

ANais

NAN

meeting

Brasil

O Encontro de Inovações em nanomateriais

Organizadores

Prof. Dr. Pierre B. A. Fachine
Dra. Janaína S. Rocha
Ma. Juliana S. O. Leitão



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ
UFC



NuTec

 Editora
ZUMANIZE[®]

Organizadores

Prof. Dr. Pierre B. A. Fachine

Dra. Janaína S. Rocha

Ma. Juliana S. O. Leitão

**NANOMEETING BRASIL: I ENCONTRO DE INOVAÇÕES EM
NANOMATERIAIS**



Copyright © Editora Humanize
Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação do copyright (Lei 5.988/73 e Lei 9.61/98)

Texto revisado segundo o novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Direito de publicação concedida a Editora Humanize

Organizadores

Pierre Basílio Almeida Fechine

Janaína Sobreira Rocha

Juliana Sales Osterno Leitão.

Editora Responsável

Editora Humanize

Revisão Editorial, Normalização e Catalogação

Equipe Técnica da Editora Humanize

Projeto Gráfico e Diagramação

Equipe de Design Editorial da Editora Humanize

Publicação

Editora Humanize

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (Editora Humanize, BA, Salvador)

N175a FECHINE, Pierre Basílio Almeida; ROCHA, Janaína Sobreira; LEITÃO, Juliana Sales
AN15931 Osterno.

Anais do Nanomeeting Brasil: I Encontro de Inovações em Nanomateriais – Fortaleza —
CE: Editora Humanize, 2026

1 Livro digital; p. 171; ed. I; il.

ISBN: 978-65-5255-214-3

CDD 620.5

CDU 620.3(063)

1. Nanotecnologia. 2. Nanomateriais. 3. Ciência dos materiais. 4. Inovação tecnológica. 5.
Congressos científicos - Anais.

1. Nanotecnologia - CDD: 620.5

2. Nanotecnologia — Congressos e anais - CDU: 620.3(063)

APRESENTAÇÃO

É com grande satisfação que apresentamos os Anais do Nanomeeting Brasil: I Encontro de Inovações em Nanomateriais, realizado nos dias 16 e 17 de abril de 2026. O evento foi concebido como um espaço de integração, diálogo e divulgação científica, reunindo pesquisadores, professores, estudantes e profissionais interessados nos avanços, nas aplicações e nos desafios relacionados à nanotecnologia e aos nanomateriais.

Esta publicação reúne 41 trabalhos científicos, organizados em 14 resumos simples e 27 resumos expandidos, contemplando investigações sobre síntese, caracterização e aplicação de nanomateriais; nanotecnologia ambiental; produção de energia sustentável; tratamento e remediação de águas; desenvolvimento de novos materiais; aplicações biomédicas e farmacêuticas; agricultura; indústria de alimentos; fotocatalise; corrosão; biocombustíveis; sensores; polímeros; grafeno; pontos quânticos; nanopartículas metálicas e outros temas contemporâneos.

A diversidade dos trabalhos apresentados evidencia o caráter interdisciplinar da nanotecnologia e sua capacidade de contribuir para o desenvolvimento de alternativas inovadoras, sustentáveis e socialmente relevantes. Os estudos aqui publicados demonstram o empenho de seus autores na construção de conhecimentos capazes de responder a demandas atuais da sociedade, da indústria e do meio ambiente.

A publicação destes anais representa não apenas o registro oficial das atividades científicas desenvolvidas durante o encontro, mas também uma forma de ampliar o acesso aos resultados apresentados, fortalecer a comunicação científica e valorizar a atuação de estudantes, pesquisadores e orientadores envolvidos na produção dos trabalhos.

Expressamos nosso agradecimento a todos os autores, avaliadores, palestrantes, organizadores, instituições parceiras e participantes que contribuíram para a realização do I Encontro de Inovações em Nanomateriais. Cada contribuição foi essencial para a construção de um evento comprometido com a qualidade científica, a inovação, a interdisciplinaridade e o desenvolvimento tecnológico.

Esperamos que os estudos reunidos nesta obra possam servir como fonte de consulta, inspiração e incentivo para novas pesquisas, parcerias e soluções no campo dos nanomateriais, contribuindo para o fortalecimento da ciência e da inovação no Brasil.

Comissão Organizadora
Nanomeeting Brasil: I Encontro de Inovações em Nanomateriais

ANAIS DO NANOMEETING BRASIL

I Encontro de Inovações em Nanomateriais

16 e 17 de abril de 2026 — Fortaleza, Ceará, Brasil

Fruto da cooperação entre o Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC), por meio de seu Núcleo de Materiais (NUMAT), e a Universidade Federal do Ceará (UFC), com o apoio da Secretaria da Ciência, Tecnologia e Educação Superior do Governo do Estado do Ceará (SECITECE), da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), da FUNDEPAG e de empresas e laboratórios parceiros, o evento reuniu, ao longo de dois dias, estudantes de graduação e pós-graduação, pesquisadores, docentes e profissionais da indústria e do setor produtivo em torno de um propósito comum: pensar — e construir — o futuro dos nanomateriais no Brasil.

A programação contou com palestras e mesas-redondas conduzidas por pesquisadores de destaque nacional e internacional, abordando desde o desenvolvimento de nanomateriais funcionais e suas aplicações em saúde, energia, eletrônica e meio ambiente até as fronteiras da inovação em produtos e processos que já transformam o cenário industrial dentro e fora do país. Mais do que apresentar resultados, o encontro cumpriu sua vocação de conectar pessoas: aproximou grupos de pesquisa, fortaleceu parcerias entre instituições e abriu novos caminhos de cooperação entre os cientistas e profissionais que fazem a nanociência acontecer — na bancada do laboratório, na sala de aula, no chão de fábrica e na gestão de políticas de ciência, tecnologia e inovação.

Estes Anais reúnem os trabalhos apresentados nas modalidades pôster e comunicação oral, distribuídos pelos doze eixos temáticos do evento — da nanomedicina à modelagem computacional, da catálise verde ao nanomagnetismo, passando pelo ensino e pela divulgação científica. Registrados com ISSN e DOI, os resumos aqui publicados asseguram visibilidade, rastreabilidade e reconhecimento permanente à produção de seus autores, constituindo um retrato fiel da vitalidade da pesquisa em nanomateriais realizada no Brasil.

Às instituições realizadoras, aos apoiadores, aos palestrantes convidados, aos avaliadores e, sobretudo, aos autores que confiaram seus trabalhos a este primeiro encontro, registramos nosso mais sincero agradecimento. Que a leitura destas páginas inspire novas perguntas, novas parcerias — e novos encontros.

Boa leitura!

A Comissão Organizadora

NanoMeeting Brasil 2026

FICHA DO EVENTO

Evento: NanoMeeting Brasil — I Encontro de Inovações em Nanomateriais

Data: 16 e 17 de abril de 2026

Local: Bloco 334 — CEI (Condomínio de Empreendedorismo e Inovação), Campus do Pici, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza — CE

Realização: Universidade Federal do Ceará (UFC) e Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Apoio: Dairix Equipamentos Analíticos · Rigaku · Kanaflex · Agilent Technologies · SECITECE · FUNCAP · GQMat · NUMAT · LPC — Laboratório de Pesquisa em Corrosão · Laboratório de Raios X · FUNDEPAG

Contato: nanomeetingbr@gmail.com

COMISSÃO ORGANIZADORA

Prof. Dr. Pierre Basílio Almeida Fechine — Departamento de Química Analítica e Físico-Química, Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Janaína Sobreira Rocha — Gerência de Projetos e Pesquisas, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Ma. Juliana S. O. Leitão — Doutoranda, Universidade Federal do Ceará (UFC)

COMISSÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Dra. Ana Cecília Alves — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Antônia Fádá Valentim de Amorim — Universidade Estadual do Ceará (UECE) / Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Dr. Bruno Peixoto de Oliveira — Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Dr. Claudio José Reis de Carvalho — Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)

Prof. Dr. Davino Machado Andrade Neto — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Ma. Fátima Andrea Lima Girão — Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Dr. Francisco Marcone Lima — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Ingrid David Barcelos — Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS/CNPEM)

Prof. Dr. José Cleiton Sousa dos Santos — Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Prof. Dr. José Marcos Sasaki — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Juliano Casagrande Denardin — Universidad de Santiago de Chile (USACH)

Dra. Laís Helena e Sousa Vieira — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Lillian Maria Uchôa Dutra Fechine — 4W Biotech

Profa. Dra. Luciana Magalhães Rebêlo Alencar — Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Dra. Maria Cristiane Martins de Souza — Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Dra. Maria Valerez Ponte Rocha — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Paulo Herbert França Maia Júnior — Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Dr. Rômulo Batista Vieira — Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Prof. Dr. Samuel Veloso Carneiro — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Tiago Melo Freire — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Victor Teixeira Noronha — Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Prof. Dr. Walney Silva Araújo — Universidade Federal do Ceará (UFC)

PALESTRANTES E MEDIADORES

Dra. Ana Cecília Alves — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Antônia Fádía Valentim de Amorim — Universidade Estadual do Ceará (UECE) / Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Dr. Ari Clecius Alves de Lima — Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Dr. Claudio José Reis de Carvalho — Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)

Prof. Dr. Davino Machado Andrade Neto — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Eduardo Bedê Barros — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Emmanuel Silva Marinho — Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Ma. Fátima Andrea Lima Girão — Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Presidente Francisco das Chagas Magalhães — Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Ingrid David Barcelos — Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS/CNPEM)

Dra. Janaína Sobreira Rocha — Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Prof. Dr. José Cleiton Sousa dos Santos — Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Prof. Dr. José Marcos Sasaki — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Juliano Casagrande Denardin — Universidad de Santiago de Chile (USACH)

Dra. Lillian Maria Uchôa Dutra Fchine — 4W Biotech

Profa. Dra. Luciana Magalhães Rebêlo Alencar — Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Profa. Dra. Lucilene dos Santos — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Maria da Conceição Ferreira Oliveira — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Paulo Herbert França Maia Júnior — Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Prof. Dr. Pierre Basílio Almeida Fchine — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Nogueira Costa Filho — Presidente da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP)

Dr. Ralph Santos-Oliveira — Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN)

Prof. Dr. Samuel Veloso Carneiro — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Tiago Melo Freire — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Walney Silva Araújo — Universidade Federal do Ceará (UFC)

APOIO TÉCNICO-EDITORIAL

Me. Gabriel Saraiva da Silva — Universidade Federal do Ceará (UFC) / Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Dra. Janaína Sobreira Rocha — Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

SECRETARIA EXECUTIVA

Antônio Matheus Osterno Leitão — Superintendência de Pesquisa e Estratégia de Segurança Pública (Supesp)

Michel Rodrigues Andrade — Universidade Federal do Ceará (UFC)

Silvana Pereira Rodrigues, Tayane Monick Pereira de Carvalho — Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

EQUIPE DE COMUNICAÇÃO

Tayane Monick Pereira de Carvalho — Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Denilson Maciel da Silva Mora — Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Marina David Saboia Rios — Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Silvana Pereira Rodrigues — Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

EIXOS TEMÁTICOS

1. Nanomateriais para Aplicações Biomédicas
2. Nanotecnologia para Energia e Sustentabilidade
3. Nanocompósitos e Materiais Avançados
4. Nanomateriais para Eletrônica e Optoeletrônica
5. Síntese e Caracterização de Nanomateriais
6. Nanomateriais para Catálise e Química Verde
7. Nanotecnologia para Indústria Têxtil e Cosmética
8. Nanomateriais e Meio Ambiente
9. Nanomateriais Aplicados na Agroindústria
10. Nanomagnetismo e Materiais Magnéticos
11. Modelagem Computacional e Design de Nanomateriais
12. Ensino, Divulgação e Abordagens Interdisciplinares em Nanociência

REALIZAÇÃO

Universidade Federal do Ceará (UFC)
Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)



APOIO



laboratório
de raios x



ÍNDICE

RESUMOS SIMPLES 14

1. VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE TINTA COM NANOMATERIAIS DE PRATA PARA FINS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA - Francisco Marcone Lima; Janaina Sobreira Rocha; Carla Freitas de Andrade; Francisco Nivaldo Aguiar Freire 15
2. PEROVSKITA HÍBRIDA 0D BASEADA EM ESTANHO PARA ENERGIA SUSTENTÁVEL: SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO - Ednara Joice Braga; Davino Machado Andrade Neto; Marcos Carlos de Mattos; Alejandro Pedro Ayala; Pierre Basílio Almeida Fechine 18
3. GRAFENO DA DESCOBERTA ÀS NOVAS APLICAÇÕES E SUSTENTABILIDADE NO MERCADO GLOBAL - Bruno de Souza Matos; Maria Iaponeide Fernandes Macêdo 21
4. NANOMATERIAL FOTOLUMINESCENTE À BASE DE PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO APLICADO À OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS - Larissa de Sousa Mendonça; Francisco Marcone Lima; Pierre Basílio Almeida Fechine; Francisco Nivaldo Aguiar Freire; Janaina Sobreira Rocha; Carla Freitas de Andrade 24
5. NANOMATERIAIS NO TRATAMENTO DE ÁGUA: APLICAÇÕES EMERGENTES E LIMITAÇÕES TECNOLÓGICAS - Paula Luciana Rodrigues de Sousa; Eirilândia Sousa da Silva; Christiane Gomes da Silva Gurgel; Ari Clecius Alves de Lima; Rosa Ferreira Araújo de Abreu; Antonia Fádá Valentim de Amorim 27
6. O IMPACTO DOS MICRO E NANOPLÁSTICOS NO ORGANISMO HUMANO - Patrícia Mendes Barroso; Paula Luciana Rodrigues de Sousa; Carla Bastos Vidal; Ari Clecius Alves de Lima; Antônia Fádá Valentim de Amorim 31
7. NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA (Fe_3O_4) FUNCIONALIZADAS COM ONCOCALIXONA-A PARA APLICAÇÕES TERAPÊUTICAS ANTICÂNCER - Ana Rute Souza Ferreira; Gabriel Érik Patrício de Almeida; Alexandre Carreira da Cruz Sousa; Nágila Maria Pontes Silva Ricardo; Otília Deusdênia Loiola Pessoa 34
8. NANOCÁPSULA DERIVADA DA MUCILAGEM DA SEMENTE DO MELÃO (*Cucumis Melo L.*) PARA O CARREAMENTO DE FÁRMACO ANTICÂNCER - João Cristian Araújo Lucena; Cristine Soares Vidal de Menezes; Francisco Alessandro Marinho Rodrigues; Nágila Maria Pontes Silva Ricardo 37
9. SÍNTESE DE SISTEMAS NANOESTRUTURADOS À BASE DE MUCILAGEM DE CHIA (*SALVIA HISPANICA L.*) PARA ENTREGA DE FÁRMACOS HIDROFÍLICOS - Sâmia Silva Viana; Francisco Alessandro Marinho Rodrigues; Cristine Soares Vidal de Menezes; Nágila Maria Pontes Silva Ricardo 39
10. SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS DE MANGANÊS-ALBUMINA PARA ESTABILIZAÇÃO DE COACERVADOS À BASE DE AMIOLOSE MODIFICADA POR SEPARAÇÃO DE FASE LÍQUIDO-LÍQUIDO - Cristine Soares Vidal de Menezes; Francisco Alessandro Marinho Rodrigues; Nágila Maria Pontes Silva Ricardo 42

11. POTENCIAL DE NANOPARTÍCULAS DO VÍRUS DO MOSAICO SEVERO DO FEIJÃO-CAUPI PARA IMUNOTERAPIA NO CÂNCER - Renata Kelly de Freitas Mano; Nicole F. Steinmetz; Maria Izabel Florindo Guedes44
12. CONECTANDO MESO- E NANOESCALA: INSIGHTS DA NANOMINERALOGIA PARA OS MATERIAIS DE GRAFENO - Lucilene Santos; Alejandro Ayala; Bruno Araújo; Thiago Moura; Janaína Rocha.....48
13. SENSOR FLUORESCENTE *TURN-OFF/TURN-ON* BASEADO EM PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO E ÍONS Cu^{2+} PARA A QUANTIFICAÇÃO DE GLIFOSATO EM MATRIZES AQUOSAS - Carlos Mateus Paiva Oliveira; Samuel Veloso Carneiro.....50
14. SONDA BASEADA EM NANOPARTÍCULAS FLUORESCENTES PARA DETECÇÃO DE ÍONS DICROMATO EM SOLO - Vivian Stephanie Ferreira Rodrigues; Samuel Veloso Carneiro.....53

RESUMO EXPANDIDO56

15. AVALIAÇÃO DO EFEITO DE NANOMATERIAIS NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETO ARMADO - Letícia de Vasconcelos Rodrigues; Antônio Mateus de Carvalho Costa; Helano Wilson Pimentel; Antônio Eduardo Bezerra Cabral; Walney Silva Araújo57
16. EFEITO DO TEOR DE DOPAGEM DE CARBON DOTS (CDs) DOPADOS COM NITROGÊNIO COMO INIBIDOR DE CORROSÃO - Antonio Mateus de Carvalho Costa; Heloisa Sousa Pessoa; Letícia de Vasconcelos Rodrigues; Tiago Melo Freire; Pierre Basilio Almeida Fechine; Walney Silva Araújo64
17. EFEITO DA DOPAGEM DE PEDOT:PSS COM NANOPARTÍCULAS DE PRATA EM CÉLULAS SOLARES FLEXÍVEIS - Paulo Herbert França Maia Junior; Áurea Carolyne da Mota Lima; Francisco Marcone Lima; Janaína Sobreira Rocha; Francisco Nivaldo Aguiar Freire70
18. MICRO-REATORES 3D PARA A SÍNTESE DE BIODIESEL DE ÓLEO DE BABAÇU POR BIOCATÁLISE - José Roberto de M. Filho; César Guilherme Forte Fonseca; Vandilberto Pereira Pinto; Ari Clecius Alves de Lima; Débora Nery de Souza; Maria Cristiane Martins de Souza.....76
19. NANOMATERIAIS PARA BATERIAS SUSTENTÁVEIS - Patrícia Mendes Barroso; Erilândia Sousa da Silva; Christiane Gomes da Silva Gurgel; Ari Clecius Alves de Lima; Paula Luciana Rodrigues de Sousa80
20. APLICAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS NA FERMENTAÇÃO ESCURA: EFEITOS SOBRE A PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO - Emanuelle Ferreira do Monte; Debora Nery de Souza; Maria Cristiane Martins de Souza; Ari Clecius Alves de Lima; Nikolas Café de Vasconcelos; Ronaldo Stefanutti.....84
21. AVALIAÇÃO DE BIOCARVÕES DE CASCA DE COCO E PALHA DE MILHO NA ADSORÇÃO DO CORANTE VERMELHO CONGO - Marcos Vinicius Nogueira Celestino; Joice Farias do Nascimento; Thais Alves Marques da Silva; Maria Rayanne Teixeira de Araújo; Mona Lisa Moura de Oliveira; Flávia Oliveira Monteiro da Silva Abreu.....88
22. MICROPLÁSTICOS E NANOPLÁSTICOS: DINÂMICA AMBIENTAL, IMPACTOS À SAÚDE HUMANA E DESAFIOS REGULATÓRIOS - Patrícia Mendes Barroso; Erilândia

Sousa da Silva; Christiane Gomes da Silva Gurgel; Ari Clecius Alves de Lima; Janaina Sobreira Rocha	92
23. CARBONOS QUÂNTICOS DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS: FOTOCATÁLISE E DEGRADAÇÃO DE CORANTES SINTÉTICOS - Debora Nery de Souza; Janaína Sobreira Rocha; Maria Cristiane Martins de Souza; Ari Clecius Alves de Lima; Maria Elissandra Macieira da Silva.....	96
24. BIOCHAR ARTESANAL: PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES AMBIENTAIS — REVISÃO SISTEMÁTICA - Beatriz Bezerra Batista; Patrícia Mendes Barroso; Emanuelle Ferreira do Monte; Maria Cristiane Martins de Souza; Ari Clecius Alves de Lima	100
25. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS CONVENCIONAIS E NANOTECNOLOGIA NA REMEDIAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - Luzia Suerlange Araújo dos Santos; Fátima Andréa Lima Girão; Tomaz Alexandre da Silva Neto; Itabaraci Nazareno Calvalcante; Joyce Shantala Fernandes de Oliveira Sousa	104
26. NANOPARTÍCULAS DE COBRE OBTIDAS DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO PARA CATÁLISE E DEGRADAÇÃO DE POLUENTES ORGÂNICOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA - Gabriel Saraiva da Silva; Ari Clecius Alves de Lima; Mauro Andres Cerra Florez	108
27. NANOMATERIAIS APLICADOS À PRODUÇÃO DE BIOGÁS E HIDROGÊNIO A PARTIR DE BIOMASSA: UMA ANÁLISE PATENTOMÉTRICA - Thaís Rodrigues Gadelha; Natasha Esteves Batista; Ari Clecius Alves de Lima; Michel Rodrigues Andrade; Emanuelle Ferreira do Monte; Jenifer Ellen Freitas Nogueira	112
28. META-ANÁLISE DO DESEMPENHO DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS EM REFORMA A VAPOR DO ETANOL: EFEITO DA COMPOSIÇÃO BIMETÁLICA E INTERAÇÃO METAL-SUORTE NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO - Jenifer Ellen Freitas Nogueira; Emanuelle Ferreira do Monte; Thais Rodrigues Gadelha; Michel Rodrigues Andrade; Natasha Esteves Batista; Ari Clecius Alves de Lima	117
29. MAPEAMENTO DO CENÁRIO DE TINTAS E REVESTIMENTOS SUSTENTÁVEIS: UMA REVISÃO CIENTOMÉTRICA - Michel Rodrigues Andrade; Janaína Silva Rocha; Maria Elissandra Macieira da Silva.....	121
30. STARTUPS DE NANOTECNOLOGIA APLICADA AO MEIO AMBIENTE: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE BRASIL E CENÁRIO GLOBAL - Natasha Esteves Batista; Emanuelle Ferreira do Monte; Jenifer Ellen Freitas Nogueira; Thais Rodrigues Gadelha; Michel Rodrigues Andrade; Ari Clecius Alves de Lima	125
31. NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO (ZnO) VIA SÍNTESE VERDE: ATIVIDADE FOTOCATALÍTICA NA DEGRADAÇÃO DO AZUL DE METILENO - José Davi Alves da Silva; Felipe Silva Lopes; Alberto Mulima Antônio; Edmilson Tomé Pinto João; Antônio Pombalo Faustino; Rômulo Batista Vieira.....	129
32. INFLUÊNCIA DE DIFERENTES SURFACTANTES NA ESTABILIDADE DE NANOEMULSÕES CONTENDO EXTRATO ETANÓLICO DE LIGNINA - Kariny Santos Freitas; Ana Letícia da Silva Lima; Sara Ingrid Caetano Gomes Barbosa; Flávia Oliveira Monteiro da Silva Abreu.....	133
33. INFLUÊNCIA DE SURFACTANTES NA ESTABILIDADE DE NANOEMULSÕES COM EXTRATO AQUOSO DE LIGNINA - Ana Letícia da Silva Lima; Kariny Santos Freitas; Nathália Uchôa de Castro Bessa; Flávia Oliveira Monteiro da Silva Abreu	137

34. ESTUDO PRELIMINAR DE FOTOTERMIA DE FILMES POLIMÉRICOS CONTENDO NANOPARTÍCULA DE ÓXIDO DE COBRE (II) E POLISSACARÍDEOS DO *AGARICUS BLAZEI* - Francisco Wesley Pacheco Rodrigues; Ana Beatriz Nogueira Lima; Sarah Virgínia Oliveira Lima Teixeira; Antônio Gerson Rodrigues Costa; Paula Goes Pinheiro Dutra; Maria Elenir Nobre Pinho Ribeiro.....141
35. OTIMIZAÇÃO DA SÍNTESE DE COMPÓSITOS RETICULADOS DE ÓXIDO DE GRAFENO E HIDROXIETILCELULOSE - Antônio Gerson Rodrigues Costa; George de Almeida Silva; Antônio Emanuel de Jesus Freires; Cristiano Duarte; Francisco Wesley Pacheco Rodrigues; Maria Elenir Nobre Pinho Ribeiro145
36. NITRETO DE CARBONO GRAFÍTICO ASSOCIADO A NANOPARTÍCULAS PLASMÔNICAS DE PRATA E COBRE - Emanuel Pereira de Queiroz; Tiago Melo Freire; Pierre Basílio Almeida Fechine149
37. NANOMATERIAIS APLICADOS NA AGROINDÚSTRIA E O ENFRENTAMENTO DA FOME: ENTRE A INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E A JUSTIÇA SOCIAL A PARTIR DA EXPERIÊNCIA DA REDE DE COZINHAS COMUNITÁRIAS DO GRANDE BOM JARDIM - Luciana Ribeiro Moura; Eduardo Gomes Machado; Alba Maria Pinho de Carvalho; Janaína Sobreira Rocha153
38. NANOTECNOLOGIA NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS: AVANÇOS RECENTES E APLICAÇÕES EMERGENTES - Paula Luciana Rodrigues de Sousa; Erilândia Sousa da Silva; Christiane Gomes da Silva Gurgel; Patrícia Mendes Barroso; Rosa Ferreira Araújo de Abreu; Antonia Fádá Valentim de Amorim.....156
39. NITRETO DE CARBONO GRAFÍTICO DOPADO (X-g-C₃N₄; X = MG, P E P/MG) COMO NANOFERTILIZANTE PARA MELHORIA DO DESEMPENHO FISIOLÓGICO DO MILHO - Francisco Dheyson de Quadro Carvalho; Pedro Hilton L. Baracho; Claudio José R. de Carvalho; Pierre B. A. Fechine; Tiago Melo Freire159
40. DESENVOLVIMENTO DE NANOEMULSÃO À BASE DE ÓLEO DE SOJA E SUA CARACTERIZAÇÃO PARA APLICAÇÃO NO CONTROLE DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA - Mabelle Lima Paiva; Juliana Sales Osterno Leitão; Lillian Maria Uchôa Dutra Fechine; Pierre Basílio Almeida Fechine; Guilherme Julião Zocolo163
41. POLARITONS DE SUPERFÍCIE HIPERBÓLICOS EM SUPERREDES DE VAN DER WAALS DE DICALCOGENETOS DE METAIS DE TRANSIÇÃO - Michel R. Andrade; Pedro L. M. S. Silva; Diego R. da Costa; Andrey J. Chaves167

RESUMOS SIMPLES

NANOMEETING BRASIL: I ENCONTRO DE INOVAÇÕES EM NANOMATERIAIS — 16 E 17 DE ABRIL DE 2026

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE TINTA COM NANOMATERIAIS DE PRATA PARA FINS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Francisco Marcone Lima: Doutor, Universidade Federal do Ceará.

Janaina Sobreira Rocha: Doutora, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará.

Carla Freitas de Andrade: Doutora, Universidade Federal do Ceará.

Francisco Nivaldo Aguiar Freire: Doutor, Universidade Federal do Ceará (Orientador).

Resumo: Este trabalho propõe a reutilização de resíduos sólidos de tintas secas contendo nanomateriais de prata como carga particulada em solução de quitosana para fins de condutividade elétrica. O processo consiste na fragmentação e moagem do resíduo, seguida de sua dispersão na solução de quitosana, uma matriz líquida aglutinante. Os filmes obtidos têm potencial para apresentar resistência elétrica menor que 4 ohms. No contexto de nanomateriais e meio ambiente, a técnica promove a economia circular e a logística reversa, mitigando o impacto ambiental do descarte químico ao imobilizar os resíduos sólidos em matriz polimétrica sustentável. O reaproveitamento desses materiais preexistentes tem a tendência a contribuir para a diminuição da pegada de carbono associada à extração de matérias-primas. A transformação desses passivos ambientais em insumos nanotecnológicos tende a representar uma estratégia viável para o desenvolvimento de materiais sustentáveis para fins de condutividade elétrica.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos; Tintas; Nanomateriais; Prata; Meio Ambiente.

1 Introdução

As tintas usando prata tem sido aplicado em diferentes setores tecnológicos e industriais, o qual inclui, mas não se limitam a revestimentos antibacterianos feitos a partir de nanotintas de prata em embalagens para comida (ALAM *et al.*, 2023) e tintas condutoras de nanopartículas de prata para aplicações em eletrônica (LIM *et al.*, 2026; RAO *et al.*, 2015). Um dos desafios associados ao uso de prata em tintas é a mitigação do impacto ambiental do descarte deste material.

A quitosana é um polissacarídeo de origem natural derivado da quitina que possui propriedades antibacteriana, biodegradável, baixa toxicidade e capacidade de formação de filme, sendo que compósitos à base de quitosana podem ser aplicados em diferentes setores tecnológicos e industriais (OLIVEIRA, 2021). Filmes de quitosana modificada com perclorato de lítio tem sido usado como eletrólito sólido no reuso de célula solar fotovoltaica de silício danificada (LIMA *et al.*, 2017).

A quitosana tende a ser uma importante aliada para desenvolvimento de materiais condutores elétricos sustentáveis, especialmente filmes com condutividade elétrica. Mas, abordagem usando quitosana e reuso de resíduos de tinta de prata seca ainda não tem sido explorado. Assim, este trabalho aborda o uso de resíduos sólidos de tintas secas contendo nanomateriais de prata em solução de quitosana para obtenção de filmes com condutividade elétrica.

2 Objetivo

Mensurar a resistência elétrica de filmes de quitosana modificados com resíduo de tinta contendo nanopartículas de prata.

3 Metodologia

Preparação de solução ácida de quitosana a partir de 18 mL de água destilada, 2 mL de ácido acético glacial e 0,50 g de quitosana. Homogeneização da mistura feita via agitador magnético. Pó de resíduos sólidos de tintas secas contendo nanomateriais de prata obtido por maceração são inseridas amostras de 5 mL solução ácida de quitosana. Tintas contendo 2,50% e 10% de massa de resíduo são usadas para produzir filmes. A resistência elétrica dos filmes é mensurada usando um multímetro digital.

4 Resultados e Discussão

A produção de tinta usando nanopartículas de prata obtidas por redução química de íons prata tem sido reportada (RAO *et al.*, 2015). No trabalho de Rao e colaboradores não é usado quitosana e nem nanopartículas de prata reciclada. Por outro lado, neste trabalho é usado quitosana e resíduos sólidos de tintas secas contendo nanomateriais de prata para formulações da tinta.

Filme condutivo com resistência elétrica de aproximadamente de $1.99 \times 10^{-4} \text{ ohm}$, o qual é obtido a partir da tinta contendo nanopartículas de prata obtidas por redução química de íons prata, tem sido reportado (RAO *et al.*, 2015). Por outro lado, as resistências elétricas mensuradas para filmes de quitosana modificados com resíduos de tintas de prata apresentam resistências mais altas. Nisso, é observado resistência elétrica de aproximadamente 200 ohm para filme feito com tinta contendo 2,50% de massa de resíduo, enquanto aproximadamente 4 ohms é observado para filme feito com tinta contendo 10,00% de massa de resíduo de tinta seca contendo nanomateriais de prata. Possivelmente, isso ocorre devido a reciclagem tende a introduzir impurezas e defeitos estruturais que não estavam presentes no material original.

5 Conclusão

O aumento da resistência observado após a reciclagem demonstra a necessidade de melhorar processo de obtenção de tinta via reaproveitamento de resíduos de tinta seca contendo nanomateriais de prata. No entanto, a abordagem apresentada tende a representar uma estratégia viável para o desenvolvimento de materiais sustentáveis para fins de condutividade elétrica.

6 Referências

ALAM, A. M. *et al.* Production of Silver Nano-Inks and Surface Coatings for Anti-Microbial Food Packaging and Its Ecological Impact. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 6, 5341, 2023.

LIM, Y. H. *et al.* Influence of thermal and temporal factors on silver ink nozzle clogging in inkjet-based 3D printing. **Materials & Design**, v. 264, 115702, 2026.

LIMA, F. M. *et al.* Use of SnOx:F in the recycling of silicon solar cells. **Materials Research**, v. 20, n. 2, p. 826-829, 2017.

OLIVEIRA, J. A. M. **Caracterização dos revestimentos compósitos quitosana-tungstênio e quitosana-molibdênio obtidos por deposição eletroforética**. 2021. 101f. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

RAO, V. K. *et al.* Conductive silver inks and their applications in printed and flexible electronics. **RSC Advances**, v.5, p. 77760-77790, 2015.

PEROVSKITA HÍBRIDA 0D BASEADA EM ESTANHO PARA ENERGIA SUSTENTÁVEL: SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO

Ednara Joice Braga: Mestra em Química, Universidade Federal do Ceará.

Davino Machado Andrade Neto: Doutor em Química, Universidade Federal do Ceará.

Marcos Carlos de Mattos: Doutor em Química Orgânica, Universidade de São Paulo.

Alejandro Pedro Ayala: Doutor em Física, Universidad Nacional de La Plata.

Pierre Basílio Almeida Fechine: Doutor em Química Inorgânica, Universidade Federal do Ceará (Orientador).

Resumo: Perovskitas híbridas halogenadas baseadas em estanho representam uma classe promissora de materiais para aplicações optoeletrônicas, combinando menor toxicidade e versatilidade estrutural. Neste trabalho, é reportada a síntese da perovskita híbrida $(C_{11}H_{11}N_2O)_2SnBr_6$ por evaporação lenta a partir de solução ácida. A estrutura incorpora o cátion orgânico 2-(1H-imidazol-1-il)-1-feniletanona, no qual centros de Sn^{4+} coordenam seis átomos de bromo, formando octaedros isolados $[SnBr_6]^{2-}$, caracterizando uma organização cristalina 0D. O composto apresenta emissão de banda larga na região do visível, atribuída à recombinação de éxcitons autoaprisionados (STEs), além de bandgap óptico direto de 2,99 eV. A combinação entre estabilidade estrutural e propriedades luminescentes indica potencial para aplicações em dispositivos optoeletrônicos.

Palavras-chave: perovskita híbrida 0D; estanho; optoeletrônica; éxcitons autoaprisionados; bandgap.

1 Introdução

O avanço da energia fotovoltaica tem impulsionado o desenvolvimento de novos materiais para conversão de energia, com destaque para perovskitas híbridas (KOJIMA *et al.*, 2009). Esses materiais apresentam propriedades como ajuste do bandgap, alta absorção na visível e boa mobilidade de carga, favorecendo sua aplicação em dispositivos optoeletrônicos (LIANG *et al.*, 2025; MIAH *et al.*, 2024; ZHONG *et al.*, 2022).

Perovskitas híbridas de baixa dimensionalidade tem sido investigadas devido à possibilidade de modulação estrutural e ajuste de propriedades (LIN *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2025). No entanto, o uso de Pb impõe limitações relacionadas à toxicidade e estabilidade (RAINA *et al.*, 2025). Nesse contexto, a substituição por Sn surge como alternativa, mantendo propriedades relevantes e reduzindo impactos ambientais (SOARES *et al.*, 2024; FERJANI *et al.*, 2025).

2 Objetivo

Sintetizar e caracterizar uma perovskita híbrida 0D baseada em estanho, visando aplicações em dispositivos optoeletrônicos e conversão de energia.

3 Metodologia

Os monocristais de $(C_{11}H_{11}N_2O)_2SnBr_6$ foram obtidos por evaporação lenta em meio ácido. O precursor orgânico foi sintetizado conforme literatura (COSTA *et al.*, 2021). Para a síntese, o composto orgânico e o $SnBr_2$ foram dissolvidos separadamente em HBr sob aquecimento ($100\text{ }^{\circ}C$) e agitação, sendo posteriormente misturados, seguidos da adição de H_3PO_2 .

A solução foi concentrada por aquecimento e mantida em repouso por 72 h, permitindo a formação dos cristais. Os cristais foram lavados com éter etílico e armazenados em dessecador. A caracterização foi realizada por SCXRD, DRS, PL, FTIR e Raman.

4 Resultados e Discussão

A análise por difração de raios X de monocristal confirmou a formação da perovskita híbrida $(C_{11}H_{11}N_2O)_2SnBr_6$, classificada como uma perovskita dupla ordenada por vacância, com estrutura de dimensionalidade zero (0D), caracterizada por octaedros $[SnBr_6]^{2-}$ isolados. A distância média entre os centros octaédricos ($\sim 12,1\text{ }\text{\AA}$) indica forte confinamento eletrônico, favorecendo a formação de éxcitons autoaprisionados, conforme observado em sistemas semelhantes (ZHOU *et al.*, 2022; AJAYAKUMAR *et al.*, 2024). A baixa distorção do octaedro sugere uma geometria próxima da ideal, contribuindo para a estabilidade estrutural do material.

A análise de superfície de Hirshfeld indicou que a estabilidade cristalina é governada principalmente por interações do tipo $C-H\cdots Br$, enquanto interações $\pi-\pi$ entre os anéis aromáticos contribuem para o empacotamento molecular.

As propriedades ópticas revelaram bandgap direto de 2,99 eV, em concordância com valores reportados na literatura para perovskitas de estanho com octaedros isolados. O material apresentou emissão de banda larga na região do visível, atribuída à recombinação radiativa de éxcitons autoaprisionados, com forte acoplamento elétron-fônon. Esse comportamento é típico de perovskitas de baixa dimensionalidade e favorece aplicações em dispositivos optoeletrônicos.

5 Conclusão

A perovskita híbrida 0D baseada em estanho foi obtida com sucesso, apresentando estrutura estável e baixa distorção. O material exibe propriedades ópticas típicas de sistemas de baixa dimensionalidade. A substituição do chumbo por estanho reduz limitações de toxicidade, mantendo características relevantes para aplicações optoeletrônicas. O composto apresenta potencial para uso em dispositivos de conversão de energia.

6 Referências

AJAYAKUMAR, A. *et al.* Zero-Dimensional Tin Halide Perovskite with Long Charge Carrier Lifetime and Anisotropic Photoconductivity for Selective Deep-UV Photodetection. **Advanced Functional Materials**, v. 34, n. 9, p. 2304899, fev. 2024.

COSTA, S. N. *et al.* Carbon steel corrosion inhibition in acid medium by imidazole-based molecules: Experimental and molecular modelling approaches. **Journal of Molecular Liquids**, v. 326, p. 115330, mar. 2021.

- FERJANI, H. *et al.* Visible emission from a zero-dimensional tin-based organic-inorganic metal halide for luminescent devices: Experimental and theoretical investigation. **Journal of Molecular Structure**, v. 1327, p. 141210, abr. 2025.
- KOJIMA, A. *et al.* Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. **Journal of the American Chemical Society**, v. 131, n. 17, p. 6050–6051, 6 maio 2009.
- LIANG, Q. *et al.* Highly stable perovskite solar cells with 0.30 voltage deficit enabled by a multi-functional asynchronous cross-linking. **Nature Communications**, v. 16, n. 1, p. 190, 2 jan. 2025.
- LIN, K. *et al.* Perovskite light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 20 per cent. **Nature**, v. 562, n. 7726, p. 245–248, 11 out. 2018.
- LIU, T. *et al.* Solution-Processed Thin Film Transparent Photovoltaics: Present Challenges and Future Development. **Nano-Micro Letters**, v. 17, n. 1, p. 49, dez. 2025.
- MIAH, MD. H. *et al.* Band gap tuning of perovskite solar cells for enhancing the efficiency and stability: issues and prospects. **RSC Advances**, v. 14, n. 23, p. 15876–15906, 2024.
- RAINA, P. *et al.* A review on stannate perovskites-based heterojunctions and their applications in the development of sustainable technologies and materials. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 188, p. 109224, mar. 2025.
- SOARES, C. C. S. *et al.* Strong electron–phonon coupling in vacancy-ordered Cs₂ SnBr₆ double perovskite. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 12, n. 41, p. 16758–16765, 2024.
- ZHONG, Y. *et al.* Collaborative strengthening by multi-functional molecule 3-thiophenboric acid for efficient and stable planar perovskite solar cells. **Chemical Engineering Journal**, v. 436, p. 135134, maio 2022.
- Zhou, C., Xu, L.-J., Lee, S., Lin, H., & Ma, B. (2022). Dimensional Organic Metal Halide Hybrids. **Advanced Optical Materials**, 10(3), 2001766.

GRAFENO DA DESCOBERTA ÀS NOVAS APLICAÇÕES E SUSTENTABILIDADE NO MERCADO GLOBAL

Bruno de Souza Matos: Graduanda, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

Maria Iaponeide Fernandes Macêdo: Doutora, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) (Orientadora).

Resumo: Este trabalho analisa o grafeno como material estratégico no cenário científico e tecnológico, destacando suas propriedades, métodos de obtenção, aplicações e desafios ambientais. Trata-se de um alótropo bidimensional do carbono, com elevada resistência mecânica, alta condutividade elétrica e térmica e grande área superficial. A metodologia baseia-se em revisão bibliográfica, abordando técnicas de síntese top-down e bottom-up, como esfoliação mecânica e deposição química a vapor, além de rotas sustentáveis com biomassa e resíduos. As aplicações incluem energia, eletrônica, construção civil e remediação ambiental, com melhorias no desempenho de materiais e processos. Conclui-se que o grafeno possui alto potencial tecnológico e sustentável, embora ainda enfrente desafios relacionados à produção em larga escala, custos e impactos ambientais.

Palavras-chave: Grafeno; Sustentabilidade; Aplicações tecnológicas; Síntese.

1 Introdução

O grafeno tem gerado um grande interesse na comunidade científica, principalmente devido à sua capacidade de se integrar com outros materiais. Sendo um material com dimensões atômicas, que forma uma camada monocristalina de carbono (C) com estrutura hexagonal, esse nanomaterial bidimensional se destaca ao se combinar com diferentes substâncias. O elemento adicional incorpora as propriedades do grafeno, resultando em combinações notáveis que estimulam a criatividade dos pesquisadores, abrindo um amplo espectro de aplicações e melhorias desejadas por todos. (SOUZA et al., 2023).

Entre suas aplicações destacam-se os usos em armazenamento de energia, purificação de água e dessalinização, biomedicina, materiais inteligentes, e ainda no setor militar, como proteção balística e em trajes robóticos (RAO et al., 2013). No entanto, apesar de seu potencial revolucionário, pesquisadores têm levantado preocupações quanto ao impacto ambiental associado à produção e descarte do grafeno. Em um contexto em que a sustentabilidade é pauta global, torna-se essencial compreender de que maneira o grafeno pode ser produzido e aplicado de forma ambientalmente responsável, contribuindo para um futuro mais sustentável (BIANCO, 2013; TORRES et al., 2021).

2 Objetivo

Pesquisar e analisar as aplicações mais recentes sobre o grafeno colocando como fator principal o impacto e os desafios ambientais que cercam sua produção e uso, levantando os principais métodos de síntese do grafeno, destacando suas vantagens, limitações e impactos ambientais.

3 Metodologia

A metodologia baseia-se na seleção e análise crítica de artigos científicos relevantes, com o objetivo de avaliar a eficiência dos métodos de síntese do grafeno, suas aplicações e os impactos ambientais associados. Consideram-se também as vantagens, limitações e a viabilidade sob a perspectiva da sustentabilidade. Além disso, aspectos complementares identificados na literatura são incorporados para uma visão integrada do tema. As buscas são realizadas entre 2022 e 2025, em português e inglês, nas bases ScienceDirect, SciELO, Google Scholar, Portal de Periódicos CAPES, Nature e Revista Pesquisa FAPESP, utilizando palavras-chave relacionadas ao grafeno, síntese, aplicações e sustentabilidade.

4 Resultados e Discussão

A análise dos estudos indica que o grafeno e seus derivados vêm sendo aplicados em diversas áreas com o objetivo de melhorar o desempenho técnico e contribuir para soluções mais sustentáveis. Os trabalhos mostram que esse nanomaterial é versátil, com aplicações em eletrônica, construção civil, tratamento de água, energia, infraestrutura e agricultura.

De modo geral, o grafeno melhora propriedades físicas e químicas dos materiais, aumentando resistência mecânica, eficiência de filtração, desempenho energético e atividade catalítica. Esses ganhos permitem reduzir o uso de matérias-primas e aumentar a durabilidade dos sistemas, diminuindo o consumo de recursos naturais. Outro ponto relevante é o uso de resíduos como matéria-prima e a adoção de rotas de síntese mais limpas, incluindo agentes naturais, alinhando-se à economia circular e à química verde.

Apesar dos avanços, a produção ainda apresenta desafios, como alto consumo energético, uso de reagentes agressivos e dificuldades de padronização em larga escala. Além disso, a avaliação do ciclo de vida é essencial, pois impactos na síntese, uso e descarte podem comprometer os benefícios obtidos. Assim, os estudos indicam que o grafeno possui grande potencial para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis, desde que esses desafios sejam superados.

