text{NH}_3^+$), o que favorece interações eletrostáticas com espécies aniônicas de ouro, como $[\text{AuCl}_4]^-$. Em seguida, esses íons são reduzidos a Au^0 , pelo extrato botânico resultando na formação de nanopartículas que permanecem estabilizadas e ancoradas na superfície da fibra. Os deslocamentos observados nas bandas de Amida I, II e III, bem como na região de estiramento N-H, reforçam a participação direta dos grupos aminos nesse processo.

Além disso, a redução na intensidade das bandas associadas aos grupos alifáticos indica que o ambiente dessas cadeias também é afetado durante a funcionalização. Embora grupos como $-\text{CH}_2$ e $-\text{CH}_3$ não interajam diretamente com o ouro, eles fazem parte de regiões mais hidrofóbicas da queratina. As mudanças observadas sugerem que a formação das nanopartículas induz ajustes na estrutura

da proteína e na organização da matriz fibrosa, alterando o microambiente dessas cadeias. Esse rearranjo estrutural, ainda que indireto, contribui para a estabilização e a fixação das AuNPs no material (Figura 17).

Figura 17 - Mecanismo de imobilização das NPs-Au na superfície da lã.



Fonte: Autora (2026)

As bandas de absorção dos espectros obtidos estão demonstradas na tabela 3.

Quadro 3 - Atribuição das bandas de FTIR da lã e do material funcionalizado (Lã@NPs-Au/Extrato)

Banda (cm^{-1}) Lã	Banda (cm^{-1}) Lã/Extrato	Banda (cm^{-1}) Lã@NPs Au/Extrato	Grupo funcional	Tipo de vibração	Atribuição
3276	3271	3336	N-H / O-H	Estiramento	Amida A
2946	2943	2915	C-H ($-\text{CH}_2$ / $-\text{CH}_3$)	Estiramento	Cadeias alifáticas
1628	1637	1694	C=O (amida)	Estiramento	Amida I
1531	1518	1593	N-H / C-N (amida)	Deformação/estiramento	Amida II
1235	1235	1298	C-N / N-H (amida)	Estiramento/deformação	Amida III
1030	1034	1094	S=O / C-O	Estiramento	Sulfóxidos; cistina oxidada

Fonte: Autora (2026)

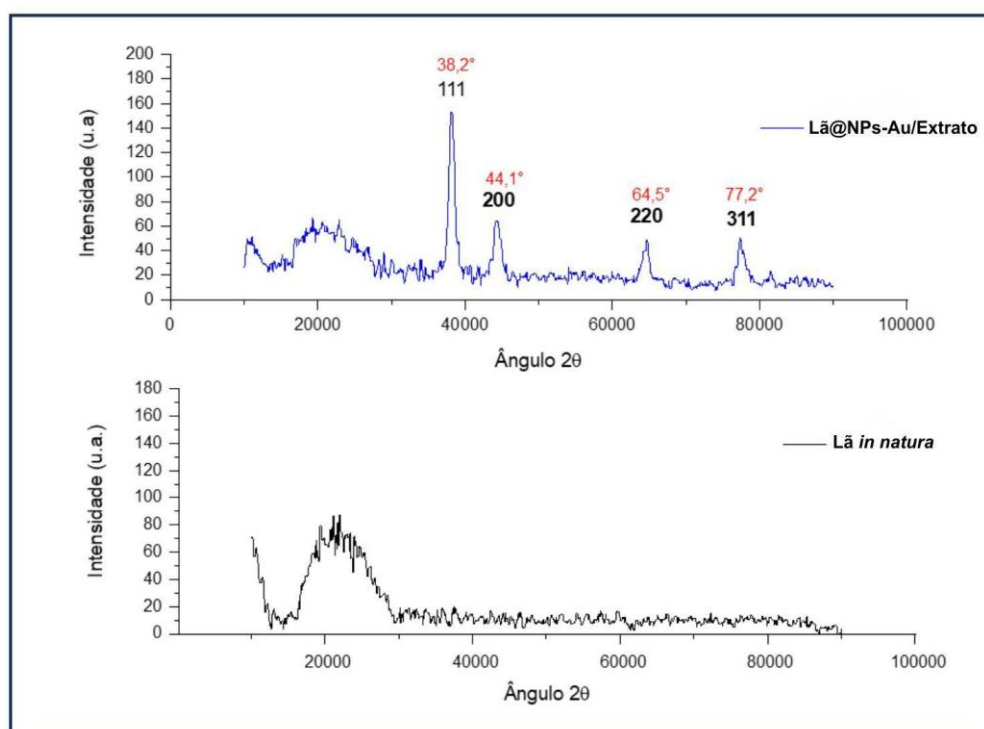
5.3 Difratometria de raios-X (DRX)

A Figura 18a apresenta os padrões de difração de raios X (DRX) da fibra de lã após a funcionalização com NPs-Au. Observam-se quatro picos de difração em 2θ , localizados em $38,2^\circ$, $44,1^\circ$, $64,5^\circ$ e $77,2^\circ$, os quais são atribuídos aos planos cristalinos (111), (200), (220) e (311) do ouro (Philip, 2010). Esses resultados confirmam a presença de nanopartículas de ouro com estrutura cristalina cúbica de faces centradas (fcc), evidenciando sua imobilização na matriz da fibra.

Por outro lado, o difratograma da lã *in natura* (Figura 18(b)) não apresenta esses picos característicos, o que reforça que as reflexões observadas na amostra funcionalizada estão associadas exclusivamente às NPs-Au.

Com base nos dados de DRX, o tamanho médio de cristalito foi estimado por meio da equação de Scherrer (Equação 1), resultando em um valor aproximado de 10 nm.

Figura 18 - Difratograma de DRX da (a) Lã immobilizada com NPs-Au/Extrato e (b) Lã *in natura*



Fonte: Autora (2026)

5.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDX)

As micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiram avaliar a morfologia das fibras de lã em seu estado natural e após a formação do material híbrido Lã@NPs-Au/Extrato. Os resultados alcançados estão demonstrados nas Figuras 19 e 20.

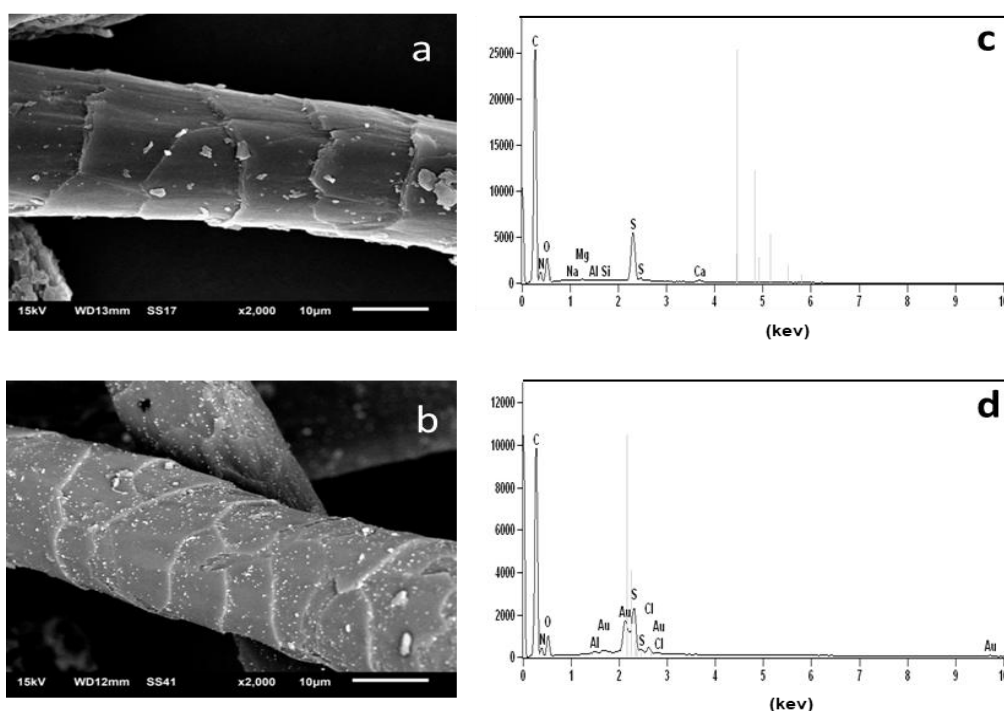
A Figura 19 apresenta as imagens de MEV da lã antes e após a funcionalização com ouro e extrato da planta. Os resultados mostrados na figura 19a da Lã *in natura*, confirmam a natureza escamosa da cutícula típica das fibras de queratina. Após a

modificação (Figura 19b) verifica-se a presença de uma série de pontos brilhantes, distribuídos ao longo da superfície da fibra, os quais são atribuídos às nanopartículas de ouro (NPs-Au), confirmando a eficácia do processo de funcionalização. Observa-se ainda que essas nanopartículas se encontram bem dispersas ao longo de toda a fibra, sem a formação de aglomerados macroscópicos, o que indica uma síntese controlada e homogênea. Essa distribuição uniforme é particularmente relevante, pois favorece o aumento da área superficial ativa e, conseqüentemente, pode contribuir para a melhoria do desempenho catalítico do material.

A espectroscopia EDX (Figura 19d) evidencia de maneira clara a formação e imobilização de ouro na fibra, com teor atômico de 17,70%, mesmo sob baixa concentração do precursor (2 mM), indicando um processo de síntese eficiente e altamente efetivo.