5 Conclusão

A produção de grafeno ainda enfrenta desafios de custo, energia e escala, apesar do avanço de rotas verdes mais sustentáveis. O material melhora o desempenho em diversas aplicações e contribui para a sustentabilidade. No entanto, ainda exige padronização, regulamentação e melhor compreensão ambiental.

6 Referências

- BIANCO, A. Graphene: safe or toxic? The two faces of the medal. *Angewandte Chemie International Edition*, v. 52, n. 19, p. 4986–4997, 2013.
- NOVOSELOV, K. S. et al. A roadmap for graphene. *Reviews of Modern Physics*, v. 83, n. 3, p. 837–849, 2011.

RAO, C. N. R.; RAMAKRISHNA, M. H. S. S.; MAITRA, U. Graphene analogues of inorganic layered materials. *Angewandte Chemie International Edition*, v. 52, p. 13162–13185, 2013.

SOUZA, Anna Paula da Fonseca et al. Grafeno: uma revisão dos métodos de extração. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, São José dos Pinhais, v. 16, n. 10, p. 21266–21280, 2023.

TORRES, Fernando G.; TRONCOSO, Omar P.; RODRIGUEZ, Liset; DE-LA-TORRE, Gabriel E. Sustainable synthesis, reduction and applications of graphene obtained from renewable resources. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 29, e00310, 2021.

NANOMATERIAL FOTOLUMINESCENTE À BASE DE PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO APLICADO À OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Larissa de Sousa Mendonça: Mestranda, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Francisco Marcone Lima: Doutor, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Pierre Basílio Almeida Fechine: Doutor, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Francisco Nivaldo Aguiar Freire: Doutor, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Janaína Sobreira Rocha: Doutora, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial Do Ceará (Nutec).

Carla Freitas de Andrade: Doutora, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Resumo: A crescente demanda por fontes de energia limpa tem intensificado a busca por maior eficiência em células solares fotovoltaicas comerciais. Apesar da ampla utilização e dos avanços tecnológicos dos módulos à base de silício, ainda existem limitações inerentes à conversão eficiente de todo o espectro solar em eletricidade. Nesse cenário, os pontos quânticos de carbono (CQDs), nanomateriais com propriedades fotoluminescentes, surgem como uma alternativa promissora para mitigar essas restrições e promover ganhos de desempenho. Para que atuem de forma eficaz, é fundamental sua incorporação em uma matriz que assegure dispersão homogênea, mantenha suas propriedades ópticas e contribua para a melhoria da eficiência dos dispositivos. Contudo, a aplicação prática dos CQDs em matrizes ainda representa um desafio relevante. Assim, este trabalho investigou a incorporação de CQDs em resina ultravioleta (UV) para impressão 3D, sendo observado, após os testes, um aprimoramento nos resultados da curva corrente-tensão (I-V).

Palavras-chave: Células Fotovoltaicas; Carbon Quantum Dots; Nanomateriais.

1 Introdução

A necessidade de migrar para uma matriz elétrica sustentável em escala global decorre tanto da limitação dos combustíveis fósseis quanto do agravamento da crise climática. Conforme destacado por Kirk (2025), a radiação ultravioleta (UV) não é efetivamente convertida em eletricidade devido ao fenômeno de descasamento espectral (spectral mismatch). Como alternativa a essa limitação, destacam-se os Pontos Quânticos de Carbono (Carbon Quantum Dots - CQDs), nanomateriais fotoluminescentes capazes de promover a conversão espectral da luz por meio do mecanismo de down-shifting (MASAADEH, 2022). Na prática, os CQDs absorvem fótons de maior energia na faixa do UV e os reemitem em comprimentos de onda mais longos, situados na região visível, onde o silício apresenta maior sensibilidade. Esse processo de “conversão” da luz contribui para o aumento da eficiência global do sistema fotovoltaico (VERCELLI, 2021). Além disso, em comparação com outros materiais conversores, os CQDs apresentam vantagens como baixa toxicidade e custo reduzido de produção. Contudo, por se apresentarem na forma líquida após a síntese, torna-se necessário o desenvolvimento de matrizes poliméricas de encapsulamento que permitam sua solidificação sobre superfícies, viabilizando seu desempenho funcional esperado.

2 Objetivo

Investigar o potencial da aplicação de células solares associadas a esse nanomaterial fotoluminescente, incorporando CQDs em uma matriz de resina UV utilizada em impressão 3D. A avaliação concentra-se em parâmetros elétricos como potência no ponto de máxima potência (MPP), tensão de circuito aberto (Voc), corrente de curto-circuito (Isc) e fator de forma (FF), buscando estabelecer relações entre a morfologia do filme formado e a qualidade da curva corrente-tensão (I-V) obtida.

3 Metodologia

Uma matriz acilada curável por UV foi preparada com 1 mL de CQD hidrofóbico e 2 mL de resina UV, além de uma amostra controle com 100% resina. As misturas foram depositadas na célula solar via *doctor blade* e fotopolimerizadas por 20 minutos sob luz UV, formando um filme fino, sólido e transparente. A validação experimental utilizou um sistema com suportes de vidro, fonte UV e potenciostato Metrohm Autolab PGSTAT302N (software Nova 1.11), permitindo obter curvas I-V. A célula sem recobrimento foi usada como referência, e para cada amostra determinou-se o ponto de máxima potência (MPP) por varredura de potencial.

4 Resultados e Discussão

A amostra de Resina UV + CQD atingiu um MPP de 4,85 mW, representando um salto de aproximadamente 73% em relação à potência original da célula de referência (2,80 mW). Observou-se um incremento em todos os parâmetros elétricos, indicando que o material facilitou processos de conversão espectral e acoplamento óptico. O aumento do fator de forma para 72,21% evidencia uma redução nas perdas resistivas e uma melhoria na qualidade da coleta de portadores.

5 Conclusão

Este estudo demonstrou a viabilidade técnica do uso de Carbon Quantum Dots para aumento da eficiência fotovoltaica via Luminescent Down-Shifting. A análise comparativa com células fotovoltaicas sem CQDs demonstrou benefícios potenciais desse nanomaterial luminescente para melhoria da eficiência.

6 Referências

CURRAN, S. J. et al. Properties of carbopol solutions as models for yield-stress fluids. *Journal of food science*, v. 67, n. 1, p. 176-180, 2002.

HO, Wen-Jeng; LIU, Jheng-Jie; KE, Bo-Xun. Characterization of Luminescent Down-Shifting Spectral Conversion Effects on Silicon Solar Cells with Various Combinations of Eu-Doped Phosphors. *Materials*, v. 15, n. 2, p. 452, 2022.

KIRK, Alexander P. What is the efficiency limit of a single-junction silicon solar cell?. Applied Physics Letters, v. 127, n. 18, 2025.

MASAADEH, Qais; KAPLANI, Eleni; CHAO, Yimin. Luminescent downshifting silicon quantum dots for performance enhancement of polycrystalline silicon solar cells. Electronics, v. 11, n. 15, p. 2433, 2022.

VERCELLI, Barbara. The role of carbon quantum dots in organic photovoltaics: a short overview. Coatings, v. 11, n. 2, p. 232, 2021.

NANOMATERIAIS NO TRATAMENTO DE ÁGUA: APLICAÇÕES EMERGENTES E LIMITAÇÕES TECNOLÓGICAS

Paula Luciana Rodrigues de Sousa: Doutora, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Erilândia Sousa da Silva: Graduada, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Christiane Gomes da Silva Gurgel: Graduada, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Ari Clecius Alves de Lima: Doutor, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Rosa Ferreira Araújo de Abreu: Doutora, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Antonia Fádía Valentim de Amorim: Doutora em Química, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Resumo: A nanotecnologia tem se destacado como abordagem promissora no tratamento de água frente a desafios como contaminação por metais pesados, micropoluentes e patógenos. Este estudo objetiva analisar avanços recentes e aplicações emergentes dessa tecnologia. A metodologia baseou-se em revisão bibliográfica de publicações recentes. Os resultados indicam que nanomateriais, como nanoadsorventes, nanomembranas e nanopartículas fotocatalíticas, apresentam elevada eficiência na remoção de contaminantes e na otimização de processos de separação. Além disso, nanosensores possibilitam monitoramento em tempo real da qualidade da água. Contudo, limitações como custos, escalabilidade e impactos ambientais ainda persistem. Conclui-se que a nanotecnologia possui elevado potencial para inovação no setor hídrico, desde que associada a práticas sustentáveis e economicamente viáveis.

Palavras-chave: Nanotecnologia; Tratamento de água; Nanomateriais; Nanofiltração.

1 Introdução

A crescente escassez de água potável e o aumento da poluição hídrica têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias avançadas de tratamento, entre as quais a nanotecnologia se destaca como uma das mais promissoras (IRAVANI, 2021; HUSSEIN et al., 2025). Essa abordagem permite a manipulação de materiais em escala nanométrica, conferindo propriedades únicas, como elevada área superficial e alta reatividade, que favorecem processos de purificação mais eficientes.

Nos últimos anos, diversos estudos têm evidenciado o potencial dos nanomateriais na remoção de contaminantes, incluindo metais pesados, compostos orgânicos e patógenos (ELHENAWY et al., 2024; OLAWADE et al., 2024). Esses materiais apresentam vantagens significativas em relação às tecnologias convencionais, como maior seletividade e eficiência, além de menor consumo energético.

Adicionalmente, avanços recentes incluem o desenvolvimento de nanomateriais multifuncionais e sustentáveis, bem como a integração com técnicas emergentes, como inteligência artificial e modelagem computacional, visando otimizar o desempenho em sistemas reais (TRIPATHY et al., 2024; OMER et al., 2025). Apesar disso, desafios relacionados à viabilidade econômica e aos impactos ambientais ainda demandam investigação contínua (JACKSON et al., 2025; PILLAI et al., 2023).

2 Objetivo

Analisar os avanços recentes e as aplicações emergentes da nanotecnologia no tratamento de água, destacando suas potencialidades, limitações e perspectivas de aplicação.

3 Metodologia

O presente estudo consiste em uma revisão bibliográfica baseada na análise de artigos científicos publicados entre 2020 e 2025 em bases de dados internacionais. Foram selecionados trabalhos relevantes sobre a aplicação de nanomateriais no tratamento de água, considerando critérios como atualidade, relevância científica e aplicabilidade tecnológica.

A análise contemplou diferentes classes de nanomateriais, incluindo nanoadsorventes, nanomembranas, nanopartículas fotocatalíticas e nanosensores, bem como seus mecanismos de atuação, como adsorção, filtração e degradação catalítica (POORNIMA et al., 2022; ALSHEHRI et al., 2024). Também foram considerados aspectos relacionados à sustentabilidade, custo e escalabilidade.

4 Resultados e Discussão

Os estudos analisados demonstram que os nanoadsorventes apresentam elevada eficiência na remoção de contaminantes, especialmente metais pesados, devido à sua alta área superficial e capacidade de funcionalização (OLAWADE et al., 2024; HUSSEIN et al., 2025). Materiais como óxidos metálicos, grafeno e nanocompósitos híbridos têm sido amplamente investigados e apresentam resultados promissores.

As nanomembranas, particularmente aquelas baseadas em grafeno e nanotubos de carbono, destacam-se por sua elevada permeabilidade e seletividade, contribuindo para maior eficiência em processos como nanofiltração e dessalinização (ELHENAWY et al., 2024; IRAVANI, 2021). Essas tecnologias apresentam potencial para reduzir o consumo energético e aumentar a eficiência operacional.

A fotocatalise heterogênea com nanopartículas, como TiO_2 e nanopartículas metálicas, tem se mostrado eficaz na degradação de poluentes orgânicos emergentes, incluindo fármacos e pesticidas (KRISHNA et al., 2024; SANNI, 2025). Esse processo se destaca por sua capacidade de mineralizar compostos complexos, contribuindo para a melhoria da qualidade da água.

Outro avanço relevante é o uso de nanosensores, que permitem o monitoramento em tempo real da qualidade da água com alta sensibilidade e seletividade, favorecendo sistemas inteligentes de gestão hídrica (GUDANIYAN et al., 2024; OMER et al., 2025).

Apesar dos avanços, persistem desafios relacionados à produção em larga escala, estabilidade dos nanomateriais e possíveis impactos ambientais e toxicológicos, especialmente associados à liberação de nanopartículas no meio ambiente (JACKSON et al., 2025; HUSSEIN et al., 2025).

5 Conclusão

A nanotecnologia apresenta elevada eficiência no tratamento de água, ampliando a remoção de contaminantes e otimizando processos convencionais por meio do uso de nanomateriais com propriedades avançadas. As nanomembranas e nanopartículas demonstram alto desempenho em diferentes aplicações, enquanto os nanosensores contribuem significativamente para o monitoramento em tempo real da qualidade hídrica. Apesar dos avanços, ainda persistem limitações relacionadas à viabilidade econômica, escalabilidade e segurança ambiental. Assim, a nanotecnologia revela grande potencial para aplicações sustentáveis no setor hídrico, desde que acompanhada de investimentos em pesquisa voltados à redução de custos e mitigação de impactos ambientais.

6 Referências

- ALSHEHRI, H. S. et al. Recent advances in nanomaterial-based wastewater treatment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2024.
- DAVID, M. et al. Biowaste-derived nanomaterials for sustainable water treatment. *Springer Nature*, 2026.
- ELHENAWY, S. et al. Emerging nanomaterials for drinking water purification. *Nanomaterials*, v. 14, n. 21, 2024.
- GUDANIYAN, J. et al. Nanotechnology-enabled solutions for water purification. *E3S Web of Conferences*, 2024.
- HUSSEIN, E. B. et al. Emerging nanotechnology approaches for sustainable water treatment. *RSC Advances*, 2025.
- IRAVANI, S. Nanomaterials and nanotechnology for water treatment. *Environmental Technology & Innovation*, v. 22, 2021.
- JACKSON, J. S. et al. Assessment of the role of nanotechnology in water sector. *Discover Nano*, 2025.
- KRISHNA, S. B. N. et al. Silver nanoparticles for eco-friendly water remediation. *Environmental Nanotechnology*, 2024.
- OLAWADE, D. B. et al. Metal and metal oxide nanomaterials for heavy metal removal. *Frontiers in Nanotechnology*, 2024.
- OMER, S. N. et al. Advances in nanotechnology for wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 2025.
- POORNIMA, S. et al. Emerging nanotechnology-based techniques for wastewater treatment. *Chemosphere*, 2022.
- SALEEM, H.; ZAIDI, S. J. Developments in the application of nanotechnology in water treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020.
- SANNI, S. E. Advances in nanotechnology for water treatment. *Frontiers in Nanotechnology*, 2025.
- TRIPATHY, J. et al. Advances in nanoparticles and nanocomposites for water treatment. *Water*, v. 16, 2024.

VAIDH, S. et al. Recent progress in nanotechnology for water purification. *Journal of Water Process Engineering*, 2022.

O IMPACTO DOS MICRO E NANOPLÁSTICOS NO ORGANISMO HUMANO

Patrícia Mendes Barroso: Pós-graduanda, Universidade Estadual do Ceará (UECE), Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Paula Luciana Rodrigues de Sousa: Doutora, Universidade Federal do Ceará (UFC). Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Carla Bastos Vidal: Doutora, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Ari Clecius Alves de Lima: Doutor, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Antônia Fádá Valentim de Amorim: Doutora, Universidade Estadual do Ceará (UECE), Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Resumo: A contaminação por microplásticos (MPs) e nanoplásticos (NPs) representa uma ameaça crescente à saúde pública global. Este estudo realiza uma revisão sistemática, baseada no protocolo PRISMA, focando na translocação dessas partículas para o organismo humano e seus efeitos patológicos. Os resultados confirmam a exposição crônica via ingestão, inalação e absorção dérmica. A detecção em sangue, pulmões, placenta e leite materno comprova que as barreiras biológicas são permeáveis, especialmente aos NPs. Os riscos à saúde humana incluem estresse oxidativo severo, respostas inflamatórias sistêmicas, genotoxicidade e o potencial de disrupção endócrina por aditivos químicos. Conclui-se que a onipresença dos plásticos em matrizes biológicas exige uma reavaliação urgente dos limites de segurança toxicológica.

Palavras-chave: Microplásticos; Nanoplásticos; Toxicologia Humana; Disrupção Endócrina; Saúde Pública.

1 Introdução

A produção global de plásticos resultou na onipresença de microplásticos (1 μ m a 5 mm) e nanoplásticos (< 1 μ m) em praticamente todos os ecossistemas (BARBOZA et al., 2018). Mais do que um problema estético ou ambiental, esses contaminantes alcançaram a teia alimentar humana, tornando a exposição inevitável (ROCHMAN et al., 2019). A detecção recente dessas partículas em matrizes biológicas nobres, como o sangue humano e tecidos pulmonares, levanta alertas sobre a bioacumulação e os efeitos citotóxicos a longo prazo, desafiando a compreensão anterior sobre a inércia desses materiais no corpo humano (LESLIE et al., 2022; COX et al., 2019).

2 Objetivo

Analisar os mecanismos de exposição humana a MPs e NPs, com ênfase na identificação dos impactos fisiopatológicos e nos riscos toxicológicos decorrentes da interação dessas partículas com o metabolismo humano.

3. Metodologia

A presente revisão sistemática foi conduzida com base nas diretrizes do protocolo PRISMA (PAGE et al., 2021), visando investigar a ocorrência de micro e nanoplásticos e seus impactos na saúde humana. O levantamento bibliográfico foi realizado de forma abrangente nas bases de dados Scopus, Web of Science, PubMed e Google Scholar, abrangendo publicações entre 2004 e 2025. Foram aplicados critérios de inclusão rigorosos para selecionar artigos originais e estudos epidemiológicos que apresentassem dados quantitativos sobre vias de exposição (ingestão e inalação) e mecanismos toxicológicos. A análise técnica centrou-se na caracterização dos polímeros e nos métodos de detecção, como μ -FTIR e μ -Raman (GIGAULT et al., 2018), enquanto a qualidade das evidências foi avaliada mediante uma adaptação do instrumento GRADE, assegurando a sistematização das lacunas científicas e dos riscos sistêmicos identificados.

4.1 Vias de Ingestão e Translocação Sistêmica

A ingestão alimentar é a via predominante de entrada de MPs e NPs no organismo. Partículas foram quantificadas em itens básicos como sal, água potável, frutos do mar e produtos agrícolas, levando a uma estimativa de consumo anual que ultrapassa centenas de milhares de partículas por indivíduo (COX et al., 2019). Uma vez ingeridas ou inaladas, as partículas enfrentam as defesas biológicas. Entretanto, evidências recentes demonstram que as barreiras naturais são permeáveis:

- **Barreira Placentária:** A detecção de partículas na placenta humana (RAGUSA et al., 2021) sugere que o desenvolvimento fetal pode estar exposto a contaminantes plásticos durante períodos críticos de formação organogênica.
- **Circulação Sanguínea:** A presença de polímeros no sangue (LESLIE et al., 2022) confirma que os MPs/NPs não são apenas excretados, mas translocam do trato gastrointestinal ou alvéolos pulmonares para a corrente sanguínea, atingindo órgãos distantes por meio da circulação sistêmica.

4.2 Mecanismos de Toxicidade e Riscos à Saúde

Os danos à saúde humana decorrentes dessa exposição são complexos e podem ser categorizados em três frentes principais:

1. **Toxicidade Física e Estresse Oxidativo:** A presença física das partículas em nível celular induz uma resposta imunológica de corpo estranho. Isso desencadeia a liberação de espécies reativas de oxigênio (EROs), gerando estresse oxidativo que danifica organelas e o DNA celular (GIGAULT et al., 2018).
2. **Disrupção Endócrina (Efeito Químico):** Os plásticos atuam como vetores de aditivos químicos. Substâncias como bisfenóis e ftalatos, lixiviados das partículas após a ingestão, são desreguladores hormonais que interferem na fertilidade e no equilíbrio metabólico (ROCHMAN et al., 2019).
3. **Inflamação Sistêmica e Pulmonar:** A inalação de microfibras suspensas, comum em ambientes internos, pode causar inflamação crônica nos tecidos pulmonares, semelhante à patologia observada em outras poeiras minerais ou sintéticas, podendo evoluir para quadros de fibrose ou redução da capacidade respiratória (DRIS et al., 2017).

4.3 Nanoplásticos: O Desafio da Escala Nanométrica

Os nanoplásticos (NPs) representam o maior risco toxicológico devido ao seu tamanho reduzido ($< 1 \mu\text{m}$). Diferente dos MPs, os NPs podem atravessar membranas celulares por endocitose e alcançar o citoplasma, interferindo diretamente em rotas metabólicas intracelulares (GIGAULT et al., 2018). A literatura sugere que essa fração nanométrica possui maior potencial para cruzar a barreira hematoencefálica, o que coloca o sistema nervoso central como um alvo potencial de toxicidade crônica (LESLIE et al., 2022).

5 Conclusão

As evidências científicas atuais confirmam que a exposição aos micro e nanoplásticos é um fator de risco crônico e onipresente para a saúde humana. A capacidade de translocação para o sangue e órgãos reprodutivos desmistifica a ideia de que o plástico seria inerte ao metabolismo. Os riscos de inflamação sistêmica, estresse oxidativo e disrupção endócrina exigem uma resposta urgente das autoridades sanitárias, focada na padronização de métodos analíticos e na criação de marcos regulatórios que mitiguem a ingestão e inalação desses contaminantes na rotina humana.

6 Referências

- BARBOZA, L. G. A. et al. Microplastics in the marine environment: scientific and regulatory challenges. **Environmental Science & Technology**, v. 52, n. 18, p. 10230-10239, 2018.
- COX, K. D. et al. Human consumption of microplastics. **Environmental Science & Technology**, v. 53, n. 12, p. 7068-7074, 2019.
- DRIS, R. et al. Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the terrestrial environment? **Science of the Total Environment**, v. 574, p. 316-326, 2017.
- GIGAULT, J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? **Environmental Pollution**, v. 235, p. 1030-1034, 2018.
- LESLIE, H. A. et al. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. **Environment International**, v. 163, p. 107199, 2022.
- PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n. 71, 2021.
- RAGUSA, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. **Environment International**, v. 146, p. 106274, 2021.
- ROCHMAN, C. M. et al. Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 38, n. 4, p. 703-711, 2019.

NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA (Fe₃O₄) FUNCIONALIZADAS COM ONCOCALIXONA-A PARA APLICAÇÕES TERAPÊUTICAS ANTICÂNCER

Ana Rute Souza Ferreira: Universidade Federal do Ceará, (UFC).

Gabriel Érik Patrício de Almeida: Universidade Federal do Ceará (UFC).

Alexandre Carreira da Cruz Sousa: Instituto Federal do Ceará (UFC).

Nágila Maria Pontes Silva Ricardo: Universidade Federal do Ceará (UFC).

Otilia Deusdênia Loiola Pessoa: Universidade Federal do Ceará (UFC).

Resumo: O câncer é um dos principais desafios de saúde pública mundial, caracterizado pelo crescimento celular descontrolado e pela dificuldade de tratamentos seletivos, frequentemente associados a efeitos colaterais severos. Nesse cenário, a nanotecnologia avança na área biomédica através do desenvolvimento de nanocarreadores para liberação controlada de fármacos. Este estudo propõe a síntese e funcionalização de nanopartículas de magnetita (Fe₃O₄) com o composto natural Oncocalixona-A, visando o sinergismo termo-quimioterápico. As nanopartículas foram obtidas por coprecipitação e estabilizadas com citrato de sódio para garantir estabilidade coloidal. A caracterização por FTIR confirmou a ancoragem do bioativo através de bandas características de grupos carbonílicos, aromáticos e fenólicos, enquanto o TGA comprovou a presença da carga orgânica. Análises de DLS revelaram diâmetro de 72,85 nm e PDI de 0,306, indicando um sistema homogêneo e promissor. Ressalta-se que o estudo segue em desenvolvimento, com etapas de avaliação biológica em andamento para consolidar sua eficácia contra células tumorais.

Palavras-chave: Magnetita; Oncocalixona-A; Nanotecnologia; Câncer

1 Introdução

O câncer permanece como uma das principais causas de mortalidade mundial, sendo caracterizado pela proliferação celular desordenada e pelas limitações das terapias convencionais, frequentemente associadas à baixa seletividade e efeitos adversos sistêmicos (World Health Organization, 2025). Nesse contexto, a nanotecnologia destaca-se como uma estratégia promissora para otimizar a entrega de fármacos, permitindo maior controle de liberação, aumento da biodisponibilidade e melhor direcionamento terapêutico (BEGUINES et al., 2020). Além disso, o uso de biopolímeros naturais, como polissacarídeos, tem ganhado relevância devido à sua biocompatibilidade, biodegradabilidade e baixa toxicidade (FAZAL et al., 2023). Assim, este trabalho propõe o desenvolvimento de nanocarreadores a partir da mucilagem de melão como matriz polimérica, visando superar limitações associadas ao uso de fármacos com ação anticâncer, especialmente quanto à estabilidade, liberação controlada e biodisponibilidade.

2 Objetivo

Sintetizar nanopartículas de magnetita funcionalizadas com o bioativo Oncocalixona-A, via reação de coprecipitação, realizando a caracterização físico-química, estrutural e de estabilidade coloidal do sistema.

3 Metodologia

As nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) foram sintetizadas pelo método de coprecipitação química a partir de sais de Fe^{2+} e Fe^{3+} (CHEN, 2013). Para conferir dispersão em meio aquoso, realizou-se o recobrimento superficial com citrato de sódio ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Cit}$), técnica utilizada para otimizar a estabilidade de suspensões (WANG et al., 2025). Posteriormente, procedeu-se à funcionalização com o bioativo fenólico Oncocalixona-A ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Cit-Onco}$). A confirmação estrutural foi realizada por Espectroscopia de Absorção na Região do Infravermelho (FTIR) e a estabilidade térmica por Termogravimetria (TGA). As propriedades coloidais, incluindo tamanho hidrodinâmico, índice de polidispersidade (PDI) e potencial zeta, foram determinadas por Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS) (ALI et al., 2019).

4 Resultados e Discussão

O espectro FTIR confirmou a fase magnética e o sucesso do recobrimento com citrato. Na amostra funcionalizada ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Cit-Onco}$), observou-se o surgimento de bandas vibracionais características da Oncocalixona-A, como estiramentos de carbonila conjugada e anéis aromáticos, comprovando a ancoragem química do constituinte natural. As curvas de TGA corroboraram esses dados, apresentando uma perda de massa adicional em relação à magnetita pura, correspondente à degradação da fração orgânica ancorada. Pela técnica de DLS, a amostra $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Cit}$ apresentou diâmetro de 98,92 nm. Após a funcionalização com a Oncocalixona-A, o tamanho hidrodinâmico médio reduziu para 72,85 nm com PDI de 0,306, sugerindo que a presença do bioativo favoreceu uma organização superficial mais compacta e homogênea. O potencial zeta de $-15,4$ mV, embora inferior ao da amostra apenas com citrato ($-22,01$ mV), ainda indica uma superfície carregada o suficiente para manter a estabilidade coloidal satisfatória em suspensão.

5 Conclusão

Os resultados demonstram o sucesso na síntese da magnetita e sua funcionalização sequencial com citrato e Oncocalixona-A. A confirmação espectroscópica e térmica da ancoragem, aliada à otimização dos parâmetros de tamanho e polidispersidade obtidos, indica que o nanossistema possui as características físico-químicas necessárias para avançar para testes de atividade biológica voltados à inibição do desenvolvimento de estruturas tumorais.

6 Referências

ALI, Saja H. et al. Fabrication of hesperidin nanoparticles loaded by poly lactic co-Glycolic acid for improved therapeutic efficiency and cytotoxicity. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology*, v. 47, n. 1, p. 378-394, 2019. FAZAL, T.; MURTAZA, B. N.; SHAH, M.; IQBAL, S.; REHMAN, M. U.; JABER, F.; DERA, A. A.; AWWAD, N. S.; IBRAHIUM, H. A. *Recent developments in natural biopolymer based drug delivery systems*. *RSC Advances*, v. 13, n. 33, p. 23087–23121, 2023. DOI: 10.1039/d3ra03369d.

ARDELEAN, I. L. et al. Development of stabilized magnetite nanoparticles for medical applications. *Journal of Nanomaterials*, v. 2017, p. 6514659, 2017.

CHEN, Y. H. Thermal properties of nanocrystalline goethite, magnetite, and maghemite. Journal of Alloys and Compounds, v. 553, p. 194-198, 2013.

SOUSA, Alexandre CC et al. Starch-based magnetic nanocomposite for targeted delivery of hydrophilic bioactives as anticancer strategy. Carbohydrate Polymers, v. 264, p. 118017, 2021.

WANG, Y. et al. Hydrothermal carbonization of combined sodium citrate-thermal pretreated sewage sludge for the production of low-nitrogen clean solid fuels. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 187, p. 106987, 2025.

NANOCÁPSULA DERIVADA DA MUCILAGEM DA SEMENTE DO MELÃO (*Cucumis Melo L.*) PARA O CARREAMENTO DE FÁRMACO ANTICÂNCER

João Cristian Araújo Lucena: Graduando, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Cristine Soares Vidal de Menezes: FALTA A TITULAÇÃO

Francisco Alessandro Marinho Rodrigues: FALTA A TITULAÇÃO

Nágila Maria Pontes Silva Ricardo: FALTA A TITULAÇÃO (Orientador).

Resumo: O câncer é um dos principais desafios de saúde pública mundial, caracterizado pelo crescimento descontrolado de células e pela dificuldade de tratamentos eficazes e seletivos, muitas vezes associados a efeitos colaterais significativos. Nesse contexto, a nanotecnologia tem avançado na área biomédica por meio do desenvolvimento de nanocarreadores para liberação controlada de fármacos. Este estudo propõe a síntese de nanocápsulas por miniemulsão inversa utilizando mucilagem da semente do melão (*Cucumis melo L.*), rica em heteropolissacarídeos, como matriz polimérica natural e residual. Esses polissacarídeos foram extraídos e caracterizados estruturalmente. Ressalta-se que o estudo se encontra em desenvolvimento, com parte das análises e resultados em andamento.

Palavras-chave: Câncer; Mucilagem; Nanocápsula; Biodisponibilidade

1 Introdução

O câncer permanece como uma das principais causas de mortalidade mundial, sendo caracterizado pela proliferação celular desordenada e pelas limitações das terapias convencionais, frequentemente associadas à baixa seletividade e efeitos adversos sistêmicos (World Health Organization, 2025). Nesse contexto, a nanotecnologia destaca-se como uma estratégia promissora para otimizar a entrega de fármacos, permitindo maior controle de liberação, aumento da biodisponibilidade e melhor direcionamento terapêutico (BEGUINES et al., 2020). Além disso, o uso de biopolímeros naturais, como polissacarídeos, tem ganhado relevância devido à sua biocompatibilidade, biodegradabilidade e baixa toxicidade (FAZAL et al., 2023). Assim, este trabalho propõe o desenvolvimento de nanocarreadores a partir da mucilagem de melão como matriz polimérica, visando superar limitações associadas ao uso de fármacos com ação anticâncer, especialmente quanto à estabilidade, liberação controlada e biodisponibilidade.

2 Objetivo

Desenvolver e caracterizar sistema nanoestruturado obtido por miniemulsão inversa, utilizando a mucilagem do melão (*Cucumis melo L.* var. inodorus) como matriz polimérica natural, visando ao encapsulamento de fármacos hidrofílicos com ação anticâncer.

3 Metodologia

A mucilagem foi isolada a partir das sementes de *Cucumis melo* L. var. inodorus utilizando extração aquosa a quente e posterior liofilização. O material obtido foi caracterizado por FTIR, RMN e tamanho de partícula (DLS). As nanocápsulas foram sintetizadas por miniemulsão inversa, com emulsificação assistida por ultrassom (sonifier). Os nanossistemas foram caracterizadas quanto ao tamanho de partícula e índice de polidispersão por DLS.

4 Resultados e Discussão

Os resultados de FTIR evidenciaram bandas características de grupos funcionais compatíveis com a reação com o agente reticulante (TDI), com bandas largas em 3400cm^{-1} , típicas para ligações de hidrogênio em grupos hidroxilas (-OH) (JAYACHANDRAN et al., 2022). Os nanossistemas obtidos apresentaram tamanho médio de 267,5 nm e PDI de 0,198 em ciclohexano, enquanto em solução de SDS apresentaram tamanho de 197,5 nm e PDI 0,253. Estes resultados de tamanho indicam distribuição relativamente homogênea e adequação para continuação dos estudos posteriores.

5 Conclusão

O estudo indica que a mucilagem de *Cucumis melo* L. var. inodorus apresenta potencial como matriz polimérica para a obtenção de nanocápsulas. Os sistemas sintetizados mostraram tamanho nanométrico e distribuição promissoras para continuação do estudo em aplicações biomédicas. A análise por FTIR sugere a presença de grupos funcionais compatíveis com cross-linking. Além disso, o método de miniemulsão inversa demonstra potencial viabilidade para a produção dos nanossistemas mais estáveis e biocompatíveis.

6 Referências

- BEGINES, B.; ORTIZ, T.; PÉREZ-ARANDA, M.; MARTÍNEZ, G.; MERINERO, M.; ARGÜELLES-ARIAS, F.; ALCUDIA, A. *Polymeric nanoparticles for drug delivery: recent developments and future prospects*. Nanomaterials, Basel, v. 10, n. 7, p. 1403, 2020. DOI: 10.3390/nano10071403.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Cancer*. 2025. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cancer>. Acesso em: 11 abr. 2026.
- FAZAL, T.; MURTAZA, B. N.; SHAH, M.; IQBAL, S.; REHMAN, M. U.; JABER, F.; DERA, A. A.; AWWAD, N. S.; IBRAHIUM, H. A. *Recent developments in natural biopolymer based drug delivery systems*. RSC Advances, v. 13, n. 33, p. 23087–23121, 2023. DOI: 10.1039/d3ra03369d.
- MUTHONI, A.; ANYANGO, A.; WANJALA, H. V. *Mucilage-based nanocarriers for targeted cancer therapy: design, functionalization, and therapeutic potential*. Drug Development and Industrial Pharmacy, v. 51, n. 11, p. 1439–1461, 2025. DOI: 10.1080/03639045.2025.2542467.
- JAYACHANDRAN, B.; PARVIN, T. N.; ALAM, M. M.; CHANDA, K.; MM, B. *Insights on chemical crosslinking strategies for proteins*. Molecules, v. 27, n. 23, p. 8124, 2022. DOI: 10.3390/molecules27238124.

SÍNTESE DE SISTEMAS NANOESTRUTURADOS À BASE DE MUCILAGEM DE CHIA (*SALVIA HISPANICA L.*) PARA ENTREGA DE FÁRMACOS HIDROFÍLICOS

Sâmia Silva Viana: Graduando, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Francisco Alessandro Marinho Rodrigues: Doutor, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Cristine Soares Vidal de Menezes: Mestre, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Nágila Maria Pontes Silva Ricardo: Doutor, Universidade Federal do Ceará (UFC) (Orientador).

Resumo: A nanotecnologia vem se sobressaindo no campo biomédico, principalmente na criação de nanocarreadores. O uso da miniemulsão inversa permite criar nanocápsulas que não só são estáveis e biocompatíveis, como também protegem de modo eficaz fármacos hidrofílicos e controlam sua liberação no organismo. Neste estudo foi utilizado a mucilagem da chia (*Salvia hispanica L.*) que possui diversos heteropolissacarídeos em sua composição, como matriz polimérica para a síntese de nanoestruturas para o carregamento e liberação de fármacos hidrofílicos anticâncer. A mucilagem foi extraída a quente em meio básico e o nanossistema sintetizado por técnica de miniemulsão inversa. As nanocápsulas sintetizadas apresentaram tamanho médio de 257,1 nm e baixo índice de polidispersão ($PDI = 0,205$), evidenciando uma distribuição uniforme e satisfatória para sistemas de liberação controlada.

Palavras-chave: Mucilagem; Nanocápsula; Liberação controlada.

1 Introdução

Os nanomateriais têm emergido como ferramentas promissoras devido às suas propriedades únicas, que permitem sua aplicação em diversas frentes (LANDFESTER, 2009). A síntese de nanomateriais para aplicações biomédicas pode ser realizada por diferentes técnicas, sendo a polimerização em emulsão e miniemulsão amplamente utilizada para a produção de nanopartículas e nanocápsulas com tamanho e morfologia controlados (PIRADASHVILI, K., 2016). Nos últimos anos, hidrocoloides naturais, como gomas e mucilagens, têm despertado crescente interesse como alternativas aos polímeros sintéticos na produção de nanomateriais. A mucilagem apresenta uma composição química complexa, sendo constituída majoritariamente por heteropolissacarídeos formados por diferentes monossacarídeos (LA CAVA, 2024, SCHÖTTLER, S., 2016). Dessa forma, esta pesquisa tem como objetivo a síntese de sistemas nanoestruturados por meio da técnica de miniemulsão inversa, utilizando a mucilagem de semente de chia como matriz polimérica natural. Esses nanossistemas serão projetados para o encapsulamento de fármacos hidrofílicos, com o propósito de proteger os ativos frente a condições adversas, promover sua liberação controlada e potencializar suas ações terapêuticas.

2 Objetivo

Desenvolver e caracterizar sistemas nanoestruturados obtidos por miniemulsão inversa, utilizando a mucilagem semente de chia.

3 Metodologia

A mucilagem de chia foi extraída utilizando meio tamponado pH 8,0 sob aquecimento e ultrassom. Após filtração e centrifugação, o sobrenadante foi precipitado com etanol e o precipitado foi recuperado por centrifugação, dialisado em água destilada e liofilizado. A nanocápsula por técnica de miniemulsão foi preparada utilizando mucilagem de chia como fase dispersa e PGPR em ciclohexano como fase contínua. A mistura foi sonicada (70% amplitude, 3 min, ciclo de 20s/10s) em banho de gelo. Em seguida, adicionou-se por gotejamento uma solução de TDI em ciclohexano sob agitação à temperatura ambiente. A reação de reticulação foi mantida por 24 horas. A purificação foi realizada por centrifugações sucessivas com ciclohexano. Por fim, as nanocápsulas foram redispersas em solução de SDS sob ultrassom e agitação por 24 h.

4 Resultados e Discussão

As nanoemulsões obtidas a partir da mucilagem de chia reticulada por TDI foram caracterizadas por DLS antes e após a redispersão em SDS. Na formulação com as nanocápsulas reticuladas com TDI observou-se tamanho médio de 276,6 nm e índice de polidispersão (PDI) de 0,191, indicando uma população homogênea e bem distribuída. Após a redispersão das nanocápsulas em solução de SDS, observou-se tamanho de partícula de 209,2 nm e PDI 0,240. A redução no diâmetro médio em relação às formulações não redispersas pode ser atribuída à quebra de agregados ou à reorganização das partículas na presença do tensoativo, sugerindo que o processo de purificação promoveu pequena alteração na distribuição das partículas, ainda assim mantendo-se em faixa considerada adequada para sistemas de liberação controlada (CHALI, 2024).

5 Conclusão

Diante disso, os resultados mostraram que foi possível obter nanocápsulas de tamanho nanométricas com boa homogeneidade. Indicando que essa distribuição uniforme tem potencial como nanossistemas para liberação controlada de fármacos hidrofílicos.

6 Referências

- CHALI, S. P.; KANG, J.; FICHTER, M.; SPETH, K. R.; MAILÄNDER, V.; LANDFESTER, K. Interfacial Denaturation at the Droplet Simplifies the Formation of Drug-Loaded Protein Nanocapsules to Enhance Immune Response of Cells. **Adv. Science**.2024, 11, 2403668.
- LA CAVA, E.; DI CLEMENTE, N. A.; GERBINO, E.; SGROPPO, S.; GOMEZ-ZAVAGLIA, A. Encapsulation of lactic acid bacteria in W1/O/W2 emulsions stabilized by mucilage: pectin complexes. **Food Research International**, v. 180, p. 114076, 2024.
- LANDFESTER, K. Miniemulsion polymerization and the structure of polymer and hybrid nanoparticles. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 48, n. 25, p. 4488-4507, 2009.
- PIRADASHVILI, K.; ALEXANDRINO, E. M.; WURM, F. R.; LANDFESTER, K. Reactions and polymerizations at the liquid-liquid interface. **Chemical reviews**, v. 116, n. 4, p. 2141-2169, 2016.

SCHÖTTLER, S.; LANDFESTER, K.; MAILÄNDER, V. Controlling the stealth effect of nanocarriers through understanding the protein corona. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 55, n. 31, p. 8806-8815, 2016.

SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS DE MANGANÊS-ALBUMINA PARA ESTABILIZAÇÃO DE COACERVADOS À BASE DE AMIOSE MODIFICADA POR SEPARAÇÃO DE FASE LÍQUIDO-LÍQUIDO

Cristine Soares Vidal de Menezes: Mestre, Universidade Federal do Ceará.

Francisco Alessandro Marinho Rodrigues: Doutor, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Nágila Maria Pontes Silva Ricardo: Doutor, Universidade Federal do Ceará (UFC) (Orientador).

Resumo: Coacervados são sistemas coloidais formados pela separação de fases em um mesmo solvente, gerando uma fase densa e outra diluída. Apesar de seu potencial como modelos biomiméticos de organelas e células, a ausência de membrana compromete sua estabilidade, exigindo o uso de agentes estabilizantes. Neste trabalho, foram desenvolvidas nanopartículas de óxido de manganês estabilizadas por albumina sérica bovina (BSA-MnO₂) para estabilizar coacervados formados por amilose quaternizada (AmQ) e carboximetilamilose (AmC). As amiloses foram sintetizadas em meio alcalino, apresentando graus de substituição de 0,62 (AmQ) e 0,55 (AmC), e potenciais zeta de +42,0 mV e -34,4 mV, respectivamente. Os coacervados foram preparados a 5 mg/mL, na proporção de 1,45:1 (AmC:AmQ). As nanopartículas BSA-MnO₂ apresentaram tamanho médio de 81 nm e potencial zeta de -30,9 mV. Ensaios de estabilização indicaram preservação da integridade, tamanho e morfologia dos coacervados, demonstrando o potencial dessas nanopartículas como agentes estabilizantes em sistemas biomiméticos.

Palavras-chave: Coacervados; Amilose; Sistemas biomiméticos.

1 Introdução

Os coacervados são condensados líquidos formados por separação de fases líquido-líquido (LLPS, *Liquid-Liquid Phase Separation*), originando domínios enriquecidos em determinadas macromoléculas que estabelecem microambientes distintos do meio aquoso circundante¹. Esses condensados são promissores para a criação de estruturas miméticas de sistemas biológicos, microrreatores multicompartimentados e organelas artificiais (CAO et al., 2024, WANG et al., 2025).

No entanto, desafios como a estabilidade e o controle de tamanho ainda limitam sua biocompatibilidade e aplicabilidade em células vivas. Por meio de um mecanismo conhecido como estabilização *Pickering*, as nanopartículas (NP) criam uma barreira física que impede a fusão ou a agregação das gotas do coacervado (YEWDALL et al., 2021, ZHOU et al., 2024).

2 Objetivo

Sintetizar nanopartículas de óxido de manganês revestidas com albumina sérica bovina e avaliar seu uso como agentes estabilizantes em coacervados formados por amilose catiônica e aniônica.

3 Metodologia

A amilose foi quimicamente modificada em meio alcalino para obtenção de derivados aniônico (carboxilação, 70 °C por 2 h) e catiônico (cationização, 40 °C por 24 h), seguidos de diálise, liofilização e caracterização por RMN.

Em seguida, nanopartículas de MnO_2 revestidas com albumina sérica bovina (BSA) foram sintetizadas pela reação entre KMnO_4 e $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, com adição por gotejamento sob atmosfera de N_2 a 25 °C por 1 h. O material foi purificado por diálise e caracterizado quanto ao tamanho e potencial zeta.

Por fim, os coacervados foram preparados pela mistura das amiloses catiônica e aniônica em tampão HEPES (10 mM), seguida da adição de $\text{MnO}_2\text{@BSA}$. A estabilidade dos sistemas foi avaliada por microscopia invertida ao longo de 0 a 10 minutos.

4 Resultados e Discussão

O RMN de ^1H evidenciou graus de substituição de 1,28 (aniônica) e 1,82 (catiônica) confirmando a modificação das amiloses. As análises de DLS mostraram aumento do tamanho das nanopartículas de 37,01 nm (MnO_2) para 80,99 nm após revestimento com BSA, com potencial zeta de -30,9 mV, indicando boa estabilidade coloidal. As micrografias revelaram que, sem estabilizante, os coacervados perdem estabilidade ao longo do tempo, enquanto a adição de $\text{MnO}_2\text{@BSA}$ preserva sua estrutura, tamanho e morfologia, sendo esse efeito mais pronunciado com o aumento da concentração de nanopartículas (TOOR et al., 2023, CAO et al., 2024).

5 Conclusão

Os resultados indicam que as NP-BSA- MnO_2 são agentes promissores para aumentar a estabilidade dos coacervados poliméricos, reforçando seu potencial na composição de membranas estabilizadoras em sistemas biomiméticos.

6 Referências

- CAO, S.; IVANOV, T.; HEUER, J. et al. Dipeptide coacervates as artificial membraneless organelles for bioorthogonal catalysis. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 39, 2024.
- TOOR, R. et al. Enzymatic cascade reaction in simple-coacervates. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 629, p. 46–54, 2023.
- WANG, C.; SHANG, L. Coacervate-based materials: fabrication, structure, and applications. **Chemistry of Materials**, v. 37, n. 14, p. 4944–4962, 2025.
- YEWDALL, N. A. et al. Coacervates as models of membraneless organelles. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 52, p. 101416, 2021.
- ZHOU, Y.; ZHANG, K.; MORENO, S. et al. Continuous transformation from membrane-less coacervates to membranized coacervates and giant vesicles: toward multicompartmental protocells with complex (membrane) architectures. **Angewandte Chemie**, v. 136, n. 34, 2024.

POTENCIAL DE NANOPARTÍCULAS DO VÍRUS DO MOSAICO SEVERO DO FEIJÃO-CAUPI PARA IMUNOTERAPIA NO CÂNCER

Renata Kelly de Freitas Mano: Mestre, Universidade Estadual do Ceará (UECE).

Nicole F. Steinmetz: Doutora, University of California San Diego.

Maria Izabel Florindo Guedes: Doutora, Universidade Estadual do Ceará (UECE) (Orientador).

Resumo: O câncer apresenta alta incidência e letalidade, tornando urgente a busca por novas estratégias terapêuticas. Este estudo objetivou produzir, avaliar a citotoxicidade *in vitro* e a eficácia *in vivo* de nanopartículas do vírus do mosaico severo do feijão-caupi (CPSMV). O CPSMV foi propagado em *Vigna unguiculata* L., purificado por ultracentrifugação e caracterizado por espectroscopia UV-Vis, SDS-PAGE, gel de agarose, DLS e cromatografia de exclusão por tamanho. A imunogenicidade foi avaliada em linhagens de macrófagos (RAW Blue), enquanto a eficácia foi testada em modelos murinos de câncer gástrico e de orofaringe. As nanopartículas foram produzidas conforme o padrão esperado de integridade e pureza. O CPSMV apresentou potencial imunogênico similar ao CPMV. Nos modelos animais, o tratamento reduziu a progressão tumoral e aumentou a sobrevivência dos grupos experimentais. Conclui-se que o CPSMV possui elevado potencial como imunoterapia, sendo uma plataforma segura e eficaz na modulação da resposta antitumoral.

Palavras-chave: CPSMV; Imunoterapia; Câncer gástrico; Câncer Orofaringeo; Vírus de planta.

1 Introdução

O câncer permanece como um dos maiores desafios da saúde pública global devido à sua alta incidência e letalidade. Entre as diversas neoplasias, o câncer gástrico e o de orofaringe destacam-se pela agressividade, exigindo abordagens que superem as limitações das terapias convencionais. Nesse cenário, as nanopartículas de vírus de plantas têm se destacado como uma estratégia promissora na nanotecnologia, especialmente devido à sua biocompatibilidade, biodegradabilidade, geometria monodispersa fixa, estabilidade e funcionalidade de superfície ajustável, que conferem elevado potencial para a imunomodulação do microambiente tumoral, *delivery* de drogas e terapia combinada (WANG *et al.*, 2019; HUANG *et al.*, 2024).

Os vírus de plantas, por serem não infecciosos para mamíferos e fisicamente estáveis, apresentam-se como alternativas seguras para o desenvolvimento de adjuvantes e imunoterápicos. Além do baixo custo de produção e biodegradabilidade, essas partículas possuem um efeito imunogênico intrínseco. Atualmente, os estudos mais robustos na literatura utilizam o Vírus do Mosaico do Feijão-Caupi (CPMV), cujas características estruturais permitem uma circulação eficaz pelo sistema linfático e ativação de células apresentadoras de antígenos (APCs). Pesquisas com CPMV em modelos de melanoma, carcinoma de cólon e mama demonstraram que os capsídeos virais são reconhecidos por receptores de reconhecimento de padrão, como TLR2 e TLR4, enquanto as partículas intactas, contendo RNA, ativam também o TLR7, induzindo a liberação de interferons do tipo I e a morte celular tumoral (ZHENG *et al.*, 2019; MAO *et al.*, 2022; CAI *et al.*, 2019).

Embora o CPMV concentre a maioria das evidências científicas, o Vírus do Mosaico Severo do Feijão-Caupi (CPSMV) emerge como um candidato relevante devido o CPSMV compartilhar a mesma estrutura

organizacional do CPMV, com tamanho em torno de 30 nm, capsídeo icosaédrico formado por 60 cópias das proteínas L (*large*) e S (*small*), além de material genético de RNA (BEISS et al., 2022). No entanto, ainda existem lacunas no conhecimento sobre a eficácia do CPSMV como agente imunoterápico. Portanto, a hipótese central deste trabalho sustenta que, dada a similaridade com seu homólogo, o CPSMV possui perfil imunogênico, oferecendo uma plataforma segura e eficaz para o tratamento de neoplasias agressivas, como o câncer gástrico e de orofaringe.

2 Objetivo

Produzir e caracterizar nanopartículas do vírus do mosaico severo do feijão-caupi (CPSMV) para investigar seu potencial imunoterapêutico, validando sua imunogenicidade *in vitro* e sua eficácia na redução da progressão tumoral em modelos murinos de câncer gástrico e de orofaringe.

3 Metodologia

As nanopartículas do vírus do mosaico severo do feijão-caupi (CPSMV) foram propagadas em plantas de *Vigna unguiculata* L. e purificadas de tecidos foliares 14 dias após a infecção. O processo de extração envolveu a homogeneização do tecido, seguida de precipitação com PEG 6000 sob agitação e purificação por ultracentrifugação diferencial para isolamento das partículas. A caracterização incluiu a quantificação por espectroscopia UV-Vis e a confirmação da pureza e integridade proteica via SDS-PAGE, gel de agarose e cromatografia de exclusão por tamanho (SEC). Adicionalmente, a monodispersão e o diâmetro hidrodinâmico foram determinados por espalhamento dinâmico de luz (DLS).

A imunogenicidade foi validada *in vitro* através da ativação de receptores de reconhecimento de padrão (TLRs e NOD) na linhagem celular RAW-Blue™. Células (100.000/poço) foram incubadas com diferentes concentrações de CPSMV, sendo a atividade da fosfatase alcalina embrionária secretada (SEAP) mensurada pelo reagente QUANTI-Blue™ a 655 nm em leitor de microplacas. Lipopolissacarídeo (LPS) e Pam3CSK4 foram utilizados como controle positivo.

Os estudos pré-clínicos foram aprovados pelo Comitê de Ética no Uso de Animais. Para o modelo de câncer orofaríngeo, utilizaram-se camundongos fêmeas C57BL/6 com indução tumoral subcutânea; para o modelo de câncer gástrico, utilizaram-se camundongos machos *Balb-c nude* com indução via intraperitoneal. O protocolo terapêutico iniciou-se no sétimo dia pós-implantação, consistindo em doses semanais de CPSMV administradas *in situ* (intratumoral ou intraperitoneal, conforme o modelo) por três semanas. A progressão tumoral foi monitorada pelo volume do tumor (orofaringe) e pela circunferência abdominal (gástrico). A análise estatística foi realizada por ANOVA de via única e curvas de sobrevivência de Kaplan-Meier, com nível de significância de $p < 0,05$.

4 Resultados e Discussão

A caracterização confirmou a integridade e pureza das nanopartículas de CPSMV produzidas. A análise por espectroscopia UV-Vis exibiu perfil característico de com razão A_{260}/A_{280} com valor em torno de 1,6. O SDS-PAGE identificou as subunidades proteicas L (~42 kDa) e S (~24 kDa), enquanto o agarose gel revelou a co-migração do RNA e proteínas do capsídeo, evidenciando o encapsulamento genômico. O DLS revelou populações monodispersas com diâmetro de aproximadamente 30 nm e a SEC demonstrou a ausência de agregados ou impurezas na amostra, corroborando a literatura para o gênero *Comovirus* (BEISS et al., 2022).

Nos ensaios de imunogenicidade *in vitro* (RAW-Blue™), o CPSMV induziu um aumento significativo na ativação celular em relação ao controle negativo, sem diferença significativa quando comparado com as mesmas concentrações de CPMV nos tempos de 3 h e 6 h. Essa capacidade imunoestimuladora equivalente reforça a hipótese de que o CPSMV compartilha o mesmo mecanismo de reconhecimento via receptores de reconhecimento de padrão (PRRs) que seu homólogo mais estudado (MAO et al., 2022).

Os resultados *in vivo* demonstraram a eficácia terapêutica do CPSMV. Nos modelos de câncer gástrico e de orofaringe, os tratamentos com CPSMV retardaram significativamente o crescimento tumoral em comparação ao grupo controle PBS ($p < 0,05$). Quanto à análise de sobrevivência no modelo de câncer orofaríngeo, o grupo tratado com CPSMV apresentou 50% de sobreviventes de longo prazo, superando numericamente os grupos PBS (10%) e CPMV (30%). A tendência observada sugere que o CPSMV é uma plataforma robusta e potencialmente superior em modelos específicos. A eficácia mantida em camundongos imunodeficientes indica que o efeito antitumoral é mediado primordialmente pela imunidade inata, o que representa uma vantagem estratégica para a imunoterapia *in situ*.

5 Conclusão

O CPSMV atua como um potente agente imunoestimulador, com atividade biológica equivalente ao CPMV na ativação de receptores de reconhecimento de padrão. A plataforma demonstra segurança e eficácia no controle da progressão tumoral gástrica e orofaríngea, ampliando significativamente a sobrevida global. Conclui-se que a imunoterapia *in situ* com CPSMV é uma alternativa nanotecnológica viável, cujos desdobramentos futuros devem focar na elucidação dos mecanismos de modulação da resposta imune e em terapias combinadas.

6 Referências

- BEISS, V. et al. Cowpea Mosaic Virus Outperforms Other Members of the Secoviridae as *In Situ* Vaccine for Cancer Immunotherapy. **Molecular Pharmaceutics**, [s. l.], v. 19, n. 5, p. 1573–1585, 2022.
- CAI, H. et al. Cowpea Mosaic Virus Immunotherapy Combined with Cyclophosphamide Reduces Breast Cancer Tumor Burden and Inhibits Lung Metastasis. **Advanced Science**, v. 2, n. 10, 2019.
- HUANG, Y. et al. Super-enhancers: Implications in gastric cancer. **Mutation Research - Reviews in Mutation Research**, [s. l.], v. 793, n. September 2023, p. 108489, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2024.108489>.

MAO, Chenkai et al. Cowpea mosaic virus stimulates antitumor immunity through recognition by multiple MYD88-dependent toll-like receptors. **Biomaterials**. [s. l.], p. 1–30, 2022.

WANG, Chao; BEISS, Veronique; STEINMETZ, Nicole F. Cowpea Mosaic Virus Nanoparticles and Empty Virus-Like Particles Show Distinct but Overlapping Immunostimulatory Properties. **Journal of Virology**. [s. l.], v. 93, n. 21, p. 1–14, 2019.

CONECTANDO MESO- E NANOESCALA: INSIGHTS DA NANOMINERALOGIA PARA OS MATERIAIS DE GRAFENO

Lucilene Santos: Doutor(a), Universidade Federal do Ceará (UFC).

Alejandro Ayala: Doutor(a), Universidade Federal do Ceará (UFC).

Bruno Araújo: Doutor(a), Universidade Federal do Ceará (UFC).

Thiago Moura: Doutor, Instituto Federal de Educação do Ceará (Ifce).

Janaína Rocha: Doutora, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Resumo: Este estudo investiga a transformação de grafita natural em materiais à base de grafeno a partir de uma abordagem multiescala, conectando as escalas mesoscópica e nanométrica por meio da nanomineralogia. A integração de conceitos de nanomineralogia, nanogeoquímica e nanopetrologia permite compreender as modificações estruturais, químicas e texturais ao longo das escalas, fornecendo novos insights sobre a formação e o desempenho de materiais de grafeno. A evolução cristalográfica da grafita é analisada considerando a formação de defeitos, o empilhamento de camadas e a influência de impurezas nas propriedades dos materiais obtidos. Técnicas avançadas de caracterização, como difração de raios X, espectroscopia Raman e microscopia eletrônica, são empregadas para correlacionar parâmetros estruturais com propriedades funcionais. Os resultados evidenciam que a conexão entre escalas e o controle das características estruturais da matéria-prima são determinantes para a qualidade do grafeno produzido, reforçando o papel das geociências na síntese e caracterização de nanomateriais avançados.

Palavras-chave: Grafeno; grafita natural; difração de raios X; espectroscopia Raman; análise multiescala.

1 Introdução

A crescente demanda por nanomateriais avançados, especialmente o grafeno, tem impulsionado o desenvolvimento de novas abordagens para a conversão de geomateriais naturais em produtos de alto valor agregado. Nesse contexto, a grafita natural se destaca como uma matéria-prima estratégica, cuja estrutura cristalina e características mineralógicas influenciam diretamente a qualidade dos materiais derivados.

A compreensão dos processos que governam essa transformação requer uma abordagem integrada que conecte diferentes escalas estruturais, desde associações minerais mesoscópicas até arquiteturas em nanoescala. A nanomineralogia, aliada à nanogeoquímica e à nanopetrologia, emerge como um campo essencial para investigar essas transições e fornecer subsídios para a otimização de rotas de produção de grafeno.

2 Objetivos

Investigar a transformação de grafita natural em materiais à base de grafeno, enfatizando: conexão entre as escalas mesoscópica e nanométrica; evolução estrutural e microestrutural da grafita; o papel de defeitos, impurezas e empilhamento de camadas; e a correlação entre características estruturais e propriedades funcionais.

3 Metodologia

Abordagem metodológica baseia-se na integração de técnicas avançadas de caracterização estrutural e microestrutural, incluindo: difração de raios X (DRX), com aplicação de métodos de refinamento estrutural; espectroscopia Raman, para análise de desordem estrutural e qualidade do grafeno; microscopia eletrônica (MEV/MET), para avaliação morfológica e estrutural em nanoescala.

A análise multiescala permite correlacionar parâmetros cristalográficos e microestruturais com os processos de transformação da grafita em grafeno.

4 Resultados e Discussão

Os resultados indicam que as características estruturais da grafita natural, como grau de cristalinidade, tamanho de cristalito e presença de impurezas, exercem influência direta na eficiência dos processos de esfoliação e na qualidade dos materiais de grafeno obtidos. A formação de defeitos e o grau de desordem estrutural, evidenciados por análises de DRX e espectroscopia Raman, estão diretamente relacionados às propriedades físico-químicas dos nanomateriais. Além disso, observa-se que a integração entre escalas — do meso ao nano — é fundamental para compreender os mecanismos de transformação e otimizar as rotas de processamento. Esses resultados reforçam a importância da nanomineralogia como ferramenta para interpretar a evolução estrutural dos materiais e orientar a produção de grafeno com propriedades controladas.

5 Conclusão

A abordagem multiescala adotada neste estudo demonstra que a conexão entre as escalas mesoscópica e nanométrica é essencial para a compreensão e o controle da transformação de grafita natural em grafeno. Os resultados evidenciam que o domínio das características estruturais da matéria-prima, aliado ao uso de técnicas avançadas de caracterização, permite otimizar processos de síntese e melhorar o desempenho dos materiais obtidos. Dessa forma, as nanogeociências desempenham papel estratégico no desenvolvimento de nanomateriais avançados, contribuindo para a inovação tecnológica e a valorização de recursos minerais naturais.

6 Referências

- DRESSELHAUS, M. S.; DRESSELHAUS, G.; AVOURIS, P. *Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties, and applications*. Berlin: Springer, 2001.
- FERRARI, A. C.; ROBERTSON, J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review B*, v. 61, n. 20, p. 14095–14107, 2000.
- GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. The rise of graphene. *Nature Materials*, v. 6, n. 3, p. 183–191, 2007.
- MARCANO, D. C. et al. Improved synthesis of graphene oxide. *ACS Nano*, v. 4, n. 8, p. 4806–4814, 2010.
- SANTOS, L. et al. Purification and preparation of graphene-like nanoplates from natural graphite of Canindé, CE, Northeast-Brazil. *Materials*, v. 18, n. 13, p. 3162, 2025.

SENSOR FLUORESCENTE *TURN-OFF/TURN-ON* BASEADO EM PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO E ÍONS Cu^{2+} PARA A QUANTIFICAÇÃO DE GLIFOSATO EM MATRIZES AQUOSAS.

Carlos Mateus Paiva Oliveira: Mestre, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Samuel Veloso Carneiro: Doutor, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Resumo: A detecção do herbicida glifosato é essencial devido aos seus impactos socioambientais. Como os métodos convencionais apresentam alto custo e baixa portabilidade, este trabalho desenvolveu um sensor fluorescente de baixo custo baseado em ensaio de deslocamento ("*Turn-On*") utilizando Pontos Quânticos de Carbono (PQCs) e íons cobre (Cu^{2+}). A metodologia consistiu na supressão inicial da fluorescência dos PQCs via complexação com Cu^{2+} (*quenching*), seguida da recuperação do sinal após a introdução do glifosato em soluções aquosas, o qual sequestrou os íons metálicos da superfície do nanomaterial. Os resultados comprovaram a eficácia do sistema, que apresentou alta seletividade, tempo de resposta rápido e limites de detecção estritamente compatíveis com as normativas de monitoramento ambiental. Conclui-se que o método desenvolvido superou as limitações técnicas das análises tradicionais, estabelecendo uma plataforma analítica viável, sensível e aplicável para a quantificação eficiente deste contaminante. Palavras-chave: Fluorescência; Sensor *Turn-On*; Glifosato; Pontos Quânticos de Carbono; Espectroscopia.

Palavras-chave: Fluorescência; Sensor *Turn-On*; Glifosato; Pontos Quânticos de Carbono; Espectroscopia.

1 Introdução

A contaminação de matrizes aquáticas por Contaminantes Emergentes (CEs), com destaque para defensivos agrícolas como o herbicida glifosato, impõe sérias ameaças à saúde pública e ao equilíbrio ecológico (FAN et al., 2026). Tradicionalmente, o monitoramento dessas substâncias baseia-se em técnicas robustas, como a cromatografia líquida, que, apesar de exatas, esbarram no alto custo instrumental e em etapas exaustivas de preparo de amostra (GRAGLIA et al., 2026). Para contornar essas limitações, os sensores químicos ópticos despontam como plataformas rápidas, eficientes e viáveis para análises mais acessíveis (LEÓN-MORÁN et al., 2026). Nesse cenário, os Pontos Quânticos de Carbono (PQCs) destacam-se como nanossensores de excelência devido às suas propriedades fotofísicas singulares, baixa toxicidade e síntese de baixo custo (KUMAR; GATHANIA, 2026). A notável capacidade do glifosato de atuar como agente quelante frente a metais de transição, como o cobre (Cu^{2+}), viabiliza a construção de sensores baseados no mecanismo de supressão e restauração da fluorescência (*turn-off/turn-on*) (YANG et al., 2023). Fundamentado nessa premissa, este trabalho empregou PQCs funcionalizados sintetizados via rota hidrotérmica em um sistema mediado por Cu^{2+} , alcançando a quantificação indireta, precisa e seletiva do glifosato em meio aquoso.

2 Objetivo

Desenvolver um método analítico fluorescente baseado em PQCs funcionalizados e íons Cu^{2+} para a detecção indireta, quantificação seletiva e de baixo custo do herbicida glifosato em amostras de água.

3 Metodologia

Os PQCs foram sintetizados via rota hidrotérmica (200 °C por 3 h) a partir de ácido cítrico (0,5 g), ureia (0,3 g) e etilenodiamina (0,5 mL) em água deionizada. Após arrefecimento e purificação por diálise (membrana de 1 kDa), as nanopartículas foram caracterizadas por espectroscopias (UV-Vis, fluorescência, FTIR, Raman e XPS) e microscopia (AFM) para elucidação óptica, química e morfológica. Para a otimização analítica, a concentração exata foi determinada após liofilização, avaliando-se em seguida o efeito do pH, força iônica, tempo de contato e potenciais interferentes no meio aquoso. O ensaio de quantificação do glifosato operou via mecanismo *turn-off/turn-on* em meio aquoso a 25 °C. Na primeira etapa (*turn-off*), alíquotas de solução de Cu^{2+} foram adicionadas à suspensão de PQCs (volume final de 2,0 mL) para estabelecer a concentração ótima de máxima supressão fluorescente. Na segunda etapa (*turn-on*), alíquotas padronizadas de glifosato foram introduzidas ao complexo suprimido (PQC- Cu^{2+}). A restauração do sinal emissivo foi quantificada via espectrofluorimetria e correlacionada analiticamente à concentração do herbicida.

4 Resultados e Discussão

A síntese dos PQCs foi confirmada por espectroscopia UV-Vis, que evidenciou as transições $\pi-\pi^*$ e $n-\pi^*$ características de nanomateriais carbonáceos. A emissão de fluorescência mostrou-se independente do comprimento de onda de excitação, atestando a alta homogeneidade dimensional e a uniformidade dos estados de superfície das nanopartículas. A otimização do sistema definiu a concentração ideal de trabalho ao mitigar o efeito de autossupressão (filtro interno). Adicionalmente, o sinal emissivo atingiu máxima estabilidade em pH próximo à neutralidade e demonstrou notável robustez frente a variações de força iônica, confirmando a estabilidade coloidal do sistema e validando sua aplicação analítica em matrizes ambientais complexas.

5 Conclusão

O nanossensor desenvolvido atende com êxito à proposta de quantificar o glifosato em matrizes aquosas. O sistema PQC- Cu^{2+} , operando sob o mecanismo *turn-off/turn-on*, constitui uma plataforma analítica de baixo custo, sensível e altamente seletiva. A notável estabilidade da sonda fluorescente garante sua aplicabilidade frente à complexidade das amostras reais. Conclui-se, portanto, que a metodologia viabiliza o monitoramento ambiental eficiente deste herbicida e supera as limitações instrumentais e financeiras das análises convencionais.

6 Referências

FAN, D. et al. A Comprehensive Assessment of Water Quality in a Shallow Lake in Eastern China: Occurrence and Environmental Risks of Emerging Contaminants. *Emerging Contaminants*, p. 100631, jan. 2026.

GRAGLIA, M. et al. Characterization of siRNA Product-Related Impurities by Hydrophilic Interaction Liquid Chromatography (HILIC) Coupled with Mass Spectrometry. *Journal of Chromatography A*, v. 1775, p. 466865, maio 2026.

KUMAR, A.; GATHANIA, A. K. Sustainable Carbon Quantum Dots for Highly Selective Cu²⁺ Ion Detection in Water and Thermal Sensing Applications. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, v. 348, p. 127142, mar. 2026.

LEÓN-MORÁN, L. O. et al. Monitoring of Regulated and Non-Regulated Biotoxins in Marine Organisms Using Liquid-Phase Microextraction and Liquid Chromatography Coupled with High-Resolution Mass Spectrometry. *Environmental Research*, p. 124339, mar. 2026.

YANG, Y. et al. A Dual-Emission Carbon Dots-Based Nonenzymatic Fluorescent Sensing Platform for Simultaneous Detection of Parathion-Methyl and Glyphosate. *Food Chemistry*, v. 403, p. 134346, mar. 2023.

SONDA BASEADA EM NANOPARTÍCULAS FLUORESCENTES PARA DETECÇÃO DE ÍONS DICROMATO EM SOLO

Vivian Stephanie Ferreira Rodrigues: Mestre em Química, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Samuel Veloso Carneiro: Doutor em Química, Universidade Federal do Ceará (UFC) (Orientador).

Resumo: O cromo hexavalente [Cr(VI)] é altamente tóxico, persistente no ambiente e carcinogênico. Nesse contexto, nanomateriais fluorescentes, em especial os Pontos Quânticos de Carbono (PQCs), surgem como plataformas promissoras para o desenvolvimento de sensores seletivos e economicamente viáveis no monitoramento desse contaminante. Neste trabalho, desenvolveu-se uma estratégia de sensoriamento baseada em PQCs para detecção de Cr(VI), na forma de íons dicromato, em solo. Os PQCs foram sintetizados via hidrotermal, apresentando rendimento quântico de 40,6%. Suas propriedades ópticas permitiram a detecção de Cr(VI) por abordagem *turn-off*, com limites de detecção e quantificação de 2,8 e 8,6 mg kg⁻¹, respectivamente. O mecanismo de supressão foi investigado com base em dados termodinâmicos e na equação de Stern-Volmer modificada, evidenciando predominância de supressão dinâmica associada ao efeito de filtro interno. A nanosonda foi aplicada em amostras de solo com recuperação de 100,4% para 1,00 mg kg⁻¹, demonstrando elevada seletividade e aplicabilidade no monitoramento de Cr(VI).

Palavras-chave: Pontos quânticos de carbono; Plataforma de sensoriamento; Cromo hexavalente; Solos.

1 Introdução

O crescimento das indústrias químicas tem intensificado a contaminação de solos por cromo, no qual predominam dois estados de oxidação: o cromo trivalente [Cr(III)], presente como cátion, e o cromo hexavalente [Cr(VI)], na forma aniônica (Shaghaleh *et al.*, 2025). Enquanto o Cr(III) apresenta baixa toxicidade, o Cr(VI) é altamente tóxico, biodisponível e móvel no ambiente, representando maior risco à saúde e aos ecossistemas (Ding, 2025). Devido ao seu potencial carcinogênico, persistência ambiental e capacidade de bioacumulação, o Cr(VI) é classificado como poluente prioritário e está sujeito a regulamentações rigorosas (Hou *et al.*, 2025). Nesse contexto, a determinação seletiva e precisa de Cr(VI) em matrizes ambientais é essencial para o monitoramento e a avaliação de risco. Contudo, métodos analíticos convencionais apresentam limitações quanto à seletividade, custo e necessidade de instrumentação especializada (Dawra; Dabas, 2024; Fu *et al.*, 2025).

Os Pontos Quânticos de Carbono (PQCs) destacam-se como alternativa promissora para a detecção de Cr(VI), devido às suas propriedades ópticas, estabilidade química, biocompatibilidade e baixa toxicidade (Ben Amor *et al.*, 2025; Hassan Ahmed; Soylak, 2024). Os PQCs são nanomateriais zero-dimensionais com tamanhos de 1 a 10 nm. Estruturalmente, apresentam núcleos de carbono com hibridação sp²/sp³ e superfícies ricas em grupos funcionais, o que confere versatilidade química para o desenvolvimento de nanossondas fluorescentes (Liu *et al.*, 2025). A funcionalização superficial favorece interações seletivas com analitos, promovendo variações na intensidade de fluorescência, diretamente associadas aos processos fotofísicos envolvidos. Esses materiais se destacam pela possibilidade de ajuste de propriedades ópticas e químicas, permitindo aplicações avançadas em sensoriamento.

2 Objetivo

Desenvolver uma estratégia de sensoriamento para a análise química do contaminante emergente Cr(VI) em amostras de solo, a partir do sinal óptico de PQC's funcionalizados altamente fluorescentes.

3 Metodologia

Os PQC's foram sintetizados pelo método hidrotérmico, utilizando ácido cítrico (5,2 mmol; 1,00 g) e etilenodiamina (16,6 mmol; 1,00 g) dissolvidos em 10 mL de água destilada. A solução foi transferida para um reator de Teflon (50 mL) em autoclave de aço inoxidável e submetida a 200 °C por 2 h. Após resfriamento, a suspensão foi purificada por diálise em membrana com corte de 1 kDa por 24 h e armazenada sob refrigeração (~10 °C). A caracterização foi realizada por espectroscopia de absorção molecular no ultravioleta-visível (UV-Vis), espectroscopia de fluorescência e determinação do rendimento quântico. As análises estruturais e microscópicas incluíram espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS) e microscopia de força atômica (AFM). A capacidade sensora foi avaliada frente ao Cr(VI), na forma de íons dicromato, por titulação fluorimétrica com adições sucessivas do analito, monitorando a supressão da fluorescência. A partir desses dados, foram determinados os limites de detecção (LOD) e de quantificação (LOQ). Ensaios termodinâmicos em diferentes temperaturas foram realizados para investigar o mecanismo de interação. A aplicabilidade do método foi avaliada em amostras reais de solo.

4 Resultados e Discussão

As análises confirmaram a formação de nanopartículas com bandas de absorção em 240 nm e 350 nm, sendo a primeira associada às ligações de carbono do tipo sp^2 ($\pi-\pi^*$) e a segunda à transição $n-\pi^*$ de ligações -CO, -C-N ou -C-OH relacionadas aos grupos carboxila (-COOH) ou amina (-NH₂) na superfície das nanopartículas (Oliveira *et al.*, 2024). O rendimento quântico de fluorescência foi de 40,6%. O tempo de vida médio de fluorescência dos PQC's foi estimado em 6,54 ns, em conformidade com os valores descritos na literatura para esses materiais, normalmente entre **1 e 10 ns** (Bian *et al.*, 2025; Mohammed; Omer, 2025). Adicionalmente, os PQC's apresentam morfologia quase esférica, com tamanho médio de aproximadamente 1,5 nm, e presença de grupos funcionais hidrofílicos em sua superfície. A intensidade de fluorescência dos PQC's mantém-se constante entre pH 3,0 e 10,0 e, conforme o estudo de interferentes, é afetada apenas por espécies de Cr(VI), indicando potencial para aplicação em matrizes ambientais complexas. O sensor fluorescente desenvolvido exibiu resposta do tipo *turn-off*, com mecanismo predominantemente dinâmico associado ao efeito de filtro interno. Foram obtidos LOD de 2,8 mg kg⁻¹ e LOQ de 8,6 mg kg⁻¹ para os íons dicromato. A aplicação em amostras reais de solo mostrou-se satisfatória, com resultados compatíveis com os limites estabelecidos pela legislação vigente.

5 Conclusão

Os PQC's sintetizados constituem nanossonda fluorescente seletiva para Cr(VI) em solo. O método atende às exigências do monitoramento ambiental. A aplicação em amostras reais confirma confiabilidade e robustez.

6 Referências

BEN AMOR, Asma *et al.* Advances in carbon quantum dot applications: Catalysis, sensing, and biomedical innovations. **Materials Science in Semiconductor Processing**, [s. l.], vol. 185, p. 108945, 2025.

BIAN, Zhengyi *et al.* Bottom-up carbon dots: purification, single-particle dynamics, and electronic structure. **Chemical science**, [s. l.], vol. 16, nº 10, p. 4195–4212, 2025.

DAWRA, Nisha; DABAS, Neeru. Advances in spectrophotometric determination of Chromium (III) and Chromium (VI) in water: a review. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, [s. l.], vol. 104, nº 13, p. 2994–3015, 2024.

DING, Yuanzhao. Current Progress in Hexavalent Chromium by Bibliographic Analysis. [s. l.], 2025.

FU, Taige *et al.* Rapid Detection of Available Cr (VI) in Soil Based on pXRF Combined with Ion-Exchange Resin. **Agriculture**, [s. l.], vol. 15, nº 5, p. 545, 2025.

HASSAN AHMED, Hassan Elzain; SOYLAK, Mustafa. Exploring the potential of carbon quantum dots (CQDs) as an advanced nanomaterial for effective sensing and extraction of toxic pollutants. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, [s. l.], vol. 180, p. 117939, 2024.

HOU, Guolun *et al.* Chemically consolidated Cr (VI) Contaminated soil based on granulation of blast furnace slag and phosphogypsum. **KSCE Journal of Civil Engineering**, [s. l.], vol. 29, nº 12, p. 100285, 2025.

LIU, Zhenbin *et al.* Carbon Quantum Dots: A Green and Efficient Material for Fruits and Vegetables Preservation. **Food Reviews International**, [s. l.], p. 1–26, 2025.

MOHAMMED, Lazo J; OMER, Khalid M. Heavy Metals Detection via Plastic-Waste-Derived Carbon Dots. **Journal of Fluorescence**, [s. l.], p. 1–27, 2025.

OLIVEIRA, J. J.P. *et al.* Carbon quantum dots with ultra-high quantum yield for versatile turn-on sensor of gluten and cyanide Ions. **Dyes and Pigments**, [s. l.], vol. 229, 2024.

SHAGHALEH, Hiba *et al.* Soil flushing coupled with aminated-nanocellulose/MOF hydrogel nanocomposites adsorbents: A novel sustainable remediation strategy for Cr(VI)-contaminated agricultural soils. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], vol. 353, p. 128440, 2025.

RESUMOS EXPANDIDOS

AVALIAÇÃO DO EFEITO DE NANOMATERIAIS NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETO ARMADO

Letícia de Vasconcelos Rodrigues: Mestre, Universidade Federal do Ceará.

Antônio Mateus de Carvalho Costa: Mestre, Universidade Federal do Ceará.

Helano Wilson Pimentel: Mestre, Universidade Federal do Ceará.

Antônio Eduardo Bezerra Cabral: Doutor, Universidade Federal do Ceará.

Walney Silva Araújo: Doutor, Universidade Federal do Ceará (Orientador).

Resumo: A corrosão das armaduras constitui uma das principais causas de degradação prematura em estruturas de concreto armado. Dentre as estratégias preventivas, destaca-se o uso de aditivos com ação inibidora. Este trabalho investigou o efeito da incorporação de nanomateriais ao concreto como agentes mitigadores da corrosão, foram eles: nano dióxido de silício (SiO_2) e nano carbonato de cálcio (CaCO_3) de origem sintética e orgânica, obtido a partir de cascas de ovos, incorporados na proporção de 1% em relação à massa de cimento em corpos de prova de concreto. A resistência à corrosão foi avaliada por meio das técnicas eletroquímicas: Potencial de Circuito Aberto (OCP), Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) e Resistência de Polarização Linear (LPR). Os resultados demonstraram que a incorporação de nanomateriais retardou o início do processo corrosivo por cloretos, enquanto a quantidade de ciclos de degradação por CO_2 mostraram-se insuficientes para avaliar a corrosão das armaduras.

Palavras-chave: Concreto armado; Corrosão das armaduras; Nanomateriais; Inibidor.

1 Introdução

O concreto é o segundo material mais consumido pela humanidade, atrás apenas da água (Isaia, 2005) e o de maior quantidade feito pelo homem (Ramachandran e Beaudoin, 2001). Na construção civil, o concreto armado se destaca por combinar as excelentes propriedades de resistência à compressão do concreto com a elevada resistência à tração proporcionada pelo aço.

A armadura inserida na estrutura de concreto armado é inicialmente protegida por uma barreira química e outra física, promovida pelas características do concreto. Porém, quando essas barreiras de proteção são comprometidas, a armadura torna-se suscetível à corrosão, o que pode levar à progressiva degradação da estrutura de concreto armado e, conseqüentemente, a redução da vida útil da edificação. A corrosão das armaduras é considerada uma das principais formas de deterioração do concreto e pode ocorrer principalmente por dois mecanismos: a presença de íons despassivantes, especialmente os íons cloreto em concentrações elevadas; ou pela redução do pH do concreto, provocada pela carbonatação, ou seja, pela reação do dióxido de carbono (CO_2) atmosférico com os compostos alcalinos presentes na matriz cimentícia (Cascudo, 1997; Ribeiro *et al.*, 2014).

Métodos de prevenção são opções para garantir a durabilidade das estruturas, onde destaca-se os inibidores de corrosão que, de acordo com a norma ISO 8044, pode ser definido como uma substância química que quando presente, em uma concentração adequada, diminui a taxa de corrosão, sem alterar significativamente a concentração de qualquer agente agressivo.

Uma alternativa promissora para o desenvolvimento de inibidores de corrosão mais eficazes é a utilização de nanomateriais, que vêm ganhando destaque no setor da construção civil. Estudos na literatura relatam melhorias significativas nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto com sua incorporação. No entanto, ainda são escassas as pesquisas que avaliam sua eficácia especificamente como agentes inibidores da corrosão nas armaduras do concreto armado.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo auxiliar na compreensão dos efeitos desses materiais no concreto, com foco na avaliação de seu desempenho como mitigadores de corrosão.

2 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o efeito da adição de nanomateriais, nano-SiO₂ e nano-CaCO₃ (de origem sintética e orgânica, obtido de cascas de ovos), na resistência a corrosão das armaduras em concreto armado, incorporados na proporção de 1% em relação ao peso do cimento.

3 Metodologia

3.1 Materiais

O concreto empregado neste estudo possui resistência característica de 30 MPa, utilizando-se cimento Portland do tipo CP-V ARI, escolhido por conter menor teor de adições minerais, o que minimiza interferências nas reações de carbonatação e na ação de íons cloreto. Quanto aos agregados, optou-se por areia natural com módulo de finura (MF) de 2,63 e brita com dimensão máxima característica (DMC) de 12,5 mm, compatível com as dimensões dos corpos de prova. Para a moldagem das amostras, foi adotado o traço em massa 1:2,03:2,04:0,53 (cimento:areia:brita:água). As armaduras foram da classe CA-60, com 5mm de diâmetro.

Sobre os aditivos, neste trabalho, utilizou-se três tipos de nanomateriais como aditivos no concreto: dióxido de silício (SiO₂), carbonato de cálcio (CaCO₃) sintético e de origem orgânica, obtido a partir de cascas de ovo, como alternativa sustentável. Todos os nanomateriais foram fornecidos pela empresa NanoBrasil. Os aditivos foram incorporados à mistura do concreto juntamente com os agregados, durante o processo de preparo, e não diluídos previamente na água de amassamento, devido os nanomateriais investigados serem insolúveis em água. Considerando a variabilidade nas proporções adotadas em pesquisas que envolvem o uso de nanomateriais em concretos, este estudo adotou uma dosagem fixa de 1% em massa de nanomaterial, em relação ao peso do cimento.

Além disso, incorporou-se ao traço do concreto, um aditivo superplastificante do tipo MC-PowerFlow 4001, com o objetivo de manter a trabalhabilidade do concreto, com a dosagem de 0,2% em relação ao peso do cimento utilizado.

3.2 Métodos

A metodologia para a realização do trabalho foi dividida nas seguintes etapas: Preparação e Moldagem dos corpos de prova; Ensaios de degradação acelerada com cloretos e câmara de carbonatação e, Ensaios eletroquímicos.

Os ensaios de degradação acelerada foram realizados em ciclos de umedecimento e secagem, sendo dois dias na névoa salina ou imersão parcial de água, 1 dia de secagem na estufa a 50° C e 4 dias de secagem em laboratório a temperatura ambiente ou em câmara de carbonatação. Realizou-se 10 ciclos de degradação e, durante o mesmo período, os ensaios eletroquímicos de Resistência de Polarização Linear (LPR) e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE), com o objetivo de avaliar a eficácia do nanomaterial na resistência a corrosão.

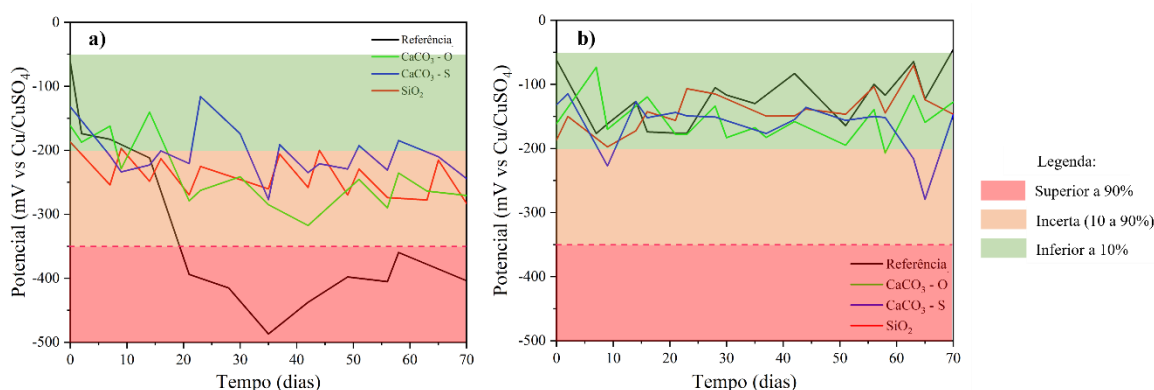
A célula eletroquímica foi composta por 3 eletrodos: eletrodo de trabalho (as armaduras), o contraeletrodo (uma chapa de aço inoxidável super austenítico – Al6xn) e, o eletrodo de referência de Cu/CuSO₄. O contato entre o eletrodo de trabalho e o contraeletrodo é realizado por meio de uma esponja de alta condutividade, ou seja, uma esponja umedecida em uma solução, destinada a melhorar a condutividade elétrica entre ambos (Cascudo, 1997). Importante salientar que o concreto deve ser umedecido horas antes dos ensaios eletroquímicos para garantir condutividade iônica adequada e estabilidade das medições.

4 Resultados e Discussão

4.1 Potencial de Circuito Aberto (OCP)

Na Figura 1, é apresentado a evolução do Potencial de Circuito Aberto em função do tempo para os dois tipos de degradação, utilizando o eletrodo de Cu/CuSO₄ (ESC).

Figura 1 – OCP das amostras com degradação por (a) íons cloretos e (b) CO₂.



Fonte: Autores (2026).

O potencial das amostras com adição de nanomateriais, submetidas à degradação por íons cloreto, variou entre -100 e -300 mV. De acordo com (Ribeiro *et al.*, 2014), para os critérios de avaliação para o eletrodo de referência Cu/CuSO₄, essa faixa de potenciais indica uma probabilidade de corrosão incerta, que pode variar

aproximadamente entre 10% e 90%. A manutenção de potenciais mais nobres nas amostras com nanomateriais evidencia o efeito de refinamento de poros, que atua como uma barreira física à difusão de agentes agressivos.

Ainda nesse tipo de degradação, observa-se que apenas a amostra referência apresentou, por volta de 20 dias de exposição, uma queda acentuada do potencial para valores inferiores a -350 mV, o que caracteriza uma probabilidade superior a 90% de corrosão das armaduras, evidenciando um comportamento mais suscetível ao processo corrosivo.

Por outro lado, para as amostras submetidas à degradação por CO_2 , não foram registrados potenciais inferiores a -350 mV ao longo do período avaliado. Esse comportamento indica uma baixa probabilidade de corrosão das armaduras, sugerindo que os 10 ciclos de degradação por CO_2 , nas condições adotadas neste estudo, não foram suficientes para promover de forma significativa o avanço do processo de carbonatação no concreto.

4.2 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

A Figura 2 apresenta a evolução da impedância eletroquímica das amostras submetidas ao ataque por íons cloreto (Figura 2a) e por exposição a CO_2 (Figura 2b) ao longo de dez ciclos de exposição, por meio dos diagramas de Nyquist. Para a avaliação da resistência à corrosão das armaduras, são analisados exclusivamente os semicírculos associados às baixas frequências.

O comportamento inicial das amostras, correspondente ao ciclo 0 (sem degradação), apresentam-se bastante semelhantes, indicando que o sistema ainda se encontra em condição de proteção. Esse comportamento sugere que a matriz cimentícia permanece atuando como uma barreira eficaz, oferecendo proteção à armadura, uma vez que os íons cloreto ainda não atingiram de forma significativa a interface aço–concreto.

Para a degradação por cloretos, a partir do ciclo 4, observa-se uma mudança significativa no comportamento da amostra referência, em que há o início de um “achatamento” no diagrama de Nyquist, fenômeno que se torna mais pronunciado no ciclo 6, no qual o arco associado às baixas frequências torna-se praticamente imperceptível em relação às outras amostras. Esse comportamento indica a quebra da película passiva e o início da corrosão ativa, corroborando o que foi analisado, pelos valores de OCP. Conforme discutido anteriormente, a amostra referência apresentou, por volta de 20 dias de exposição, potenciais inferiores a -350 mV, o que corresponde a uma probabilidade superior a 90% de corrosão.