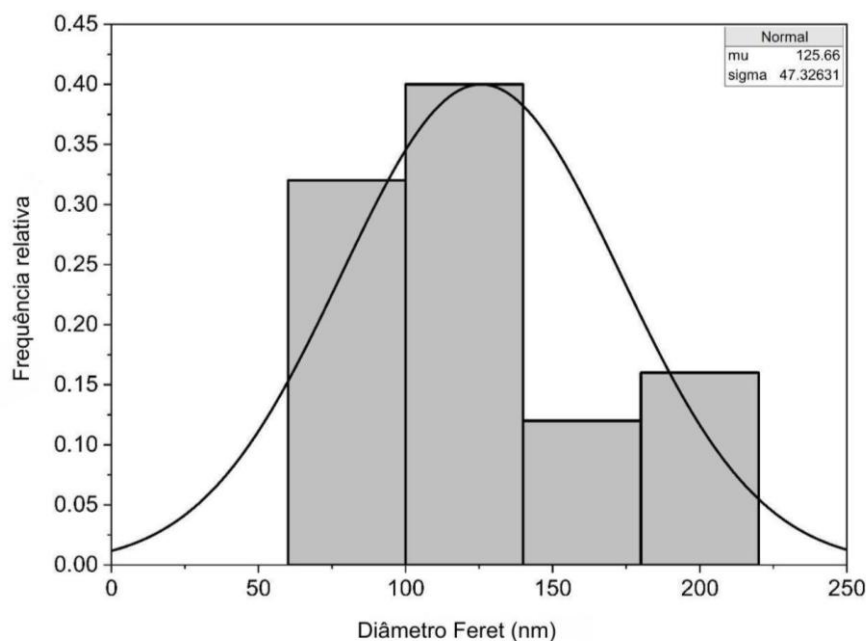
A Figura 20 apresenta o histograma de distribuição de tamanho das NPs-Au suportadas na fibra de lã. A análise das micrografias confirma a formação efetiva das nanopartículas, com dimensões variando entre 60 e 220 nm e distribuição centrada em aproximadamente 125 nm, evidenciando um perfil adequado para aplicações catalíticas.

Figura 19 - Imagem de MEV da (a) lã *in natura* e (b) Lã@NPs-Au/Extrato após sucessivas lavagens (c) EDX lã *in natura* e (d) EDX Lã@NPs-Au/Extrato



Fonte: Autora (2026)

Figura 20 - Histograma com distribuição do tamanho das NPs-Au suportadas na lã



Fonte: Autora (2026)

5.5 Aplicação catalítica da Lã@NPs-Au/Extrato

Nesta terceira etapa do trabalho, avaliou-se o desempenho catalítico do material funcionalizado Lã@NPs-Au/Extrato na redução do corante catiônico azul de metileno (AM).

Este experimento propõe uma alternativa aos métodos físicos e químicos convencionais no tratamento de águas contaminadas por corantes não biodegradáveis, que nem sempre são eficazes, podem ter alto custo e gerar subprodutos tóxicos (Silva, 2019). Diante das exigências econômicas e ambientais, destaca-se a importância do desenvolvimento de tecnologias menos poluentes e do uso de materiais acessíveis e eficientes para a despoluição da água (Mihai; Bondarev; Necula, 2025).

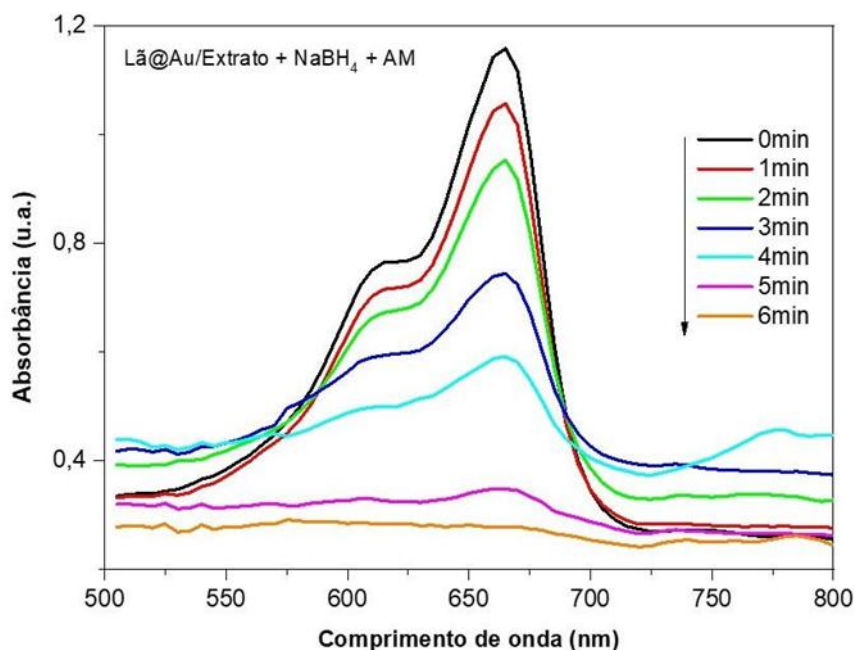
A atividade catalítica da Lã@NPs-Au/Extrato na redução do AM ocorreu em meio aquoso, na presença de borohidreto de sódio (NaBH_4) como redutor e à temperatura ambiente. Ensaio controle foi realizado, porém, sem a presença de Lã@NPs-Au/Extrato para fins comparativos. Efeitos de concentração de catalisador (Lã@NPs-Au/Extrato) e concentração de agente redutor (NaBH_4) não foram

investigados. As concentrações utilizadas foram baseadas nas condições comumente empregadas em processos catalíticos. A reação de redução foi monitorada por meio da espectroscopia no UV-Vis baseando-se nas medidas de intensidade das bandas de máxima absorção (máx) de 660 nm para o AM.

As diminuições de intensidades das referidas bandas de absorções com a evolução do tempo reacional, vem acompanhada de descoloração das soluções dos corantes (Ullah *et al.*, 2025).

Os espectros eletrônicos de absorção da redução de AM com Lã@NPs-Au/Extrato em diferentes tempos de reação são demonstrados na Figura 21. A figura mostra que a intensidade da banda de absorção do AM em 660 nm diminuiu gradativamente com a evolução do tempo de reação. Os dados apresentados na Figura 21 revelam que a banda de absorção característica do AM em 660 nm desaparece integralmente após seis minutos de reação, resultado que atesta a capacidade do material Lã@NPs-Au/Extrato em promover a redução completa do corante na concentração de 10 ppm, evidenciando seu elevado potencial catalítico.

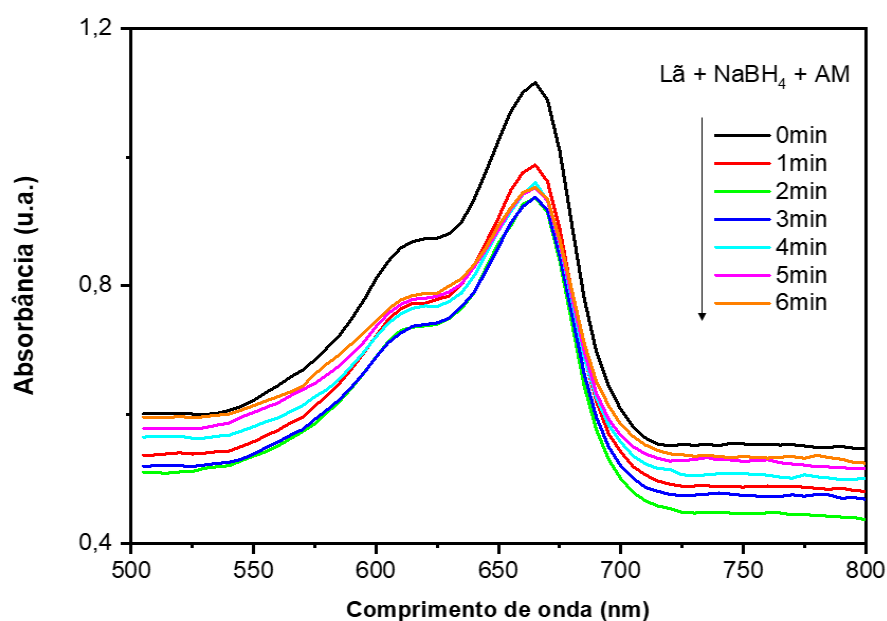
Figura 21 - Espectros eletrônicos no UV-Vis da redução do AM com NaBH₄ e Lã@NPs-Au/Extrato, à temperatura de 25°C



Fonte: Autora (2026)

Com o objetivo de avaliar a atividade catalítica do material Lã@NPs-Au/Extrato, foi realizado um experimento controle envolvendo a redução do AM (10 ppm) na presença de NaBH_4 , utilizando apenas a lã *in natura*. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 22.

Figura 22 - Espectros eletrônicos no UV-Vis da redução do AM com NaBH_4 e lã *in natura*, à temperatura de 25°C



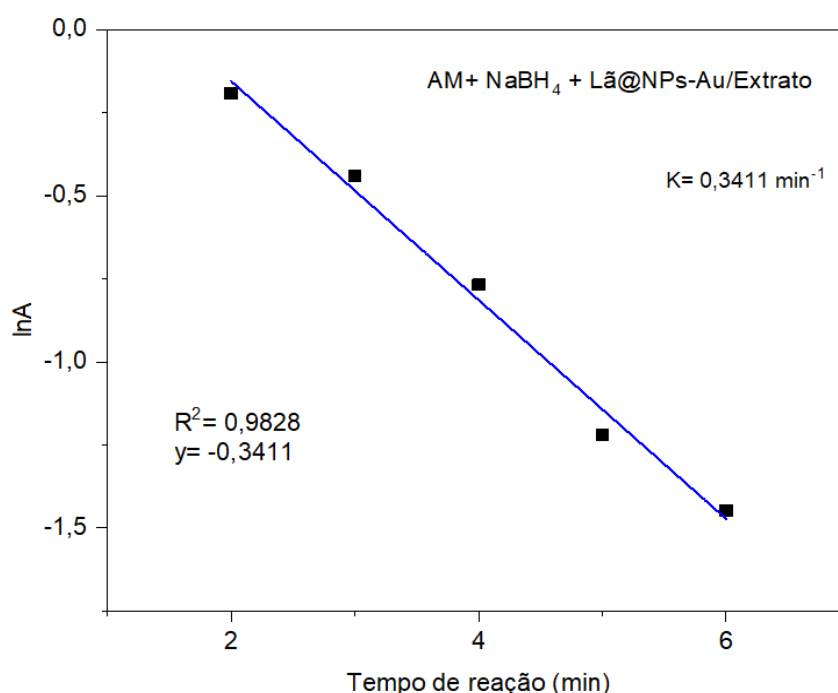
Fonte: Autora (2026)

A Figura 22 evidencia que a redução AM pelo borohidreto de sódio (NaBH_4), ocorre de forma consideravelmente mais lenta na ausência do material Lã@NPs-Au/Extrato (Figura 21), sendo necessários tempos superiores a 6 minutos para atingir uma descoloração mais significativa. Embora o NaBH_4 atue como agente redutor, fornecendo elétrons ao meio reacional, a transferência direta desses elétrons para o corante é limitada em solução aquosa (Stolle *et al.*, 2021).

A adição do material Lã@NPs-Au/Extrato supera essa limitação ao atuar como mediador da transferência eletrônica (Tang *et al.*, 2017). Nesse sistema, a reação segue o mecanismo de Langmuir–Hinshelwood, no qual os íons BH_4^- e as moléculas de AM são adsorvidos simultaneamente na superfície das nanopartículas de ouro. Após a adsorção, a superfície metálica facilita a transferência de elétrons do borohidreto para o corante, promovendo sua rápida redução à forma incolor, o leucometileno azul (Stolle *et al.*, 2021).

A redução percentual (% R) para o corante AM foi calculada usando a Equação 1 (Figura 23). Observou-se uma clara relação linear, indicando que o processo segue uma cinética de primeira ordem (Tang *et al.*, 2017). A equação de regressão da reta ajustada foi $Y = -0,3411X + 0,3755$, com um excelente coeficiente de correlação ($R^2 = 0,9828$), confirmando a forte concordância dos dados experimentais com o modelo cinético. A partir da inclinação da reta, a constante de velocidade foi calculada como $k = 0,3411 \text{ min}^{-1}$. Esses resultados demonstram que as nanopartículas de ouro biossintetizadas catalisaram eficientemente a redução do AM na presença de NaBH_4 . Os resultados obtidos neste trabalho são consistentes com os reportados na literatura para sistemas catalíticos à base de nanopartículas de ouro biossintetizadas. Nanopartículas de ouro sintetizadas a partir de extrato *Allium cepa* (cebola) demonstraram elevada atividade catalítica na degradação do AM, com constante de velocidade $k = 0,3550 \text{ min}^{-1}$ e 95% de remoção em 8 minutos, também obedecendo à cinética de pseudo-primeira ordem (Rattanakit *et al.*, 2025). De forma similar, NPs-Au sintetizadas a partir extrato da folha de *Ruta graveolens* alcançaram resultados semelhantes, alcançando 98% de remoção do corante AM em 7 minutos e alcançando uma constante de velocidade $k=0,30864 \text{ min}^{-1}$ (Selvarani *et al.*, 2025).

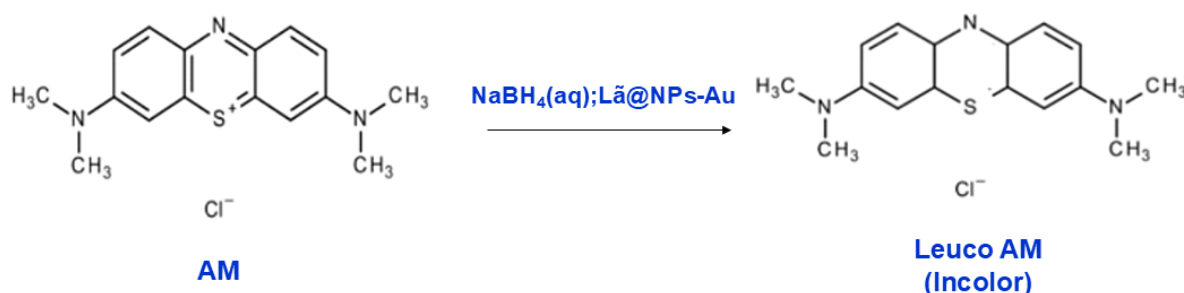
Figura 23 - Gráfico da regressão linear do logaritmo de absorbância ($\ln A$) versus tempo (t) da redução do AM na presença de Lã@NPs-Au/Extrato



Fonte: Autora (2026)

A Figura 24 ilustra a representação esquemática da redução do corante AM pela Lã@NPs-Au/Extrato, na presença de NaBH₄ e temperatura ambiente, formando como produto o corante em sua forma Leuco.

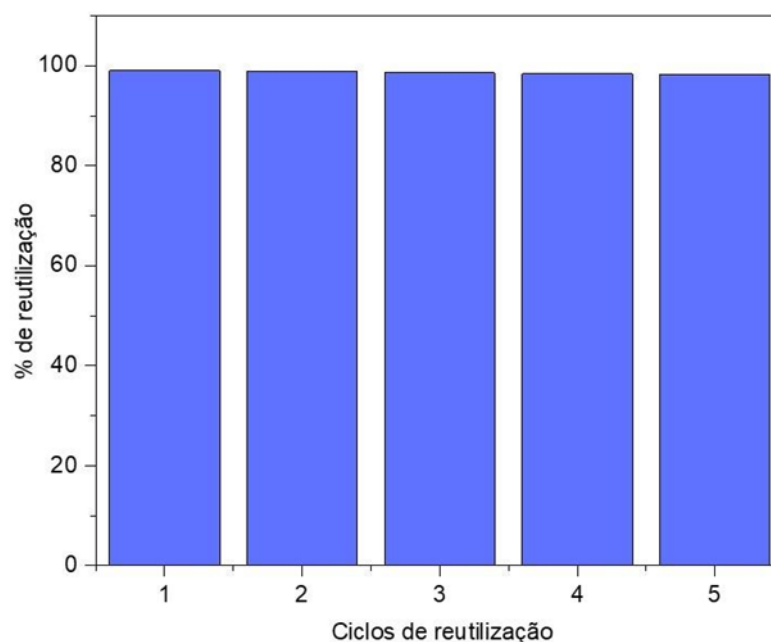
Figura 24 - Representação esquemática da redução catalítica do corante Azul de metileno (AM) em solução aquosa, na presença de NaBH₄ e Lã@NPs-Au/Extrato, à temperatura ambiente



Fonte: Autora (2026)

A viabilidade de reutilização do catalisador Lã@NPs-Au/Extrato foi investigada ao longo de cinco ciclos consecutivos, com eficiência inicial de aproximadamente 99% no primeiro ciclo e redução gradual e discreta nos ciclos subsequentes, atingindo cerca de 97,5% ao quinto ciclo (Figura 25). A variação acumulada inferior a 2% evidencia que o sistema preservou sua estabilidade operacional e sua eficiência catalítica sem um declínio expressivo ao longo dos ciclos, indicando que a interação entre as NPs-Au e a matriz da lã minimiza a lixiviação do material híbrido e mantém o desempenho catalítico do sistema ao longo dos usos repetidos. Esse comportamento representa um aspecto determinante para a viabilidade econômica e ambiental do material, viabilizando sua aplicação em processos contínuos de remediação ambiental.

Figura 25 - Percentual de reutilização do material funcionalizado Lã@NPs-Au/Extrato na aplicação catalítica do corante azul de metileno



Fonte: Autora (2026)

Para fins comparativos e de validação do desempenho catalítico, a Tabela 4 reúne estudos representativos da literatura nos quais nanopartículas de ouro (NPs-Au) são empregadas na redução catalítica do corante AM. Os trabalhos selecionados contemplam diferentes matrizes de suporte e estratégias de imobilização das nanopartículas, permitindo uma análise comparativa abrangente. Essa abordagem evidencia, de forma crítica, a eficiência e a competitividade do material desenvolvido neste estudo frente a outros sistemas catalíticos baseados em NPs-Au.