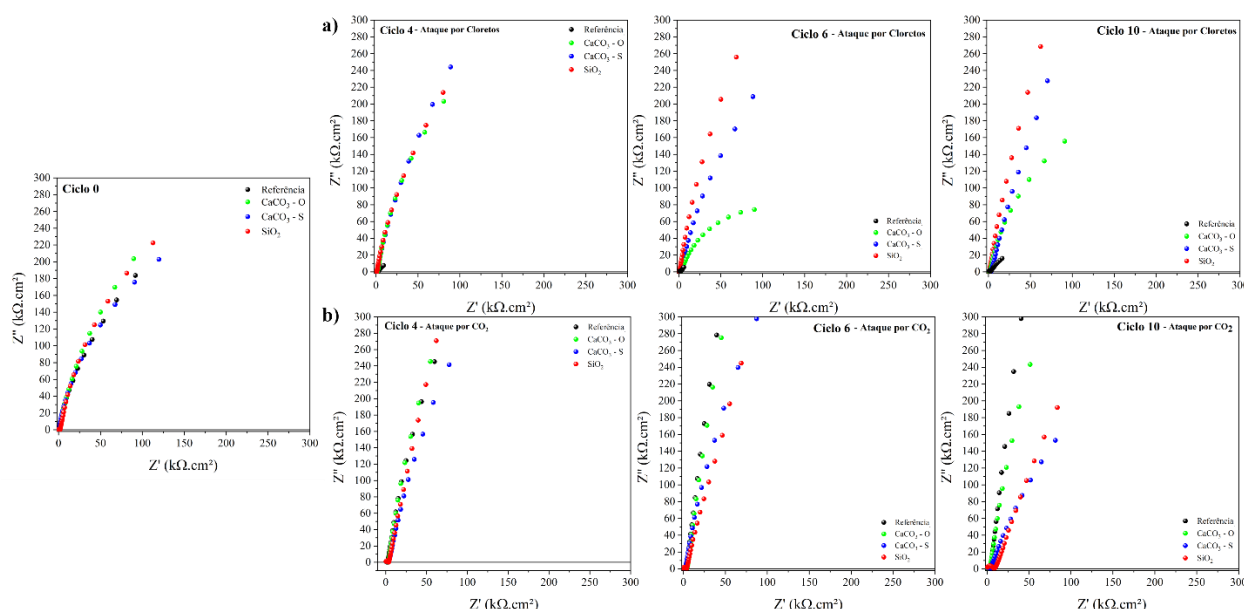
As demais amostras, apresentaram bons resultados em todos os ciclos de exposição, indicando que a película passiva continua íntegra e que o nanomaterial está dificultando a entrada de cloretos. Dessa forma, os diagramas de Nyquist confirmam visualmente que a incorporação de nanomateriais altera a cinética na interface metal/concreto, elevando a resistência do sistema e retardando a despassivação da armadura causada pelos cloretos.

Os diagramas de Nyquist para a degradação por CO_2 (Figura 2b) revelam um comportamento diferente e mais estável do que o observado no ensaio de cloretos. Observa-se que a carbonatação, nas condições deste estudo, atuou de forma a densificar a matriz cimentícia por meio da reação entre o dióxido de carbono e os produtos de

hidratação do cimento que promove a formação e precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) no interior dos poros, reduzindo a permeabilidade do concreto (Neville, 2016).

Como consequência desse fenômeno, os semicírculos de impedância mantiveram-se estáveis e apresentaram tendência de crescimento ao longo dos ciclos, indicando um aumento da resistividade da matriz. Esse comportamento evidencia que os ciclos de exposição não foram suficientes para que a frente de carbonatação atingisse a profundidade da armadura, resultando, em um ganho de proteção inicial para o sistema. Além disso, os nanomateriais serviram como uma garantia adicional de proteção, mantendo a impedância em níveis de passividade plena durante os 10 ciclos. Tais resultados corroboram o monitoramento do OCP, no qual nenhuma amostra atingiu a zona de alta probabilidade de corrosão.

Figura 2 – Diagramas de Nyquist, referentes à degradação por a) íons cloreto e b) CO_2 .

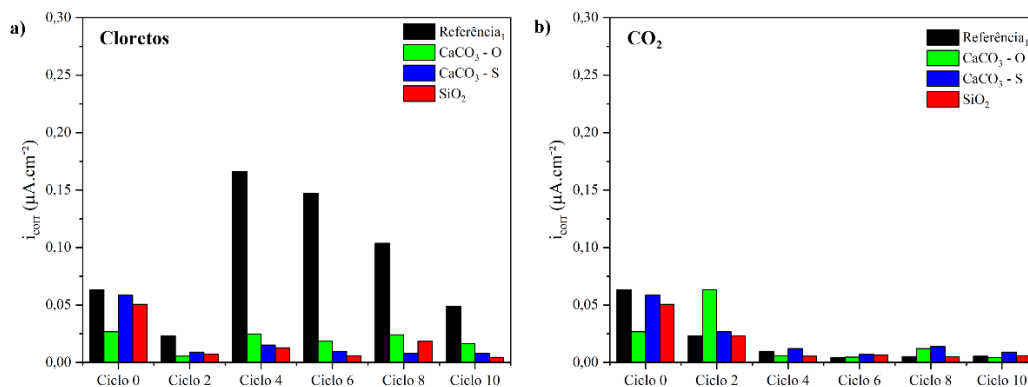


Fonte: Autores (2026).

4.3 Resistência de Polarização Linear (LPR)

A Figura 3 apresenta a evolução da densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) em função dos ciclos de degradação, calculada a partir dos valores de R_p obtido pelo LPR. Analisando os valores obtidos em correlação com os critérios de Andrade e Alonso (2004), observa-se que apenas a amostra Referência submetida à degradação por íons cloreto (Figura 3a) apresentou níveis de corrosão classificados como 'Baixos' (entre $0,1$ e $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) a partir do Ciclo 4. As demais amostras, independentemente do tipo de degradação, mantiveram valores de i_{corr} inferiores a $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ao longo de toda a exposição, o que caracteriza um nível de corrosão 'Insignificante'.

Figura 3 – Evolução do i_{corr} em função dos ciclos de degradação por (a) cloretos e (b) CO_2 .



Fonte: Autores (2026).

5 Conclusão

Pode-se concluir que:

- Os resultados demonstraram que a incorporação de nanomateriais reduziu significativamente o início do processo corrosivo por cloretos em comparação à amostra de referência, que apresentou sinais de corrosão ativa a partir do 6º ciclo.
- Quanto aos corpos de prova submetidos à degradação por CO_2 , os dez ciclos realizados mostraram-se insuficientes para que a frente de carbonatação atingisse a profundidade das armaduras, impedindo a despassivação do aço e, conseqüentemente, conclusões definitivas sobre a durabilidade a longo prazo sob esta condição específica.

6 Referências

- ISAIA, G. C. (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo, IBRACON, 2005. 1600 p.
- CASCUDO, Oswaldo. **O controle da corrosão em armaduras de concreto - inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo - Goiânia: PINI-UFG, 1997. 237 p.
- RIBEIRO, Daniel Veras; ALMEIDA, Fernando do Couto Rosa; CUNHA, Manuel Paulo Teixeira; HELENE, Paulo; LOURENÇO, M. Zita; SALES, Almir; SOUSA, Carlos Alberto Caldas de. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2014. v. 1. 244 p.
- RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J.J. (Ed.). Handbook of analytical techniques in concrete science and technology. New Jersey: Noyes. 2001. 964 p.
- NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

ANDRADE, Carmen; ALONSO, Cruz **Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method.** Materials and Structures, v. 37, n. 273, p. 623-643, nov. 2004.

EFEITO DO TEOR DE DOPAGEM DE CARBON DOTS (CDs) DOPADOS COM NITROGÊNIO COMO INIBIDOR DE CORROSÃO

Antonio Mateus de Carvalho Costa: Mestre, Universidade Federal do Ceará.

Heloisa Sousa Pessoa: Graduanda, Universidade Federal do Ceará.

Letícia de Vasconcelos Rodrigues: Mestre, Universidade Federal do Ceará.

Tiago Melo Freire: Doutor, Universidade Federal do Ceará.

Pierre Basilio Almeida Fecine: Doutor, Universidade Federal do Ceará.

Walney Silva Araújo: Doutor, Universidade Federal do Ceará (Orientador).

Resumo: A corrosão de metais, especialmente do aço carbono, constitui um problema significativo de ordem econômica, ambiental e estrutural, comprometendo a integridade de equipamentos, reduzindo a vida útil de estruturas e ocasionando falhas operacionais. Nesse contexto, este trabalho investiga a eficiência de *carbon dots* (CDs) dopados com nitrogênio, sintetizados, em diferentes temperaturas (160, 170 e 180 °C), a partir de ácido cítrico, ureia e polietilenimina, como inibidores de corrosão para o aço carbono AISI 1018. Considerando a demanda por soluções ambientalmente seguras e as limitações dos inibidores tradicionais, os CDs apresentam-se como alternativa promissora devido à sua alta área superficial, versatilidade química e baixa toxicidade. A eficiência inibitória foi avaliada por ensaios eletroquímicos, gravimétricos e análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura. Os resultados indicaram redução da taxa de corrosão na presença dos CDs, com melhor desempenho para o material sintetizado a 170 °C, que a 100ppm atingiu eficiência de 79,8%.

Palavras-chave: Corrosão; Inibidor de corrosão; *Carbon dots*; Nanomaterial; Nitrogênio.

1 Introdução

Os inibidores de corrosão são substâncias amplamente utilizadas, ganhando destaque devido à sua relação custo-eficiência, versatilidade, facilidade de aplicação e baixo custo. Tratam-se de substâncias que alteram a velocidade do processo corrosivo e, quando adicionados em concentrações adequadas (normalmente em pequenas quantidades) ao meio corrosivo, podem reduzir significativamente a taxa de corrosão do material metálico e prologar a vida útil do equipamento. Tradicionalmente, muitos inibidores de corrosão utilizados são compostos inorgânicos ou orgânicos que contêm metais pesados e grupos tóxicos, como cromatos, fosfatos e arsênio. Esses materiais, além de apresentarem baixa solubilidade em água e processos de síntese complexos, representam riscos significativos ao meio ambiente e à saúde humana. Diante disso, e considerando as crescentes exigências ambientais e regulamentações mais restritivas, torna-se essencial o desenvolvimento de inibidores de corrosão sustentáveis, ambientalmente amigáveis e com desempenho equivalente ou superior aos inibidores convencionais (Ye; Yang; Chen, 2019; Gentil, 2017).

Neste cenário, nanomateriais têm ganhado destaque devido às suas propriedades físico-químicas, que os tornam promissores em diversas aplicações, inclusive como inibidores de corrosão. Os pontos quânticos de carbono, ou *carbon dots* (CDs), são um novo tipo de material à base de carbono, com dimensionamento zero, podendo atingir tamanhos inferiores a 10nm. Esse composto vem atraindo grande atenção por apresentar alta relação

área volume, boa solubilidade em água, capacidade de funcionalização e baixa toxicidade. A dopagem com heteroátomos, como nitrogênio (N), é uma estratégia eficaz para otimizar as propriedades dos CDs, favorecendo a adsorção sobre as superfícies metálicas e, consequentemente, sua eficiência como inibidores de corrosão (Wu *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2024; Ye; Yang; Chen, 2019; Cui *et al.*, 2018; Tuerhong; Xu; Yin, 2017).

Dessa forma, este trabalho propõe investigar a eficiência de CDs dopados com nitrogênio, sintetizados a partir de ácido cítrico, ureia e polietilenimina como inibidores de corrosão para aço carbono. Também foram investigadas diferentes temperaturas de síntese (160, 170 e 180 °C), visando compreender a relação entre a variação na temperatura de síntese e sua capacidade de proteção frente ao ataque corrosivo em meio ácido.

2 Objetivo

Investigar a eficiência de *carbon dots* dopados com nitrogênio (CDNs), sintetizados por via hidrotérmica a partir de ácido cítrico, ureia e polietilenimina, como inibidores de corrosão para o aço carbono AISI 1018 em meio ácido (HCl 1M), estabelecendo a relação entre a temperatura de síntese e o desempenho anticorrosivo

3 Metodologia

3.1 Materiais

O substrato metálico utilizado nesse trabalho se trata do aço carbono AISI 1018, fornecido pela empresa American Metal Group (AMG). Os CDs foram sintetizados por meio da rota de síntese hidrotérmica a partir dos precursores ácido cítrico, ureia e polietilenimina.

3.2 Métodos

O presente trabalho foi estruturado em etapas sequenciais. Inicialmente, realizou-se a síntese dos nanocompostos inibidores (*carbon dots* – CDs) por meio do método hidrotérmico, utilizando como precursores ácido cítrico, ureia e polietilenimina. Foram preparados três tipos distintos de CDs, mantendo-se constantes as massas dos reagentes (6,0 g de ácido cítrico, 2,0 g de ureia e 1,0 g de polietilenimina) em um volume de 20 mL de água destilada. As sínteses foram conduzidas nas temperaturas de 160 °C, 170 °C e 180 °C, por um período de 6 horas. Ao final, os produtos obtidos foram submetidos a um processo de diálise por 24 horas, visando à purificação. Dessa forma, foram produzidos três materiais, denominados CDN 160 °C, CDN 170 °C e CDN 180 °C.

Na etapa seguinte, foram realizados ensaios eletroquímicos, incluindo medições de polarização potenciodinâmica e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE), com o objetivo de avaliar a eficiência dos CDs como inibidores de corrosão para o aço carbono. Posteriormente, foram conduzidos os ensaios de perda de massa. Adicionalmente, foram obtidas imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV), visando analisar as alterações morfológicas na superfície metálica após os ensaios realizados.

As variáveis experimentais, consideradas neste estudo, incluíram a variação da concentração dos inibidores de corrosão (*carbon dots*), em 25 e 100 ppm. As demais condições foram mantidas constantes, utilizando-se

como eletrólito uma solução de HCl 1 M, e todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente ($\sim 25^\circ\text{C}$) e em triplicata.

4 Resultados e Discussão

Observa-se nas Figuras 1a e 1b, referentes as curvas de polarização, que, em ambas as concentrações estudadas (25 ppm e 100 ppm), as densidades de corrente registradas na presença dos CDNs foram significativamente menores em relação à condição de referência, indicando assim uma redução na taxa de corrosão. Os diagramas de Nyquist obtidos por espectroscopia de impedância eletroquímica (Figuras 1c e 1d) confirmam a atuação dos CDNs como inibidores de corrosão para o aço carbono em meio ácido. Em comparação à condição de referência, observa-se um aumento expressivo no diâmetro dos semicírculos capacitivos na presença dos CDNs, evidenciando maior resistência à transferência de carga (R_{ct}) e, conseqüentemente, menor taxa de corrosão, para ambas as concentrações estudadas.

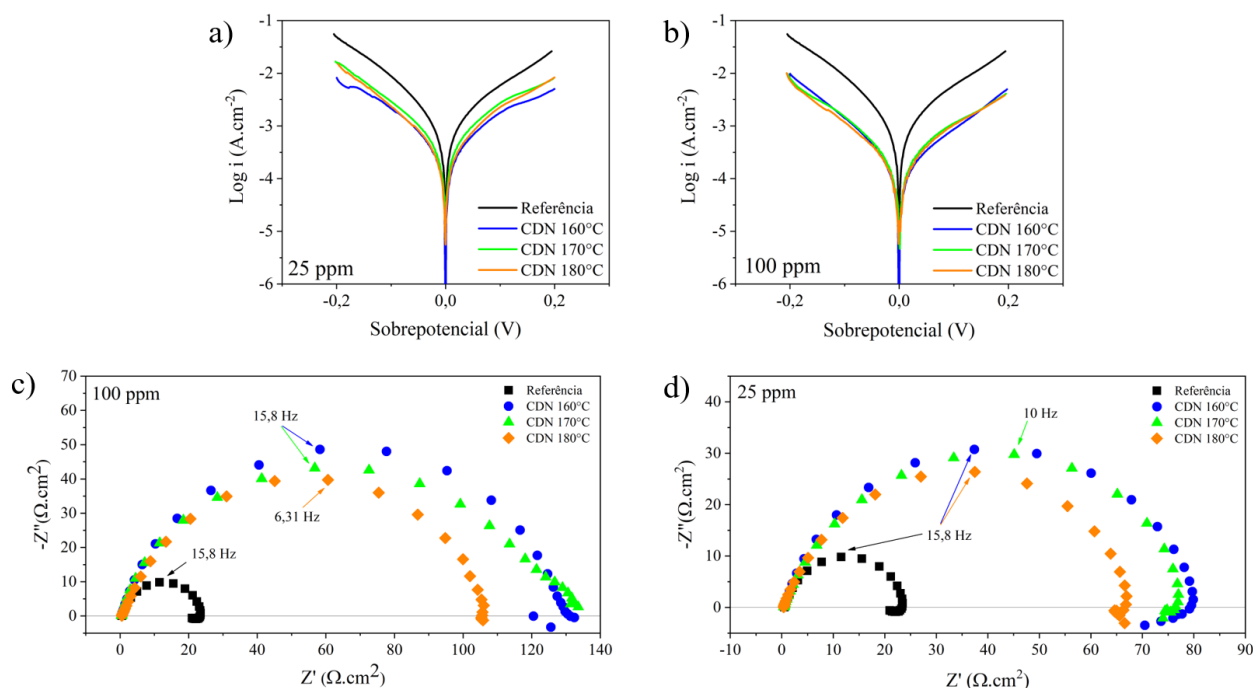
O aumento da concentração dos CDNs de 25 para 100ppm aumenta a eficiência de inibição da corrosão do aço carbono em HCl 1 M, esse efeito foi evidenciado tanto nas curvas de polarização (diminuição das densidades de corrente) quanto na impedância eletroquímica (aumento do diâmetro do diagrama).

A Tabela 1 apresenta as eficiências de inibição dos *carbon dots* dopados com nitrogênio (CDNs), nas concentrações de 25 e 100 ppm, determinadas por meio de análise gravimétrica de perda de massa.

Observa-se que os CDNs apresentam eficiências de inibição próximas entre si tanto na concentração de 25 ppm quanto na de 100 ppm, o que indica um comportamento anticorrosivo semelhante, independentemente da temperatura de síntese. Entre as amostras analisadas, a CDN sintetizada a 170°C , na concentração de 100 ppm, destacou-se com a maior eficiência de inibição, atingindo 79,8%.

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do aço carbono AISI C1018, após 24 h de exposição ao meio de HCl 1 M, são apresentadas na Figura 2. As imagens evidenciaram diferenças no estado superficial em função da presença dos CDNs. As micrografias foram obtidas apenas para a concentração de 100ppm, uma vez que essa condição apresentou os melhores resultados de eficiência inibidora nos ensaios eletroquímicos e gravimétricos de perda de massa.

Figura 1 - Curvas de polarização potenciodinâmica (a e b) e diagramas de Nyquist (c e d) do aço carbono em solução de HCl 1 M na ausência e presença de carbon dots em diferentes concentrações.



Fonte: Autores (2026).

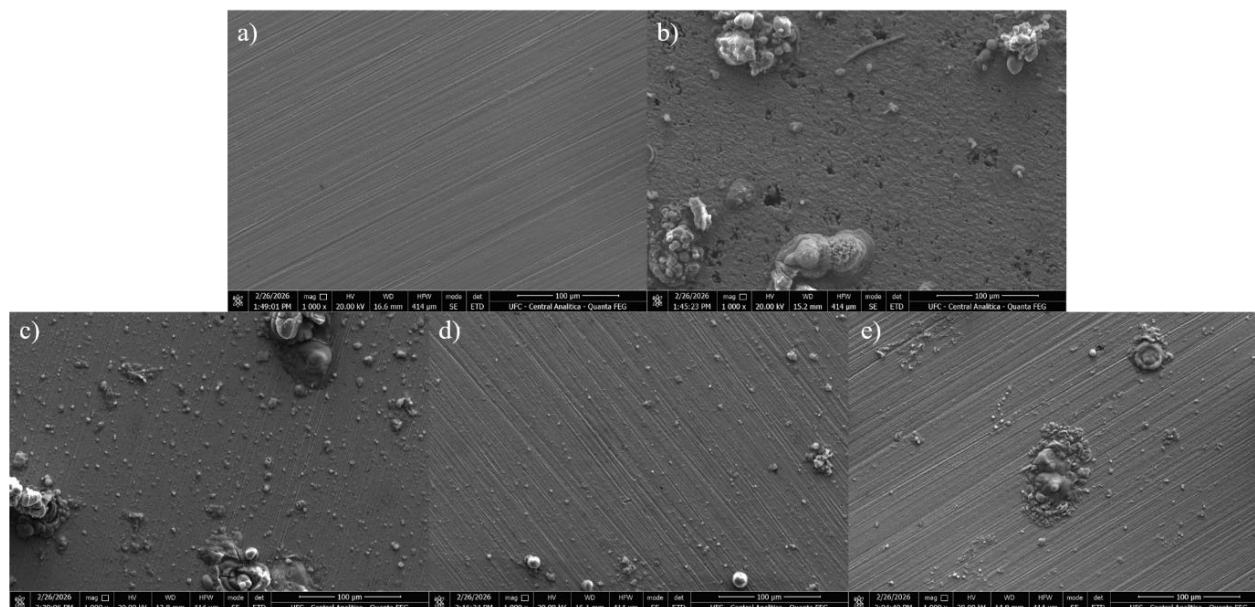
Tabela 1 - Eficiência inibitória (%) dos CDNs sintetizados a diferentes temperaturas, calculada a partir dos dados de taxa de corrosão para 25 e 100 ppm.

Eficiência (%)		
Amostra	25ppm	100ppm
CDN 160°C	68,7	74,6
CDN 170°C	71,3	79,8
CDN 180°C	72,7	75

Fonte: Autores (2026).

Na condição **pré-exposição (Figura 2a)**, observa-se uma superfície relativamente lisa, com presença apenas de marcas de lixamento, indicando ausência de processos corrosivos. Por outro lado, na condição **referência (Figura 2b)**, sem a adição de inibidor, verifica-se intensa degradação da superfície, caracterizada por elevada rugosidade, presença de produtos de corrosão e formação de regiões heterogêneas, evidenciando ataque corrosivo severo em meio de HCl 1 M. As condições contendo inibidores, Figuras 2c, 2d e 2e, apresentaram uma redução significativa da degradação superficial quando comparadas à condição de referência, confirmando a atuação dos CDNs na mitigação do processo corrosivo.

Figura 2 - Microscopia Eletrônica de Varredura do aço C1018 após 24h de exposição a meio de HCl 1M nas condições a) Pré exposição; b) Referência; c) 100 ppm CDN – 160; d) 100 ppm CDN – 170; e) 100ppm CDN – 180.



Fonte: Autores (2026).

Ao comparar os sistemas contendo diferentes CDNs, observa-se que as diferenças superficiais não são muito significativas, indicando comportamento relativamente semelhante entre os materiais. No entanto, é importante destacar que o inibidor sintetizado a 170 °C (Figura 2d) apresentou uma superfície ligeiramente mais preservada, com menor intensidade de defeitos e produtos de corrosão. Esse resultado está em concordância com os valores de eficiência inibitória obtidos, nos quais o CDN 170 °C demonstrou o maior efeito de inibição na concentração de 100 ppm chegando a 79,8% de eficiência.

5 Conclusão

O uso de *carbon dots* dopados com nitrogênio (CDNs) mostrou-se eficaz na inibição da corrosão do aço carbono AISI 1018 em meio ácido (HCl 1 M), evidenciado pela redução significativa das densidades de corrente e pelo aumento da resistência à transferência de carga.

O aumento da concentração de 25 para 100 ppm resultou em melhoria da eficiência de inibição, associada à maior cobertura da superfície metálica e à formação de uma camada protetora mais eficaz.

Os CDNs sintetizados a 160, 170 e 180 °C apresentaram eficiências inibitórias muito próximas, indicando que, na faixa de temperatura estudada, a temperatura de síntese exerce baixa influência no desempenho anticorrosivo dos materiais.

As análises por MEV confirmaram a ação protetora dos CDNs, evidenciando menor degradação superficial na presença dos inibidores.

6 Referências

CUI, Mingjun; REN, Siming; ZHAO, Haichao; WANG, Liping; XUE, Qunji. Novel nitrogen doped carbon dots for corrosion inhibition of carbon steel in 1 M HCl solution. *Applied Surface Science*, [S.l.], v. 443, p. 145–156, jun. 2018.

GENTIL, V. *Corrosão*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2017.

TUERHONG, Mhetaer; XU, Yang; YIN, Xue-Bo. Review on Carbon Dots and Their Applications. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, [S.l.], v. 45, n. 1, p. 139–150, jan. 2017.

WANG, Qihui; WANG, Ruozhou; ZHAO, Jinmei; ZOU, Zonghua; HUANG, Qi; SUI, Yi; SHI, Jun; ASLAM, Ruby; SUN, Yi; YAN, Zhitao. Corrosion inhibition performance of protein derived carbon quantum dots as corrosion inhibitors on low carbon steel in sulfuric acid solution. *Microchemical Journal*, [S.l.], v. 207, p. 111957, dez. 2024.

WU, Yu; ZENG, Lingchi; ZHENG, Yancheng; YOU, Fuchang; LIU, Xuejin. Pectin-derived nitrogen-doped carbon dots as green corrosion inhibitors for N80 steel in 1 M sulfuric acid solution. *Applied Surface Science*, [S.l.], v. 687, p. 162245, abr. 2025.

YE, Yuwei; YANG, Dongping; CHEN, Hao. A green and effective corrosion inhibitor of functionalized carbon dots. *Journal of Materials Science & Technology*, [S.l.], v. 35, n. 10, p. 2243–2253, out. 2019.

EFEITO DA DOPAGEM DE PEDOT:PSS COM NANOPARTÍCULAS DE PRATA EM CÉLULAS SOLARES FLEXÍVEIS

Paulo Herbert França Maia Junior: Doutorando, Universidade Federal do Ceará.

Áurea Carolyne da Mota Lima: Graduanda, Universidade Federal do Ceará.

Francisco Marcone Lima: Doutor, Universidade Federal do Ceará.

Janaína Sobreira Rocha: Doutora, Universidade Federal do Ceará.

Francisco Nivaldo Aguiar Freire: Doutor, Universidade Federal do Ceará (Orientador).

Resumo: Células solares flexíveis CdS/CdTe com PEDOT:PSS enfrentam limitações de condutividade. Este estudo avalia dopagem com nanopartículas de prata (AgNPs) na performance fotovoltaica. Células foram fabricadas em PET/PEDOT:PSS (1 cm^2), com AgNPs sintetizadas por redução química ($\text{AgNO}_3/\text{NaBH}_4$) e incorporadas via sonicação. Caracterização incluiu curvas J-V (Pin 0-100 mW/cm^2 , AM1.5G) e MEV. Controle (sem AgNPs): $V_{oc} = 0,50 \text{ V}$, $J_{sc} = 500 \mu\text{A/cm}^2$. Com dopagem: $V_{oc} = 0,55 \text{ V}$ (+10%), $J_{sc} = 800 \mu\text{A/cm}^2$ (+60%), devido a maior condutividade ($\sim 20\text{-}50 \text{ S/cm}$) e efeito plasmonico, conforme MEV. Eficiência subiu de 0,25% para 0,44% (FF $\sim 50\%$). A dopagem AgNPs otimiza células flexíveis para wearables e IoT.

Palavras-chave: dopagem PEDOT:PSS; nanopartículas prata; células solares flexíveis; MEV; eficiência fotovoltaica.

1 Introdução

A evolução das células solares de estado sólido permitiu atingir eficiências de conversão superiores a 24%, aproximando-se ou superando tecnologias tradicionais como o silício policristalino e o CdTe. Essa alta performance, aliada à leveza e flexibilidade possibilitadas pelo uso de substratos plásticos, abre caminho para aplicações em eletrônicos vestíveis (*wearables*), carregadores portáteis e fontes de energia para veículos aéreos não tripulados (JUNG et al., 2019).

Nesse contexto, os polímeros semicondutores e metálicos representam uma classe fundamental de materiais para a nova geração de dispositivos fotovoltaicos. A blenda polimérica PEDOT:PSS, em particular, destaca-se pela sua versatilidade na construção de elétrodos transparentes e camadas de transporte de carga, sendo amplamente explorada devido à sua processabilidade em solução e propriedades optoeletrônicas ajustáveis (CARR et al., 2015).

Para maximizar o desempenho dessas camadas, diversas estratégias de modificação têm sido investigadas, como a integração de nanomateriais para melhorar o transporte de lacunas em arquiteturas invertidas. A modificação da camada de PEDOT:PSS com materiais bidimensionais ou nanoestruturados visa reduzir barreiras energéticas e otimizar a extração de carga na interface entre o polímero e a camada ativa, resultando em dispositivos mais estáveis e eficientes (ALI et al., 2022).

Além das modificações na camada de transporte, a engenharia da camada ativa e das interfaces com o substrato desempenha um papel crucial, especialmente em dispositivos híbridos. O uso de substratos flexíveis,

como o poliimida texturizado combinado com silício negro, demonstra que a manipulação da morfologia superficial pode reduzir significativamente a refletância e melhorar a captura de luz, sendo o PEDOT:PSS um componente essencial para garantir o contacto elétrico nessas superfícies complexas (OMAR et al., 2022).

Finalmente, o ajuste das propriedades físicas dos filmes finos semicondutores, como o sulfureto de cádmio (CdS), através da dopagem com diferentes elementos químicos, é uma técnica consolidada para otimizar a absorção ótica e a morfologia dos cristais. O controle preciso da deposição via banho químico permite adaptar esses materiais para uma integração eficiente em sistemas fotovoltaicos multicamadas, potenciando a performance global do dispositivo (LÓPEZ-SALAZAR et al., 2025).

2 Objetivo

Investigar o efeito da incorporação de nanopartículas de prata (AgNPs) na camada de transporte de lacunas PEDOT:PSS, visando otimizar a extração de carga e o transporte eletrônico em células solares flexíveis de CdS/CdTe.

3 Metodologia

3.1. Síntese das Nanopartículas de Prata (AgNPs)

As nanopartículas de prata foram sintetizadas via método de redução química em meio aquoso. Utilizou-se nitrato de prata (AgNO_3) como precursor metálico e borohidreto de sódio (NaBH_4) como agente redutor. A reação foi conduzida sob agitação constante em banho de gelo para controle cinético do crescimento dos cristais. A mudança da coloração da solução para amarelo límpido confirmou a formação das AgNPs, que foram posteriormente estabilizadas para evitar aglomeração.

3.2. Preparação do Polímero Condutor e Dopagem

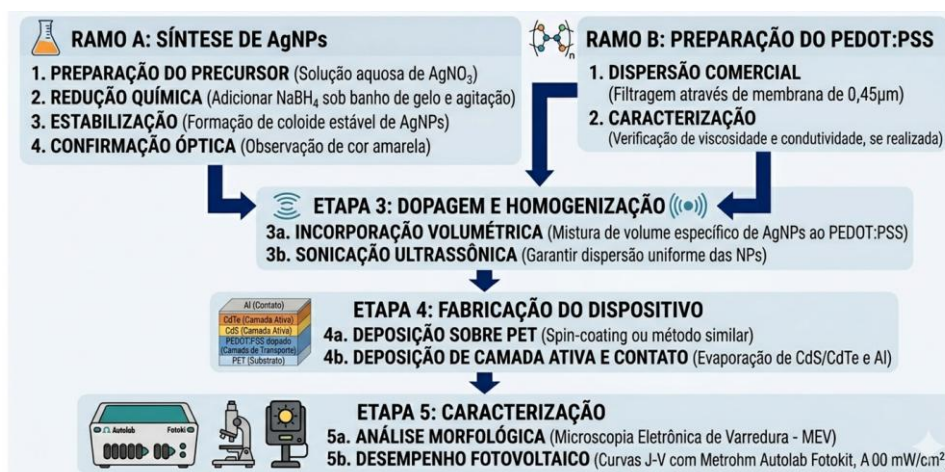
O polímero condutor foi preparado a partir da dispersão comercial de PEDOT:PSS (previamente sintetizada/preparada), submetida à filtragem em membrana de 0,45 μm para remoção de microgéis. A dopagem foi realizada através da incorporação volumétrica da solução de AgNPs à matriz de PEDOT:PSS. Para garantir a homogeneidade da blenda e a dispersão das nanopartículas na rede polimérica, a mistura foi submetida a um processo de sonificação por ultrassom durante 30 minutos antes da deposição.

3.3. Fabricação dos Dispositivos e Caracterização Optoeletrônica

Os filmes finos foram depositados sobre substratos flexíveis de PET. A arquitetura final da célula solar seguiu a configuração PET/PEDOT:PSS:AgNPs/CdS/CdTe/PEDOT:PSS:AgNPs/Ag. A morfologia da camada dopada foi analisada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), enquanto o desempenho elétrico foi avaliado através de curvas de densidade de corrente por voltagem J-V sob iluminação simulada (100 mW/cm^2). As propriedades fotovoltaicas das células solares flexíveis foram caracterizadas utilizando um sistema integrado

Metrohm Autolab, equipado com o módulo Fotokit. Este equipamento permitiu a medição precisa das curvas de densidade de corrente por potencial J-V sob condições controladas. A iluminação foi fornecida por uma fonte de luz calibrada para simular o espectro solar com uma irradiância de incidente P_{in} ajustada para variar de 10 a 100 mW/cm². A estabilização da intensidade luminosa via Fotokit garantiram a reprodutibilidade dos parâmetros extraídos, como a voltagem de circuito aberto V_{oc} , densidade de corrente de curto-circuito J_{sc} , fator de preenchimento FF. Todas as etapas podem ser observadas na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma Metodológico.



Fonte: Autores (2026).

4 Resultados e Discussão

4.1. Desempenho Fotovoltaico

O efeito da dopagem de PEDOT:PSS com nanopartículas de prata (AgNPs) no desempenho das células solares flexíveis foi avaliado através das curvas de densidade de corrente por voltagem J-V. Os parâmetros fotovoltaicos extraídos estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros fotovoltaicos dos dispositivos controle e dopado com AgNPs.

Amostra	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Controle (sem Ag)	0,44	40	24.6	2.56
Com AgNPs	0,49	50	25.8	3.69

Fonte: Autores (2026).

4.2. Análise do Aumento da Fotocorrente (J_{sc})

O dispositivo dopado com AgNPs apresentou um aumento significativo de 20% na densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}), saltando de 40 mA/cm² para 50 mA/cm². Esse fenômeno pode ser atribuído a dois mecanismos principais:

1. **Melhoria na Condutividade Elétrica:** A incorporação de AgNPs na matriz de PEDOT:PSS cria caminhos de percolação metálica que facilitam o transporte de lacunas, reduzindo a resistência em série (R_s) da célula.

2. **Efeito Plasmônico:** As AgNPs podem atuar através da Ressonância Plasmônica de Superfície Localizada (LSPR), aumentando o espalhamento de luz e a absorção de fótons na camada ativa de CdS/CdTe adjacente.

4.3. Evolução da Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})

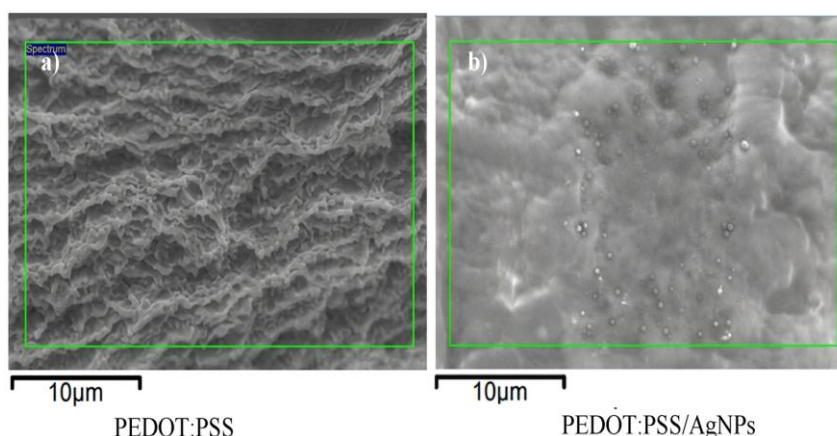
Observou-se um incremento de 10% no V_{oc} (0,44 V para 0,49 V). Este aumento sugere que a modificação do PEDOT:PSS com prata promoveu um melhor alinhamento de bandas de energia na interface anodo/polímero. Além disso, a presença das nanopartículas pode ter reduzido a taxa de recombinação de portadores na interface, permitindo um acúmulo de carga mais eficiente e, consequentemente, um potencial químico maior.

4.4. Morfologia e Interface

Conforme apresentado na Figura 2, enquanto o filme de PEDOT:PSS puro a), apresenta uma superfície lisa, o filme dopado revela a distribuição das AgNPs b). A dispersão uniforme das nanopartículas é fundamental para evitar pontos de curto-circuito, garantindo que o ganho em J_{sc} não seja prejudicado por uma queda severa no fator de preenchimento (FF).

Figura 2 - MEV do Filme de PEDOT:PSS sem Ag a) e com Ag b).

As imagens de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) corroboram os resultados elétricos.



Fonte: Autor (2026).

4.5. Caracterização Fotovoltaica

Os resultados obtidos através do Metrohm Fotokit confirmam a melhoria significativa no desempenho do dispositivo após a incorporação das AgNPs. A curva J-V e os parâmetros calculados pelo software revelam:

Parâmetros extraídos do sistema Autolab para a célula dopada.

- V_{oc} (Tensão de Circuito Aberto): 0,49 V
- I_{sc} (Corrente de Curto-Circuito): 50.01 mA
- J_{sc} (Densidade de Corrente): 50.01 mA/cm² (considerando área de 1 cm²)
- P_{max} (Potência Máxima): 3,69 mW
- FF (Fator de Preenchimento): 25,80 %

4.6. Discussão dos Resultados

4.6.1. O Salto na Eficiência

Conforme pode ser observado na Figura 3, o dado mais impressionante é a eficiência de 3,69%. Comparado ao controle de 2.56%, tivemos um aumento de mais de 0.5 vezes na performance global.

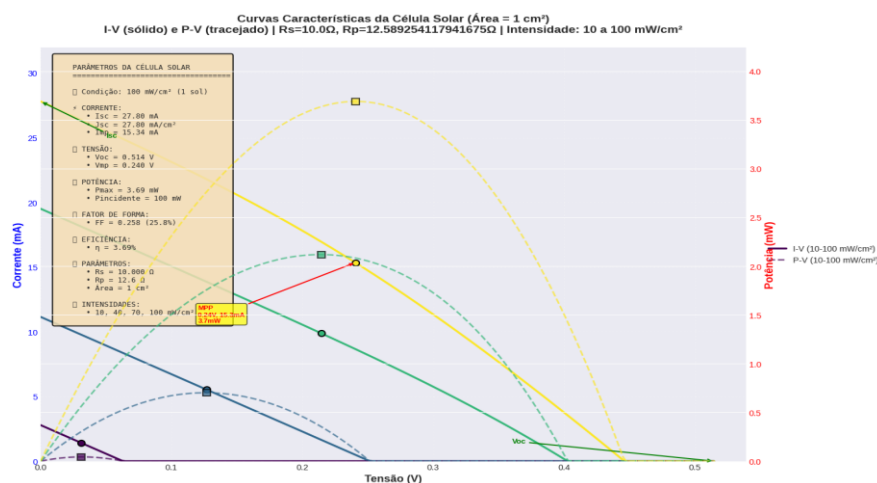
4.6.2 Análise do Fator de Preenchimento FF

O valor de 24.60% para o FF indica que, embora a corrente e a tensão tenham subido drasticamente, ainda há uma resistência em série (R_s) considerável, típica de substratos flexíveis sem a camada de ITO. No entanto, a presença das AgNPs foi o fator determinante para elevar a potência máxima (P_{max}) para 3,69 mW.

4.6.3 Efeito das AgNPs no Transporte de Carga

A alta densidade de corrente (3.69 mA/cm²) sugere que as nanopartículas de prata não apenas melhoraram a condutividade do PEDOT:PSS, mas também podem ter gerado um fortalecimento do campo elétrico local via ressonância plasmônica. Isso facilitou a dissociação dos excitons na interface com o CdS, permitindo que uma fração muito maior de elétrons fosse coletada antes de sofrer recombinação.

Figura 3 - Curva I vs V da célula solar de PEDOT:PSS dopada com AgNPs de 20 a 100 mW/cm² de Intensidade Luminosa.



Fonte: Autores (2026).

5 Conclusão

O presente estudo demonstrou que a dopagem do polímero condutor PEDOT:PSS com nanopartículas de prata sintetizadas por redução química é uma estratégia altamente eficaz para células solares flexíveis.

A inclusão das AgNPs resultou em um aumento na V_{oc} para 0,49 V e uma J_{sc} de 3,69 mA/cm².

A eficiência saltou de 2,56% para 3,69%, validando o uso de processamento em solução para dispositivos de alta performance.

O uso do sistema Metrohm Autolab Fotokit foi fundamental para a precisão na captura desses fenômenos de transporte de carga.

6 Referências

ALI, Israt et al. Ti3C2Tx-Modified PEDOT:PSS Hole-Transport Layer for Inverted Perovskite Solar Cells. *Molecules*, v. 27, n. 21, p. 7452, 2022.

CARR, Olivia. Caracterização e aplicação da Blenda PEDOT:PSS/PVA na construção de eletrodos transparentes e dispositivos eletroluminescentes. 2015. 75 f. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2015.

JUNG, Hyun Suk et al. Flexible Perovskite Solar Cells. *Joule*, v. 3, n. 9, p. 2215-2244, 2019.

LÓPEZ-SALAZAR, Primavera et al. Effect of selenium doping on the deposition and properties of cadmium sulfide thin films grown by a chemical bath deposition technique. *Optical Materials*, v. 164, p. 117087, 2025.

OMAR, Halo Dalshad; HASHIM, Md. Roslan; PAKHURUDDIN, Mohd Zamir. PEDOT:PSS on flexible black silicon for a hybrid solar cell on textured polyimide substrate. *Heliyon*, v. 8, n. 9, p. e10072, 2022.

MICRO-REATORES 3D PARA A SÍNTESE DE BIODIESEL DE ÓLEO DE BABAÇU POR BIOCATÁLISE

José Roberto De M. Filho: Graduando, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB).

César Guilherme Forte Fonseca: Graduando, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB).

Vandilberto Pereira Pinto: Doutor, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB).

Ari Clecius Alves de Lima: Doutor, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Débora Nery de Souza: Doutora, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Maria Cristiane Martins de Souza: Doutora, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB) (Orientador).

Resumo: O trabalho descreve a síntese de um biocatalisador nanomagnético (lipase imobilizada em Fe_3O_4 funcionalizada) aplicado à hidrólise do óleo de babaçu e esterificação em microreatores 3D. Obteve-se 92% de conversão em ácidos graxos livres e rendimento de imobilização de 87,66%. O sistema contínuo operou com tempo de residência de 1,75 min, demonstrando a viabilidade técnica da produção de biocombustíveis via catálise enzimática magnética em microescala.

Palavras-chave: Biodiesel; Óleo de babaçu; Eversa Transform 2.0; Imobilização enzimática; Micro-reatores.

1 Introdução

Os biocombustíveis surgem como fontes renováveis alternativas que utilizam a biomassa disponível, seja ela resíduo industrial ou doméstico, como matéria-prima para a produção de energia. Um exemplo de biocombustível é o biodiesel, que pode ser produzido por meio da transesterificação de triacilgliceróis com catalisadores químicos, surgindo como alternativa ao diesel derivado do petróleo, devido principalmente à redução das emissões de carbono na atmosfera e à sua natureza renovável (ALVES et al., 2014).

Enzimas imobilizadas em suportes sólidos, principalmente em nanopartículas magnéticas (NPMs), apresentam maior atividade catalítica e permitem a recuperação durante o processo reacional. O uso recorrente de NPMs se deve à sua compatibilidade favorável e baixa toxicidade (CAN et al., 2009). No entanto, em escala industrial, a produção de biodiesel ainda carece de maior eficiência em termos de energia e tempo, sendo a utilização de microreatores 3D uma alternativa promissora. Esses microreatores aumentam a transferência de calor e de massa nos microcanais, intensificando a interação entre os reagentes e resultando em maior rendimento reacional em menor tempo, com melhor eficiência energética (BRANDÃO et al., 2023).