Quadro 4 - Nanopartículas de ouro imobilizadas em diferentes suportes com aplicação em catálise de Azul de Metileno (AM)

Suporte das NPs-Au	Tempo (min)	Constante (min ⁻¹)	Referência
Compósito de tecido de algodão revestido com quitosana	12	0,18	Awais <i>et al.</i> , 2025
Goma de <i>Amburana cearensis</i> (exsudato)	7	0,094	Silva <i>et al.</i> , 2025
Hidrogel de alginato-ácido cítrico	10	0,0691	Jagankar <i>et al.</i> , 2026
Material híbrido Lã@NPs-Au/Extrato	6	0,3411	Barcellos, 2026

Fonte: Autora (2026).

Dessa forma, os resultados obtidos confirmam a elevada atividade catalítica do material Lã@NPs-Au/Extrato, cujo papel fundamental consiste em fornecer uma superfície ativa que aproxima os reagentes e favorece a transferência eletrônica, acelerando significativamente o processo de redução.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho demonstrou, de forma inédita, o potencial da lã de descarte da raça ovina Corriedale como suporte funcional para a imobilização de nanopartículas de ouro (NPs-Au), obtidas por síntese verde, destacando também o uso inédito do extrato aquoso de *Baccharis dracunculifolia* DC como agente redutor e estabilizante.

A utilização integrada de resíduos da ovinocultura e de uma metodologia de síntese verde possibilitou a geração do material híbrido Lã@NPs-Au/Extrato, destacando-se pela combinação de caráter sustentável e desempenho catalítico.

A formação e as características do material híbrido (la@NPSAu-Extrato) foram confirmadas por um conjunto de técnicas analíticas de caracterização complementares. A espectroscopia UV-Vis revelou uma banda de ressonância de plasmon de superfície (SPR) característica em aproximadamente 545 nm, confirmando a presença das NPs-Au na solução coloidal. A análise por FTIR confirmou interações entre os grupos aminos e tióis presentes na superfície da lã, indicando que a imobilização ocorre predominantemente por meio de interações químicas com os constituintes proteicos do suporte.

Os resultados de DRX validam a formação de ouro metálico cristalino, com estrutura fcc bem definida, reforçando a eficiência do método de síntese na obtenção de NPs-Au de alta qualidade.

As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) demonstram a distribuição homogênea das nanopartículas de ouro sobre a superfície da lã, enquanto a espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDX) confirma a incorporação expressiva do metal, com teor de 17,70% at. Au, atestando a elevada eficiência do processo de imobilização.

O material à base de lã funcionalizada com nanopartículas de ouro (híbrido) foi aplicado como catalisador heterogêneo na redução do corante azul de metileno em matriz aquosa ambiental, apresentando boa eficiência no processo. Além do desempenho satisfatório na degradação do contaminante, o sistema mostrou boa estabilidade, preservando sua atividade catalítica ao longo de sucessivos ciclos de uso, com potencial de reutilização por até cinco ciclos sem perdas significativas de desempenho.

Os resultados obtidos neste trabalho, analisados em uma perspectiva mais ampla, reforçam a viabilidade do aproveitamento de resíduos queratinosos como plataformas catalíticas inovadoras, promovendo a valorização de resíduos, a redução de impactos ambientais e o avanço de tecnologias limpas voltadas à remoção de corantes em sistemas aquosos. Espera-se que este trabalho contribua para o avanço de materiais sustentáveis, incentivando soluções aplicáveis no contexto local e nacional.

7 PERSPECTIVAS DE PESQUISA

A execução deste trabalho abre novas frentes de investigação envolvendo nanopartículas metálicas fitobiogênicas e o aproveitamento de lã de descarte. Nesse contexto, destacam-se as seguintes perspectivas:

- Investigar sistematicamente os parâmetros de síntese, como pH do extrato, concentração de HAuCl_4 , temperatura e tamanho das NPs-Au, com o objetivo de otimizar suas propriedades físico-químicas e ampliar seu potencial de aplicação em diferentes contextos científicos e tecnológicos;
- Avaliar o material híbrido em aplicações biomédicas, com ênfase em atividade antimicrobiana e potencial cicatrizante;
- Analisar a toxicidade das NPs-Au utilizando modelos de organismos invertebrados, contribuindo para a compreensão de seus impactos ambientais e biológicos;
- Explorar o desempenho catalítico do material na degradação de outros contaminantes orgânicos de relevância ambiental e industrial.

Essas abordagens visam aprofundar o entendimento do sistema desenvolvido e expandir suas aplicações em áreas estratégicas.

REFERÊNCIAS

ABOU-TALEB, Marwa; EL-SAYED, Hosam. By-products during processing of fiber and their use: generation of by-products during wool processing and their utilization. *In*: JOSE, Seiko.; THOMAS, Sabu.; BASU, Gautam (orgs.). **The wool handbook**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2024. p. 577-592. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99598-6.00017-7>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323995986000177>. Acesso em: 25 set. 2025.

ADRAOUI, Imane *et al.* Eco-friendly synthesis of zinc oxide nanoparticles using saffron extract and their photocatalytic and antibacterial activities. **Journal of Materials Research**, Cambridge, v. 38, n. 11, p. 2874-2884, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1557/s43578-023-00976-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1557/s43578-023-00976-3>. Acesso em: 14 set. 2025.

AFSHEEN *et al.* Quick catalytic degradation of methylene blue using gellan gum-co-polymethacrylic acid hydrogel supported Ni-Cu bimetallic composite. **Materials Science and Engineering: B**, Switzerland, v. 323, p. 118690, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2025.118690>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510725007147>. Acesso em: 20 fev. 2025.

AHIRE, Satish Arvind *et al.* The augmentation of nanotechnology era: a concise review on fundamental concepts of nanotechnology and applications in material science and technology. **Results in Chemistry**, Dublin, v. 4, p. 100633, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100633>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211715622000633>. Acesso em: 22 fev. 2026.

AHMAD, Nor Monica *et al.* Effect of optimisation variable and the role of plant extract in the synthesis of nanoparticles using plant-mediated synthesis approaches. **Inorganic Chemistry Communications**, Netherlands, v. 161, p. 111839, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111839>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138770032301451X>. Acesso em: 10 set. 2025.

ALBADAWI, Emad Ali *et al.* Eco-friendly green synthesis of silver nanoparticles from guajava leaves extract for controlling organophosphorus pesticides hazards, characterization, and in vivo toxicity assessment. **BMC Pharmacology and Toxicology**, London, v. 25, n. 1, p. 98, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40360-024-00798-5>. Disponível em: <https://bmcparmacoltoxcol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40360-024-00798>. Acesso em: 13 set. 2025.

ALBRECHT, Matthew. A.; EVANS, Cameron W.; RASTON, Colin. L. Green chemistry and the health implications of nanoparticles. **Green Chemistry**, Cambridge, v. 8, n. 5, p. 417, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1039/B517131H>.

Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2006/gc/b517131h>. Acesso em: 10 set. 2025.

ALLAFI, Faisal *et al.* Advancements in applications of natural wool fiber. **Journal of Natural Fibers**, United States, v. 19, n. 2, p. 497-512, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1856265>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/10.1080/15440478.2020.1856265>. Acesso em: 13 mar. 2026.

ALMEIDA, Patrícia Danielle Oliveira de *et al.* Marine algae-derived nanoparticles (MADNs): green synthesis, characterization, and therapeutic applications. **Discover Applied Sciences**, Switzerland, v. 7, n. 461, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06915-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-025-06915-4>. Acesso em: 7 out. 2025.

ALSAMHARY, Khawla E. *Moringa oleifera* seed based green synthesis of copper nanoparticles: characterization, environmental remediation and antimicrobial activity. **Saudi Journal of Biological Sciences**, Amsterdam, v. 30, n. 11, p. 103820, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103820>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X23005953>. Acesso em: 21 set. 2025.

ÁLVAREZ-CHIMAL, Rafael *et al.* Green chemistry in the synthesis of nanoparticles and their antibacterial properties. **Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología**, México, v. 18, n. 34, 2025. DOI: <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2025.34.69826>. Disponível em: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-56912025000100007&script=sci_abstract&tlng=en. Acesso em: 10 set. 2025.

AMARILHO-SILVEIRA, Fernando; BRONDANI, William Cardinal; LEMES, Jaqueline Schneider. Lã: Características e fatores de produção. **Archivos de Zootecnia**, Córdoba, v. 64, p. 13-24, 2015. DOI: <https://doi.org/10.21071/az.v64i247.502>. Disponível em: <https://www.uco.es/ucopress/az/index.php/az/article/view/502>. Acesso em: 13 mar. 2026.

AMMAR, Huda *et al.* Valorization of wool waste into a mesoporous W@SiO₂-Fe₃O₄ composite for efficient Cd(II) and Cu(II) adsorption from aqueous solution. **Polyhedron**, United States, v. 291, p. 118079, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.poly.2026.118079>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0277538726001257>. Acesso em: 10 dez. 2025.

ANASTAS, Paul; EGHBALI, Nicolas. Green chemistry: principles and practice. **Chemical Society Reviews**, United Kingdom, v. 39, n. 1, p. 301-312, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1039/B918763B>. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2010/cs/b918763b>. Acesso em: 30 abr. 2026.

ANDRADE, Gabriela Nascimento. **Síntese e estabilização de nanopartículas de ouro com aminoácidos**. 2024. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Industrial) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2024. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/40771/1/Gabriela%20Nascimento%20Andrade_Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

ANDREWS, Deborah *et al.* The circular economy, design thinking and education for sustainability. **Local economy**, London, v. 30, n. 3, p. 305-315, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/0269094215578226>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0269094215578226>. Acesso em: 25 fev. 2026.

ARAGÃO, Anderson Passos de *et al.* Green synthesis of silver nanoparticles using theseaweed *Gracilaria birdiae* and their antibacterial activity. **Arabian Journal of Chemistry**, Saudi Arabia, v. 12, n. 8, p. 4182-4188, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.04.014>. Disponível em: <https://arabjchem.org/green-synthesis-of-silver-nanoparticles-using-the-seaweed-gracilaria-birdiae-and-their-antibacterial-activity>. Acesso em: 28 out. 2024.

ARCOS ROSERO, Wilmmmer Alexander *et al.* Review of advances in coating and functionalization of gold nanoparticles: from theory to biomedical application. **Pharmaceutics**, Switzerland, v. 16, n. 2, p. 255, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16020255>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4923/16/2/255>. Acesso em: 10 ago. 2025.

ARMSTRONG, Lorene *et al.* *Baccharis dracunculifolia* DC. A review of research advances from 2004 to 2024, with new micromorphology and essential oil investigations. **Journal of Herbal Medicine**, Germany, v. 48, p. 100952, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2024.100952>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210803324000634>. Acesso em: 10 mar. 2026.

AWAIS, Fahim Ullah *et al.* Catalytic degradation of dyes using gold nanoparticles supported over chitosan coated cotton cloth composite. **Materials Research Express**, United Kingdom, v. 12, n. 1, p. 015008, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/adaac6>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/adaac6>. Acesso em: 3 maio 2026.

BACHIEGA, Tatiana Fernanda *et al.* Immunomodulatory/anti-inflammatory effects of *Baccharis dracunculifolia* leaves. **Natural product research**, London, v. 27, n. 18, p. 1646-1650, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786419.2012.742078>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786419.2012.742078>. Acesso em: 10 mar. 2025.

BAIG, Nadeem; KAMMAKAKAM, Irshad; FALATH, Wail. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. **Materials Advances**, Cambridge, v. 2, n. 6, p. 1821-1871, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0MA00807A>. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2001/mo/d0ma00807a>. Acesso em: 15 set. 2025.

BANJARA, Rameshwari A. *et al.* A comparative analysis of chemical vs green synthesis of nanoparticles and their various applications. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, Amsterdam, v. 22, p. 100988, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100988>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215153224000913>. Acesso em: 15 out. 2025.

BANSAL, Suneev Anil *et al.* Role of gold nanoparticles in advanced biomedical applications. **Nanoscale Advances**, Cambridge, v. 2, n. 9, p. 3764-3787, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0NA00472C>. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/na/d0na00472c>. Acesso em: 10 ago. 2025.

BARBOSA, Vanessa *et al.* Antioxidant Activity and Determination of Phenolic Compounds, Total Flavonoids and Hispidulin in *Baccharis erioclada* DC. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 66, p. e23220459, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2023220459>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/babt/a/vMMRTTrBXxzXSLJP7qVnRQyS/?format=html&lang=en>. Acesso em: 10 mar. 2026.

BARBOSA, Valcilaine Teixeira. **Síntese biogênica de nanopartículas de prata usando própolis vermelha de Alagoas**. 2018. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufal.br>. Acesso em: 25 out. 2025.

BAYDA, Samer *et al.* The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical–physical applications to nanomedicine. **Molecules**, Switzerland, v. 25, n. 1, p. 112, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25010112>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/25/1/112>. Acesso em: 15 set. 2025.

BOEING, Thaise *et al.* Gastric healing effect of p-coumaric acid isolated from *Baccharis dracunculifolia* DC on animal model. **Naunyn-Schmiedeberg's archives of pharmacology**, Berlin, v. 394, n. 1, p. 49-57, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00210-020-01928-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00210-020-01928-9>. Acesso em: 10 mar. 2026.

BONIN, Edinéia *et al.* *Baccharis dracunculifolia*: Chemical constituents, cytotoxicity and antimicrobial activity. **Lwt**, Amsterdam, v. 120, p. 108920, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643819312629>. Acesso em: 25 fev. 2026.

CAMILLI, Francesca *et al.* Turning waste wool into a circular resource: A review of eco-innovative applications in agriculture. **Agronomy**, Switzerland, v. 15, n. 2, p. 446, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/2/446>. Acesso em: 20 fev. 2026.

CAO, Chunhua *et al.* In situ preparation of magnetic Fe₃O₄/chitosan nanoparticles via a novel reduction–precipitation method and their application in adsorption of reactive azo dye. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 260, p. 90-97, 2014. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.03.063>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591014002469>. Acesso em: 10 mar. 2026.

CAVALCANTE, Noely Bastos. **Atividade antibacteriana e antifúngica de nanopartículas de prata produzidas por *Curvularia inaequalis* (Shear) Boedijn**. 2014. 79f. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, 2014. Disponível em: <https://repositorio.univasf.edu.br>. Acesso em: 15 out. 2025.

CHAN, John Zewen *et al.* Green synthesis of gold nanoparticles using aqueous extract of *Ciltoria ternatea* flower. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Bristol: IOP Publishing, 2020. p. 012036. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/808/1/012036>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/808/1/012036/pdf>. Acesso em: 10 set. 2025.

D'AGOSTINO, Agnese *et al.* In situ fabrication of green silver nanoparticles for antibacterial finishing of cotton fabrics. **SSRN**, New York, n. 6017359, 5 jan. 2026. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.6017359>. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=6017359. Acesso em: 15 mar. 2026.

DAS, Gitishree *et al.* Bio-Inspired Synthesis of Gold Nanoparticles Using Leaf Extract of Jamun and Research on Its Biomedical Potential. **Int J Nanomedicine**, New Zeland, v. 19, p. 12257-12286, 2024. DOI: <https://doi.org/10.2147/IJN.S480592>. Disponível em: <https://www.dovepress.com/bio-inspired-synthesis-of-gold-nanoparticles-using-leaf-extract-of-jam-peer-reviewed-fulltext-article-IJN>. Acesso em: 25 out 2025.

DHEYAB, Mohammed Ali *et al.* Green synthesis of gold nanoparticles and their emerging applications in cancer imaging and therapy: a review. **Reviews in Inorganic Chemistry**, Germany, v. 45, n. 4, p. 663-685, 2025a. DOI: <https://doi.org/10.1515/revic-2024-0028>. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/revic-2024-0028/html>. Acesso em: 15 nov. 2025.

DHEYAB, Mohammed Ali *et al.* Mechanistic insights and advances in polyphenol- and flavonoid-mediated sustainable synthesis of gold nanoparticles from agricultural waste: a review. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 320, Part 3, p. 145978, 2025b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.145978>. Disponível em: linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141813025065353. Acesso em: 25 nov. 2025.

DREADEN, Erik C. *et al.* The golden age: gold nanoparticles for biomedicine. **Chemical Society Reviews**, Cambridge, v. 41, n. 7, p. 2740-2779, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1039/C1CS15237H>. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/cs/c1cs15237h/unauth>. Acesso em: 3 maio 2026.

EDO, Great Iruoghene *et al.* Green biosynthesis of nanoparticles using plant extracts: mechanisms, advances, challenges, and applications. **BioNanoScience**, New York, v. 15, p. 267, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12668-025-01883-w>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12668-025-01883-w>. Acesso em: 13 mar. 2026.

ENKHZAYA, Solongo; SHIOMORI, Koichiro; OYUNTSETSEG, Bolormaa. Effective adsorption of Au(III) and Cu(II) by chemically treated sheep wool and the binding mechanism. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 8, n. 5, p. 104021, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104021>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343723001234>. Acesso em: 4 abr. 2026.

FARFÁN-FLORES, Carlos *et al.* Applications of sheep's wool in the fertilization of agricultural crops: a strategy for its valorization. **Acta Agrícola y Pecuaria**, Cuernavaca, v. 11, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.30973/aap/2025.10.0111019>. Disponível em: <https://aap.uaem.mx/index.php/aap/article/view/716>. Acesso em: 25 nov. 2025.

FENG, Ziqi; JIA, Yun; CUI, Hongyou. Engineering the surface roughness of the gold nanoparticles for the modulation of LSPR and SERS. **Journal of Colloid and Interface Science**, Amsterdam, v. 672, p. 1–11, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.05.217>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002197972401216>. Acesso em: 25 nov. 2025.

FIGUEIRA, Ciro Siqueira. **Biossíntese e caracterização de nanopartículas de ouro produzidas com extrato aquoso de folhas de *Anacardium occidentale* L.** 2018. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Universidade Federal do Ceará, Sobral, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/34957/1/2018_dis_csfigueira.pdf. Acesso em: 5 set. 2025.

FONSECA, Fábio Garske da. **Síntese verde, caracterização e atividade catalítica de nanopartículas de ouro produzidas por extrato de semente de *Eugenia uniflora* L.** 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br>. Acesso em: 13 maio 2024.

GHAFFAR, HH Abdel *et al.* Modification of Waste Wool Fiber as Low Cost Adsorbent for The Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution. **Egypt. J. Chem**, Cairo, v. 60, n. 3, p. 395-406, 2017. DOI: 10.21608/ejchem.2017.687.1023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317125171_Modification_of_waste_wool_fiber_as_low_cost_adsorbent_for_the_removal_of_methylene_blue_from_aqueous_solution. Acesso em: 5 abr. 2026.