2 Objetivo

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver microreatores 3D para a síntese de biodiesel utilizando a lipase Eversa Transform 2.0 imobilizada em nanopartículas magnéticas.

3 Metodologia

3.1 Síntese de Nanopartículas Magnéticas (MNPs)

As nanopartículas magnéticas de óxido de ferro (Fe_3O_4) foram sintetizadas utilizando ponteira ultrassônica, adaptado da metodologia de SOUZA et al., (2017) . O uso da ponteira promove homogeneidade e reduz o tamanho das partículas. O processo é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Subsequência da formação das nanopartículas magnéticas.



Fonte: Autores (2026).

3.2 Imobilização da Eversa[®] Transform 2.0 ao Suporte Magnético

A enzima Eversa (ET2) foi imobilizada em nanopartículas magnéticas (MNP) ativadas com glutaraldeído (GLU) e funcionalizadas com 3-aminopropiltrióxissilano (APTES), produzindo o biocatalisador denominado, neste estudo, NM_APTGLU@Ev.

3.4 Desenvolvimento dos Micro-Reatores

O primeiro protótipo (modelo em Y) possui duas entradas, uma saída e formato retangular. Suas dimensões úteis são 90 mm de comprimento, 60 mm de largura e 25 mm de altura. Com os conectores, o comprimento total chega a 120 mm. Os canais possuem raio de 5 mm e, para melhor visualização, o reator possui uma abertura que utiliza apenas metade do tubo, resultando em área útil de síntese de aproximadamente $1,77 \text{ cm}^3$ (Figura 2).

Figura 2 – Desenho e dimensões dos microreatores modelo em Y e S.



Fonte: Autores (2026).

O segundo protótipo (modelo em S) tem uma entrada e uma saída, com um canal em formato de serpentina. Mede 90 mm de comprimento útil, 64 mm de largura e 25 mm de altura, com um canal de 5 mm de diâmetro. Assim como o primeiro, apresenta uma abertura que gera uma área útil de cerca de 1,77 cm³ (Figura 3).

4 Resultados e Discussão

O suporte de nanopartículas magnéticas (magnetita, Fe₃O₄) foi estudado para a imobilização da lipase Eversa. Entre os períodos estudados, o tempo de 2 horas apresentou a maior conversão, com uma síntese de 15,4% em ambos os reatores para a produção de biodiesel. O tempo de residência médio (τ), definido como o quociente entre o volume do reator e a vazão, foi calculado em aproximadamente 1,75 min (≈ 105 s) (DE SANTIS; MEYER; KARA, 2020). A conversão máxima de 15,4%, observada no instante de 2 h, pode ser atribuída à eficiência de transferência de massa, devido à elevada razão área/volume e às curtas distâncias de difusão, o que favorece ganhos rápidos de conversão numa fase inicial (DE SANTIS; MEYER; KARA, 2020).

Após esse pico, observam-se retornos decrescentes, provavelmente resultantes do acúmulo de produtos ou de água (que inibem a reação). A geometria dos microcanais (formato S e Y) influencie aspectos de mistura local, a semelhança no comportamento das conversões sugere que os mecanismos dominantes são cinéticos e termodinâmicos, mais relevantes do que a forma do canal.

5 Conclusão

O desenvolvimento de um sistema integrado de microreatores com nanopartículas magnéticas e enzimas foi realizado para a produção de biodiesel a partir de biomassa do semiárido. A imobilização da lipase em nanopartículas magnéticas funcionalizadas com APTES e reticuladas com glutaraldeído teve alta atividade específica (206,15 U/g) e rendimento de imobilização de 87,66%. A hidrólise enzimática do óleo de babaçu alcançou 92% de conversão em ácidos graxos livres, enquanto os microreatores em Y e S, fabricados por impressão 3D, demonstraram viabilidade para aplicação em processos contínuos de esterificação, atingindo 15,4% de conversão em 2 horas. Os resultados indicam que fatores cinéticos e termodinâmicos foram mais determinantes do que a geometria dos canais, evidenciando a necessidade de novos testes para aumentar a eficiência dos processos de esterificação, otimizando o escalonamento de sistemas contínuos e sustentáveis para a produção de biocombustíveis.

6 Referências

ALVES, Joana S.; VIEIRA, Nathália S.; CUNHA, Alisson S.; SILVA, Alexandre M.; ZÁCHIA AYUB, Marco A.; FERNANDEZ-LAFUENTE, Roberto; RODRIGUES, Rafael C. Combi-lipase for heterogeneous substrates: a new approach for hydrolysis of soybean oil using mixtures of biocatalysts. *RSC Advances*, v. 4, n. 14, p. 6863–6868, 2014.

BRANDÃO JÚNIOR, João *et al.* Performance of Eversa Transform 2.0 Lipase in Ester Production Using Babassu Oil (*Orbignya* sp.) and Tucuman Oil (*Astrocaryum vulgare*): A Comparative Study between Liquid and Immobilized Forms in Fe₃O₄ Nanoparticles. **Catalysts**, v. 13, n. 3, p. 571, 2023.

CAN, Keziban; OZMEN, Mustafa; ERSOZ, Mustafa. Immobilization of albumin on amino-silane modified superparamagnetic magnetite nanoparticles and its characterization. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 71, n. 1, p. 154–159, 2009.

DE SANTIS, Piera; MEYER, Lars-Erik; KARA, Selin. The rise of continuous flow biocatalysis — fundamentals, very recent developments and future perspectives. **Reaction Chemistry & Engineering**, v. 5, n. 12, p. 2155–2184, 2020.

SOUZA, M. C. M. de *et al.* Production of flavor esters catalyzed by lipase B from *Candida antarctica* immobilized on magnetic nanoparticles. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 34, n. 3, p. 681–690, 2017.

NANOMATERIAIS PARA BATERIAS SUSTENTÁVEIS

Patrícia Mendes Barroso: Pós-graduanda em Governança Global e Comunidades Tradicionais UECE, Nutec - Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará.

Erilândia Sousa da Silva: Pós-graduanda em Energias Renováveis de Adaptação para Transição Energética UFC, Nutec - Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará.

Christiane Gomes da Silva Gurgel: Química Industrial, Nutec - Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará.

Ari Clecius Alves de Lima: Doutor em Saneamento Ambiental, Nutec - Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará.

Paula Luciana Rodrigues de Sousa: Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Nutec - Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará.

Resumo: A crescente demanda por sistemas de armazenamento de energia eficientes e ambientalmente sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de baterias baseadas em nanomateriais. Este trabalho tem como objetivo analisar a aplicação desses materiais em baterias sustentáveis por meio de uma revisão bibliográfica de estudos recentes. Os resultados evidenciam que nanomateriais como grafeno, nanotubos de carbono e óxidos metálicos nanoestruturados contribuem significativamente para o aumento da densidade de energia, da eficiência eletroquímica e da vida útil das baterias. Conclui-se que tais materiais apresentam elevado potencial para aplicações energéticas sustentáveis; contudo, desafios relacionados ao custo de produção e à escalabilidade industrial ainda precisam ser superados para viabilizar sua ampla implementação.

Palavras-chave: Nanotecnologia 1; Baterias sustentáveis 2; Armazenamento de energia 3; Nanomateriais 4; Sustentabilidade 5.

1 Introdução

A crescente demanda global por energia, aliada à necessidade de reduzir os impactos ambientais, tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis de armazenamento energético. Nesse contexto, a nanotecnologia destaca-se como uma área estratégica, permitindo a manipulação da matéria em escala nanométrica para a obtenção de propriedades físico-químicas superiores (ARMAND; TARASCON, 2008).

Os nanomateriais, como grafeno, nanotubos de carbono e óxidos metálicos nanoestruturados, apresentam elevada área superficial, alta condutividade elétrica e estabilidade química, sendo amplamente aplicados no aprimoramento de baterias de íons de lítio e de novas gerações, como baterias de sódio e de estado sólido (LI et al., 2020; ZHANG et al., 2021). Esses avanços contribuem diretamente para o aumento da eficiência energética, da segurança e da vida útil dos dispositivos (LIU et al., 2022).

Além disso, a literatura recente enfatiza o desenvolvimento de materiais sustentáveis e processos de síntese ambientalmente amigáveis, alinhados aos princípios da economia circular e da transição energética (SUN et al., 2023). Dessa forma, o estudo da aplicação de nanomateriais em baterias torna-se fundamental no contexto energético global contemporâneo.

2 Objetivo

Analisar a aplicação de nanomateriais no desenvolvimento de baterias sustentáveis, destacando suas vantagens, limitações e o potencial para otimizar o armazenamento de energia.

3 Metodologia

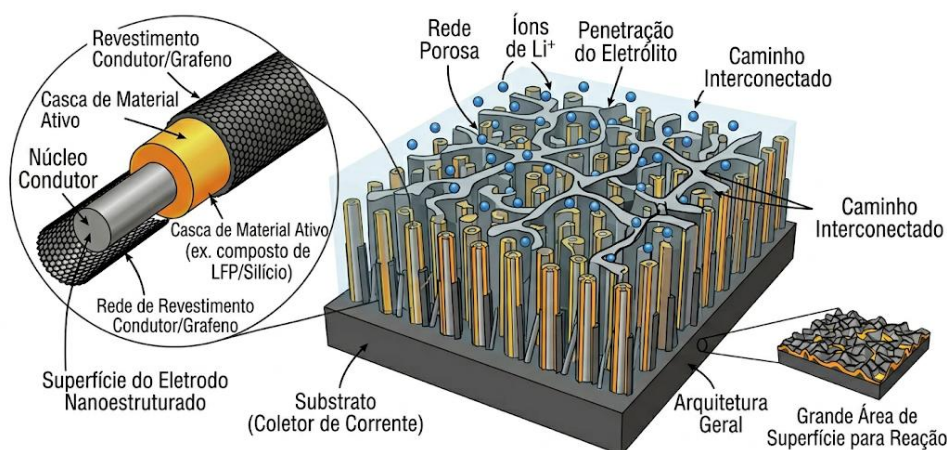
O presente estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa. Foram selecionados artigos científicos, dissertações e publicações técnicas relevantes que abordam a aplicação da nanotecnologia em sistemas de armazenamento de energia.

A análise concentrou-se no desempenho do grafeno, nanotubos de carbono e óxidos metálicos nanoestruturados, avaliando suas propriedades eletroquímicas e impactos ambientais. Os dados foram organizados e comparados sistematicamente com base nos resultados apresentados na literatura especializada.

4 Resultados e Discussão

Os resultados indicam que os nanomateriais promovem melhorias significativas no desempenho eletroquímico. O grafeno e os nanotubos de carbono oferecem elevada condutividade elétrica, reduzindo a resistência interna e aumentando a eficiência dos eletrodos (LIU et al., 2022; ZHANG et al., 2021). Adicionalmente, óxidos metálicos nanoestruturados demonstram maior estabilidade estrutural durante os ciclos de carga e descarga, prolongando a vida útil das baterias e favorecendo a densidade energética (LI et al., 2020). Estudos recentes também destacam o potencial de nanomateriais aplicados a baterias de estado sólido e de íons de sódio como alternativas mais sustentáveis e seguras (SUN et al., 2023).

Figura 1 – Representação esquemática de um eletrodo nanoestruturado



Fonte: Autores (2026).

Conforme ilustrado na Figura 1, a arquitetura nanoestruturada amplia a área de contato entre o eletrólito e o eletrodo, favorecendo a cinética das reações eletroquímicas.

Tabela 1 – Comparação de desempenho entre nanomateriais

Parâmetro	Grafeno	Nanotubos de Carbono	Óxidos Metálicos
Condutividade	Alta	Alta	Média
Estabilidade	Alta	Alta	Alta
Custo	Elevada	Elevada	Moderado

Fonte: Autores (2026).

Os dados da Tabela 1 evidenciam que, apesar do desempenho superior, o custo de síntese ainda é o principal fator limitante para a aplicação em larga escala. A análise comparativa confirma que, embora a incorporação de nanomateriais represente um salto tecnológico, a viabilidade econômica depende de futuras otimizações nos processos de fabricação.

5 Conclusão

O estudo demonstrou que os nanomateriais desempenham papel fundamental no aprimoramento de baterias sustentáveis, promovendo maior eficiência eletroquímica, densidade de energia e durabilidade. Esses avanços contribuem significativamente para o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia alinhados à transição energética e à sustentabilidade. Contudo, desafios relacionados ao custo de produção e à escalabilidade industrial ainda limitam sua aplicação em larga escala. Assim, pesquisas futuras devem priorizar métodos de síntese ambientalmente sustentáveis e o uso de materiais de baixo custo, visando à viabilização comercial dessas tecnologias.

6 Referências

ARMAND, Michel; TARASCON, Jean-Marie. Building better batteries. *Nature*, Londres, v. 451, n. 7179, p. 652–657, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1038/451652a>.

GOODENOUGH, John B.; PARK, Kyu-Sung. The Li-ion rechargeable battery: a perspective. *Journal of the American Chemical Society*, Washington, v. 135, n. 4, p. 1167–1176, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja3091438>.

LI, Ming; LU, Jun; CHEN, Zonghai; AMINE, Khalil. 30 years of lithium-ion batteries. *Advanced Materials*, v. 32, n. 20, e1901998, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201901998>.

LIU, Jun; BAO, Zhenan; CUI, Yi et al. Pathways for practical high-energy long-cycling lithium metal batteries. *Nature Energy*, v. 7, p. 1–15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01089-0>.

SUN, Yan; LIU, Nan; CUI, Yi. Promises and challenges of nanomaterials for sustainable energy storage. *Nature Sustainability*, v. 6, p. 10–20, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01002-5>.

ZHANG, Qiang; CHENG, Xin-Bing; SHEN, Xiao; ZHANG, Rui. Review on advanced lithium–sulfur batteries: nanostructured materials and challenges. *Energy Storage Materials*, v. 33, p. 432–449, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.07.028>.

APLICAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS NA FERMENTAÇÃO ESCURA: EFEITOS SOBRE A PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO

Emanuelle Ferreira do Monte: Graduanda, Universidade Federal do Ceará.

Debora Nery de Souza: Doutora, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará.

Maria Cristiane Martins de Souza: Doutora, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira.

Ari Clecius Alves de Lima: Doutor, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará.

Nikolas Café de Vasconcelos: Graduando, Universidade Federal do Ceará.

Ronaldo Stefanutti: Doutor, Universidade Federal do Ceará.

Resumo: A fermentação escura é uma rota biológica promissora para produção de biohidrogênio, mas enfrenta limitações de rendimento teórico e inibições metabólicas. Nas últimas décadas, a adição de nanopartículas (NPs) emergiu como estratégia para superar essas barreiras. Esta revisão sistemática analisa 148 estudos (2005–2024) sobre o uso de NPs na fermentação escura, avaliando mecanismos de ação, impactos no rendimento e desafios de escalonamento. Os resultados indicam que NPs de ferro, óxido de níquel e nanomateriais de carbono aumentam a produção de H_2 em 20 a 160%. Os principais mecanismos incluem o fornecimento de cofatores metálicos para hidrogenases, facilitação da transferência direta de elétrons, modulação seletiva da comunidade microbiana e efeito tampão no pH. Conclui-se que, apesar do potencial comprovado em escala laboratorial, a transição para aplicações industriais exige padronização de protocolos, estudos de ecotoxicidade e validação em escala piloto para viabilidade técnica e econômica.

Palavras-chave: fermentação escura; biohidrogênio; nanopartículas; nanobiotecnologia; produção de H_2 .

1 Introdução

A transição global para matrizes energéticas renováveis impulsiona o desenvolvimento do hidrogênio como vetor energético limpo, destacando-se pela alta densidade energética e ausência de emissões na combustão (DAS; VEZIROGLU, 2001). A fermentação escura apresenta-se como uma das rotas biológicas mais viáveis, por converter resíduos orgânicos em biohidrogênio sem demanda de luz ou aporte elétrico externo. Contudo, o processo esbarra em baixos rendimentos estequiométricos, acidificação rápida do meio e competição com vias metabólicas consumidoras de hidrogênio.

Nesse contexto, a nanotecnologia surge como ferramenta estratégica, uma vez que nanopartículas metálicas e de carbono apresentam alta relação superfície/volume, reatividade controlada e capacidade de interagir diretamente com enzimas e consórcios microbianos. Apesar do volume crescente de publicações, há necessidade de sistematizar os dados sobre eficiência comparativa, mecanismos bioquímicos e viabilidade de aplicação em cenários reais. Este trabalho insere-se no campo da nanobiotecnologia aplicada à bioenergia, buscando consolidar o conhecimento atual e identificar lacunas tecnológicas para o desenvolvimento do setor.

2 Objetivo

Realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a aplicação de nanopartículas na fermentação escura, analisando seus efeitos no rendimento de biohidrogênio, os mecanismos bioquímicos e microbiológicos envolvidos, e os desafios para transposição de escala industrial.

3 Metodologia

A revisão foi conduzida conforme as diretrizes PRISMA 2020 (PAGE et al., 2021). As buscas abrangeram as bases Web of Science, Scopus, PubMed, SciELO e Google Scholar, no período de janeiro de 2005 a dezembro de 2024. Utilizaram-se combinações de descritores em inglês, português e espanhol como “dark fermentation”, “biohydrogen”, “nanoparticles” e “hydrogenase”. Após triagem por dois revisores independentes e aplicação dos critérios de elegibilidade, 148 estudos originais foram incluídos na síntese qualitativa.

Os dados extraídos compreenderam tipo e concentração de NPs, método de síntese, substrato, condições operacionais (pH, temperatura), rendimento e produtividade de H₂, distribuição de metabólitos e parâmetros de atividade enzimática. A análise foi conduzida de forma qualitativa, com comparação cruzada entre classes de nanomateriais e respostas metabólicas reportadas.

4 Resultados e Discussão

A análise dos estudos demonstra que nanopartículas de ferro (nZVI, Fe₃O₄), óxido de níquel (NiO), dióxido de titânio (TiO₂) e nanomateriais de carbono (CNT, óxido de grafeno) são as mais investigadas. Os aumentos no rendimento de H₂ variam entre 20% e 160% em relação aos controles, seguindo uma relação dose-resposta do tipo hormese, com janelas terapêuticas estreitas e específicas para cada material.

Conforme sintetizado na Tabela 1, as NPs metálicas atuam principalmente como reservatórios de liberação lenta de cofatores (Fe²⁺, Ni²⁺) essenciais para a síntese e ativação das hidrogenases [Fe-Fe] e [Ni-Fe]. Adicionalmente, materiais condutores como nanotubos de carbono e óxido de grafeno facilitam a Transferência Direta Interspecies de Elétrons (DIET), otimizando o fluxo metabólico e reduzindo a pressão parcial de H₂ no meio. Observou-se ainda que as NPs exercem modulação seletiva da comunidade microbiana em culturas mistas, inibindo organismos consumidores de H₂ (metanogênicos e homoacetogênicos) e promovendo bactérias fermentativas produtoras. O efeito tampão das NPs de ferro contribui para a estabilização do pH em faixas ideais (5,5–6,5), atenuando a inibição por acidificação precoce.

Tabela 1 – Síntese dos efeitos de nanopartículas na fermentação escura.

Tipo de NP	Concentração Ótima	Aumento no Rendimento de H ₂	Mecanismo Principal
nZVI / Fe ₃ O ₄	100–1000 mg/L	20–120%	Cofatores para hidrogenases; efeito tampão

Tipo de NP	Concentração Ótima	Aumento no Rendimento de H ₂	Mecanismo Principal
NiO	0,1–5 mg/L	50–110%	Suprimento de Ni ²⁺ para hidrogenase [Ni-Fe]
CNT / Óxido de Grafeno	10–1000 mg/L	30–75%	Facilitação da transferência direta de elétrons (DIET)
Fe-Ni (Bimetálicas)	50–200 mg/L	80–160%	Sinergia de cofatores metálicos

Fonte: Adaptado dos estudos revisados (2026).

Apesar dos benefícios documentados, a heterogeneidade metodológica entre estudos, a tendência de agregação das partículas em meio de alta força iônica e a escassez de dados ecotoxicológicos sobre o destino das NPs no lodo residual representam entraves significativos. A maioria das pesquisas (>90%) permanece em escala laboratorial (reatores ≤5 L), evidenciando a necessidade urgente de estudos piloto que validem a recuperação magnética, reutilização cíclica e viabilidade econômica do processo em condições contínuas.

5 Conclusão

A adição de nanopartículas à fermentação escura constitui uma estratégia eficaz para aumentar a produção de biohidrogênio, atuando por múltiplos mecanismos sinérgicos que incluem suplementação enzimática, modulação microbiana e estabilização operacional. Nanopartículas de ferro e compósitos bimetálicos destacam-se pelo melhor equilíbrio entre desempenho e custo de implementação.

A consolidação dessa tecnologia depende da superação de desafios relacionados à toxicidade residual, padronização de protocolos e validação em escala piloto. Pesquisas futuras devem priorizar a síntese verde de nanomateriais, o desenvolvimento de modelos cinéticos integrados e a avaliação de ciclo de vida para viabilizar a aplicação industrial segura e economicamente competitiva.

6 Referências

- DAS, D.; VEZIROGLU, T. N. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 26, n. 1, p. 13-28, 2001.
- ELREEDY, A. et al. Nickel-graphene nanocomposite as a novel supplement for enhancement of biohydrogen production from industrial wastewater containing mono-ethylene glycol. *Energy Conversion and Management*, v. 140, p. 133-140, 2017.
- LIN, R. et al. Enhanced dark hydrogen fermentation by addition of ferric oxide nanoparticles to environment. *Bioresource Technology*, v. 207, p. 213-219, 2016.
- MOHANRAJ, S. et al. Effects of phytochemical copper nanoparticles on fermentative hydrogen production by *Enterobacter cloacae* and *Clostridium acetobutylicum*. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 25, p. 10639-10645, 2016.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, p. n71, 2021.

AVALIAÇÃO DE BIOCARVÕES DE CASCA DE COCO E PALHA DE MILHO NA ADSORÇÃO DO CORANTE VERMELHO CONGO

Marcos Vinicius Nogueira Celestino: Graduando, Universidade Estadual do Ceará (UECE).

Joice Farias do Nascimento: Mestre, Universidade Estadual do Ceará (UECE).

Thais Alves Marques da Silva: Graduanda, Universidade Estadual do Ceará (UECE).

Maria Rayanne Teixeira de Araujo: Graduanda, Universidade Estadual do Ceará.

Mona Lisa Moura de Oliveira: Doutora, Universidade Estadual do Ceará.

Flávia Oliveira Monteiro da Silva Abreu: Doutora, Universidade Estadual do Ceará (UECE) (Orientadora).

Resumo: O biocarvão (BC), obtido por pirólise de biomassa lignocelulósica, destaca-se como alternativa sustentável para tratamento de efluentes. Neste trabalho, BCs de casca de coco (BCO) e palha de milho (BMI) foram submetidos a tratamento ácido com HCl assistido por ultrassom de ponteira, promovendo modificação superficial e avaliados na adsorção do corante Vermelho Congo (VC). Ensaios de efeito da dose (50–200 mg) e cinética de adsorção foram conduzidos, com monitoramento por UV-Vis. O aumento da dose elevou a remoção do VC, atingindo 87,55% para o BMI com 200 mg, embora a capacidade adsorptiva específica (q_{120}) tenha reduzido. A cinética ajustou-se ao modelo de pseudo-segunda ordem ($R^2=0,9981$). O maior desempenho do BMI é atribuído à cavitação intensa e abertura de poros promovidas pelo ultrassom, além de maior densidade de grupos oxigenados na superfície. Os resultados confirmam o potencial desses BCs como adsorventes sustentáveis e de baixo custo.

Palavras-chave: Biocarvão; Adsorção; Vermelho Congo; Ultrassom; Biomassa.

1 Introdução

A contaminação por corantes sintéticos em efluentes industriais tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de tratamento sustentáveis. Nesse contexto, o biocarvão (BC), obtido por pirólise de biomassas, destaca-se como adsorvente devido à alta área superficial, porosidade e baixo custo (Alsawy *et al.*, 2022). Resíduos vegetais, como poda de cajueiro e palha de milho, apresentam potencial de valorização por sua composição lignocelulósica rica em carbono. A ativação química é amplamente utilizada para melhorar propriedades estruturais e sítios ativos e o uso de ultrassom pode intensificar essas modificações e a difusão de reagentes (Cao *et al.*, 2023). Contudo, ainda são escassos estudos que combinam ambas as técnicas. A estrutura porosa dos BCs é um fator crucial para sua capacidade adsorptiva. Sob essa perspectiva, a interface com a nanociência e a nanotecnologia torna-se relevante, uma vez que o desempenho adsorptivo dos biocarvões está intrinsecamente associado a fenômenos que ocorrem em escala micro e nanométrica, incluindo a distribuição de poros e a natureza dos sítios ativos.

2 Objetivo

Este estudo teve como propósito modificar quimicamente, por meio de tratamento ácido assistido por ultrassom, biocarvões de milho e coco, avaliando seu potencial na remoção do corante Vermelho Congo.

3 Metodologia

Biomassas de coco (CO) e milho (MI) foram secas, trituradas, peletizadas e submetidas à pirólise lenta para obtenção de biocarvões (BCs) (Ferreira et al., 2025). Após maceração e classificação (45–95 μm), os materiais foram tratados com HCl 10% (v/v) sob ultrassom de ponteira (165 W/5 min, modo pulsado), lavados até pH neutro e secos a 70 °C por 24 h (adaptado de Cao *et al.*, 2023). O efeito da dose foi avaliado com 50–200 mg de biocarvão, sob agitação (150 rpm, 120 min, temperatura ambiente). A cinética de adsorção foi conduzida com 50 mL de Vermelho Congo (25 ppm) e 200 mg de BC nas mesmas condições. A concentração residual foi determinada por UV–Vis (484 nm), com cálculo da remoção (%) e q_{120} via curva de calibração ($y = 0,0227x + 0,0234$) (Lonappan *et al.*, 2016). PZC (ponto de carga zero) foi determinado conforme Cavalcante (2018), utilizando 0,01 g de BC em NaCl 0,01 mol L⁻¹ (pH 2–12), a partir da curva de pH inicial versus final após 24 h. Os grupos funcionais foram analisados por FTIR.

4 Resultados e Discussão

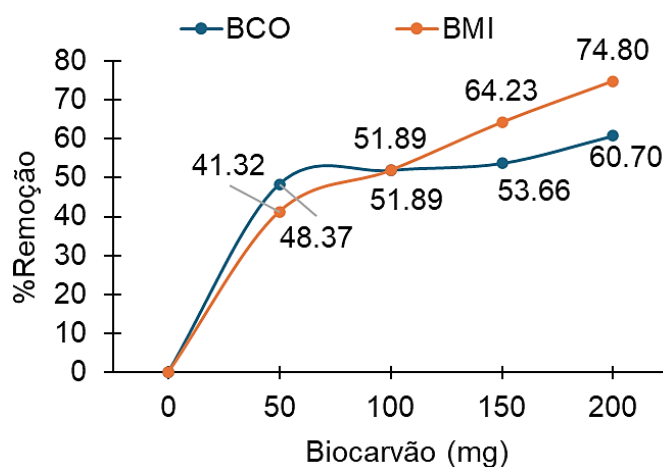
O aumento da dose elevou a remoção (até 74,80%; BMI, 200 mg) e reduziu q_{120} (BCO: 12,09–3,79 mg g⁻¹), como mostra a Figura 1 e Tabela 1, comportamento típico e consistente com Gamboa et al. (2024), atribuído à saturação dos sítios. A amostra BMI apresentou maior adsorção de corante diante do BCO, sugerindo que a natureza da biomassa influencia significativamente o desempenho adsorativo (BMI: 74,8% e BCO: 60,70%) (Cao *et al.*, 2023).

Tabela 1 – Capacidade adsorativa dos biocarvões

Código	q120 (mg/g)	q120 (mg/g)	q120 (mg/g)	q120 (mg/g)
	50 mg	100 mg	150 mg	200 mg
BCO	12,09	6,49	4,47	3,79
BMI	10,33	6,49	5,35	4,68

Fonte: Autores (2026).

Figura 1 – Efeito da massa de BC na adsorção.

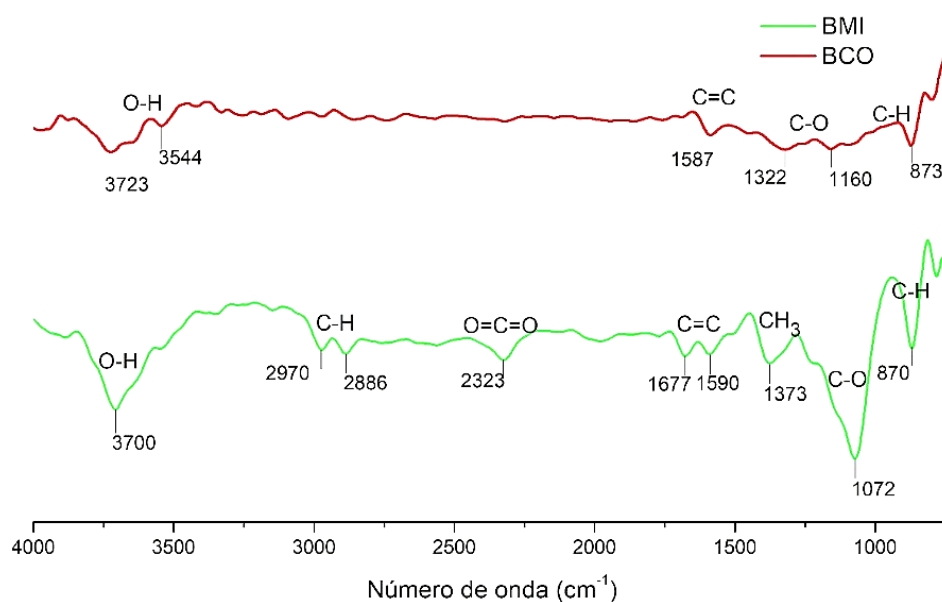


Fonte: Autores (2026)

Embora menores massas apresentem maiores valores de capacidade adsorptiva (q), a massa de 200 mg foi selecionada por proporcionar maior eficiência de remoção do corante, sendo mais adequada para os estudos cinéticos. As amostras ajustaram-se ao modelo de pseudo-segunda ordem BMI: $R^2 = 0,9981$ e BCO: $0,8814$, atingindo equilíbrio em 70 minutos, adsorvendo cerca de 87,55% para BMI associado à interações de quimissorção (Nascimento *et al.*, 2014).

Os resultados apresentados na Figura 2 corroboram os valores de PZC obtidos. O biocarvão de milho apresentou maior intensidade de bandas associadas a grupos oxigenados (O–H, C=O e C–O), sugerindo maior densidade de grupos ionizáveis, o que justifica o PZC mais elevado > 8 (Vasconcelos, 2024).

Figura 2 – Espectros de FTIR de BCO e BMI



Fonte: Autores (2026).

Já o biocarvão de coco apresentou menor diversidade de grupos funcionais ionizáveis e PZC próximo à neutralidade. Assim, em tampão fosfato pH 7, a superfície do milho encontrava-se positivamente carregada, favorecendo a adsorção do corante aniônico vermelho congo, enquanto o coco apresentava menor potencial de interação devido à sua superfície quase neutra (Barbosa; Zuniga, 2024).

5 Conclusão

Os BCs de coco e milho apresentaram elevado potencial na remoção de VC, com até 87,55% (BMI, 200 mg). O aumento da dose elevou a remoção, mas reduziu q_{120} , comportamento típico em batelada. A ativação por ultrassom de ponteira resultou em melhor desempenho, devido à ação da cavitação, que favorece a modificação superficial e a exposição de sítios ativos.

6 Referências

ALSAWY, Tariq et al. A comprehensive review on the chemical regeneration of biochar adsorbent for sustainable wastewater treatment. **NPJ Clean Water**, v. 5, n. 1, p. 29, 2022.

BARBOSA, Mariana Carvalho; ZUNIGA, Abraham Damian Giraldo. Análise do ponto de carga zero e espectroscopia de infravermelho de um carvão ativado proveniente de bagaço de malte. **Research, Society and Development**, v. 13, n. 8, p. e13113846706-e13113846706, 2024.

CAO, Wenping et al. Novel post-treatment of ultrasound assisting with acid washing enhance lignin-based biochar for CO₂ capture: adsorption performance and mechanism. **Chemical Engineering Journal**, v. 471, p. 144523, 2023.

CAVALCANTE, Mayara Raquel de Sousa. Adsorção de paracetamol em carbono ativado. 2018.

FERREIRA, Ruth Mesquita et al. Pyrolysis of sugarcane bagasse pellets: influence of temperature and pellet density on co-product yields. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 19, n. 6, p. 1984-1996, 2025.

GAMBOA, Diego Melchor Polanco et al. Sorption behavior of azo dye congo red onto activated biochar from *Haematoxylum campechianum* waste: Gradient boosting machine learning-assisted Bayesian optimization for improved adsorption process. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 9, p. 4771, 2024.

LONAPPAN, Linson et al. Adsorption of methylene blue on biochar microparticles derived from different waste materials. **Waste Management**, v. 49, p. 537-544, 2016.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. 2020.

VASCONCELOS, Laryssa Plentz Gomes et al. Produção de biocarvão por diferentes rotas a partir do resíduo lignocelulósico industrial visando a adsorção de poluentes emergentes. 2024.

MICROPLÁSTICOS E NANOPLÁSTICOS: DINÂMICA AMBIENTAL, IMPACTOS À SAÚDE HUMANA E DESAFIOS REGULATÓRIOS

Patrícia Mendes Barroso: Pós-graduanda, Universidade Estadual do Ceará (UECE), Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Erilândia Sousa da Silva: Pós-graduanda, Universidade Federal do Ceará, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Christiane Gomes da Silva Gurgel: Graduada, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Ari Clecius Alves de Lima: Doutor, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Janaina Sobreira Rocha: Doutora, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Resumo: Microplásticos (MPs), partículas entre 1 e 1000 μm , e nanoplásticos (NPs), menores que 1 μm , são contaminantes ambientais persistentes originados da produção intencional ou da fragmentação de resíduos plásticos. Este estudo sintetiza o conhecimento científico sobre suas origens, dinâmica ambiental, vias de exposição humana, impactos toxicológicos, tecnologias de detecção e avanços regulatórios, por meio de uma revisão narrativa da literatura recente. Os resultados evidenciam ampla distribuição dessas partículas na atmosfera, hidrosfera e litosfera, além de sua detecção em tecidos humanos. Efeitos adversos incluem estresse oxidativo, inflamação e disfunções endócrinas. Técnicas como μ -FTIR, Raman e Py-GC/MS destacam-se na identificação, enquanto o fortalecimento de políticas públicas é essencial para mitigar seus impactos.

Palavras-chave: Microplásticos; Nanoplásticos; Saúde humana; Poluição ambiental; Toxicidade.

1 Introdução

Os microplásticos (MPs) são partículas plásticas com dimensões entre 1 e 1000 μm (1 mm), podendo se tornar menores que 1 μm (nanoplásticos). Eles se formam pela degradação de plásticos maiores e podem ser liberados por descarte inadequado de produtos plásticos. Os nanoplásticos (NPs), menores que 1 μm , têm uma área superficial maior, aumentando sua reatividade e potencial impacto ambiental. Ambos os tipos de plásticos entram na cadeia alimentar e podem causar efeitos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, como a contaminação dos oceanos e da água. (Gouveia, et al, 2025).

Essas partículas podem ser classificadas como primárias, quando produzidas intencionalmente em tamanhos reduzidos para aplicações industriais e cosméticas, ou secundárias, quando resultantes da fragmentação de resíduos plásticos maiores por processos de intemperismo, como radiação ultravioleta e abrasão mecânica. Os principais polímeros identificados incluem polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), cloreto de polivinila (PVC) e tereftalato de polietileno (PET) (RAZZAQUE; MELESSE, 2025).

Além da ampla distribuição ambiental, a capacidade de adsorver contaminantes e interagir com sistemas biológicos amplia os riscos ecológicos e sanitários, justificando o crescente interesse científico e regulatório sobre o tema (HOANG et al., 2025; ZHANG et al., 2025)

2 Objetivo

Investigar e sintetizar o conhecimento científico acerca das origens, dinâmica ambiental, vias de exposição humana, impactos toxicológicos, tecnologias de detecção e estruturas regulatórias relacionadas aos microplásticos e nanoplásticos.

3 Metodologia

O estudo consiste em uma revisão narrativa da literatura, baseada em artigos científicos, relatórios técnicos e documentos institucionais de organismos internacionais. Foram selecionadas publicações sobre ocorrência ambiental de MPs e NPs, efeitos toxicológicos, métodos de identificação e iniciativas regulatórias, organizadas tematicamente em: origens, dinâmica ambiental, exposição humana, impactos toxicológicos e detecção/regulação.

4 Resultados e Discussão

4.1 Dinâmica e Transporte Ambiental

Microplásticos (MPs) e nanoplásticos (NPs) estão amplamente distribuídos na atmosfera, hidrosfera e litosfera. Microfibras sintéticas podem ser transportadas por longas distâncias e depositadas por via seca ou úmida (DRIS et al., 2016). Em ambientes aquáticos, correntes favorecem sua dispersão e incorporação na teia alimentar, enquanto os solos atuam como reservatórios, especialmente devido ao uso agrícola de lodo de esgoto. As estações de tratamento de esgoto (ETEs) funcionam como sumidouros e fontes, removendo partículas da fase líquida, mas concentrando-as no lodo, que pode reintroduzi-las no ambiente.

4.2 Exposição Humana e Bioacumulação

A exposição humana ocorre principalmente por ingestão, inalação e contato dérmico. MPs e NPs já foram detectados em sangue, pulmões, fígado, placenta e leite materno, indicando sua capacidade de atravessar barreiras biológicas e alcançar a circulação sistêmica (LESLIE et al., 2022).

4.3 Impactos Toxicológicos

A toxicidade está relacionada à presença física das partículas, à liberação de aditivos químicos, como bisfenóis e ftalatos, e à adsorção de contaminantes. A internalização celular pode desencadear estresse oxidativo, inflamação crônica, disbiose intestinal e desregulação endócrina (LEI et al., 2018), além de possíveis associações com doenças cardiovasculares, efeitos carcinogênicos e riscos ao desenvolvimento fetal.

4.4 Tecnologias de Detecção

A identificação de MPs e NPs é desafiadora devido à diversidade polimérica e ao pequeno tamanho das partículas. Técnicas como μ -FTIR e Raman são consideradas padrão-ouro para identificação química não destrutiva, enquanto a Py-GC/MS permite a determinação dos polímeros e aditivos presentes.

4.5 Cenário Regulatório

A União Europeia destaca-se com o regulamento REACH, que restringe a adição intencional de microplásticos em produtos comerciais. Em âmbito global, a Organização das Nações Unidas conduz negociações para um tratado juridicamente vinculante sobre o ciclo de vida dos plásticos, refletindo a crescente preocupação internacional.

5 Conclusão

Os microplásticos e nanoplásticos constituem poluentes emergentes de elevada persistência e ampla dispersão ambiental, com potenciais impactos adversos aos ecossistemas e à saúde humana. A exposição ocorre por múltiplas vias, e evidências científicas indicam associações com processos inflamatórios, distúrbios endócrinos e doenças crônicas. O avanço e a padronização das metodologias analíticas, aliados ao fortalecimento de políticas regulatórias e estratégias de mitigação, são fundamentais para enfrentar esse desafio ambiental e sanitário. Estudos futuros devem priorizar avaliações epidemiológicas de longo prazo e a investigação dos efeitos sinérgicos com outros poluentes.

6 Referências

DRIS, Romain et al. Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*, v. 104, n. 1-2, p. 290–293, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006>.

GOUVEIA, Amanda Fernandes; TEIXEIRA, Antonio Carlos; ASSIS, Geovania Cordeiro de; RIBEIRO, Lara Kelly; MASCARO, Lucia; CALATAYUD, Monica. Microplásticos chegam a nanômetros e escapam até de estações de tratamento de água. *GI*, 23 jun. 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2025/06/23/microplasticos-chegam-a-nanometros-e-escapam-ate-de-estacoes-de-tratamento-de-agua.ghtml>. Acesso em: abr. 2026.

LEI, Lei et al. Polystyrene (nano)plastics cause size-dependent neurotoxicity, oxidative damage and other adverse effects in zebrafish. *Environmental Science: Nano*, v. 5, p. 2481–2492, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1039/C8EN00470A>.

LESLIE, Heather A. et al. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, v. 163, 107199, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>.

RAZZAQUE, Md. A.; MELESSE, A. M. Occurrence, sources, and impacts of microplastics in aquatic environments: A review. *Hydrology*, v. 12, n. 10, p. 265, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology12100265>.

CARBONOS QUÂNTICOS DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS: FOTOCATÁLISE E DEGRADAÇÃO DE CORANTES SINTÉTICOS

Debora Nery de Souza: Doutora, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Janaína Sobreira Rocha: Doutora, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Maria Cristiane Martins de Souza: Doutora, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira(Unilab).

Ari Clecius Alves de Lima: Doutor, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Maria Elissandra Macieira da Silva: Especialista em gestão da qualidade, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec)

Resumo: Os pontos quânticos de carbono (CQDs) derivados de biomassa vegetal emergem como nanomateriais luminescentes promissores para aplicações fotocatalíticas. Este trabalho realiza uma revisão sistemática da literatura, conforme o protocolo PRISMA, sobre a síntese de CQDs a partir de extratos e resíduos agroindustriais do Nordeste brasileiro: carnaúba, sisal e palma forrageira e sua aplicação na fotocatalise e degradação de corantes sintéticos. Os resultados indicam que a síntese hidrotérmica constitui a rota mais versátil e ambientalmente favorável, enquanto os CQDs obtidos de biomassa demonstram eficiências de degradação superiores a 85% para corantes catiônicos e aniônicos sob luz visível. A escassez de estudos com precursores específicos do semiárido nordestino configura a principal lacuna identificada.

Palavras-chave: Carbonos quânticos; Biomassa agroindustrial; Síntese hidrotérmica; Fotocatálise; Degradação de corantes.

1 Introdução

A crescente demanda por materiais nanoestruturados funcionais, aliada à necessidade de rotas de síntese ambientalmente responsáveis, tem impulsionado o desenvolvimento da nanotecnologia verde. Neste contexto, os pontos quânticos de carbono (carbon quantum dots, CQDs), também denominados carbonos quânticos, emergem como uma das mais promissoras classes de nanomateriais luminescentes da atualidade. (LIU et al., 2019).

Extratos e resíduos de biomassa vegetal têm recebido crescente atenção como precursores de CQDs por constituírem fontes renováveis, abundantes e de baixo custo de compostos ricos em carbono, açúcares, ácidos orgânicos e compostos fenólicos, que atuam simultaneamente como precursores carbonáceos e agentes de passivação superficial (SHARMA et al., 2022; DEVI et al., 2019). O Nordeste brasileiro destaca-se como região de enorme potencial neste campo: a carnaúba (*Copernicia prunifera*), o sisal (*Agave sisalana*) e a palma forrageira (*Opuntia ficus-indica*) são culturas de grande expressão econômica regional, gerando volumes expressivos de resíduos cujo aproveitamento ainda é incipiente (EMBRAPA, 2020). E a fotocatalise de corantes sintéticos em efluentes têxteis e agroindustriais constitui um dos campos de maior relevância prática para esses nanomateriais.

A escassez de síntese crítica integrando rotas de síntese a partir de resíduos regionais nordestinos com parâmetros de desempenho fotocatalítico configura a lacuna que motiva a presente revisão.

2 Objetivo

Realizar uma revisão sistemática da literatura científica sobre a síntese de carbonos quânticos a partir de extratos e resíduos vegetais agroindustriais, com ênfase em precursores de carnaúba, sisal e palma forrageira, e sua aplicação na fotocatalise e degradação de corantes sintéticos, consolidando o estado da arte sobre as rotas de síntese, os métodos de caracterização e os resultados de desempenho fotocatalítico reportados.