GHIMIŞ, Simona Bianca *et al.* Impregnated Sheep Wool Fibers with an Antimicrobial Effect. **Chemistry Proceedings**, Switzerland, v. 13, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemproc2023013001>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-4583/13/1/1>. Acesso em: 15 out. 2025.

GLEITER, Herbert. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. **Acta Materialia**, Oxford, v. 48, n. 1, p. 1-29, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00285-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00285-2). Disponível em: <https://www.science-direct.com/science/article/pii/S1359645499002852>. Acesso em: 1 maio 2026.

HAJI, Aminoddin; NASIRIBOROUHAND, Majid. In-situ synthesis of silver nanoparticles using natural dyed wool fabric. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF APPLIED RESEARCH ON TEXTILE AND MATERIALS. Anais ...* Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 7-11. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-08842-1_2. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-08842-1_2. Acesso em: 30 nov. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção da pecuária municipal**. Efetivo de rebanhos, por tipo (cabeças). Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html>. Acesso em: 10 out. 2025.

IRAVANI, Siavash. Green synthesis of metal nanoparticles using plants. **Green Chemistry**, Cambridge, v. 13, n. 10, p. 2638-2650, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1039/c1gc15386b>. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/gc/c1gc15386b/unauth#!divAbstract>. Acesso em: 30 abr. 2026.

IURCKEVICZ, Genice *et al.* Bioactive compounds in the leaves of *Baccharis dracunculifolia*: extraction process and characterization. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 43, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v43i1.53262>. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/53262>. Acesso em: 10 mar. 2026.

JAGANKAR, Damini *et al.* Facile room-temperature one-pot synthesis of a gold nanoparticle-embedded hydrogel for recyclable dye degradation and antimicrobial applications. **Environmental Science: Nano**, Cambridge, v. 13, p.861-878, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1039/D5EN00722D>. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2026/en/d5en00722d>. Acesso em: 3 maio 2026.

JUNQUEIRA, Jéssica Sousa Santos; SILVA, Priscila Pereira; GUERRA, Wendell. Ouro. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 34, p. 45-46, 2012. Disponível em: https://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc34_1/10-EQ-104-10.pdf. Acesso em: 20 out. 2025.

KALIMUTHU, Kalishwaralal *et al.* Eco-friendly synthesis and biomedical applications of gold nanoparticles: a review. **Materials Science and Engineering: C**, Amsterdam, v. 152, p. 104296, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.104296>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493120306354>. Acesso em: 5 set. 2025.

KELLY, K. Lance *et al.* The optical properties of metal nanoparticles: the influence of size, shape, and dielectric environment. **The Journal of Physical Chemistry B**,

Washington, v. 107, n. 3, p. 668-677, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp026731y>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/jp026731y>. Acesso em: 10 dez. 2025.

KHAN, Ibrahim; SAEED, Khalid; KHAN, Idrees. Nanoparticles: properties, applications and toxicities. **Arabian Journal of Chemistry**, Saudi Arabia, v. 12, n. 7, p. 908-931, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535217300990>. Acesso em: 10 set. 2025.

KHAN, Nadia *et al.* Recent advances in functional materials for wastewater treatment: from materials to technological innovations. **Journal of Marine Science and Engineering**, Switzerland, v. 10, n. 4, p. 534, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10040534>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/4/534>. Acesso em: 28 abr. 2026.

KHAN, Sadia *et al.* Photocatalytic dye degradation from textile wastewater: a review. **ACS omega**, Washington, v. 9, n. 20, p. 21751-21767, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00887>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsomega.4c00887>. Acesso em: 28 abr. 2026.

KIRUBAKARAN, Dharmalingam *et al.* A Comprehensive Review on the Green Synthesis of Nanoparticles: Advancements in Biomedical and Environmental Applications. **Biomedical Materials & Devices**, Switzerland, v. 4, p. 388-413, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44174-025-00295-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44174-025-00295-4>. Acesso em: 15 out. 2025.

KOÇAK, Yılmaz *et al.* Eco-friendly production of platinum nanoparticles: physicochemical properties, evaluation of biological and catalytic activities. **International Journal of Environmental Science and Technology**, Tehran, v. 21, n. 1, p. 51-62, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05232-w>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/S13762-023-05232-W>. Acesso em: 25 nov. 2025.

KULKARNI, Malhari Bhimrao *et al.* Review on biomass sheep wool-based polymer composites. **Biomass Conversion and Biorefinery**, Switzerland, v. 14, n. 24, p. 30961–30982, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04912-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-023-04912-4>. Acesso em: 25 set 2025.

KUMARI, Puja *et al.* New approaches of green silver nanoparticles for cancer and biomedical applications: a review. **Exploration of Targeted Anti-tumor Therapy**, Xi'an, v. 6, p. 1002341, 2025. DOI: <https://doi.org/10.37349/etat.2025.1002341>. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12550369/>. Acesso em: 25 set 2025.

LA, Duc *et al.* Efficient degradation of methylene blue using hydrothermally synthesized V₂O₅ nanosheets: An innovative approach for sustainable wastewater treatment. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, Taipei, v. 178,

p. 106324, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2025.106324>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187610702500375X>. Acesso em: 3 abr. 2026.

LAKKAKULA, Jaya *et al.* Palladium Nanoparticles as a Platform for Cancer Diagnosis and Treatment. **BioNanoSci.**, New York, v. 14, p. 4342-4359, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12668-024-01603-w>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12668-024-01603-w>. Acesso em: 24 nov. 2025.

MAHMUD, Sakil *et al.* Wool functionalization by using green synthesized silver nanoparticles. **Oriental Journal of Chemistry**, Bhopal, v. 33, n. 5, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/330507>: Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/d8c6/41c9d28872b3918e7f38387eb4a79c82d3ad.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2026.

MCKITTRICK, Joanna *et al.* The structure, functions, and mechanical properties of keratin. **JOM**, Pittsburgh, v. 64, n. 4, p. 449-468, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0302-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-012-0302-8>. Acesso em: 13 mar. 2026.

MEENARATHI, Balakrishnan; AGATHIAN, K.; ANBARASAN, Rathi. Modification of wool fibre's structural properties as a cheap adsorbent for the elimination of Cr⁶⁺ and Rhodamine6g dye from aqueous solution. **International Journal of Biological Macromolecules**, Netherlands, v. 253, p. 127160, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127160>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813023040576>. Acesso em: 1 mar. 2026.

MEHRA, Vaishali *et al.* Green synthesis of gold nanoparticles (AuNPs) by using plant extract and their biological application: a review. **BioNanoScience**, New York, v. 15, p. 18, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12668-024-01703-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12668-024-01703-7>. Acesso em: 13 set. 2025.

MIDOLO, Giusi *et al.* Sheep wool waste availability for potential sustainable re-use and valorization: a GIS-based model. **Agriculture**, Switzerland, v. 14, n. 6, p. 872, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14060872>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/14/6/872>. Acesso em: 13 dez. 2025.

MIDOLO, Giusi *et al.* Assessing the mechanical properties of low-quality sheep wool yarn. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 475, p. 141220, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141220>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061825013686>. Acesso em: 20 nov. 2025.

MIHAI, Sonia; BONDAREV, Andreea; NECULA, Mihaela. The potential of biogenic materials as sustainable and environmentally benign alternatives to conventional adsorbents for dyes removal: a review. **Processes**, Switzerland, v. 13, n. 2, p. 589,

2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13020589>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/13/2/589>. Acesso em: 5 abr. 2026.

MINTEGUIAGA, Manuel *et al.* *Baccharis dracunculifolia* DC. In: **Medicinal and Aromatic Plants of South America v. 2:** Argentina, Chile and Uruguay. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 85-105. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-62818-5_5. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-62818-5_5. Acesso em: 13 abr. 2026.

MIR, Sajjad Husain *et al.* Organic-inorganic hybrid functional materials: An integrated platform for applied technologies. **Journal of The Electrochemical Society**, Pennington, v. 165, n. 8, p. B3137-B3156, 2018. DOI: 10.1149/2.0191808jes. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0191808jes/meta>. Acesso em: 4 maio 2026.

MOHAMED, Esraa *et al.* Green synthesis of silver nanoparticles using aqueous extract of *Aloe vera* and their cytotoxic activities. **Bulletin of Faculty of Science**, Zagazig, v. 2025, n. 4, p. 54-64, 2025. Disponível em: https://bfszu.journals.ekb.eg/article_441903_4130522ff2f63958d2f388ac9097998.pdf. Acesso em: 15 out. 2025.

MOHAMMADZADEH, Vahideh *et al.* Applications of plant-based nanoparticles in nanomedicine: A review. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, Amsterdam, v. 25, p. 100606, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100606>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352554122000109?casa_token=u6sFjY0AJFsAAAAA:c8Xfuns8U4Qw4-eiF3no4HFllwiRu3tUTTpO95eagta8fZSM8Jay_pcm1ENZI_Y1PZfbr5F50yo Acesso em: 5 set. 2025.

MURA, Stefania *et al.* Multifunctionalization of wool fabrics through nanoparticles: a chemical route towards smart textiles. **Journal of Colloid and Interface Science**, Amsterdam, v. 456, p. 85-92, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.06.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979715005561>. Acesso em: 25 nov. 2025.