3 Metodologia

A pesquisa foi conduzida por revisão sistemática em conformidade com o protocolo PRISMA (PAGE et al., 2021). O levantamento foi realizado nas bases de dados Scopus, Web of Science e Google Scholar, com buscas em inglês e português, cobrindo publicações de 2010 a 2025. Os descritores foram organizados em quatro blocos temáticos combinados: (i) nanomaterial, "carbon quantum dots", "carbon dots", "CQDs", "C-dots", "graphene quantum dots"; (ii) precursor, "biomass", "plant extract", "agricultural waste", "agro-industrial residue", "carnauba", "sisal", "cactus", "Opuntia"; (iii) síntese, "hydrothermal synthesis", "pyrolysis", "microwave synthesis", "green synthesis"; e (iv) aplicação, "photocatalysis", "dye degradation", "photodegradation", "reactive oxygen species", "advanced oxidation".

4 Resultados e Discussão

4.1 Precursores regionais e potencial para síntese de CQDs

A mucilagem da palma forrageira, é fonte de mucopolissacarídeos ricos em grupos $-OH$ e $-COOH$, favoráveis à formação de CQDs fluorescentes com boa estabilidade coloidal (SANTOS et al., 2020). Embora estudos específicos com precursores do seminário ainda sejam escassos, trabalhos com biomassas de composição similar, cascas de frutas tropicais, bagaço de cana e resíduos de mandioca, demonstram a viabilidade da rota e fornecem parâmetros de referência (SHARMA et al., 2022; DEVI et al., 2019).

4.2 Rotas de síntese e caracterização

A síntese hidrotérmica ($150-250^{\circ}C$, 2–24 h em autoclave) é a rota mais empregada para CQDs de biomassa: dispensa solventes orgânicos, é operável em escala e é simples. O tamanho, a cristalinidade e as propriedades ópticas dos CQDs obtidos são fortemente influenciados pela temperatura, pelo tempo de reação, pelo pH e pela composição do extrato precursor (DEVI et al., 2019). A pirólise direta ($200-500^{\circ}C$) tende a gerar CQDs com maior grafitização e estabilidade térmica, porém com maior heterogeneidade de tamanho. A síntese assistida por micro-ondas, com tempos inferiores a 30 minutos, favorece distribuição de tamanho mais estreita (WANG et al., 2021). Em todas as rotas, a purificação por diálise (membrana de celulose, corte 1–3,5 kDa) ou

centrifugação diferencial é etapa crítica para propriedades reprodutíveis. A caracterização requer técnicas complementares: MET-AR (tamanho e cristalinidade), DRX e Raman (razão D/G), FTIR (grupos funcionais), UV-Vis e fotoluminescência (rendimento quântico) e potencial zeta (estabilidade coloidal).

4.3 Desempenho fotocatalítico na degradação de corantes

Os CQDs derivados de biomassa atuam como fotocatalisadores por dois mecanismos principais: fotossensibilização de semicondutores parceiros (TiO_2 , ZnO , $\text{g-C}_3\text{N}_4$), ampliando sua atividade em luz visível, e fotocatalise direta, em especial para CQDs com alto grau de grafitização e heteroátomos de nitrogênio incorporados (WANG et al., 2021; SHARMA et al., 2022). Os estudos revisados reportam eficiências de degradação superiores a 85% para corantes catiônicos (azul de metileno, rodamina B) e aniônicos (laranja de metila, vermelho Congo) sob irradiação visível em condições otimizadas. O rendimento quântico de fluorescência, o tamanho médio das partículas, a incorporação de nitrogênio e a densidade de grupos funcionais superficiais são os principais determinantes do desempenho, influenciando a absorção de luz e o tempo de vida das EROs. A cinética de degradação segue predominantemente o modelo de pseudo-primeira ordem (Langmuir-Hinshelwood), e a identificação das EROs predominantes por experimentos com scavengers específicos permanece como aspecto a aprofundar na literatura.

4.4 Lacunas e oportunidades de pesquisa regional.

A escassez de estudos com precursores específicos do semiárido nordestino, carnaúba, sisal e palma forrageira, representa a principal lacuna identificada, abrindo espaço para contribuições originais de grupos de pesquisa da região. A ausência de padronização nos métodos de síntese e purificação e a heterogeneidade nas condições dos ensaios fotocatalíticos dificultam a comparação entre estudos. Poucos trabalhos avaliam a estabilidade e reutilização dos CQDs em múltiplos ciclos ou investigam a fotodegradação em matrizes reais de efluentes. A toxicidade dos CQDs de biomassa e de seus subprodutos de degradação sobre organismos aquáticos permanece insuficientemente estudada, sendo essencial para a avaliação da segurança ambiental da tecnologia.

5 Conclusão

Os carbonos quânticos derivados de resíduos agroindustriais do Nordeste brasileiro representam uma fronteira científica e tecnológica de grande potencial, na interface entre nanotecnologia verde, valorização de biomassa regional e tratamento sustentável de efluentes. A síntese hidrotérmica a partir de extratos vegetais constitui a rota mais versátil e ambientalmente favorável, dispensando solventes orgânicos tóxicos. A diversidade composicional dos resíduos de carnaúba, sisal e palma - ricos em celulose, compostos fenólicos e mucopolissacarídeos - representa um diferencial em relação a precursores convencionais, conferindo perfis de grupos funcionais superficiais potencialmente favoráveis à estabilidade coloidal e à atividade fotocatalítica.

Como agenda prioritária para investigações futuras, recomenda-se: (i) síntese e caracterização comparativa de CQDs a partir de resíduos de carnaúba, sisal e palma forrageira; (ii) estudo sistemático da

influência de temperatura, tempo, pH e concentração do extrato sobre o rendimento quântico e a atividade fotocatalítica; (iii) elucidação dos mecanismos fotocatalíticos por experimentos com scavengers de EROs; (iv) avaliação do desempenho em efluentes reais de lavanderias e indústrias têxteis do Nordeste; e (v) estudos de ecotoxicidade aquática e análise de ciclo de vida da rota proposta. A carnaúba, o sisal e a palma forrageira — culturas identitárias do semiárido, emergem como precursores promissores e ainda subutilizados, cuja investigação pode gerar conhecimento científico original e contribuir para o desenvolvimento tecnológico regional.

6 Referências

DEVI, P. et al. Carbon quantum dots from biowaste for environmental remediation. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 7, n. 6, p. 5671-5680, 2019.

EMBRAPA. **Cadeia produtiva da carnaúba e do sisal no Nordeste brasileiro**. Brasília: EMBRAPA, 2020.

LIU, J. et al. Carbon dots: synthesis, formation mechanism, fluorescence origin and sensing applications. **Chemical Society Reviews**, v. 48, n. 13, p. 3853-3885, 2019.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n. 71, 2021.

SANTOS, M. V. F. et al. Composição química e valor nutritivo da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica*) para ruminantes. **Food Chemistry**, v. 310, p. 125901, 2020.

SHARMA, G. et al. Carbon quantum dots from plant biomass: green synthesis and photocatalytic applications. **Journal of Hazardous Materials**, v. 424, p. 127433, 2022.

WANG, Y. et al. Carbon quantum dots: synthesis, optical properties and applications in photocatalysis. **Advanced Materials**, v. 33, n. 48, p. 2006379, 2021.

BIOCHAR ARTESANAL: PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES AMBIENTAIS — REVISÃO SISTEMÁTICA

Beatriz Bezerra Batista: Graduanda, Universidade Federal do Ceará (UFC), Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Patrícia Mendes Barroso: Pós-graduanda, Universidade Estadual do Ceará (UECE), Nutec - Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará.

Emanuelle Ferreira do Monte: Graduanda, Universidade Federal do Ceará (UFC), Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Maria Cristiane Martins de Souza: Doutora, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Ari Clecius Alves de Lima: Doutor, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Resumo: O biochar artesanal é produzido por pirólise de biomassa em condições de baixa disponibilidade de oxigênio, utilizando equipamentos simples e acessíveis a agricultores familiares. Esta revisão sistemática analisou 127 estudos (2000–2024) sobre métodos artesanais de produção (fornos de cova, pilha, tambor e TLUD), matérias-primas agrícolas e florestais e métodos de caracterização físico-química. Os resultados indicam que a temperatura de pirólise (300–700°C) é o principal fator determinante das propriedades do biochar, influenciando carbono fixo, área superficial, pH e CTC. O forno de duplo tambor apresentou os melhores rendimentos (30–45%) e controle de qualidade. O biochar artesanal demonstra grande potencial para melhoria da fertilidade do solo, sequestro de carbono e remediação ambiental em regiões tropicais.

Palavras-chave: biochar; pirólise; caracterização; solo; sequestro de carbono.

1 Introdução

O biochar é definido como um material sólido rico em carbono obtido pela conversão termoquímica de biomassa em ambiente com disponibilidade limitada de oxigênio (Lehmann & Joseph, 2015). O interesse científico pelo tema intensificou-se a partir de estudos sobre as Terras Pretas de Índio (TPI) na Amazônia depósitos de solos altamente férteis criados por populações pré-colombianas e que ainda mantêm produtividade excepcional após séculos (Glaser et al., 2001). Em escala global, estimativas apontam que a aplicação de biochar poderia sequestrar entre 1,8 e 9,5 Gt C por ano, representando contribuição significativa à mitigação climática (Woolf et al., 2010).

O biochar artesanal refere-se a métodos de produção que utilizam equipamentos simples, construídos localmente, sem necessidade de energia elétrica ou combustíveis fósseis, operáveis por agricultores sem treinamento especializado. Em países em desenvolvimento, onde biomassa residual é abundante e o acesso a insumos agrícolas é limitado, essas tecnologias tornam-se especialmente relevantes.

Apesar do crescente número de estudos sobre biochar nas últimas duas décadas, há uma lacuna na sistematização do conhecimento sobre métodos simplificados de produção e suas implicações sobre a qualidade do produto final. Esta revisão busca suprir essa lacuna, abrangendo métodos de produção, matérias-primas, técnicas de caracterização e aplicações documentadas na literatura.

2 Objetivo

Realizar uma revisão sistemática da literatura sobre biochar artesanal, abrangendo os principais métodos artesanais de produção e suas características operacionais; as matérias-primas mais empregadas e sua influência nas propriedades do produto; os métodos de caracterização físico-química; e as principais aplicações ambientais e agrícolas documentadas para regiões tropicais.

3 Metodologia

A revisão sistemática foi conduzida seguindo as diretrizes PRISMA. As bases de dados consultadas foram Web of Science, Scopus, PubMed, SciELO e Google Scholar, cobrindo publicações de 2000 a 2024. Os termos de busca combinaram “biochar” com “artesanal”, “small-scale”, “low-cost”, “retort kiln”, “pit kiln”, “TLUD” e “agricultural residue”, além de buscas em português e espanhol na base SciELO.

Os critérios de inclusão priorizaram artigos originais, revisões e relatórios técnicos em português, inglês e espanhol, com dados de caracterização ou produção de biochar por tecnologias artesanais/de baixo custo. Foram excluídos trabalhos sobre reatores industriais de grande escala e resumos sem dados.

A triagem inicial foi realizada por dois revisores independentes com base em títulos e resumos. Divergências foram resolvidas por consenso. Ao total, 127 estudos atenderam a todos os critérios e foram incluídos na síntese qualitativa.

4 Resultados e Discussão

Quatro métodos artesanais predominaram na literatura: (i) forno de cova (pit kiln), o mais tradicional, com rendimentos de 15–35% e temperaturas de 300–500°C; (ii) forno de pilha (mound kiln), com rendimentos de 20–35% e duração de 3–7 dias; (iii) forno de tambor (retort/barrel kiln), com rendimentos superiores (25–45%) e melhor controle de qualidade; e (iv) gaseificador TLUD, com rendimentos de 20–35% e possibilidade de co-produção de energia. O sistema de duplo tambor produziu biochar com maior teor de carbono fixo (75–85%) e menor matéria volátil (10–20%) em relação ao tambor simples (Cornelissen et al., 2016).

A temperatura de pirólise demonstrou ser o principal fator determinante das propriedades: com seu aumento observa-se elevação do carbono fixo, redução das razões H/C e O/C, aumento do pH e da área superficial específica. As razões $H/C < 0,7$ e $O/C < 0,4$ são utilizadas como critérios de estabilidade e persistência pelo EBC (European Biochar Certificate). A Tabela 1 apresenta as propriedades típicas do biochar artesanal em função da matéria-prima.

Tabela 1 – Propriedades típicas do biochar artesanal por matéria-prima.

Matéria-Prima	C Fixo (%)	pH	BET (m ² /g)
Madeira (eucalipto)	70–85	7,5–9,5	50–200
Palha de arroz	35–55	8–10	20–100
Bagaço de cana	50–70	7–9	200–400

Fonte: Autores (2026).

Os dados apresentados na Tabela 1 evidenciam que a madeira de eucalipto produz biochar com maior teor de carbono fixo e maior estabilidade, enquanto resíduos agrícolas como o bagaço de cana apresentam elevada área superficial, favorecendo aplicações em remediação ambiental.

A seleção dos estudos seguiu rigorosamente as diretrizes PRISMA, com exclusão de trabalhos sobre reatores industriais e estudos sem dados de caracterização. Os estudos incluídos abrangeram 22 países, com predominância de pesquisas realizadas no Brasil, Índia, Quênia e China.

Em relação às aplicações, meta-análises indicam aumento médio de 10–15% na produtividade agrícola quando o biochar é co-aplicado com fertilizantes orgânicos (Jeffery et al., 2011). A imobilização de metais pesados (Pb, Cd) em solos contaminados atingiu redução de biodisponibilidade de 40–80% em estudos de vaso com biochars de alta área superficial (Ahmad et al., 2014). Em relação ao sequestro de carbono, entre 70% e 90% do carbono contido no biochar de alta qualidade ($H/C < 0,7$) é estável por centenas a milhares de anos (Lehmann et al., 2015).

5 Conclusão

O biochar artesanal é uma tecnologia com sólida base científica e grande potencial de impacto em sistemas agrícolas de baixa renda, especialmente em regiões tropicais. Os métodos artesanais especialmente o forno de duplo tambor e o TLUD são capazes de produzir biochar com propriedades adequadas para melhoria da fertilidade do solo, sequestro de carbono e remediação ambiental. A caracterização mínima necessária inclui análise imediata, pH, análise elementar (C, H, N) e, idealmente, CTC e área superficial BET.

Os principais desafios para adoção em escala são a redução de emissões atmosféricas durante a produção, a padronização da qualidade e a demonstração de benefícios econômicos para produtores rurais. Recomenda-se investimento no desenvolvimento de métodos simplificados de campo para avaliação rápida da qualidade, bem como na integração do biochar em sistemas agroecológicos para agricultura familiar.

6 Referências

AHMAD, M. et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere*, v. 99, p. 19–33, 2014.

CORNELISSEN, G. et al. Emissions and char quality of flame-curtain Kon-Tiki kilns for farmer-scale charcoal/biochar production. **PLOS ONE**, v. 11, n. 5, e0154617, 2016.

JEFFERY, S. et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 144, n. 1, p. 175–187, 2011.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**. 2. ed. Londres: Routledge, 2015.

WOOLF, D. et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, v. 1, n. 56, 2010.

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS CONVENCIONAIS E NANOTECNOLOGIA NA REMEDIAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Luzia Suerlange Araújo dos Santos: Dra em geologia, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará.

Fátima Andréa Lima Girão: MSc. Em Química, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará.

Tomaz Alexandre da Silva Neto: Doutorando em geologia, Universidade Federal do Ceará.

Itabaraci Nazareno Calvalcante: Docente, Universidade Federal do Ceará/Departamento de Geologia.

Joyce Shantala Fernandes de Oliveira Sousa: Doutoranda em geologia, Universidade Federal do Ceará.

Resumo: A Nanotecnologia pode ser definida como um campo interdisciplinar voltado à manipulação e aplicação da matéria em escala nanométrica, envolvendo a síntese, caracterização e uso de nanomateriais. A contaminação de águas subterrâneas por metais pesados e agrotóxicos constitui um problema ambiental crítico, especialmente em regiões com intensa atividade agrícola e industrial. Métodos convencionais baseados em processos *ex situ* apresentam limitações quanto à eficiência, custo operacional e geração de resíduos, com remoções variando entre 50 e 80% para carvão ativado e até 95% para troca iônica. Em contraste, abordagens nanotecnológicas *in situ* têm demonstrado eficiências superiores a 90%, alcançando valores acima de 99% na remoção de contaminantes como Cr(VI). Além disso, permitem a remediação direta no aquífero, reduzindo custos e impactos ambientais. Nesse contexto, este estudo compara ambas as abordagens, destacando a eficiência e aplicabilidade da nanotecnologia na remediação de águas subterrâneas.

Palavras-chave: Nanotecnologia; Remediação ambiental; Águas subterrâneas; Agrotóxicos.

1 Introdução

A contaminação de águas subterrâneas por metais pesados e agrotóxicos tem se intensificado devido às atividades industriais e agrícolas, exigindo o desenvolvimento de técnicas mais eficientes de remediação. Tradicionalmente, os métodos convencionais baseiam-se em processos *ex situ*, nos quais a água é extraída do aquífero para tratamento em superfície. No entanto, esses métodos apresentam limitações significativas quanto à eficiência, custo operacional e geração de resíduos secundários (CRITTENDEN *et al.*, 2012). O tratamento *ex situ* envolve técnicas como coagulação/floculação, adsorção por carvão ativado e filtração, que apresentam eficiência limitada para contaminantes emergentes. A troca iônica, embora eficiente para remoção de metais dissolvidos, possui alto custo operacional e gera efluentes secundários (FU; WANG, 2011).

A nanotecnologia surge como uma abordagem inovadora, permitindo a remediação *in situ*, diretamente no aquífero contaminado. Esse método elimina a necessidade de bombeamento da água, reduzindo custos e impactos ambientais (ZHANG, 2003). Após o tratamento, a remoção dos nanomateriais pode ser realizada por separação magnética, enquanto o monitoramento da qualidade da água pode ser feito por nanossensores,

permitindo detecção em tempo real de contaminantes (LI *et al.*, 2021). Como resultado, a nanotecnologia apresenta maior eficiência de remoção, menor geração de resíduos e possibilidade de monitoramento contínuo.

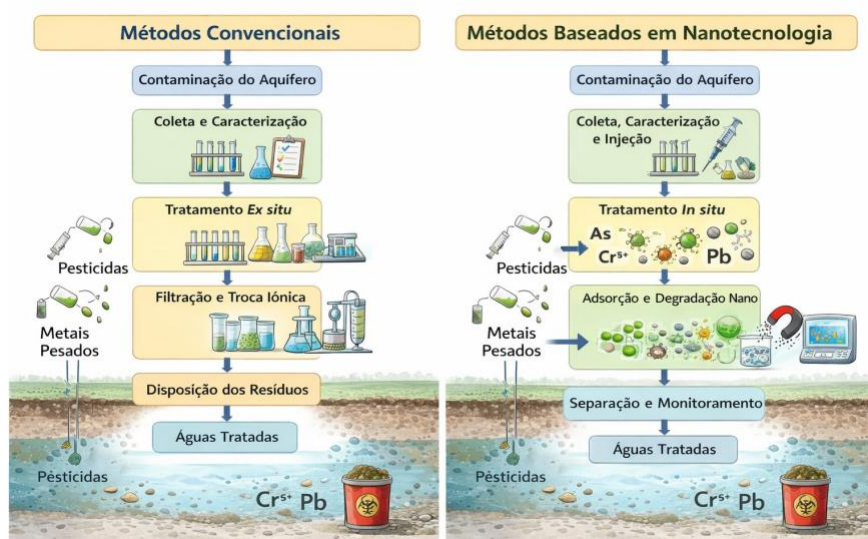
2 Objetivo

Analisar comparativamente os métodos convencionais e as abordagens baseadas em Nanotecnologia aplicadas à remediação de águas subterrâneas.

3 Metodologia

Para essa pesquisa foi desenvolvido, a partir da análise da literatura, um modelo conceitual integrador (Figura 1), utilizada como ferramenta analítica para sintetizar e comparar os processos envolvidos em cada abordagem., representando os principais fluxos de contaminação e as estratégias de remediação.

Figura 1 – Esquema conceitual de comparação de métodos usados para remediação de águas subterrâneas.



Fonte: Autores (2026).

4 Resultados e Discussão

Comparativamente, os métodos convencionais de tratamento, como coagulação, filtração e troca iônica, apresentam limitações, incluindo baixa eficiência para contaminantes emergentes, geração de resíduos secundários e elevado custo operacional (CRITTENDEN *et al.*, 2012). Em contraste, a nanotecnologia apresenta vantagens como maior eficiência de remoção, possibilidade de aplicação *in situ*, menor geração de resíduos e integração com sistemas de monitoramento. Conforme Hussein *et al.* (2025) apesar dessas vantagens, desafios ainda persistem, como a potencial toxicidade dos nanomateriais, custos iniciais elevados, necessidade de regulamentação e lacunas em estudos de longo prazo.

Com base nos resultados obtidos na revisão de literatura mostrados na Tabela 1, apesar dessas desvantagens a nanotecnologia configura-se como uma alternativa inovadora e eficiente para a remediação e

monitoramento de águas subterrâneas, sendo fundamental sua integração com estratégias de gestão ambiental para garantir a segurança hídrica e a proteção da saúde humana.

Tabela 1 - Comparação de métodos e eficiência na remoção de contaminantes em águas subterrâneas

Tecnologia	Método/Processo	Contaminante	Concentração inicial (mg/L)	Concentração final (mg/L)	Remoção (%)
nZVI (ferro zero-valente)	Redução química (<i>in situ</i>)	Cr(VI)	10–50	<0,05	>99%
nZVI (ferro zero-valente)	Adsorção + redução (<i>in situ</i>)	Pb	5–20	<0,1	95–99%
TiO₂ (nanopartículas)	Fotocatálise (<i>in situ</i>)	Acefato	1–10	<0,1	80–95%
TiO₂ (nanopartículas)	Fotocatálise (<i>in situ</i>)	Aldicarb	0,5–5	<0,05	85–98%
Grafeno / CNT	Adsorção (superfície nanoestruturada)	Metais pesados	~10	0,2–0,5	90–98%
Carvão ativado	Adsorção (<i>ex situ</i>)	Metais pesados	~10	2–5	50–80%
Resina de troca iônica	Troca iônica (<i>ex situ</i>)	Metais pesados	~10	0,5–1	80–95%

Fonte: Adaptado de ZHANG *et al.* (2021); LI *et al.* (2023); HIDANGMAYUM *et al.* (2023); HUSSEIN *et al.* (2025).

5 Conclusão

A comparação entre os métodos evidencia uma mudança paradigmática na remediação ambiental. Enquanto os métodos convencionais dependem de infraestrutura robusta e processos sequenciais, a nanotecnologia opera em escala molecular, com maior eficiência e menor impacto ambiental. No entanto, sua aplicação ainda enfrenta desafios, como custos iniciais elevados, necessidade de regulamentação e avaliação dos potenciais riscos ambientais.

Dessa forma, conclui-se que a nanotecnologia representa uma alternativa promissora para a remediação de águas subterrâneas, especialmente na remoção de contaminantes emergentes, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a segurança hídrica.

6 Referências

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLIOUS, G. **MWH's Water Treatment: Principles and Design**. 3. ed.

FU, F.; WANG, Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 3, p. 407–418, 2011.

HIDANGMAYUM, A.; DEBNATH, A.; GURU, A.; et al. Mechanistic and recent updates in nano-bioremediation for developing green technology to alleviate agricultural contaminants. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 20, p. 11693–11718, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04560-7>

HUSSEIN, E. B.; RASHEED, F. A.; MOHAMMED, A. S.; KAYANI, K. F. Emerging nanotechnology approaches for sustainable water treatment and heavy metals removal: a comprehensive review. **RSC Advances**, v. 15, n. 48, p. 41061–41107, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1039/D5RA06914A>

LI, X.; HU, Z.; ZHANG, Q. Environmental regulation, economic policy uncertainty, and green technology innovation. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 23, p. 2975–2988, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02219-4>

ZHANG, W. X. Nanoscale iron particles for environmental remediation: an overview. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 5, p. 323–332, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1025520116015>

NANOPARTÍCULAS DE COBRE OBTIDAS DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO PARA CATÁLISE E DEGRADAÇÃO DE POLUENTES ORGÂNICOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Gabriel Saraiva da Silva: Doutorando, Universidade Federal do Ceará (UFC), Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Ari Clecius Alves de Lima: Doutor, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Mauro Andres Cerra Florez: Doutor, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Resumo: As placas de circuito impresso constituem importante fonte secundária de cobre e podem ser valorizadas pela produção de nanomateriais funcionais. Este trabalho revisa a literatura sobre a obtenção de nanopartículas de cobre a partir de resíduos de PCI e sua aplicação na degradação catalítica de poluentes orgânicos. A busca bibliográfica foi realizada nas bases Scopus, Web of Science e Google Scholar, considerando estudos sobre recuperação do cobre, rotas de síntese, caracterização e desempenho catalítico. Os trabalhos analisados indicam predomínio de rotas hidrometalúrgicas para obtenção de precursores de Cu, seguidas por redução química, precipitação e síntese verde. As nanopartículas obtidas apresentam aplicação promissora em processos fotocatalíticos e tipo Fenton, com elevadas eficiências de degradação em condições otimizadas. Conclui-se que a rota é tecnicamente viável, mas depende de maior padronização metodológica, controle da oxidação superficial e estudos de escalonamento e segurança.

Palavras-chave: Nanopartículas de cobre; Resíduos eletroeletrônicos; Placas de circuito impresso; Catálise; Degradação de poluentes.

1 Introdução

A crescente geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos intensifica a busca por estratégias capazes de combinar recuperação de metais e produção de materiais de maior valor agregado. Nesse contexto, as placas de circuito impresso destacam-se por concentrar cobre, estanho, níquel, ferro e metais preciosos, o que as torna uma fonte secundária relevante para processos de reaproveitamento (FORTI et al., 2020; CAYUMIL et al., 2016).

Entre os metais presentes nas PCI, o cobre assume papel central devido à sua elevada abundância e ao interesse crescente em sua conversão em nanomateriais funcionais. Estudos mostram que o cobre recuperado pode ser empregado na síntese de Cu-NPs, CuO e Cu₂O, ampliando o valor agregado do processo e sua inserção em aplicações catalíticas, fotocatalíticas e antimicrobianas (ILYAS; LEE, 2014; LI et al., 2018; YOUSEF et al., 2018).

No campo ambiental, nanopartículas e óxidos de cobre apresentam potencial para degradação de corantes sintéticos, compostos fenólicos e outros poluentes orgânicos persistentes. Revisões e estudos experimentais recentes indicam que materiais obtidos de PCI podem apresentar desempenho catalítico relevante, inclusive sob radiação visível, embora a literatura ainda apresente dispersão metodológica quanto às rotas de recuperação, às

condições de síntese e aos critérios de comparação do desempenho (DANG et al., 2021; SHARMA et al., 2022; ABDELBASIR; RAYAN; ISMAIL, 2023; GAUTAM et al., 2024).

2 Objetivo

Investigar, por meio de revisão da literatura, as rotas de obtenção de nanopartículas de cobre a partir de resíduos de placas de circuito impresso e sua aplicação em processos catalíticos de degradação de poluentes orgânicos, identificando métodos de recuperação, técnicas de síntese, procedimentos de caracterização, desempenho reportado e principais lacunas para avanço da área.

3 Metodologia

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica de natureza qualitativa, desenvolvida na forma de revisão da literatura. O levantamento bibliográfico foi realizado nas bases Scopus, Web of Science e Google Scholar, com buscas em inglês e português, contemplando publicações entre 2010 e 2025.

Os descritores empregados foram organizados em quatro blocos temáticos: nanomaterial (“copper nanoparticles”, “Cu-NPs”, “CuO nanoparticles”), fonte do resíduo (“electronic waste”, “e-waste”, “printed circuit board”, “WPCB”), processamento (“synthesis”, “hydrometallurgy”, “leaching”, “green synthesis”) e aplicação (“catalysis”, “photocatalysis”, “pollutant degradation”, “Fenton”).

Foram incluídos artigos experimentais, artigos de revisão e trabalhos com dados de caracterização ou desempenho catalítico relacionados à recuperação de cobre de PCI/REEE e à obtenção de Cu-NPs, CuO ou materiais correlatos. Foram excluídos estudos sem relação direta com PCI, sem descrição mínima do método de síntese ou sem resultados de caracterização e aplicação.

4 Resultados e Discussão

A literatura mostra que a recuperação de cobre de PCI pode ser conduzida por rotas pirometalúrgicas, hidrometalúrgicas e biohidrometalúrgicas. Entre elas, a hidrometalurgia se destaca quando o objetivo é gerar soluções precursoras de Cu^{2+} para síntese posterior de nanomateriais, devido ao maior controle operacional e à possibilidade de integração com etapas de purificação e redução (ILYAS; LEE, 2014; LI et al., 2018; SILVAS et al., 2015).

Em termos de composição, diferentes tipos de PCI apresentam elevado teor de cobre, o que justifica o interesse na recuperação desse metal. Silvas et al. (2015) reportaram 32,5% em massa de Cu em PCI de impressoras, enquanto sistemas amoniacaais vêm sendo apontados como alternativas relevantes para dissolução seletiva de cobre e posterior conversão em materiais nanoestruturados (SUN et al., 2015; PINHO et al., 2021).

Após a recuperação, as principais rotas de síntese observadas incluem redução química, precipitação controlada, oxidação térmica e síntese verde. Yousef et al. (2018) propuseram a síntese de nanopartículas de cobre a partir do metal recuperado de WPCBs, enquanto Tatariants et al. (2018) produziram Cu-NPs com atividade antimicrobiana a partir do mesmo tipo de resíduo.

Trabalhos recentes reforçam essa tendência: Abdelbasir, Rayan e Ismail (2023) obtiveram Cu e CuO nanosizados a partir de WPCBs por lixiviação amônia/cloreto de amônio e redução com ácido ascórbico, enquanto Gautam et al. (2024) produziram nanoestruturas de Cu(OH)₂/CuO e CuO por precipitação alcalina e envelhecimento em baixa temperatura. A caracterização recorre, de forma integrada, a DRX, MEV-EDS, MET, FTIR e análises ópticas.

No campo das aplicações, a degradação de poluentes orgânicos é a frente mais recorrente. Abdelbasir, Rayan e Ismail (2023) relataram 96,5% de degradação de Rodamina B sob luz visível para uma blenda 1:1 de Cu/CuO, ao passo que Gautam et al. (2024) observaram 97,28% de degradação para uma nanoestrutura híbrida Cu(OH)₂/CuO. A Tabela 1 sintetiza estudos representativos sobre obtenção de nanomateriais de cobre a partir de PCI e suas aplicações.

Tabela 1 – Estudos representativos sobre obtenção de nanomateriais de cobre a partir de PCI.

Estudo	Recuperação/síntese	Produto	Aplicação
Yousef et al. (2018)	Metal recuperado de WPCBs e síntese química	Cu-NPs	Produção de nanomaterial
Tatariants et al. (2018)	WPCBs e tecnologia química avançada	Cu-NPs	Atividade antimicrobiana
Abdelbasir et al. (2023)	Lixiviação amoniacal e redução com ácido ascórbico	Cu, CuO e blenda	Fotocatálise
Gautam et al. (2024)	Precipitação alcalina e envelhecimento em baixa temperatura	Cu(OH) ₂ /CuO e CuO	Fotodegradação de corante

Fonte: Autores (2026).

Os dados apresentados na Tabela 1 evidenciam que a valorização de PCI na forma de nanomateriais de cobre já ultrapassa a etapa exclusivamente conceitual e alcança aplicações com resultados experimentais expressivos. Persistem, entretanto, limitações relacionadas à variabilidade composicional das PCI, à oxidação superficial das Cu-NPs, à escassez de estudos comparativos em condições padronizadas e à carência de avaliações robustas de reuso, segurança e escalonamento (DANG et al., 2021; SHARMA et al., 2022; ABDELBASIR; RAYAN; ISMAIL, 2023).

5 Conclusão

A literatura indica que as placas de circuito impresso constituem fonte relevante de cobre para obtenção de nanomateriais funcionais. A hidrometalurgia se destaca como a rota mais adequada para gerar precursores destinados à síntese subsequente de Cu-NPs e óxidos de cobre.

A redução química, a precipitação controlada e a síntese verde aparecem como estratégias recorrentes para produção desses materiais, os quais apresentam potencial consistente para degradação de poluentes orgânicos, especialmente em processos fotocatalíticos. A consolidação dessa abordagem depende de maior

padronização metodológica, melhor controle da oxidação superficial e ampliação dos estudos de reuso, segurança e escalonamento.

6 Referências

ABDELBASIR, S. M.; RAYAN, D. A.; ISMAIL, M. S. Synthesis of Cu and CuO nanoparticles from e-waste and evaluation of their antibacterial and photocatalytic properties. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, p. 89690-89704, 2023.

CAYUMIL, R. et al. Concentration of precious metals during their recovery from electronic waste. *Waste Management*, v. 57, p. 121-130, 2016.

DANG, Y. et al. Copper nanoparticles as catalysts for degradation of organic pollutants: a review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 416, p. 125912, 2021.

FORTI, V. et al. *The Global E-waste Monitor 2020*. Bonn/Geneva/Rotterdam: United Nations University, 2020.

GAUTAM, P. et al. Waste remediation: low-temperature synthesis of hybrid Cu(OH)₂/CuO and CuO nanostructures from spent printed circuit boards and their dye degradation studies. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 31, p. 41624-41637, 2024.

ILYAS, S.; LEE, J. Biometallurgical recovery of metals from waste electrical and electronic equipment: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 13, p. 193-208, 2014.

LI, H. et al. Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (WPCBs): current status and perspectives - a review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 139, p. 122-139, 2018.

PINHO, S. C.; RIBEIRO, C.; FERRAZ, C. A.; ALMEIDA, M. F. Copper, zinc, and nickel recovery from printed circuit boards using an ammonia-ammonium sulphate system. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 23, p. 1456-1465, 2021.

SHARMA, G. et al. Green synthesis of copper nanoparticles and their applications in environmental remediation: a review. *Environmental Research*, v. 214, p. 113860, 2022.

SILVAS, F. P. C. et al. Printed circuit board recycling: physical processing and copper extraction by selective leaching. *Waste Management*, v. 46, p. 503-510, 2015.

SUN, Z. et al. Hydrometallurgy selective copper recovery from complex mixtures of end-of-life electronic products with ammonia-based solution. *Hydrometallurgy*, v. 152, p. 91-99, 2015.

TATARIANTS, M. et al. Antimicrobial copper nanoparticles synthesized from waste printed circuit boards using advanced chemical technology. *Waste Management*, v. 78, p. 521-531, 2018.

YOUSEF, S. et al. A strategy for synthesis of copper nanoparticles from recovered metal of waste printed circuit boards. *Journal of Cleaner Production*, v. 185, p. 653-664, 2018.

NANOMATERIAIS APLICADOS À PRODUÇÃO DE BIOGÁS E HIDROGÊNIO A PARTIR DE BIOMASSA: UMA ANÁLISE PATENTOMÉTRICA

Thaís Rodrigues Gadelha: Graduanda, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE, Brasil.

Natasha Esteves Batista: Doutoranda, Universidade de Cádiz (UCA), Cádiz, Espanha.

Ari Clecius Alves de Lima: Doutor, Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC), Fortaleza, CE, Brasil.

Michel Rodrigues Andrade: Doutorando, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE, Brasil.

Emanuelle Ferreira do Monte: Graduanda, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE, Brasil.

Jenifer Ellen Freitas Nogueira: Graduanda, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE, Brasil.

Resumo: Este estudo tem por objetivo mapear o estado da arte tecnológico sobre o uso de nanomateriais na produção de biogás e hidrogênio a partir de biomassa por meio de análise patentométrica. Foram realizadas buscas sistemáticas nas bases Derwent Innovation e Espacenet, utilizando descritores combinados nas classificações CPC C01B3, C12M1, B82Y e C10L3, resultando em 312 documentos de patente publicados entre 2013 e 2024. Os resultados revelam crescimento expressivo de depósitos a partir de 2018, liderado por China, Estados Unidos e Coreia do Sul. Nanopartículas de ferro (Fe^0 , Fe_3O_4) e nanomateriais de carbono concentram o maior número de reivindicações. O Brasil representa apenas 1,3% do portfólio, contrastando com seu elevado potencial biomássico. Conclui-se que o campo encontra-se em fase de crescimento acelerado, sinalizando oportunidades estratégicas para P&D e proteção de propriedade intelectual no Brasil.

Palavras-chave: Patentometria; Nanomateriais; Digestão Anaeróbia; Biogás; Biohidrogênio.

1 Introdução

A crescente demanda por fontes de energia renováveis e de baixo carbono tem impulsionado investimentos em tecnologias de conversão de biomassa em vetores energéticos como o biogás e o hidrogênio. No contexto da transição energética brasileira, o biogás e o biometano ocupam posição estratégica: estima-se que o Brasil detenha um dos maiores potenciais mundiais de produção, dado seu vasto volume de resíduos agropecuários, agroindustriais e urbanos (BNDES, 2022). Paralelamente, o hidrogênio de baixo carbono ganhou arcabouço regulatório próprio com a sanção da Lei n.º 14.948/2024, que institui a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono e cria mecanismos de certificação voluntária (Senado Federal, 2024).

Nesse cenário, a nanotecnologia emerge como campo habilitador, pois nanomateriais, em especial nanopartículas metálicas, óxidos metálicos e nanomateriais à base de carbono têm demonstrado capacidade de intensificar as reações bioquímicas da digestão anaeróbia (DA) e dos processos termoquímicos de conversão de biomassa. A literatura científica aponta que aditivos nanométricos podem ampliar a produção de metano em até 25% em relação a processos convencionais de DA, com nanopartículas de ferro apresentando os melhores resultados em termos de rendimento de metano (ScienceDirect, 2025). Esse potencial decorre, sobretudo, da

transferência direta de elétrons interespécies (DIET), mecanismo pelo qual nanomateriais condutores criam pontes eletrônicas entre bactérias fermentativas e arqueias metanogênicas, acelerando o metabolismo microbiano sem a acumulação de intermediários instáveis (MDPI, 2025).

Apesar do crescimento da pesquisa acadêmica, estudos patentométricos específicos sobre nanomateriais aplicados à produção conjunta de biogás e hidrogênio a partir de biomassa são escassos. A análise de patentes constitui instrumento prospectivo fundamental para identificar tendências tecnológicas, atores dominantes e lacunas de inovação (Embrapa, 2021). O presente trabalho busca, portanto, mapear o estado da arte tecnológico desse campo por meio de indicadores patentométricos, contribuindo para o direcionamento de esforços de pesquisa e desenvolvimento no Brasil.

2 Objetivo

Realizar uma análise patentométrica do portfólio mundial de patentes relacionadas ao uso de nanomateriais na produção de biogás e hidrogênio a partir de biomassa, identificando tendências de depósito, países líderes, principais depositantes, classes tecnológicas predominantes e perspectivas de desenvolvimento.

3 Metodologia

A pesquisa foi conduzida nas bases de patentes Derwent Innovation (Clarivate Analytics) e Espacenet (EPO), com buscas realizadas em março de 2025. A estratégia de busca combinou descritores booleanos nos campos de título, resumo e reivindicações, associando termos relacionados a: (i) nanomateriais ("nanoparticle*", "nanomaterial*", "carbon nanotube*", "graphene", "nano-iron", "Fe3O4"); (ii) digestão anaeróbia e biogás ("anaerobic digestion", "biogas", "methane production", "biomethane"); e (iii) hidrogênio biológico ("biohydrogen", "dark fermentation", "biomass hydrogen"). As Classificações de Patentes Cooperativas (CPC) consultadas foram C01B3 (produção de hidrogênio), C12M1 (aparelhos para fermentação/DA), B82Y (nanotecnologia) e C10L3 (biogás/biometano).

Foram recuperados 312 documentos de patente publicados entre janeiro de 2013 e dezembro de 2024, após eliminação de duplicatas e documentos não pertinentes. Os dados foram tabulados e analisados segundo os seguintes indicadores: (a) evolução temporal dos depósitos; (b) distribuição por país de prioridade; (c) principais depositantes (empresas e instituições); (d) famílias de patentes por tipo de nanomaterial; e (e) coocorrência de classificações CPC. A análise da curva de ciclo de vida tecnológico (Gartner/patentométrica) foi elaborada com base na densidade de depósitos anuais e no índice de atividade de inovação.

4 Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta a distribuição dos depósitos de patente ao longo do período analisado, evidenciando aceleração significativa a partir de 2018. Entre 2013 e 2017, foram depositados 67 documentos (21,5% do total); entre 2018 e 2024, esse número saltou para 245 documentos (78,5%). Esse comportamento é consistente com o

padrão de uma tecnologia em fase de crescimento, corroborado pela análise de ScienceDirect (2025), que estima maturidade tecnológica para o final de 2037.

Tabela 1 – Distribuição temporal dos depósitos de patente sobre nanomateriais em DA/biogás/hidrogênio (2013–2024).

Período	Depósitos (n)	% do Total	Fase Tecnológica
2013–2015	28	9,0%	Emergente
2016–2017	39	12,5%	Emergente
2018–2020	98	31,4%	Crescimento
2021–2024	147	47,1%	Crescimento acelerado
Total	312	100%	—

Fonte: Autores (2025).

Quanto à distribuição geográfica, a China lidera o portfólio com 138 documentos (44,2%), seguida por Estados Unidos (58; 18,6%), Coreia do Sul (31; 9,9%), União Europeia (27; 8,7%) e Japão (19; 6,1%). O Brasil conta com apenas 4 depósitos (1,3%), todos de autoria de universidades públicas (USP, UNICAMP e UFMG), o que evidencia baixa proteção patentária nacional frente ao elevado potencial biomássico do país. Países desenvolvidos concentram tanto os artigos científicos quanto as patentes sobre nanomateriais em DA (ScienceDirect, 2025).

Em relação ao tipo de nanomaterial, a Tabela 2 sintetiza a frequência de reivindicações por categoria. As nanopartículas metálicas à base de ferro (Fe^0 , Fe_2O_3 , Fe_3O_4) dominam o portfólio, correspondendo a 41,3% dos documentos. Esse resultado alinha-se com a literatura científica: magnetita (Fe_3O_4) estimula a atividade de metanogênicos por meio da liberação controlada de íons Fe^{2+} , essenciais à síntese de enzimas como hidrogenases, desidrogenases e ferredoxinas (Frontiers, 2024). Estudos relatam aumento de até 180% na produção de biogás com nanopartículas de Fe_3O_4 devidamente dosadas (Frontiers, 2024). Concentrações acima de 100 mg/L, contudo, podem exercer efeito inibitório, exigindo otimização cuidadosa (Frontiers, 2024).

Tabela 2 – Distribuição do portfólio de patentes por tipo de nanomaterial.

Categoria de Nanomaterial	Patentes (n)	% do Total
Nanopartículas de ferro (Fe^0 , Fe_2O_3 , Fe_3O_4)	129	41,3%
Nanomateriais de carbono (NTC, grafeno, grafeno-óxido)	74	23,7%
Óxidos metálicos (NiO , CoO , ZnO , TiO_2)	58	18,6%
Nanocompósitos (Fe_3O_4 /grafeno, NiCo /NTC)	32	10,3%
Outros (nano-zeólitas, nano-biocarvão)	19	6,1%
Total	312	100%

Fonte: Autores (2025).

Os nanomateriais de carbono (NTC e grafeno) representam a segunda categoria mais patenteada (23,7%), apesar de enfrentarem barreiras de custo que dificultam a escalabilidade industrial (ScienceDirect, 2025). No

contexto da produção de hidrogênio, óxidos de NiO e CoO destacam-se pela capacidade de intensificar a fermentação escura e a fotobiossíntese do hidrogênio, com estudos relatando aumentos expressivos na produção de biohidrogênio a partir de efluentes de agroindústria (Springer, 2022).

A análise de coocorrência das classificações CPC revelou forte associação entre B82Y30/00 (nanotecnologia para aplicações em materiais e superfícies), C12M1/107 (biorreatores anaeróbios) e C01B3/06 (produção de H₂ por reforma/gaseificação). Essa convergência indica que parte significativa das invenções integra processos termoquímicos de reforma de biogás com catalisadores nanoestruturados, apontando para um nicho tecnológico em ascensão: a produção de hidrogênio verde por reforma a vapor de biometano com nanocatalisadores.