MUTHUGANESH, Arumugan *et al.* Efficient methylene blue dye degradation via visible light-activated g-C₃N₄/CuO nanocomposites. **Hybrid Advances**, Amsterdam, v. 9, p. 100420, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100420>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773207X25000442>. Acesso em: 15 mar. 2026.

NASCIMENTO, Lucas Rafael Bezerra de Araújo. **Síntese de nanopartículas anisotrópicas de ouro e aplicação das mesmas em reações de redução química do p-nitrofenol**. 2019. 78f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Química Tecnológica e Industrial) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br>. Acesso em: 15 out. 2025.

NASROLLAHZADEH, Mahmoud *et al.* Green-synthesized nanocatalysts and nanomaterials for water treatment: current challenges and future perspectives.

Journal of Hazardous Materials, Amsterdam, v. 401, p. 123401, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123401>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030438942031390X>. Acesso em: 30 abr. 2026.

NETTO-FERREIRA, José Carlos. Reações Catalíticas Empregando o Efeito Plasmônico de Nanopartículas Metálicas Suportadas. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 165-217, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150010>. Disponível em: <https://rvq.s bq.org.br/pdf/v7n1a10>. Acesso em: 10 out. 2025.

NJOKI, Peter Njuguna *et al.* Size correlation of optical and spectroscopic properties for gold nanoparticles. **The Journal of Physical Chemistry C**, Washington, v. 111, n. 40, p. 14664-14669, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp074902c>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp074902c>. Acesso em: 13 abr. 2026.

OLIVARES-PINTO, Ulises; BARBOSA, Newton PU; FERNANDES, Geraldo Wilson. Global invasibility potential of the shrub *Baccharis dracunculifolia*. **Brazilian Journal of Botany**, São Paulo, v. 45, p. 1081-1097, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40415-022-00817-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40415-022-00817-0>. Acesso em: 2 mar. 2026.

OLIVEIRA, Jessica do Rocio de Paula de; LENZI, Giane Gonçalves. Advances in the use of green and sustainable synthesis to obtain nanomaterials. *In: Green chemistry for environmental sustainability - prevention-assurance-sustainability (P-A-S) approach*. London: IntechOpen, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002866>. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/1002866>. Acesso em: 13 set. 2025.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **Test No. 125**: Nanomaterial particle size and size distribution of nanomaterials. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 1. Paris: OECD Publishing, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1787/af5f9bda-en>. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/test-no-125-nanomaterial-particle-size-and-size-distribution-of-nanomaterials_af5f9bda-en.html. Acesso em: 30 abr. 2026.

OSMAN, Ahmed I. *et al.* Synthesis of green nanoparticles for energy, biomedical, environmental, agricultural, and food applications: a review. **Environmental Chemistry Letters**, Cham, v. 22, p. 841-887, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01682-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-023-01682-3>. Acesso em: 13 set. 2025.

OUSSADI, Karima *et al.* Wool keratin as a novel, alternative, low-cost adsorbent rich in various N and S proteins for eliminating methylene blue from water. **Biomass Conversion and Biorefinery**, Cham, v. 15, n. 3, p. 4803-4817, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05851-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-024-05851-4>. Acesso em: 25 set. 2025.

PANDIT, Chetan *et al.* Biological agents for synthesis of nanoparticles and their applications. **Journal of King Saud University - Science**, Riyadh, v. 34, p. 101869, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101869>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/358221504_Biological_agents_for_synthesis_of_nanoparticles_and_their_applications. Acesso em: 15 out. 2025.

PARLATO, Monica Concetta M. *et al.* Livestock wastes sustainable use and management: assessment of raw sheep wool reuse and valorization. **Energies**, Basel, v. 15, n. 9, p. 3008, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093008>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/9/3008>. Acesso em: 10 fev. 2026.

PARLATO, Monica Concetta M.; PORTO, Simona Maria Carmela; VALENTI, Francesca. Assessment of sheep wool waste as new resource for green building elements. **Building and Environment**, Oxford, v. 225, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109596>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132322008265>. Acesso em: 13 dez. 2025.

PATIL, Tejaswini *et al.* Gold nanoparticles: synthesis methods, functionalization and biological applications. **Journal of Cluster Science**, Cham, v. 34, p. 705-725, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10876-022-02287-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10876-022-02287-6>. Acesso em: 10 ago. 2025.

PEARSON, Ralph Gottfrid. Hard and soft acids and bases. **Journal of the American Chemical Society**, Washington, v. 85, n. 22, p. 3533-3539, 1963. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja00905a001>. Acesso em: 3 maio 2026.

PHILIP, Daizy. Rapid green synthesis of spherical gold nanoparticles using *Mangifera indica* leaf. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, Amsterdam, v. 77, n. 4, p. 807-810, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2010.08.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1386142510003859>. Acesso em: 28 mar. 2026.

POKROPIVNY, Vladimir Vasilievich; SKOROKHOD, Valeriy Vladimirovich. Classification of nanostructures by dimensionality and concept of surface forms engineering in nanomaterial science. **Materials Science and Engineering C**, Amsterdam, v. 27, n. 5-8, p. 990-993, set. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2006.09.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493106003353>. Acesso em: 1 maio 2026.

PORUBSKÁ, Mária; KOÓŠOVÁ, Karin; BRANIŠA, Jana. The application of sheep wool in the building industry and in the removal of pollutants from the environment. **Processes**, Basel, v. 12, n. 5, p. 963, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12050963>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/12/5/963>. Acesso em: 2 abr. 2026.

PYYKKÖ, Pekka. Relativistic effects in chemistry: more common than you thought. **Annual review of physical chemistry**, Palo Alto, v. 63, n. 1, p. 45-64, 2012. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-physchem-032511-143755>. Acesso em: 24 nov. 2025.

RAFEE, Vahdat *et al.* Eco-friendly dye-sensitized solar cells: Green synthesis of ZnO nanoparticles using *Sargassum algae* and performance enhancement through optimized dye combinations. **Materials Science and Engineering: B**, Amsterdam, v. 317, p. 118164, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2025.118164>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921510725001874>. Acesso em: 5 set. 2025.

RAJABINEJAD, Hossein; BUCIȘCANU, Ingrid-Ioana; MAIER, Stelian Sergiu. Current approaches for raw wool waste management and unconventional valorization: a review. **Environmental Engineering and Management Journal**, Iasi, v. 18, n. 7, 2019. DOI: <https://doi.org/10.30638/eemj.2019.146>. Disponível em: http://eemj.icpm.tuiasi.ro/pdfs/vol18/no7/Full/1_146_Rajabinejad_18.pdf. Acesso em: 25 set. 2025.

RAOTA, Camila Suliani. **Síntese verde de nanopartículas de prata a partir do extrato do bagaço de *Vitis labrusca* (cultivar Ives), caracterização e aplicação na desinfecção de efluentes industriais**. 2018. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/server/api/core/bitstreams/01bba18a-edd7-4a0d-bf25-502c6326e567/content>. Acesso em: 15 out. 2025.

RATTAKAKIT, Parawee *et al.* Sustainable valorization of onion bulbs for the green synthesis of gold nanoparticles and catalytic degradation of methylene blue. **Green Technologies and Sustainability**, v. 2025, p. 100284, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100284>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949736125001186>. Acesso em: 20 out. 2025.

ROCO, Mihail C.; BAINBRIDGE, William Sims. Converging technologies for improving human performance: integrating from the nanoscale. **Journal of Nanoparticle Research**, Dordrecht, v. 4, p. 281-295, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021152023349>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1021152023349>. Acesso em: 30 abr. 2026.

RUIZ-DÍAZ, Carlos *et al.* Experimental evaluation of sheep wool fibres as sustainable reinforcement in eco-friendly cement mortars. **Materials**, Basel, v. 19, n. 2, p. 427, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma19020427>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/19/2/427>. Acesso em: 21 fev. 2026.

SADEGHI-KIAKHANI, Mousa; HASHEMI, Ehsan; NOROUZI, Mohammad-Mahdi. Characterization and antibacterial studies of phytosynthesized palladium nanoparticles on wool fibers using colorants extracted from saffron petals. **International Journal of Environmental Science and Technology**, Teera, v. 22, p. 1523-1536, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05758-7>. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-024-05758-7>. Acesso em: 23 fev. 2026.

SADEGHI-KIAKHANI, Mousa; HASHEMI, Ehsan; NOROUZI, Mohammad-Mahdi. Production of antibacterial wool fiber through the clean synthesis of palladium nanoparticles (PdNPs) by *Crocus sativus* L. stamen extract. **Fibers and Polymers**, Seul, v. 25, p. 3357-3367, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12221-024-00659-5>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12221-024-00659-5>. Acesso em: 23 fev. 2026.

SANFELICE, Rafaela; PAVINATTO, Adriana; CORRÊA, Daniel. **Introdução à nanotecnologia**. São Paulo: Blucher, 2022. Disponível em: <https://www.blucher.com.br/introducao-a-nanotecnologia>. Acesso em: 10 set. 2025.

SAVELEVA, Mariia Sergeevna. *et al.* Hierarchy of hybrid materials—the place of inorganics-in-organics in it, their composition and applications. **Frontiers in chemistry**, Lausanne, v. 7, p. 179, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00179>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2019.00179>. Acesso em: 4 maio 2026.