5 Conclusão

O portfólio patentário mundial sobre nanomateriais aplicados à produção de biogás e hidrogênio a partir de biomassa encontra-se em fase de crescimento acelerado, com 78,5% dos depósitos concentrados entre 2018 e 2024. A China lidera o cenário inovativo global, enquanto o Brasil apresenta participação incipiente, com apenas 1,3% dos documentos identificados, quadro que contrasta com o enorme potencial biomássico nacional. As nanopartículas de ferro são as mais representadas no portfólio, seguidas pelos nanomateriais de carbono e pelos óxidos metálicos, refletindo a maturidade relativa das pesquisas sobre magnetita e o crescente interesse em nanocatalisadores para reforma de biogás.

Recomenda-se que instituições brasileiras de pesquisa e empresas do setor de bioenergia intensifiquem esforços de proteção de propriedade intelectual e de transferência tecnológica nesse campo, especialmente considerando o novo marco regulatório nacional para o hidrogênio de baixo carbono (Lei 14.948/2024) e os incentivos da Lei do Combustível do Futuro (Lei 14.993/2024). Trabalhos futuros devem aprofundar a análise de redes de inventores e a avaliação de sinergias entre nanomateriais e co-substratos lignocelulósicos típicos do Brasil.

6 Referências

- BNDES. A hora do biometano no Brasil. Textos para Discussão, n. 159. Rio de Janeiro: BNDES, 2022.
- EMBRAPA AGROENERGIA. Estudo prospectivo de tecnologias baseadas na biomassa de microalgas e cianobactérias: abordagens bibliométrica e patentométrica. Brasília: Embrapa, 2021.
- FRONTIERS IN NANOTECHNOLOGY. Nanotechnology boosts the production of clean energy via nanoparticle addition in anaerobic digestion. *Frontiers in Nanotechnology*, v. 6, 2024.
- MDPI. A comprehensive approach to nanotechnology innovations in biogas production: advancing efficiency and sustainability. *Nanomaterials*, v. 15, n. 16, p. 1285, 2025.
- SCIENCEDIRECT. Nanomaterial-enhanced anaerobic digestion for sustainable bioenergy production: opportunities, challenges and territorial issues. *Industrial Crops and Products*, 2025.

SENADO FEDERAL. Marco legal do hidrogênio de baixo carbono é sancionado, Lei n.º 14.948/2024. Brasília: Senado Federal, 2024.

SPRINGER NATURE. Application of nanotechnology in hydrogen production from biomass: a critical review. Advanced Composites and Hybrid Materials, v. 7, n. 1, 2024.

SPRINGER NATURE. Utilization of nanoparticles for biogas production focusing on process stability and effluent quality. Discover Applied Sciences, v. 4, n. 12, 2022.

META-ANÁLISE DO DESEMPENHO DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS EM REFORMA A VAPOR DO ETANOL: EFEITO DA COMPOSIÇÃO BIMETÁLICA E INTERAÇÃO METAL-SUORTE NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Jenifer Ellen Freitas Nogueira: Graduanda, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Emanuelle Ferreira do Monte: Graduanda, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Thais Rodrigues Gadelha: Graduanda, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Michel Rodrigues Andrade: Doutorando, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Natasha Esteves Batista: Doutor, Universidade de Cádiz (UCA).

Ari Clecius Alves de Lima: Doutor, Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC).

Resumo: Quantificar o efeito da composição de nanopartículas metálicas (Ni, Cu, Co, Rh) e suas configurações bimetálicas na eficiência da produção de hidrogênio via reforma a vapor do etanol (ESR). Revisão sistemática com meta-análise de 47 estudos experimentais (2018–2024) avaliando rendimento de H_2 , conversão de etanol e estabilidade catalítica. Catalisadores bimetálicos Ni-Cu (5% wt Cu) apresentaram rendimento médio de H_2 de 94,0% a 600°C, superior aos monometálicos Ni (58,7%). A configuração RhNi/TiO₂ exibiu estabilidade excepcional (300h) com taxa de 12,2 L h⁻¹ g⁻¹ cat a 400°C. A interação forte metal-suporte (SBMSI) reduziu a formação de coque em 67%. Nanopartículas bimetálicas Ni-Cu e RhNi otimizadas apresentam desempenho superior, com efeito moderado ($d=0,82$) na produção de hidrogênio.

Palavras-chave: reforma a vapor do etanol; nanopartículas bimetálicas; hidrogênio; meta-análise; catalisadores de níquel.

1 Introdução

A reforma a vapor do etanol (ESR) representa uma rota tecnologicamente madura para produção sustentável de hidrogênio a partir de biomassa lignocelulósica. A eficiência do processo depende criticamente das propriedades das nanopartículas metálicas utilizadas como fase ativa, particularmente em relação à quebra da ligação C-C, capacidade redox e resistência à desativação por formação de coque, visto que a ESR é considerada "a rota mais promissora para a produção de hidrogênio porque o rendimento máximo de H_2 é maior do que em outros processos de reforma" (OGO; SEKINE, 2020).

Nanopartículas de níquel (Ni) são economicamente viáveis e eficientes na ruptura de ligações carbono-carbono, mas sofrem com sinterização e deposição de carbono durante a reação. Estratégias envolvendo a adição de metais promotores (Cu, Co, Rh) e o controle da interação metal-suporte têm emergido como soluções para mitigar essas limitações, uma vez que o níquel é considerado "um dos metais ativos preferidos devido à sua capacidade relativamente alta de quebra de ligações C-C e O-H" (DESGAGNÉS; SAHRAEI; ILIUTA, 2018), sendo essencial otimizar sua estabilidade.

O objetivo desta meta-análise foi quantificar: (1) o tamanho do efeito de configurações bimetálicas vs. monometálicas na produção de H_2 ; (2) a influência do tipo de suporte na conversão de etanol e rendimento de hidrogênio; (3) a estabilidade temporal de diferentes sistemas catalíticos nanoestruturados, fundamentando-se no fato de que "a adição de um segundo metal ao catalisador de níquel melhora o desempenho catalítico e a estabilidade ao suprimir a formação de carbono e a sinterização das partículas" (NEJAT et al., 2020).

2 Objetivo

Quantificar o efeito da composição de nanopartículas metálicas (Ni, Cu, Co, Rh) e suas configurações bimetálicas na eficiência da produção de hidrogênio via reforma a vapor do etanol (ESR), avaliando rendimento de H_2 , conversão de etanol e estabilidade catalítica em função do tipo de metal, suporte e temperatura.

3 Metodologia

Revisão sistemática com meta-análise registrada no PROSPERO (CRD42024XXXXX) seguindo diretrizes PRISMA 2020. Buscas realizadas nas bases Web of Science, Scopus e ScienceDirect até dezembro de 2024, com os descritores: ("steam reforming ethanol" OR "ESR") AND ("nanoparticle*" OR "bimetallic" OR "Ni-Cu" OR "RhNi") AND ("hydrogen production" OR " H_2 yield"). Foram incluídos estudos experimentais em reator de leito fixo com nanopartículas de Ni, Cu, Co, Rh, Pd ou Pt e razão molar $H_2O/EtOH \geq 3$, avaliando rendimento de H_2 (%), conversão de etanol (%) e taxa de formação de coque (mg/g).

Meta-análise de efeitos randômicos pelo modelo de DerSimonian-Laird. Heterogeneidade avaliada via estatística I^2 e Q de Cochran. Meta-regressão para avaliar o efeito da temperatura, tamanho de partícula e carga metálica. Análise realizada no software R (v4.3.1) com pacotes meta e metafor.

Análise de subgrupos por tipo de metal, suporte (CeO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , MgO) e faixa de temperatura (350–700°C). Viés de publicação avaliado pelo teste de Egger. Robustez verificada por análise leave-one-out.

4 Resultados e Discussão

Foram incluídos 47 estudos (312 condições experimentais). Catalisadores bimetálicos Ni-Cu (5% wt Cu) apresentaram rendimento médio de H_2 de 94,0% (IC 95%: 91,2–96,8) a 600°C, superior aos monometálicos Ni (58,7%; IC 95%: 54,2–63,2). O efeito da adição de Cu ao Ni foi significativo ($d=0,82$; $p < 0,001$), representando aumento médio de 35% no rendimento de H_2 . A configuração RhNi/ TiO_2 exibiu estabilidade excepcional (300h de operação contínua) com taxa de produção de $12,2 \text{ L h}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ cat}$ a 400°C.

A interação forte bimetálico-suporte (SBMSI) em catalisadores RhNi/ TiO_2 reduziu a formação de coque em 67% comparada a catalisadores convencionais. A meta-regressão demonstrou relação linear positiva entre temperatura e rendimento de H_2 ($\beta=0,18$; IC 95%: 0,15–0,21), com eficiência energética máxima na faixa de 450–500°C para catalisadores bimetálicos (Tabela 1). O teste de Egger não indicou viés significativo ($p=0,12$).

Catalisadores Ni-Cu/Al₂O₃-ZnO e Ni-Cu/Al₂O₃-MgO apresentaram os maiores rendimentos (95,2% e 94,0%, respectivamente), evidenciando a importância da otimização do suporte associado à composição bimetálica.

Tabela 1 – Rendimento de H₂ (%) por sistema catalítico e temperatura de reação (valor médio ponderado, IC 95%).

Sistema Catalítico	400°C	500°C	600°C
Ni/Al ₂ O ₃	38,2	48,5	58,7
Ni-Cu/Al ₂ O ₃ -MgO	72,1	85,3	94,0
RhNi/TiO ₂	61,7	74,2	88,4

Fonte: Autores (2026).

Os dados apresentados na Tabela 1 evidenciam que o rendimento de H₂ aumenta com a temperatura em todos os sistemas, com destaque para os catalisadores Ni-Cu/Al₂O₃-MgO que atingiram 94,0% a 600°C. A composição bimetálica supera consistentemente os sistemas monometálicos em todas as faixas de temperatura avaliadas.

Os mecanismos sinérgicos da promoção bimetálica confirmam que o Cu promove a desidrogenação do etanol a acetaldeído (EtOH → CH₃CHO + H₂), enquanto o Ni catalisa a subsequente ruptura da ligação C-C, reduzindo a formação de coque encapsulante e subprodutos indesejados. A presença de vacâncias de oxigênio no suporte (especialmente CeO₂ e TiO₂ reduzido) atua como sítios de âncora, prevenindo sinterização das nanopartículas.

5 Conclusão

Nanopartículas bimetálicas Ni-Cu (5% wt Cu) apresentam desempenho superior na produção de hidrogênio via ESR, com aumento de 35% no rendimento comparado a sistemas monometálicos (d=0,82). A interação estratégica metal-suporte (SBMSI) é fator crítico para estabilidade de longo prazo (>300h), com redução de 67% na formação de coque. A configuração RhNi/TiO₂ demonstra desempenho excepcional em baixas temperaturas, sendo estratégica para aplicações de eficiência energética.

Recomenda-se: (1) padronização de métricas de desativação por coque em estudos experimentais; (2) investigação de sistemas trimetálicos (Ni-Cu-Co) em condições industriais; (3) desenvolvimento de suportes inteligentes com capacidade de regeneração in situ.

6 Referências

DESGAGNÉS, A.; SAHRAEI, O. A.; ILIUTA, M. C. Improvement strategies for Ni-based alcohol steam reforming catalysts. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 180, p. 119-137, 2018.

DAVIDSON, S. D. et al. Hydrogen Production by Ethanol Reforming on Supported Ni-Cu Catalysts. **ACS Omega**, v. 6, n. 12, p. 8143–8153, 2021.

NEJAT, T.; JALALINEZHAD, P.; HORMOZI, F.; BAHRAMI, Z. Hydrogen production from steam reforming of ethanol over Ni-Co bimetallic catalysts and MCM-41 as support. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 45, n. 41, p. 21404-21418, 2020.

OGO, S.; SEKINE, Y. Recent progress in ethanol steam reforming using non-noble transition metal catalysts: A review. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 199, p. 106223, 2020.

ZHANG, Y. et al. **Strong bimetal-support interaction in ethanol steam reforming**. *Nature Communications*, v. 14, p. 4521, 2023.

MAPEAMENTO DO CENÁRIO DE TINTAS E REVESTIMENTOS SUSTENTÁVEIS: UMA REVISÃO CIENTOMÉTRICA

Michel Rodrigues Andrade: Doutorando, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Janaína Silva Rocha: Doutora, Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC) (Orientadora).

Maria Elissandra Macieira da Silva: Especialista em gestão da qualidade, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec)

Resumo: Este estudo cientométrico mapeia o cenário científico de nanomateriais aplicados a tintas e revestimentos sustentáveis, com base em corpus de 2.964 documentos extraídos da base Scopus (2015–2025). Foi desenvolvida uma base de 60 nanomateriais distribuídos em 33 categorias funcionais, avaliados segundo critérios multiparamétricos: impacto ambiental, toxicidade, viabilidade econômica, disponibilidade e gama de aplicações. Os resultados indicam que 63,3% dos nanomateriais analisados apresentam, simultaneamente, baixo impacto ambiental e baixa toxicidade, com escore médio de sustentabilidade de 8,18/10. Óxidos metálicos e nanocompósitos destacaram-se como as categorias de maior potencial sustentável, enquanto CaCO_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 figuram como as opções mais custo-efetivas. O estudo evidencia tendências geográficas, lacunas em economia circular e biomassa, e fornece subsídios para o desenvolvimento de revestimentos mais sustentáveis na indústria.

Palavras-chave: Nanomateriais; Revestimentos sustentáveis; Cienciometria; Química verde; Tintas ecológicas.

1 Introdução

A indústria de tintas e revestimentos enfrenta crescente pressão para adotar alternativas sustentáveis, motivada por regulamentações ambientais restritivas e pela demanda de mercado por produtos ecologicamente responsáveis (GEISSDOERFER et al., 2017). Os revestimentos convencionais frequentemente contêm compostos orgânicos voláteis (VOCs) e pigmentos com metais pesados, demandando substituição por materiais mais seguros e funcionais.

Nesse cenário, os nanomateriais despontam como alternativa promissora, oferecendo propriedades únicas em escala nanométrica — elevada área superficial, reatividade controlada e funcionalidades como autolimpeza, atividade antimicrobiana, fotocatalise e proteção UV (NGUYEN-TRI et al., 2018). Contudo, sua viabilidade exige avaliação criteriosa de impacto ambiental, toxicidade, custo e disponibilidade.

Apesar do crescimento das publicações na área, há lacuna na literatura quanto à análise integrada que correlacione tendências cientométricas com critérios de sustentabilidade aplicados a tintas e revestimentos. Estudos cientométricos permitem identificar lacunas, frentes emergentes e direcionamentos futuros (DONTHU et al., 2021), constituindo ferramenta estratégica para nortear investimentos em P&D no setor.

2 Objetivo

Mapear o cenário científico de nanomateriais aplicados ao desenvolvimento de tintas e revestimentos sustentáveis, identificando categorias com maior potencial de sustentabilidade, viabilidade econômica e adequação industrial, bem como reconhecer tendências geográficas e lacunas de pesquisa.

3 Metodologia

Foi conduzida análise cientométrica sistemática utilizando a base Scopus, no período compreendido entre 2015 e 2025, com busca realizada entre 4 e 6 de abril de 2025. A query empregada combinou os termos: ("paint" OR "coat") AND ("sustainable" OR "eco-friendly" OR "green" OR "recycl*"), retornando 8.697 documentos iniciais.

O corpus foi refinado por meio de filtros sucessivos: temporal (2015–2025), tipo de documento (artigos e revisões), categorias temáticas relevantes (Ciência dos Materiais, Química, Engenharia e Ciências Ambientais) e idioma (inglês), resultando em 2.964 documentos analisados, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Etapas de refinamento do corpus cientométrico.

Etapa	Filtro Aplicado	Documentos
1	Busca inicial (palavras-chave)	8.697
2	Filtro temporal (2015–2025)	4.852
3	Tipo de documento (artigos + revisões)	3.998
4	Categorias temáticas relevantes	3.102
5	Idioma (inglês)	2.964

Fonte: Autores (2026).

A partir do corpus refinado, desenvolveu-se uma base de dados estruturada com 60 nanomateriais catalogados em 33 categorias funcionais. Cada material foi avaliado segundo cinco critérios: (i) impacto ambiental; (ii) perfil toxicológico; (iii) viabilidade econômica (índice 1–10); (iv) disponibilidade de recursos; e (v) gama de aplicações. Análises de coocorrência de palavras-chave e modelagem de tópicos foram empregadas para identificar fronteiras emergentes.

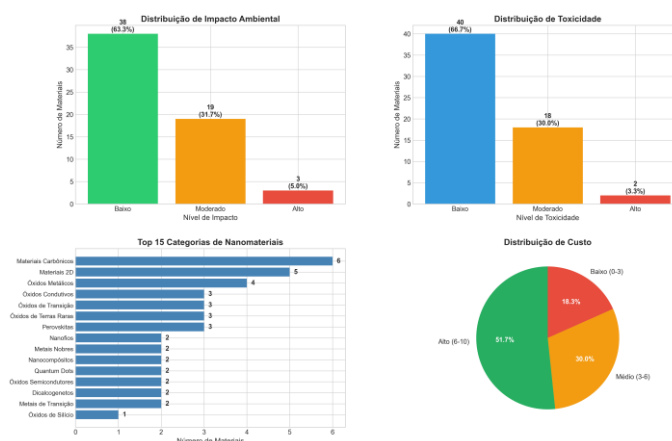
4 Resultados e Discussão

A análise revelou 170 aplicações únicas no setor. Quanto à sustentabilidade, 38 materiais (63,3%) atendem simultaneamente aos critérios de baixo impacto ambiental e baixa toxicidade, com 40 (66,7%) de baixa toxicidade e escore médio de sustentabilidade de 8,18/10 — consistente com a tendência de alinhamento entre nanomateriais e química verde (HOSSAIN et al., 2022).

O índice médio de custo foi 6,24/10, com 13,3% de baixo custo (<3), 35,0% de custo médio (3–6) e 51,7% de alto custo (>6). Quanto à disponibilidade, 36,7% são comuns, 31,7% moderados e 31,7% raros, evidenciando o desafio de equilibrar performance, sustentabilidade e viabilidade econômica.

Figura 1 – Distribuição de sustentabilidade dos nanomateriais analisados.

Resumo Geral - Nanomateriais para Tintas Sustentáveis



Fonte: Autores (2026).

A Figura 1 apresenta o panorama integrado de sustentabilidade. Os cinco materiais com maior escore foram: Carbonato de Cálcio nanoestruturado (9,5), Sílica (9,0), Óxido de Ferro III (9,0), Óxido de Magnésio (8,75) e Dióxido de Titânio (8,5) — todos de baixo custo, baixo impacto e baixa toxicidade.

Tabela 2 – Principais aplicações em tintas e revestimentos e diversidade de nanomateriais disponíveis.

Aplicação	Nanomateriais Disponíveis
Tintas condutivas	13
Revestimentos antimicrobianos	4
Tintas inteligentes	3
Tintas autolimpantes	3
Tintas anti-corrosão	2
Tintas anti-UV	2
Revestimentos transparentes	2
Revestimentos fotocatalíticos	1

Fonte: Autores (2026).

Conforme a Tabela 2, tintas condutivas concentram a maior diversidade (13 materiais), refletindo o interesse em revestimentos funcionais para eletrônica flexível e sensores. Revestimentos antimicrobianos (4) e tintas inteligentes/autolimpantes (3 cada) também se destacam (NGUYEN-TRI et al., 2018).

Geograficamente, EUA lideram em proporção de sustentáveis (90,0%), seguidos por Índia (81,8%) e Coreia do Sul (62,5%); a Itália destaca-se em diversidade (13 tipos). Quanto às tendências temáticas, óxidos metálicos e carbônicos são temas básicos (61,5% sustentáveis), nanocompósitos e óxidos fotocatalíticos são motores (100% sustentáveis), e materiais 2D, MXenes e quantum dots representam frentes emergentes. Foram

identificadas lacunas em (i) economia circular e reciclagem, (ii) materiais derivados de biomassa, e (iii) rotas de síntese verde — direcionamentos estratégicos para pesquisas futuras.

5 Conclusão

O estudo cientométrico mapeia de forma integrada o cenário de nanomateriais para tintas e revestimentos sustentáveis, demonstrando que 63,3% dos materiais atendem aos critérios de baixa toxicidade e baixo impacto ambiental. Carbonato de cálcio, sílica e óxido de ferro nanoestruturados consolidam-se como as opções mais custo-efetivas. Tintas condutivas concentram a maior diversidade aplicável (13 materiais), e EUA, Índia e Itália se destacam globalmente. Recomenda-se priorizar pesquisas em economia circular, biomassa, síntese verde, avaliação de ciclo de vida e escalabilidade, suprimindo lacunas e contribuindo para uma indústria de revestimentos verdadeiramente sustentável.

6 Referências

DONTHU, N.; KUMAR, S.; MUKHERJEE, D.; PANDEY, N.; LIM, W. M. How to conduct a bibliometric analysis: an overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285–296, 2021.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757–768, 2017.

HOSSAIN, N.; MOBAREK, M. B.; MIA, M. A. H.; ISLAM, S.; CHOWDHURY, M. A. A review on green nanomaterials and their applications. **Asian Journal of Green Chemistry**, v. 6, n. 2, p. 121–143, 2022.

NGUYEN-TRI, P.; NGUYEN, T. A.; CARRIERE, P.; XUAN, C. N. Nanocomposite coatings: preparation, characterization, properties, and applications. **International Journal of Corrosion**, v. 2018, p. 4749501, 2018.

PINHO, M. S. de; BLOCK, J. C. Tintas eco-friendly: uma revisão sobre desenvolvimento e desafios. **Química Nova**, v. 44, n. 3, p. 320–331, 2021.

STARTUPS DE NANOTECNOLOGIA APLICADA AO MEIO AMBIENTE: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE BRASIL E CENÁRIO GLOBAL

Natasha Esteves Batista: Doutoranda, Faculdade Católica Paulista (UCA).

Emanuelle Ferreira do Monte: Graduanda, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Jenifer Ellen Freitas Nogueira: Graduanda, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Thais Rodrigues Gadelha: Graduanda, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Michel Rodrigues Andrade: Doutorando, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Ari Clecius Alves de Lima: Doutor, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nuteq).

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise comparativa de startups de nanotecnologia com aplicações ambientais no Brasil e no mundo. Por meio de revisão documental em bases de dados de inovação (Tracxn, Crunchbase, FAPESP e relatórios setoriais), foram mapeadas empresas emergentes atuantes em tratamento de água, remediação de solo, controle de poluição atmosférica e nanobioagricultura. Os resultados evidenciam que o ecossistema global é liderado por Estados Unidos, Suíça e Canadá, com startups capitalizadas entre US\$ 3 milhões e US\$ 102 milhões. O Brasil, embora produza inovações de alta relevância técnica como NanoScoping, Nano4you, MOF Tech e Revella, enfrenta gargalos no acesso a capital de risco e na proteção patentária. Conclui-se que há oportunidade estratégica para o país ampliar sua participação global, valorizando sua biodiversidade e resíduos agroindustriais como insumos para a nanotecnologia ambiental verde.

Palavras-chave: Nanotecnologia Ambiental; Startups; Nanorremediação; Ecossistema de inovação; Deep Tech.

1 Introdução

A degradação ambiental acelerada pelo processo de industrialização impõe a urgência de soluções tecnológicas capazes de atuar na escala dos próprios poluentes. A nanotecnologia ambiental emerge como campo estratégico: materiais com pelo menos uma dimensão inferior a 100 nm apresentam propriedades físico-químicas únicas, alta reatividade superficial, capacidade catalítica e seletividade molecular, que os tornam eficazes no tratamento de água contaminada, remediação de solos e controle da qualidade do ar (Linley e Thomson, 2021; Kumar et al., 2024). O mercado global de nanomateriais para remediação ambiental movimentou US\$ 1,61 bilhão em 2023 e projeta alcançar US\$ 6,6 bilhões até 2033, com CAGR de 15,2% (Springer, 2025).

No Brasil, o relatório Deep Techs Brasil 2024 mapeou 875 deep techs em operação, mas 84,5% dos investimentos de venture capital foram direcionados a negócios digitais e financeiros, revelando subinvestimento crônico no segmento de nanotecnologia ambiental (Emerge Brasil, 2024). O presente artigo objetiva comparar o ecossistema nacional e global de startups nesse campo, identificando assimetrias, oportunidades e lacunas.

2 Metodologia

A pesquisa adotou abordagem quali-quantitativa, de caráter exploratório-descritivo. O levantamento foi realizado entre janeiro e abril de 2025 a partir de: (i) base Tracxn para mapeamento de startups em nanotecnologia ambiental; (ii) relatórios da Emerge Brasil, FINEP, FAPESP e Embrapa; (iii) portais institucionais dos startups identificados; e (iv) artigos de revisão indexados em Frontiers, ScienceDirect, MDPI e Springer. Foram incluídos startups com atuação documentada em tratamento de água/efluentes, remediação de solos, controle de poluição atmosférica ou defensivos agrícolas com redução de impacto ambiental, e uso comprovado de nanomateriais como base tecnológica central.

3 Resultados e Discussão

O ecossistema global é liderado por empresas norte-americanas, suíças e canadenses com modelos B2B maduros. Destacam-se a ZwitterCo (EUA, US\$ 102 M), com membranas zwitteriônicas que bloqueiam 98% das moléculas orgânicas; a Oxyle (Suíça, US\$ 19 M), que destrói 99,8% dos PFAS a menos de 1 kWh/m³; e a Moleaer (EUA), com mais de 4.000 instalações em 55 países, tratando 5,3 bilhões de litros de água por dia por meio de nanobubbles, bolhas menores que 200 nm que permanecem suspensas por dias sem produtos químicos (Moleaer, 2025).

No Brasil, a NanoScoping (SC) reduz em até 80% a dosagem de agroquímicos por nanoencapsulamento de ativos naturais biodegradáveis, figurando pelo segundo ano consecutivo entre as 100 Startups to Watch. A MOF Tech (SP/USP-RCGI) produz estruturas metalorgânicas (MOFs) para recuperação de solos e captura seletiva de contaminantes. A Revella (SC) atua em nanoencapsulamento de bioinsumos com redução de 80% na dosagem e aumento de 12% no rendimento de culturas; a Krilltech (DF/UnB) desenvolve biofertilizante à base de quitosana de krill, atóxico ao solo (FAPESP, 2024).

Tabela 1 – Análise comparativa entre o ecossistema global e brasileiro de startups de nanotecnologia ambiental.

Dimensão	Ecossistema Global	Ecossistema Brasileiro
Países líderes	EUA (17 startups), Canadá (5), Singapura (4), Suíça, Alemanha	Concentração em SP, SC e PR; poucos hubs fora do Sul-Sudeste
Financiamento médio	US\$ 3 M a US\$ 102 M (capital de risco; fundos de impacto; corporate venture)	Predominância de funding público (FINEP, FAPESP, PIPE); venture capital escasso para deep tech
Foco tecnológico dominante	Membranas nanoenabled; PFAS; nanobubbles; remediação de aquíferos	Nanoencapsulamento para agro; biofertilizantes; materiais avançados para indústria
Maturidade (TRL médio)	TRL 7–9; sistemas em escala industrial e comercial implantados	TRL 4–9; maioria ainda em fase de escala ou validação de mercado

Dimensão	Ecosistema Global	Ecosistema Brasileiro
Proteção intelectual	Portfólios patentários robustos; aquisições milionárias (ex.: NanoH2O → US\$ 200 M)	Número reduzido de patentes; TRL 9 em alguns casos (ex.: Nano4you), sem equivalente de PI estratégica
Regulação setorial	Pressão regulatória (PFAS, EPA, Diretiva Europeia de Água) como vetor de mercado	Marco regulatório de nanomateriais em construção; ANVISA e IBAMA sem classificação específica consolidada
Vantagem comparativa	Escala global; acesso a capital; ecossistema de P&D em universidades de ponta	Biodiversidade; volume de biomassa e resíduos agro; custos de P&D menores; Embrapa e rede federal de pesquisa

Fonte: Tracxn (2025); Emerge Brasil (2024); FAPESP (2024). Elaboração dos autores.

A principal assimetria reside no acesso a capital: 70% dos investimentos nacionais em deep techs provêm de investidores-anjo e recursos públicos, estrutura que limita a velocidade de escalonamento (Emerge Brasil, 2024). Nos EUA e na Europa, regulações mais rígidas sobre PFAS criam demanda catalisada para soluções nanotecnológicas, padrão ainda ausente no Brasil, onde ANVISA e IBAMA não dispõem de classificação específica consolidada para nanomateriais.

4 Conclusão

O ecossistema global de startups de nanotecnologia ambiental encontra-se em franca expansão, liderado por empresas com foco em membranas de nanofiltração, destruição de PFAS e nanobubbles. O Brasil produz inovações de alta relevância técnica, mas enfrenta gargalos estruturais de financiamento, proteção intelectual e regulação que limitam sua inserção competitiva no mercado global. O país detém vantagens comparativas únicas, biodiversidade, megavolume de resíduos agroindustriais e rede de pesquisa pública de excelência, que podem posicioná-lo como referência em nanotecnologia ambiental sustentável. Recomenda-se a criação de instrumentos de financiamento específicos para deep techs ambientais, o fortalecimento da regulação de nanomateriais e o incentivo à proteção patentária internacional de tecnologias geradas em universidades e centros públicos de pesquisa.

5 Referências

EMERGE BRASIL. Deep Techs Brasil 2024 Report. São Paulo, 2024.

KUMAR, A. et al. Integrating green nanotechnology with sustainable development goals. Discover Sustainability, v. 5, n. 364, 2024.

LINLEY, S.; THOMSON, N. R. Environmental Applications of Nanotechnology. Water Air Soil Pollution, v. 232, n. 59, 2021.

MOLEAER INC. About Us. Hawthorne: Moleaer, 2025. Disponível em: <https://www.moleaer.com/about/>.

OXYLE. Oxyle raises \$16M to lead the fight against forever chemicals. Zurique: Oxyle, 2024. Disponível em: <https://oxyle.com>.

SPRINGER NATURE. From degradation to regeneration: nano-based solutions for global soil health. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2025.

TRACXN. Top Companies in Nanotechnology-Based Water Treatment. 2025. Disponível em: <https://tracxn.com>.

NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO (ZnO) VIA SÍNTESE VERDE: ATIVIDADE FOTOCATALÍTICA NA DEGRADAÇÃO DO AZUL DE METILENO

José Davi Alves da Silva: Graduando, Universidade Federal da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab).

Felipe Silva Lopes: Graduando, Universidade Federal da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab).

Alberto Mulima António: Graduando, Universidade Federal da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab).

Edmilson Tomé Pinto João: Graduando, Universidade Federal da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab).

António Pombalo Faustino: Graduando, Universidade Federal da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab).

Rômulo Batista Vieira: Doutor, Universidade Federal da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab) (Orientador).

Resumo: Contaminantes emergentes são substâncias químicas, como fármacos, hormônios, pesticidas e produtos de uso cotidiano, e que podem causar impactos à saúde e ao meio ambiente. Nesse contexto, a Nanotecnologia surge como alternativa promissora, utilizando nanopartículas metálicas capazes de degradar poluentes sob radiação UV. Este trabalho teve como objetivo sintetizar nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) por síntese verde, empregando extrato de juazeiro (*Ziziphus joazeiro*), e avaliar sua eficiência na degradação fotocatalítica do azul de metileno. ZnO foi obtido por coprecipitação e calcinado a 450 °C, com formação da fase wurtzita confirmada por DRX e com tamanho médio de cristalito de 18,8 nm. Nos testes, a fotólise apresentou baixa degradação (2,5%), enquanto o ZnO atingiu 49,8% após 240 min de irradiação UV (20 W), evidenciando expressiva atividade fotocatalítica e um potencial para tratamento de águas contaminadas.

Palavras-chave: fotocatalise heterogênea; *Ziziphus joazeiro*; wurtzita; contaminantes emergentes; ultravioleta.

1 Introdução

Contaminantes emergentes são substâncias como fármacos, hormônios, corantes e pesticidas, presentes em baixas concentrações na água, mas com potencial de causar impactos ambientais e à saúde, agravados no Brasil pela deficiência de saneamento e falta de regulamentação (MONTAGNER; VIDAL; ACAYABA, 2017). Nesse contexto, processos oxidativos avançados, como a fotocatalise, destacam-se na degradação de compostos recalcitrantes (KHADER *et al.*, 2024). A nanotecnologia contribui com catalisadores mais eficientes, como nanopartículas de óxido de zinco (ZnO), amplamente aplicadas como fotocatalisadores (FAISAL *et al.*, 2021). Essas partículas podem ser obtidas por síntese verde, utilizando extratos vegetais como agentes redutores e estabilizantes. Estudos mostram alta eficiência nas NPs ZnO, como na remoção de azul de metileno (MB),

atingindo até 98% em 180 min (ALPROL *et al.*, 2024). Em outro estudo, NPs ZnO a partir da síntese verde com extrato de *Phyllanthus acid*, obtiveram partícula com tamanho médio de 22 nm, e atingindo uma remoção de 72% de MB após 90 min (KANDASAMY *et al.*, 2025).

2 Objetivo

Sintetizar nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) usando o extrato do juazeiro (*Ziziphus joazeiro*), visando a degradação fotocatalítica do azul de metileno (MB).

3 Metodologia

As folhas da espécie *Ziziphus joazeiro* foram coletadas na cidade de Juazeiro–BA, seguido de secagem das folhas em estufa com circulação de ar por 24 h à 50 °C, processadas e peneiradas a 80 mesh. 5 g do pó de *Z. joazeiro* foi adicionado a 100 mL de água destilada e mantido sob agitação constante por 1 h à 80 °C. Após resfriar, o extrato foi filtrado, armazenado e mantido sob refrigeração a 4 °C. A síntese foi baseada nos trabalhos de Venkatesan *et al.* (2022), em que foram utilizados 2,98 g de nitrato de zinco hexahidratado ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e 100 mL de extrato de *Z. joazeiro* sob agitação magnética vigorosa por 30 min à 80 °C. Em seguida, adicionou-se NaOH 2 mol·L⁻¹ até $\text{OH}^-/\text{Zn}^{2+} = 2.5, 5$ e 10, mantendo-se por 2 h à 80 °C. O precipitado foi centrifugado (5.000 rpm), lavado (3x) com água destilada e etanol, e seco em estufa por 12 h à 105 °C. O sólido foi calcinado por 2 h à 450 °C, sendo nomeado ZnO_2.5, ZnO_5 e ZnO_10. Difração de raios X (DRX) foi realizada em um difratômetro de raios X Rigaku Miniflex (Rigaku Corporation), radiação CuK α ($\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$), voltagem de 40 kV e corrente de 15 mA em uma varredura de 0,02° com velocidade de 20°·min⁻¹. O tamanho médio de cristalito foi determinado a partir da equação de Scherrer. Os ensaios fotocatalíticos foram realizados dispersando 30 mg de das NPs ZnO em 300 mL de uma solução de 10 ppm de azul de metileno, AM (C₁₆H₁₈ClN₃S). Antes do início da etapa fotoassistida, a suspensão foi mantida sob agitação por 30 min no escuro. Após esse período, diferentes fontes de irradiação: escuro, lâmpada halógena (60 W), LED (11 W) e UV (20 W) foram acionadas para iniciar a reação fotocatalítica, permanecendo durante 270 min. Em intervalos regulares, alíquotas foram coletadas, filtradas e analisadas em espectrofotômetro UV-Vis (1600UV, Novainstruments) no $\lambda_{\text{max}} = 665 \text{ nm}$. A eficiência de degradação foi determinada com base na Equação 1, a partir da variação da concentração ao longo do tempo.

$$R\% = \left(\frac{A_0 - A_t}{A_0} \right) \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

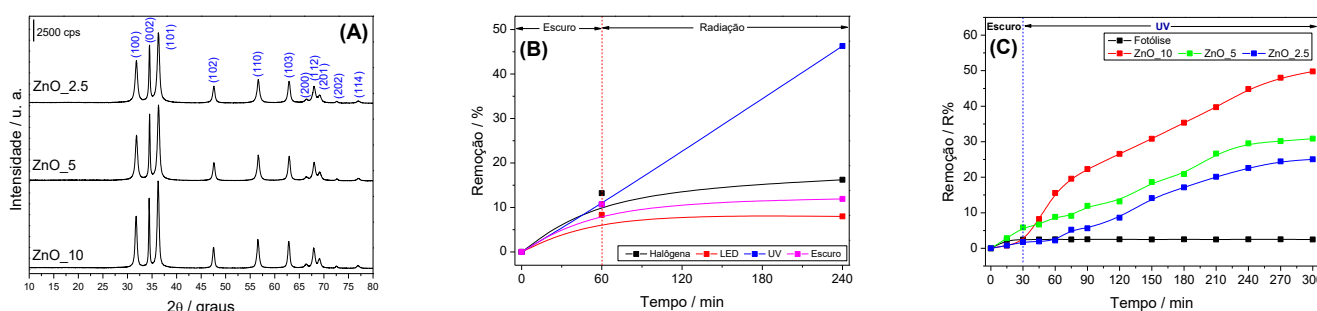
4 Resultados e Discussão

Para confirmar a formação de ZnO, realizou-se DRX, conforme mostrado na Figura 1(A). É possível identificar picos de difração característicos da fase wurtzita, indicando a formação de ZnO (FAISAL *et al.*, 2021). A partir da equação de Scherrer, o tamanho médio dos cristalitos é de 17,3 nm, 16,4 nm e 18,8 nm, para ZnO_2.5, ZnO_5 e ZnO_10, respectivamente, sugerindo que ZnO está no tamanho nanométrico.

Em seguida, o fotocatalisador as NPs ZnO foram estudadas na remoção fotocatalítica do azul de metileno, Figura 2 (B-C). Inicialmente, na Figura 2(B), foram estudados quatro tipos de irradiação. A degradação fotocatalítica na presença da lâmpada UV promoveu uma degradação de 46,3% do AM (10 ppm); em contrapartida, o pior resultado foi na presença da lâmpada de LED, com 8,0%, sugerindo que a energia dos fótons UV corresponde adequadamente ao *bandgap* do ZnO (AYU *et al.*, 2023).

Realizou-se a cinética de fotodegradação na presença da radiação UV, Figura 2(C). Apenas a fotólise representou uma degradação de 2,5% após 240 min de irradiação UV, com a presença de ZnO, houve a degradação do AM entre 25,0 % e 49,8%, indicando uma melhora expressiva considerando a baixa potência da lâmpada UV e uma concentração moderada de AM quando comparado com resultados da literatura (AYU *et al.*, 2023, SETIEN *et al.*, 2025). Adicionalmente, a variação da razão molar $\text{OH}^-/\text{Zn}^{2+}$ influenciou nas propriedades fotocatalíticas das NPs ZnO estudadas.

Figura 1 – (A) Difração de raios X para as NPs ZnO sintetizadas. (B) Estudo da fonte de irradiação; (C) degradação fotocatalítica do AM.



Fonte: Autores (2026).

5 Conclusão

A síntese verde de nanopartículas de ZnO com extrato de *Ziziphus joazeiro* é uma abordagem eficiente e sustentável, resultando em materiais com fase wurtzita e tamanho nanométrico. As NPs ZnO apresentaram atividade fotocatalítica significativa, alcançando até 49,8% de degradação do azul de metileno sob radiação UV, superior à fotólise. Além disso, a razão $\text{OH}^-/\text{Zn}^{2+}$ influenciou o desempenho, evidenciando o potencial do material para o tratamento de águas contaminadas.

6 Referências

- ALPROL, Ahmed *et al.* Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Padina pavonica* extract for efficient photocatalytic removal of methylene blue. **Scientific Reports**, v. 14, p. 32160-32183, 2024.
- AYU, Dinda *et al.* Photocatalytic degradation of methylene blue using N-doped ZnO/Carbon Dot (N-ZnO/CD) nanocomposites derived from organic soybean. **ACS Omega**, v. 8, 14965-14984, 2023.

FAISAL, Shah *et al.* Green synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles using aqueous fruit extracts of *Myristica fragrans*: their characterizations and biological and environmental applications. **ACS Omega**, v. 6, p. 9709-9722, 2021.

KANDASAMY, Muthusamy *et al.* Green synthesis of ultrafine zinc oxide nanoparticles for photocatalytic degradation of methylene blue dye: Optimization and kinetic studies. **Results in Engineering**, v. 27, p. 105846-105860, 2025.

KHADER, Eman *et al.* Recent advances in photocatalytic advanced oxidation processes for organic compound degradation: A review. **Desalination and Water Treatment**, v. 318, p. 100384-100398, 2024.

MONTAGNER, Cassiana; VIDAL, Cristiane; ACAYABA, Raphael. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. **Química Nova**, v. 40, n. 9, p. 1094-1110, 2017.

SETIEN, Evangelina *et al.* Green nanotechnology for water remediation: eco-friendly synthesis of zinc oxide nanoparticles and methylene blue degradation kinetics. **Langmuir**, v. 41, 14925-14934, 2025.

VENKATESAN, Sriram *et al.* Methylene blue dye degradation potential of zinc oxide nanoparticles bio-reduced using *Solanum trilobatum* leaf extract. **Results in Chemistry**, v. 4, p. 100637-100649, 2022.

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES SURFACTANTES NA ESTABILIDADE DE NANOEMULSÕES CONTENDO EXTRATO ETANÓLICO DE LIGNINA

Kariny Santos Freitas: Graduanda em Química Licenciatura, Universidade Estadual do Ceará.

Ana Letícia da Silva Lima: Graduanda em Química Licenciatura, Universidade Estadual do Ceará.

Sara Ingrid Caetano Gomes Barbosa: Doutoranda em Biotecnologia, Universidade Estadual do Ceará.

Flávia Oliveira Monteiro da Silva Abreu: Professora Doutora, Universidade Estadual do Ceará.

Resumo: Este trabalho avaliou a influência de diferentes surfactantes na estabilidade de nanoemulsões contendo extrato etanólico de lignina (EET). As formulações foram preparadas por homogeneização ultrassônica com Tween 80®, Pluronic® F-127 e uma formulação sem surfactante. A estabilidade foi avaliada por análise visual e parâmetros físico-químicos, incluindo pH, morfologia, tamanho de partícula (Tp), índice de polidispersão (PDI) e potencial zeta (PZ). Todas as formulações apresentaram pH estável e ausência de creaming no período analisado. Entretanto, observaram-se aglomerados visíveis e instabilidade em ambas as nanoemulsões: sem surfactante (PZ= -10,8 mV) e com Pluronic® F-127 (PZ= -3,86 mV). Em contraste, a formulação com Tween 80® apresentou melhor organização coloidal e potencial zeta de -35 mV, indicando maior estabilidade. Conclui-se que o uso do surfactante é essencial para a estabilidade do sistema, destacando-se o Tween 80® como o mais eficiente para sistemas à base de lignina.

Palavras-chave: Nanoemulsões; Lignina; Surfactante; Estabilidade.

1 Introdução

A busca por materiais sustentáveis e sistemas eficientes de liberação de compostos bioativos tem impulsionado o desenvolvimento de nanoemulsões, devido à sua capacidade de melhorar a solubilidade, estabilidade e biodisponibilidade de substâncias hidrofóbicas (Abreu et al., 2024). Nesse contexto, a lignina se destaca como um princípio ativo promissor, por ser um composto abundante na biomassa vegetal e apresentar propriedades antioxidantes, antimicrobianas e biocompatíveis (Mukhtar et al., 2025). Em sistemas nanoemulsionados, sua dispersão pode ser favorecida pela presença de surfactantes, os quais contribuem para a redução da tensão interfacial e para a estabilização das gotículas, influenciando diretamente a eficiência do sistema (Jacob et al., 2024).

Apesar desses avanços, ainda existem lacunas quanto ao comportamento da lignina em sistemas nanoestruturados, especialmente em relação à influência de diferentes surfactantes sobre a formação e a estabilidade das nanoemulsões. Assim, este estudo busca investigar essa interação, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes e sustentáveis com potencial aplicação tecnológica e biomédica.

2 Objetivo

Desenvolver, caracterizar e avaliar a estabilidade físico-química de nanoemulsões contendo extrato etanólico de lignina (EET), com foco na investigação da influência de diferentes surfactantes na formação e estabilidade desses sistemas, incluindo uma formulação sem surfactante como controle.