SAVIO, Lorenzo *et al.* Natural fibre insulation materials: use of textile and agri-food waste in a circular economy perspective. **Materials Circular Economy**, Cham, v. 4, p. 6, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42824-021-00043-1>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42824-021-00043-1>. Acesso em: 10 dez. 2025.

SCHERRER, Paul. Bestimmung der inneren Struktur und der Größe von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen. In: **Kolloidchemie ein lehrbuch**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1912. p. 387-409. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-33915-2_7. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-33915-2_7#citeas. Acesso em 15 abr 2026.

SCURO, Valeska Marcolin. **Síntese fito-assistida de nanopartículas de prata utilizando extrato folhar de capimannoni (*Eragrostis plana* Ness) e sua aplicação para redução catalítica de corantes tóxicos**. 2021. 90f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/handle/riu/6553>. Acesso em: 15 out. 2025.

SCURO, Valeska Marcolin *et al.* Novel biosynthesis of silver nanoparticles catalytically active using extract of non-native species (*Eragrostis plana* Nees) of Brazilian Pampa. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro v. 97, p. e20241276, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202520241276>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/jBzgxwtHbgkhj8JFFJzBmrg/?format=html&lang=en>. Acesso em: 3 mar. 2026.

SELVARANI, J. Franklin Lourdu *et al.* Eco-friendly synthesis of gold nanoparticles using *Ruta graveolens* Leaf extract and their efficient catalytic reduction of 4-

Nitroaniline, Methylene Blue and Antibiotic Nitrofurantoin. **Journal of Organometallic Chemistry**, Amsterdam, v. 1036, p. 123706, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jorgchem.2025.123706>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022328X25001998>. Acesso em: 10 out. 2025.

SILVA, Elenara Oliveira da. **Carvão ativado obtido a partir da palha de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) para a adsorção do corante azul de metileno**. 2019. 156f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/server/api/core/bitstreams/5087dac5-70c6-4468-a4b1-7bc399061f4d/content>. Acesso em: 25 set 2025.

SILVA, Eziel Cardoso da *et al.* Gold nanoparticles based on polysaccharide from *Amburana cearensis* for organic dyes degradation. **Polímeros**, São Carlos, v. 35, n. 3, p. e20250029, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20240094>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/KPdBYPSnpDCFvVn6SypZXSD/?lang=en>. Acesso em: 3 maio 2026.

SILVA, Luiz Augusto da *et al.* Immunomodulation and anti-inflammatory effects of *Baccharis dracunculifolia* and Brazilian Green Propolis: A integrative literature review. **Research, Society and Development**, Irabira, v. 11, n. 11, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i11.33358>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/33358>. Acesso em: 12 mar. 2026.

SINGH, Kshitij R. B. *et al.* Potentialities of bioinspired metal and metal oxide nanoparticles in biomedical sciences. **RSC Advances**, Cambridge, v. 11, n. 40, p. 24722-24746, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/d1ra04273d>. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ra/d1ra04273d>. Acesso em: 25 nov. 2025.

STOLLE, Heike Lisa Kerstin Stephanie *et al.* Shape-dependent catalytic activity of gold and bimetallic nanoparticles in the reduction of methylene blue by sodium borohydride. **Catalysts**, Basel, v. 11, n. 12, p. 1442, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal11121442>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4344/11/12/1442>. Acesso em: 17 mar. 2026.

SUBEKIN, Alexei Yu *et al.* Investigation of the Optical Properties of Assembled Silver and Gold Nanoparticles for Creating SERS Sensors. **Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics**, Moscow, v. 88, n. 2, p. 178-185, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062873823705196>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1062873823705196>. Acesso em: 24 nov. 2025.

SUN, Yanli *et al.* The progress and prospect for sustainable development of waste wool resources. **Textile Research Journal**, London, v. 93, n. 1-2, p. 468-485, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/00405175221098572>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/00405175221098572>. Acesso em: 25 set. 2025.

SZATKOWSKI, Piotr. The influence of various chemical modifications of sheep wool fibers on the long-term mechanical properties of sheep wool/PLA biocomposites.

Materials, Basel, v. 18, n. 13, p. 3056, 2025. DOI:

<https://doi.org/10.3390/ma18133056>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/18/13/3056>. Acesso em: 5 dez. 2025.

SZCZECINA, Julita *et al.* Sheep wool as biomass: identifying the material and its reclassification from waste to resource. **Energies**, Basel, v. 18, n. 19, p. 5185, 2025.

DOI: <https://doi.org/10.3390/en18195185>. Disponível em:

<https://www.mdpi.com/1996-1073/18/19/5185>. Acesso em: 3 mar. 2026.

TANG, Bin *et al.* In situ synthesis of gold nanoparticles on wool powder and their catalytic application. **Materials**, Basel, v. 10, p. 295, 2017. DOI:

<https://doi.org/10.3390/ma10030295>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/3/295>. Acesso em: 15 out. 2025.

TUMMINO, Maria Laura *et al.* Towards zero-waste processes: waste wool derivatives as phosphate adsorbents and auxiliaries for textiles' natural dyeing. **Environmental Science and Pollution Research**, Cham, v. 31, p. 49156-49171, 2024. DOI:

<https://doi.org/10.1007/s11356-024-34395-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-024-34395-3>. Acesso em: 25 out 2025.

TURKEVICH, John; STEVENSON, Peter Cooper; HILLIER, James. A study of the nucleation and growth processes in the synthesis of Colloidal Gold. **Discuss.**

Faraday Soc., London, v. 11, n. c, p. 55-75, 1951. DOI:

<https://doi.org/10.1039/DF9511100055>. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1951/df/df9511100055>. Acesso em: 11 set. 2025.

ULLAH, Rahman *et al.* Synthesis of silver nanoparticles and their use in the degradation of methylene blue dye and evaluation of in vitro antioxidant activity: a step toward sustainability. **International Journal of Environmental Science and Technology**, Teerã, v. 22, p. 2673-2682, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05782-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-024-05782-7>. Acesso em: 13 mar. 2026.

VELMANI, Sundar *et al.* Eco-friendly synthesis and biomedical potential of silver nanoparticles using *Pandanus dubius* extract. **Scientific Reports**, London, v. 15, n. 1, p. 39940, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-39940-9>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-39940-9>. Acesso em: 11 set. 2025.

VERMA, Vishal *et al.* A review on green synthesis of TiO₂ NPs: photocatalysis and antimicrobial applications. **Polymers**, Basel, v. 14, p. 1444, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.3390/polym14071444>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/7/1444>. Acesso em: 10 out. 2025.

XIE, Jianping *et al.* Identification of active biomolecules in the high-yield synthesis of single-crystalline gold nanoplates in algal solutions. **Small**, Weinheim, v. 3, n. 4, p. 672-682, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/sml.200600612>. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sml.200600612>. Acesso em: 3 maio 2026.

XING, Su-Fang *et al.* Stability and biomineralization of cadmium sulfide nanoparticles biosynthesized by the bacterium *Rhodopseudomonas palustris* under light. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 458, p. 131937, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131937>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389423012207>. Acesso em: 10 out. 2025.

YIN, Honghuan *et al.* NH₂-UiO-66 (Zr) modified waste wool fibers for efficient adsorption of dye from water. **Desalination and Water Treatment**, London, v. 318, p. 100305, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100305>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624003382>. Acesso em: 23 mar. 2026.

YOUSIF, Hussein F.; SALIH, Oday Asal. An experimental comparison of the mechanical properties of concrete using waste sheep, goat wool, and industrial fibres. **Civil and Environmental Engineering**, Bratislava, v. 21, n. 2, p. 1166-1180, 2025. DOI: <https://doi.org/10.2478/cee-2025-0086>. Disponível em: <https://cee.tuke.sk/pdfs/cee/2025/02/13.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2025.

ZANELA, Juliano *et al.* Active biodegradable packaging for foods containing *Baccharis dracunculifolia* leaf as natural antioxidant. **Food and Bioprocess Technology**, Cham, v. 14, p. 1301-1310, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02641-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-021-02641-y>. Acesso em: 13 mar. 2026.

ZEIN, Randa; SHARROUF, Wissam; SELTING, Kim. Physical properties of nanoparticles that result in improved cancer targeting. **Journal of Oncology**, London, v. 2020, p. 194780, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/5194780>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2020/5194780>. Acesso em: 10 set. 2025.

ZHANG, Chunhua *et al.* Utilization of waste wool fibers for fabrication of wool powders and keratin: A review. **Journal of Leather Science and Engineering**, Singapore, v. 2, n. 1, p. 15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42825-020-00030-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s42825-020-00030-3>. Acesso em: 4 maio 2025.

ZHANG, Shanju *et al.* Directed assembly of hybrid nanomaterials and nanocomposites. **Advanced Materials**, Weinheim, v. 30, n. 18, p. 1705794, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201705794>. Disponível em: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201705794>. Acesso em: 4 maio 2026.

ZHANG, Shan; WANG, Chao. Precise Analysis of Nanoparticle Size Distribution in TEM Image. **Methods and Protocols**, Basel, v. 6, n. 4, p. 63, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/mps6040063>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2409-9279/6/4/63>. Acesso em: 21 maio 2026.

ZHOU, Huitong *et al.* Wool: from properties and structure to genetic insights and sheep improvement strategies. **Animals**, Basel, v. 15, n. 19, p. 2790, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani15192790>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2615/15/19/2790>. Acesso em: 16 fev. 2026.