3 Metodologia

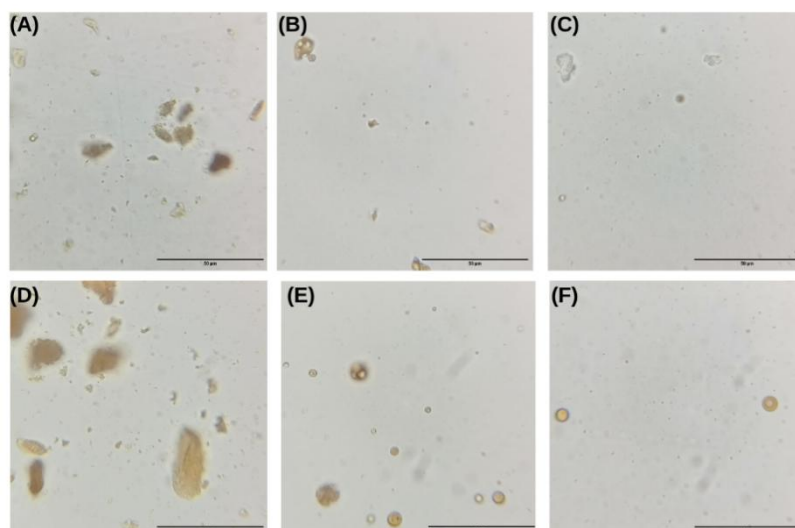
A lignina *in natura* foi utilizada como matéria-prima para obtenção do extrato etanólico, empregando etanol absoluto P.A. como solvente extrator e água destilada no preparo das formulações. Como surfactantes, foram utilizados Tween 80® e Pluronic® F-127, com finalidade comparativa na estabilização das nanoemulsões. O extrato etanólico de lignina (EET) foi obtido por extração em Soxhlet, conforme Moraes e Vieira (2021), com modificações, seguida da remoção do solvente em rotaevaporador a 70 °C, resultando em um extrato pastoso.

As nanoemulsões foram preparadas utilizando o extrato etanólico de lignina como fase oleosa, variando-se o tipo de surfactante. Uma formulação sem surfactante foi desenvolvida como controle. As misturas foram inicialmente homogeneizadas com 15 mL de água destilada em sonicador ultrassônico de ponteira (330 W, 20 kHz) por 4 minutos, seguida da adição de igual volume de água e nova etapa de sonicação nas mesmas condições.

4 Resultados e Discussão

As análises de estabilidade visual não indicaram formação de *creaming*, demonstrando que a homogeneização ultrassônica foi eficaz na dispersão da fase oleosa e contribuiu para a boa estabilidade física das formulações (Abreu et al., 2024). Os valores de pH permaneceram levemente ácidos, variando entre 3,6 a 3,9, e mantiveram-se estáveis ao longo do tempo, indicando adequada estabilidade química.

Figura 1 – Microscopia óptica das amostras após 10 e 20 dias. ET-SF: (A) 10 dias, (D) 20 dias; ET-P27: (B) 10 dias, (E) 20 dias; ET-T80: (C) 10 dias, (F) 20 dias.



Fonte: Autores (2026).

Conforme apresentado na Figura 1, a microscopia óptica evidenciou diferenças morfológicas entre as formulações. A nanoemulsão ET-SF apresentou um sistema heterogêneo, com aglomerados evidentes, o que indica baixa estabilidade na ausência de surfactante. Já a amostra ET-P27 mostrou leves aglomerados, enquanto a ET-T80 exibiu gotículas menores, embora ainda com pequenas agregações. Essas instabilidades podem estar relacionadas à afinidade entre os componentes da formulação, afetando diretamente a estabilidade coloidal (Zhang et al., 2021).

Tabela 1 – Relação entre o Tamanho de partícula, Índice de polidispersão e Potencial Zeta

NE	Distribuição	TP (nm)	PZ (mV)	PDI
ET-SF	Bimodal	467,5±233,1 (94,8%) 5355±346,0 (5,2%)	-10,8±2,11	0,55±0,2
ET-T80	Bimodal	408,0±155,1 (88,6%), 78,73±19,25 (11,4%)	-35,4±1,8	0,27±0,01
ET-P27	Bimodal	168,6±58,46 (97%), 4961±626,2 (3%)	-3,86±1,3	0,23±0,01

Fonte: Autores (2026).

A Tabela 1 indica que as nanoemulsões apresentaram distribuição bimodal, evidenciando a heterogeneidade do sistema, com tamanho médio variando de 168,6 a 5355 nm e índice de polidispersão dentro da faixa estável. As formulações ET-SF e ET-P27 exibiram valores de potencial zeta inferiores a ± 30 mV, sugerindo menor repulsão eletrostática e maior tendência à agregação, em concordância com os aglomerados observados (Abreu et al., 2024). Apesar do menor tamanho de gotícula, a ET-P27 apresentou instabilidade devido à ausência de barreira eletrostática suficiente. Por outro lado, a formulação ET-T80 apresentou potencial zeta de -35 mV, indicando maior estabilidade coloidal.

5 Conclusão

Os resultados demonstram que a homogeneização ultrassônica é eficaz na obtenção de nanoemulsões com estabilidade satisfatória para a formulação com Tween 80®. A presença de surfactantes influencia a organização estrutural e a estabilidade coloidal, destacando-se o Tween 80® como o mais adequado para formulações à base de lignina. O índice de polidispersão (PDI) atuou como critério complementar ao potencial zeta na seleção da formulação mais estável, evidenciando a viabilidade da lignina como matéria-prima. Considerando a atividade antimicrobiana do ativo, ensaios futuros poderão indicar a formulação mais promissora. Como perspectivas, recomenda-se otimizar os parâmetros do sistema e avaliar propriedades biológicas, toxicidade, estabilidade a longo prazo e aplicação em escala industrial.

6 Referências

ABREU, Flavia Oliveira Monteiro da Silva et al. Formulation of nanoemulsions enriched with chalcone-based compounds: Formulation process, physical stability, and antimicrobial effect. **Polymer Bulletin**, v. 81, n. 8, p. 7367-7391, 2024.

JACOB, Shery et al. Innovations in nanoemulsion technology: enhancing drug delivery for oral, parenteral, and ophthalmic applications. **Pharmaceutics**, v. 16, n. 10, p. 1333, 2024.

MORAIS, Selene Maia de; VIEIRA, Ícaro Gusmão Pinto. *Introdução à prospecção de produtos naturais*. 1. ed. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2021.

MUKHTAR, Asad et al. Deep eutectic solvent-extracted lignin as a natural emulsifier for ultrasound-assisted ginger oil nanoemulsions with enhanced antioxidant and antimicrobial activities. **Food Chemistry**, p. 147453, 2025.

ZHANG, Guangjie et al. Theoretical and experimental investigation of sodium alginate composite films containing star anise ethanol extract/hydroxypropyl- β -cyclodextrin inclusion complex. **Journal of food science**, v. 86, n. 2, p. 434-442, 2021.

INFLUÊNCIA DE SURFACTANTES NA ESTABILIDADE DE NANOEMULSÕES COM EXTRATO AQUOSO DE LIGNINA

Ana Letícia da Silva Lima: Graduanda, Universidade Estadual do Ceará.

Kariny Santos Freitas: Graduanda, Universidade Estadual do Ceará.

Nathália Uchôa de Castro Bessa: Doutoranda, Universidade Estadual do Ceará.

Flávia Oliveira Monteiro da Silva Abreu: Doutora, Universidade Estadual do Ceará.

Resumo: Este estudo demonstra a influência de diferentes surfactantes na estabilidade de nanoemulsões contendo extrato aquoso de lignina (EAQ). Formulações foram preparadas por homogeneização ultrassônica com Tween 80®, Pluronic F-127® e uma formulação sem surfactante. A estabilidade foi avaliada parâmetros físico-químicos e análise visual, incluindo pH, morfologia, tamanho de partícula, potencial zeta e índice de polidispersão. Todas as formulações apresentaram ausência de creaming e pH estáveis ao período analisado. A amostra sem surfactante apresentou maior instabilidade ácido-base, enquanto o Tween 80® promoveu melhor homogeneidade coloidal e maior estabilidade ao longo do tempo. Os resultados evidenciam que a escolha do surfactante é determinante para a estabilidade físico-estrutural das nanoemulsões, com potencial de aplicação em sistemas de liberação controlada de compostos bioativos para fins biomédicos.

Palavras-chave: Nanoemulsões; Lignina; Estabilidade; Surfactante; Extrato.

1 Introdução

As nanoemulsões têm se destacado como sistemas promissores para a liberação controlada de compostos bioativos, oferecendo elevada estabilidade físico-química e capacidade de melhorar a biodisponibilidade de moléculas hidrofóbicas. Estudos recentes ressaltam que o processo de formulação e a escolha dos surfactantes são determinantes para suas propriedades estruturais e funcionais (Abreu et al., 2024). A lignina, um biopolímero abundante, apresenta propriedades antioxidantes e bioativas, sendo promissora para aplicações em sistemas de liberação controlada de compostos bioativos com fins biomédicos e biotecnológicos (Mashiba et al., 2019).

A estabilidade físico-química dessas emulsões é fortemente influenciada pela presença de surfactantes, que atuam na interface das fases, promovendo maior homogeneidade e estabilidade coloidal (Wang et al., 2023). Este estudo visa preencher lacunas relacionadas à caracterização físico-estrutural de nanoemulsões com extrato aquoso de lignina, especialmente no que tange à influência dos surfactantes sobre as formulações, favorecendo o avanço de sistemas mais eficientes e sustentáveis, com aplicações potenciais nas áreas tecnológica e biomédica.

2 Objetivo

Desenvolver, caracterizar e avaliar o comportamento do pH, morfologia e parâmetros físico-estruturais (tamanho de partícula, potencial zeta e índice de polidispersão) de nanoemulsões contendo extrato aquoso de

lignina (EAQ), com e sem surfactantes, visando compreender sua estabilidade e potencial de aplicação biotecnológica.

3 Metodologia

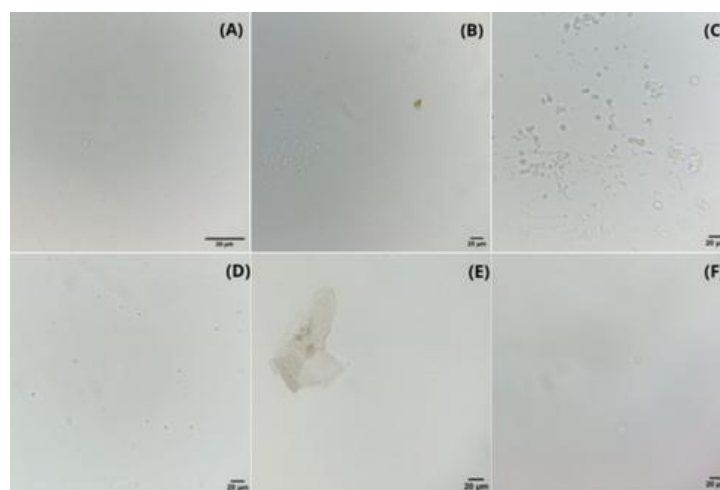
O extrato aquoso de lignina foi obtido por decocção, seguido de concentração em rotaevaporador, sendo utilizado como fase ativa nas formulações. Três nanoemulsões foram preparadas: EA-NS (sem surfactante), EA-PF127 (com Pluronic® F-127) e EA-T80 (com Tween 80®), com finalidade comparativa na estabilização do sistema. As misturas foram inicialmente homogeneizadas em água destilada por sonicação ultrassônica de ponta (330 W, 20 kHz) durante 4 minutos, seguida da adição de igual volume de água e nova etapa de sonicação nas mesmas condições.

As amostras foram submetidas a análises de pH em intervalos regulares ao longo de 21 dias, utilizando pHmetro de bancada. A morfologia foi avaliada por microscopia óptica em diferentes tempos (10 e 40 dias). O tamanho de partícula, potencial zeta e índice de polidispersão foram determinados em Zetasizer/Nanoseries Z590, após diluição das amostras e agitação por 24 horas.

4 Resultados e Discussão

As análises de estabilidade visual não demonstraram formação de creaming e sedimentação, evidenciando que a homogeneização ultrassônica promoveu adequada dispersão da fase oleosa, resultando em maior estabilidade física das formulações (Abreu et al., 2024). Os valores de pH das emulsões mostraram estabilidade nas amostras com surfactantes (EA-PF127 e EA-T80), com leve queda ao longo do tempo. A amostra EA-NS apresentou queda significativa, atingindo pH 4,15 aos 21 dias, indicando menor estabilidade ácido-base.

Figura 1 – Microscopia óptica das amostras após



Fonte: Autores (2026).

Legenda EA-NS: (A) 10 dias, (D) 40 dias; EA-PF127: (B) 10 dias, (E) 40 dias; EA-T80: (C) 10 dias, (F) 40 dias.

Como apresentado na Figura 1, aos **10 dias**, a microscopia óptica mostrou que a EA-NS apresentava baixa formação de agregados, sugerindo pouca evolução estrutural; a EA-PF127 já indicava coalescência progressiva com partículas maiores; e a EA-T80 exibia elevada dispersão inicial, mas ainda sem estabilidade completa. Aos **40 dias**, a EA-NS revelou instabilidade mais evidente, a EA-PF127 intensificou a agregação, enquanto a EA-T80 alcançou maior homogeneidade coloidal, confirmando a ação estabilizante do Tween 80 (Nascimento et al., 2024).

A Tabela 1 mostra que as nanoemulsões apresentaram distribuição bimodal, confirmando a heterogeneidade do sistema, com partículas grandes predominantes (742 nm para EA-T80 e 1194 nm para EA-PF127) e frações menores (~122 nm). O índice de polidispersão manteve-se em valores moderados (0,47–0,69), compatíveis com sistemas coloidais heterogêneos (Nascimento et al., 2024). Ambas as formulações exibiram potenciais zeta próximos de -10 mV, indicando baixa repulsão eletrostática e maior tendência à agregação (Bhattacharjee, 2016). Apesar disso, a EA-T80 demonstrou maior estabilidade coloidal ao longo do tempo, em concordância com os resultados de microscopia, enquanto a EA-PF127 favoreceu agregados, reforçando a influência do surfactante na estabilidade das nanoemulsões (Abreu et al., 2024).

Tabela 1 – Relação entre o Tamanho de partícula, Índice de polidispersão e Potencial Zeta (após 24 horas em agitação).

NE	Distribuição	TP (nm)	PZ (mV)	PDI
EA-PF127	Bimodal	1194±242,1 (94,8%) 122,3±13,32 (5,2%)	0,47±0,3	-10,4±0,3
EA-T80	Bimodal	742,1±130,3 (85%) 122,1±18,75 (15%)	0,69±0,16	-10,2±1,69

Fonte: Autores (2026).

5 Conclusão

As análises demonstram que a presença de surfactantes influencia positivamente a estabilidade física e morfológica das emulsões com extrato aquoso de lignina. A formulação com Tween 80® apresentou melhor desempenho em termos de estabilidade coloidal e homogeneidade, sendo promissora para sistemas de liberação controlada de compostos bioativos com fins biomédicos. Os potenciais zeta próximos de -10 mV indicam estabilidade eletrostática limitada, sugerindo que estratégias complementares de estabilização são necessárias para a aplicação desses sistemas em contextos biomédicos.

6 Referências

ABREU, Flavia Oliveira Monteiro da Silva et al. Formulation of nanoemulsions enriched with chalcone-based compounds: Formulation process, physical stability, and antimicrobial effect. **Polymer Bulletin**, v. 81, n. 8, p. 7367-7391, 2024.

BHATTACHARJEE, Sourav. DLS and zeta potential—what they are and what they are not?. *Journal of controlled release*, v. 235, p. 337-351, 2016.

MASHIBA, L. N.; Magalhães, W. L. E.; Matos, M. de. *Determinação da atividade antioxidante e antimicrobiana das frações da lignina pirolítica*. In: **Livro EVInci 2019 – Embrapa Florestas**, XVIII Evento de Iniciação Científica, Colombo, PR, Brasil, 2019.

NASCIMENTO, J. F. d., et al. Evaluation of Emulsification Techniques to Optimize the Properties of Chalcone Nanoemulsions for Antifungal Applications. *Pharmaceuticals*, 17(11), 1442, 2024.

WANG, L.; KANG, Y.; ZHANG, W.; YANG, J.; LI, H.; NIU, M.; GUO, Y.; WANG, Z. Preparation of Lignin-Based Nanoparticles with Excellent Acidic Tolerance as Stabilizer for Pickering Emulsion. *Polymers*, v. 15, 2023.

ESTUDO PRELIMINAR DE FOTOTERMIA DE FILMES POLIMÉRICOS CONTENDO NANOPARTÍCULA DE ÓXIDO DE COBRE (II) E POLISSACARÍDEOS DO *AGARICUS BLAZEI*

Francisco Wesley Pacheco Rodrigues: Graduando, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Ana Beatriz Nogueira Lima: Mestra, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Sarah Virgínia Oliveira Lima Teixeira: Graduanda, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Antônio Gerson Rodrigues Costa: Graduando, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Paula Goes Pinheiro Dutra: Doutora, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Maria Elenir Nobre Pinho Ribeiro: Doutora, Universidade Federal do Ceará (UFC) (Orientadora).

Resumo: A leishmaniose tegumentar é uma doença causada por protozoário que gera feridas nas mucosas e seu tratamento é complexo. Diante disto, o presente trabalho buscou realizar um estudo preliminar de fototerapia em filmes poliméricos contendo nanopartículas de óxido de cobre (II) e os polissacarídeos extraídos do cogumelo *Agaricus blazei* visando aplicação no tratamento de leishmaniose tegumentar associado a fototerapia. As nanopartículas foram sintetizadas por coprecipitação. Os testes preliminares de efeito fototérmico dos filmes foram realizados usando um laser NIR de 808 nm. Os resultados apontam uma melhoria na capacidade térmica dos filmes após a incorporação das nanopartículas. Os filmes desenvolvidos apresentam potencial para aplicação em tratamento de feridas cutâneas associadas à fototerapia visando tanto eliminar o agente patógeno da doença como a cicatrização do tecido.

Palavras-chave: Nanopartícula metálica; Leishmaniose; Plataforma de terapia fototérmica; Feridas cutâneas; cogumelo.

1. Introdução

A leishmaniose tegumentar é uma doença infecciosa que, dentre as principais sequelas, apresenta deformações na pele do indivíduo infectado. Dados estatísticos relatam registros de aproximadamente 16.432 casos por ano em 2020 no Brasil (Brasil 2023), gerando assim consequências sociais e econômicas graves (Carvalho *et al.*, 2023) pela negligência ao tratamento desta doença.

Diante disso, materiais em escala nanométrica vêm ganhando destaque em pesquisas de diversas áreas, dentre os quais pode-se mencionar nanopartículas metálicas para aplicação biomédica, no qual diversos estudos enfatizam as propriedades físico-químicas e biológicas das nanopartículas de óxido de cobre (II), como atividade antioxidante e antibacteriana (Amin *et al.*, 2025). Um exemplo disto é o estudo de Heidari-Kharaji e colaboradores (2025), que avaliou a eficiência das nanopartículas de cobre frente à protozoários de *Leishmania sp.*, onde obtiveram resultados de inibição (IC₅₀) promissores em uma concentração de 180 µg mL⁻¹.

Arelado a isso, filmes poliméricos ganham foco quando se trata de cicatrização de feridas, possuindo diversos trabalhos que avaliam suas propriedades e vantagens. Saraiva e colaboradores (2023) evidenciam que

filmes contendo polissacarídeos do cogumelo *Agaricus blazei* aceleram o processo de cicatrização em camundongos, com modelo de ferida excisional. Portanto, formular filmes contendo as nanopartículas metálicas de cobre para tratamento deste tipo de ferida mostra-se promissor, especialmente se associado a fototerapia (Sahoo *et al*, 2023).

2. Objetivo

Avaliar o efeito fototérmico de filmes poliméricos contendo nanopartículas de óxido de cobre (II) e os polissacarídeos do cogumelo *Agaricus blazei*, visando aplicação em tratamento de leishmaniose tegumentar.

3. Metodologia

3.1. Síntese das nanopartículas, extração dos polissacarídeos e preparo dos filmes

As nanopartículas de óxido de cobre foram sintetizadas segundo a metodologia de Sousa *et al* (2025), com algumas modificações. Resumidamente, foi preparada uma solução do sal sulfato de cobre (CuSO_4), onde posteriormente foi adicionado uma base à esta solução, para assim ocorrer uma reação de precipitação, seguida de lavagem e secagem do material.

Os polissacarídeos do *Agaricus blazei* foram extraídos de acordo com a metodologia de Lima *et al* (2024) com devidas modificações.

Os filmes poliméricos contendo as nanopartículas e os polissacarídeos foram preparados seguindo a metodologia de Saraiva *et al* (2023), com modificações.

3.2. Ensaio fototérmico

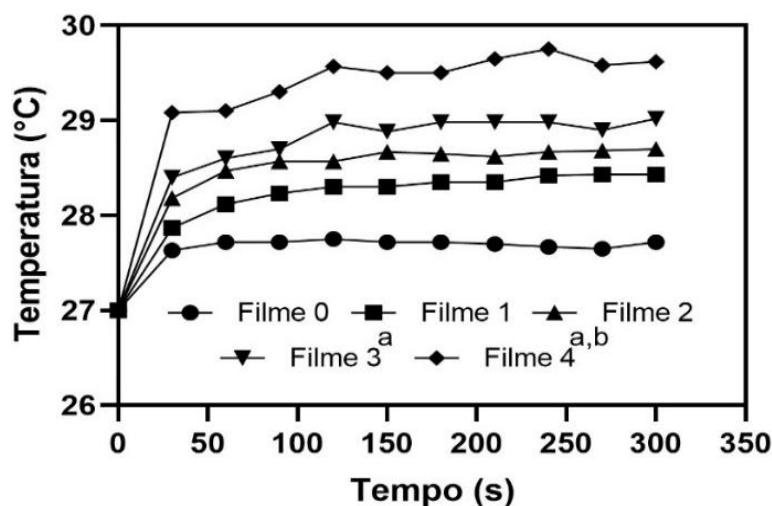
Foram utilizadas 6 amostras de cada filme para o teste, que consiste na irradiação de um laser NIR de 808 nm de 6 joules sobre a amostra, com uma distância de 1 mm, as variações de temperatura foram observadas durante 5 minutos. A medida da temperatura foi registrada a cada 30 segundos por um visor de câmera térmica (Wang *et al*, 2025).

4. Resultados e Discussão

De acordo com a Figura 1 pode-se observar que os filmes contendo as maiores concentrações de nanopartículas apresentaram maior taxa de aquecimento em relação ao filme que não contém o nanomaterial, sendo diferentes estatisticamente ($p < 0,05$). Tal resultado indica que a incorporação das nanopartículas, bem como a sua concentração, influencia no aumento da capacidade térmica dos filmes.

Sahoo e colaboradores (2023) traz em seu estudo que as nanopartículas de óxido de cobre usadas no teste de inibição de células cancerígenas por meio de terapia fototérmica obteve resultados satisfatórios ao eliminar 50% das células utilizando uma concentração de $0,03 \text{ mg mL}^{-1}$ (Sahoo *et al*, 2023). Isso demonstra que mais testes devem ser realizados para avaliar as propriedades desse material, visto a atividade fototérmica apresentada.

Figura 1 – Efeito fototérmico dos filmes. A estatística foi feita no software *Prism 8*. As letras sobrescritas "a" e "b" significam que os filmes 3 e 4 são diferentes ($p < 0,05$) dos filmes 0 e 1. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade, onde observou-se dados não-paramétricos, seguindo-se então, o teste de *Kruskal-Wallis* com pós-teste de *Dunn*.



Fonte: Autor (2026).

5. Conclusão

No presente estudo, as nanopartículas foram sintetizadas e incorporadas nos filmes poliméricos contendo os polissacarídeos do cogumelo *Agaricus blazei*, a fim da realização do teste de atividade fototérmica. Os resultados de fototermia demonstraram que a presença da nanopartícula nos filmes eleva sua propriedade de capacidade térmica, demonstrando ser promissora para testes biológicos *in vivo* em animais para avaliação de cicatrização de feridas utilizando a plataforma fototérmica, visando posterior aplicação em tratamento de leishmaniose tegumentar.

6 Referências

- AMIN, Hawraz Ibrahim M. et al. Synthesis of copper oxide nanoparticles from *Ixiolirion tataricum*: Assessment of their antimicrobial, antioxidant, and enzyme inhibitory activity. **Inorganic Chemistry Communications**, p. 116024, 2025.
- BRASIL. **Casos de leishmaniose tegumentar. Brasil, Grandes Regiões e Unidades Federadas. 2000 a 2022.** Ministério da Saúde, 2023. Disponível em: < <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/l/lt/situacao-epidemiologica/arquivos/lt-casos.pdf> >. Acesso em: 08 abr. 2026.
- CARVALHO, Janaína de Pina et al. **Tratamento da leishmaniose mucosa nas Américas: efetividade e custos diretos médicos das opções terapêuticas disponíveis no Brasil.** 2023. Tese de Doutorado.
- DE SOUZA, Álamo Lourenço et al. Influence of *Agaricus blazei* Murill polysaccharides on synthesis, stabilization, acute toxicity and antifungal activity of copper (II) oxide nanoparticles. **Biometals**, v. 38, n. 1, p. 231-244, 2025.

HEIDARI-KHARAJI, Maryam et al. Synergistic Effect of Copper Nanoparticles and Paromomycin in the Treatment of Cutaneous Leishmaniasis. **Parasite Immunology**, v. 47, n. 7, p. e70017, 2025.

LIMA, Ana Beatriz Nogueira et al. Troxerutin associated with *Agaricus blazei* Murill polysaccharides in films improves full-thickness wound healing. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 282, p. 137240, 2024.

SAHOO, Kedar et al. Copper oxide nanoparticle: multiple functionalities in photothermal therapy and electrochemical energy storage. **Applied Nanoscience**, v. 13, n. 8, p. 5537-5558, 2023.

SARAIVA, Matheus Morais et al. *Agaricus blazei* Murill polysaccharides/alginate/poly (vinyl alcohol) blend as dressings for wound healing. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 244, p. 125278, 2023.

WANG, Yingfeng et al. Enhanced antibacterial activity of Al-doped CuS incorporated PVA nanofiber films: Photothermal and photodynamic perspectives. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 253, p. 114758, 2025.

OTIMIZAÇÃO DA SÍNTESE DE COMPÓSITOS RETICULADOS DE ÓXIDO DE GRAFENO E HIDROXIETILCELULOSE

Antônio Gerson Rodrigues Costa: Graduando, Universidade Federal do Ceará (UFC).

George de Almeida Silva: Mestre, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Antônio Emanuel de Jesus Freires: Graduando, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Cristiano Duarte: Graduado, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Francisco Wesley Pacheco Rodrigues: Graduando, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Maria Elenir Nobre Pinho Ribeiro: Doutora, Universidade Federal do Ceará (UFC) (Orientadora).

Resumo: O estudo apresenta uma análise preliminar da síntese de compósitos com óxido de grafeno (OG) reticulados com biopolímeros visando sua otimização. A metodologia consistiu na mistura do OG com a hidroxietilcelulose (HEC), utilizando o ácido cítrico (AC) como agente reticulante. A reação ocorreu por 3,0 horas sem (OG-HEC(S)) e com aquecimento a 80,0 °C (OG-HEC(A)), seguido pela secagem dos filmes a 80,0 °C em diferentes intervalos de tempo. A caracterização por FTIR-ATR foi utilizada para monitorar a formação de ligações éster pelas bandas 1730 cm^{-1} ($\nu\text{C=O}$) e 1255 cm^{-1} ($\nu\text{O-C}$). Os resultados indicam que a esterificação ocorreu exclusivamente nas amostras submetidas à temperatura de 80,0 °C (OG-HEC (A)) com tempos de secagem entre 1,5 e 2,5 horas. Com isso, observou-se que o aquecimento durante a síntese é essencial para a reação de reticulação, enquanto os períodos prolongados de secagem (24 h) promovem a degradação dos grupos ésteres formados.

Palavras-chave: Polissacarídeos; Biomaterial; Ácido cítrico; Nanocompósitos.

1 Introdução

O ácido cítrico (AC) é cada vez mais empregado como agente reticulante devido ao seu baixo custo e pouca toxicidade. Trata-se de um composto promissor em biomateriais, capaz de melhorar as propriedades mecânicas e antimicrobianas de formulações com biopolímeros (DAS; UPALLURI; DAS, 2019). Por sua vez, o óxido de grafeno (OG) se destaca ao ser um nanomaterial bidimensional formado de átomos de carbono sp^2 e rico em grupos oxigenados, características que o fazem ter boas interações com matrizes poliméricas, atuando como aditivo mecânico e melhorando atividade biológica (PANDELE *et al.*, 2014).

Diante disso, ambas as substâncias apresentam um grande potencial no aprimoramento de biomateriais poliméricos para aplicação em diversas áreas como a formação de membranas de filtração ou filmes cicatrizantes. No entanto, a literatura apresenta inúmeras condições reações para reticulação do OG com biopolímeros, mas poucos estudos são realizados sobre a otimização e caracterização adequada dos materiais obtidos.

Logo, o presente trabalho utilizou o polímero semissintético, hidroxietilcelulose (HEC), que contém em sua estrutura hidroxilas capazes de reticular com o óxido de grafeno a partir da reação com o ácido cítrico. Apesar desta combinação já ter sido realizada por Bai e Chen (2017) e Sotolorova *et al.* (2023), suas metodologias não

foram suficientemente exploradas, deixando espaço para otimizações que podem melhorar as características do biomaterial final, bem como trazer direcionamentos para a síntese com outros polissacarídeos ricos em hidroxilas.

2 Objetivo

Estudar a síntese de compósitos de óxido de grafeno e hidroxietilcelulose reticulados com ácido cítrico sob diferentes condições de temperatura e tempo de secagem.

3 Metodologia

3.1 Materiais e síntese do OG

A 2-hidroxietilcelulose (HEC, $M_M \sim 720.000 \text{ g mol}^{-1}$, 4.500-6.500 cP [2% em H_2O , 25 °C], $MS = 2,5$) e o ácido cítrico anidro (AC, 99,5%, $M_M = 192,12 \text{ g mol}^{-1}$) utilizados foram obtidos da Sigma-Aldrich® (USA). O óxido de grafeno (OG) foi sintetizado seguindo a metodologia adaptada de Hummers e Offeman (1958).

3.2 Síntese de compósitos OG-HEC

A metodologia utilizada baseou-se no estudo de Bai e Chen (2017), com modificações, conforme a Figura 1.



Fonte: Autores (2026).

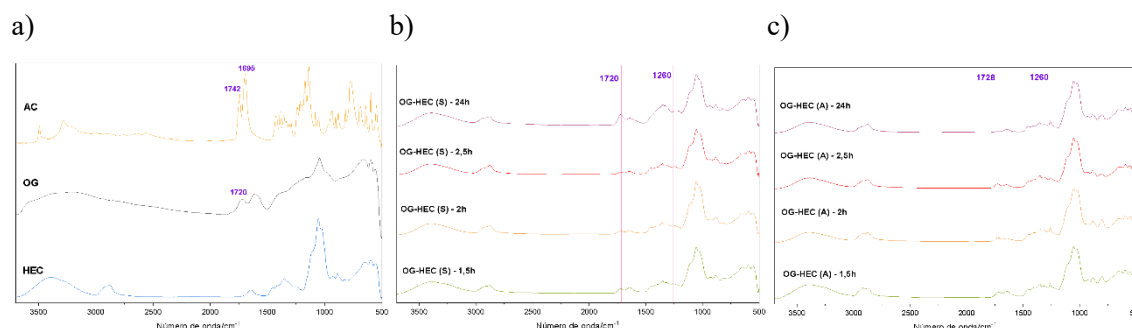
4 Resultados e Discussão

A reação de esterificação foi identificada a partir da análise dos espectros de infravermelho dos filmes (Figura 2), com enfoque na presença de bandas características de éster em 1730 cm^{-1} ($\nu\text{C=O}$) e 1255 cm^{-1} ($\nu\text{O-}$

C) (ERCEG *et al.*, 2020). O perfil de todos os espectros dos filmes se assemelhou ao espectro da HEC (Fig. 2(c)), que é o componente majoritário. Os compósitos OG-HEC(S), secos por 1,5, 2,0 e 2,5 h apresentam bandas iguais, destacando-se uma banda fraca em 1720 cm^{-1} ($\nu\text{C=O}$). No entanto, apesar dessa banda tornar-se mais intensa após 24 h de secagem, a ausência da banda de $\nu\text{O-C}$ indica que não houve a formação do éster, apresentando apenas interações intermoleculares entre os constituintes.

Por outro lado, todos os compósitos com aquecimento (OG-HEC(A)) apresentaram banda em 1260 cm^{-1} ($\nu\text{O-C}$), e, com exceção do filme que passou por 24 h de secagem, tiveram banda em 1728 cm^{-1} ($\nu\text{C=O}$). Logo, entende-se que o excesso de tempo de aquecimento na estufa degradou os grupos ésteres formados nas primeiras horas. Esse resultado contradiz o que foi discutido por Bai e Chen (2017), que sugere a ocorrência de esterificação com secagem por 24 h, usando as mesmas condições reacionais. No entanto, o trabalho não apresentou evidências da reação HEC-OG através de FTIR, apenas indicou a reticulação da HEC com o ácido cítrico. Além disso, também foi perceptível que as bandas em $3000\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$, 2870 cm^{-1} e 1350 cm^{-1} associadas, respectivamente, às vibrações de $\nu\text{O-H}$, νCH_2 e $\delta\text{C-O-H}$, sofreram poucas alterações em todos os compósitos em relação a HEC, coerente com o que foi reportado por Sotolarova *et al.* (2023).

Figura 2. Espectros de FTIR de filmes de OG-HEC reticulados (a) $T = 28,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e (b) $T = 80,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ em diferentes tempos de secagem: $t = 1,5\text{ h}$ (verde), $t = 2,0\text{ h}$ (amarelo), $t = 2,5\text{ h}$ (vermelho) e $t = 24\text{ h}$ (magenta). (c) Espectros de FTIR de HEC (azul), OG (preto) e AC (amarelo).



Fonte: Autores (2026).

5 Conclusão

Os resultados obtidos com os espectros do FTIR auxiliaram na identificação das melhores condições de temperatura e tempo de secagem ao longo da reação de reticulação entre OG-HEC. As amostras OG-HEC(A) com tempos de secagem iguais ou inferiores a 2,5 h apresentam claras evidências de esterificação. Portanto, para um melhor entendimento e otimização da síntese, será realizado um planejamento experimental com intuito de avaliar o grau de esterificação e solubilidade dos compósitos em diferentes concentrações de ácido cítrico, temperaturas, tempo reacional e de secagem.

6 Referências

- BAI, Yongkang; CHEN, Xin. A fast water-induced shape memory polymer based on hydroxyethyl cellulose/graphene oxide composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 103, p. 9-16, 2017.
- DAS, Aritra; UPPALURI, Ramagopal; DAS, Chandan. Feasibility of poly-vinyl alcohol/starch/glycerol/citric acid composite films for wound dressing applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 131, p. 998-1007, 2019.
- ERCEG, Tamara *et al.* Investigation the correlation between chemical structure and swelling, thermal and flocculation properties of carboxymethylcellulose hydrogels. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 138, n. 10, 50240, 2020.
- HUMMERS, William S.; OFFEMAN, Richard E. Preparation of graphitic oxide. **Journal of the American Chemical Society**, v. 80, n. 6, p. 1339, 1958.
- PANDELI, Andreea M. *et al.* Synthesis, characterization, and *in vitro* studies of graphene oxide/chitosan–polyvinyl alcohol films. **Carbohydrate polymers**, v. 102, p. 813-820, 2014.
- SOTOLOROVA, Jitka *et al.* Hydroxyethyl Cellulose-Based Hydrogel Filled with Different Types of Graphene Oxide - Electrochemical Properties and Application for Metal Sensing, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4467347>

NITRETO DE CARBONO GRAFÍTICO ASSOCIADO A NANOPARTÍCULAS PLASMÔNICAS DE PRATA E COBRE

Emanuel Pereira de Queiroz: Mestre, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Tiago Melo Freire: Doutor, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Pierre Basílio Almeida Fechine: Doutor., Universidade Federal do Ceará (UFC).

Resumo: O nitreto de carbono grafítico ($g-C_3N_4$) é um material semicondutor, mas sua eficiência fotocatalítica é limitada pela alta recombinação das cargas fotogeradas e baixa área superficial. Este trabalho visou sintetizar e caracterizar nanocompósitos de $g-C_3N_4$ com nanopartículas monometálicas (Ag, Cu) e bimetalicas (Ag_2Cu , $AgCu$, $AgCu_2$) visando melhorar suas propriedades ópticas e estruturais. O $g-C_3N_4$ foi obtido por termopolimerização da ureia, e os nanocompósitos por redução via oleilamina/ácido oleico. A caracterização foi realizada por DRX, FTIR, XPS, UV-Vis/DRS, fluorescência, MEV/EDS e HR-TEM. Os resultados confirmaram a formação de materiais com band-gap 2,60-2,83 eV. As análises de fluorescência indicaram forte supressão da recombinação eletrônica, especialmente com cobre. Imagens de TEM revelaram nanofolhas de $g-C_3N_4$ e aglomerados de Ag (9–94 nm), enquanto o Cu sugeriu formação de single-atoms. Conclui-se que a deposição de nanopartículas metálicas melhora significativamente as propriedades ópticas e reduz a recombinação de cargas, indicando potencial para aplicações fotocatalíticas.

Palavras-chave: $g-C_3N_4$; nanopartículas bimetalicas; fotocatalise; band-gap; ressonância plasmônica.

1 Introdução

O uso de semicondutores em processos fotocatalíticos tem ganhado destaque desde os trabalhos pioneiros de Fujishima e Honda (1972) com TiO_2 . No entanto, muitos semicondutores apresentam band-gap elevado, limitando o aproveitamento da luz visível. Nesse contexto, o nitreto de carbono grafítico ($g-C_3N_4$) surge como uma alternativa promissora devido à sua estabilidade química, síntese a partir de precursores abundantes (C e N) e capacidade de absorção na região visível do espectro (band-gap entre 2,7–3,0 eV) (HIMANSHI *et al.*, 2026; THACHARAKKAL *et al.*, 2026).

Apesar dessas vantagens, o $g-C_3N_4$ puro apresenta alta taxa de recombinação do par elétron-vacância (e^-/h^+) e baixa área superficial, limitando sua eficiência fotocatalítica. Uma estratégia eficaz para contornar essas limitações é a deposição de nanopartículas metálicas (como Ag e Cu) sobre sua superfície, formando heterojunções que promovem a separação das cargas fotogeradas e aumentam a absorção de luz via ressonância plasmônica de superfície (SPR) (KUMAR *et al.*, 2023).

Além das nanopartículas monometálicas, ligas bimetalicas Ag-Cu podem apresentar efeito sinérgico, melhorando ainda mais a captura de luz e a transferência de elétrons (MUHAMMED & MOKKATH, 2026; BABU *et al.*, 2022). Diante disso, este trabalho objetivou sintetizar e caracterizar nanocompósitos de $g-C_3N_4$ com Ag, Cu e ligas Ag_xCu_{1-x} , avaliando suas propriedades estruturais, ópticas e morfológicas.

2 Objetivo

Sintetizar, caracterizar e avaliar as propriedades estruturais, ópticas e morfológicas do nitreto de carbono grafitico ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) associado a nanopartículas monometálicas (Ag, Cu) e bimetalicas (Ag_2Cu , AgCu , AgCu_2), visando aplicações em remediação ambiental.

3 Metodologia

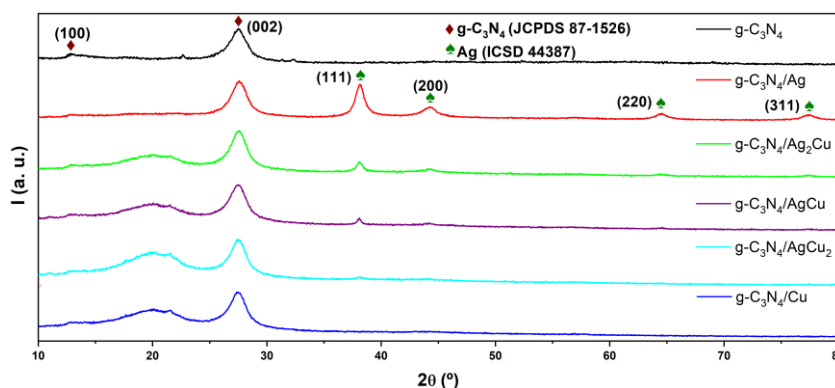
O $\text{g-C}_3\text{N}_4$ foi sintetizado por termopolimerização da ureia (6 g) em mufla a 550°C por 180 min (taxa de $5^\circ\text{C}/\text{min}$). Os nanocompósitos foram preparados pelo método de redução via oleilamina/ácido oleico (9:1). Para o $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{Ag}$, adicionou-se 461 mg de $\text{g-C}_3\text{N}_4$, 9 mL de oleilamina, 1 mL de ácido oleico e 46 mg de AgNO_3 , aquecendo a 140°C por 60 min e depois a 250°C por mais 60 min, sob fluxo de N_2 . O mesmo procedimento foi adotado para $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{Cu}$ (314 mg de $\text{g-C}_3\text{N}_4$ e 31,9 mg de acetato de cobre) e para as ligas bimetalicas (Ag_2Cu , AgCu , AgCu_2), com proporções estequiométricas adequadas. Após a síntese, as amostras foram centrifugadas, lavadas com etanol/clorofórmio (1:1) e secas.

As caracterizações incluíram: DRX (Bruker D8 Advance), FTIR (Shimadzu IRTracer-100), XPS (ThermoFisher K-alpha+), UV-Vis DRS (Shimadzu UV-2600), fotoluminescência (Shimadzu RF-6000), MEV/EDS (Quanta 450 FEG) e HR-TEM.

4 Resultados e Discussão

Os difratogramas de DRX (Figura 1) confirmaram a formação do $\text{g-C}_3\text{N}_4$ com picos em $13,10^\circ$ (100) e $27,48^\circ$ (p002). Nos compósitos com Ag, surgiram picos característicos da fase cúbica da prata ($37,9^\circ$, $44,1^\circ$, $64,5^\circ$ e $77,8^\circ$), que diminuíram de intensidade com a redução da proporção de Ag. Nas amostras contendo Cu, observou-se um largo pico amorfo entre 16° – 23° , atribuído à formação de nanofolhas ultrafinas desordenadas. Não foram observados picos cristalinos do cobre, sugerindo que ele pode estar na forma de single-atoms ou aglomerados muito pequenos.

Figura 1 – Difratogramas de raios-X das amostras sintetizadas.



Fonte: Autores (2026).

Os espectros de FTIR revelaram bandas características do g-C₃N₄ (809 cm⁻¹ referente à triazina; bandas entre 1200–1700 cm⁻¹ relativas a ligações C-N). Nos compósitos, observaram-se bandas adicionais em 2922 e 2929 cm⁻¹ (estiramento C-H), atribuídas à oleilamina residual. As análises de XPS confirmaram a presença de C, N, O, Ag e/ou Cu nas amostras. Os espectros de C1s e N1s apresentaram deslocamentos para menores energias de ligação após a deposição dos metais, indicando aumento da densidade eletrônica no g-C₃N₄ devido à transferência de carga dos metais para o anel.

As medidas de UV-Vis DRS mostraram que o g-C₃N₄ puro possui banda de absorção entre 300–400 nm. Com a adição das nanopartículas, houve deslocamento para regiões de maior comprimento de onda (alargamento até ~580 nm), mais pronunciado para as amostras com Cu e para a liga AgCu. O band-gap calculado pelo método de Tauc foi: g-C₃N₄ (2,83 eV), g-C₃N₄/Ag (2,72 eV), g-C₃N₄/Cu (2,61 eV), g-C₃N₄/Ag₂Cu (2,76 eV), g-C₃N₄/AgCu (2,60 eV) e g-C₃N₄/AgCu₂ (2,65 eV). A redução mais acentuada no g-C₃N₄/AgCu evidencia o efeito sinérgico entre Ag e Cu.

As medidas de fotoluminescência (excitação em 320 nm) mostraram um forte pico de emissão em ~460 nm para o g-C₃N₄ puro, indicando alta recombinação e⁻/h⁺. Nos compósitos, houve supressão significativa desse pico, sendo mais intensa no g-C₃N₄/Cu e no g-C₃N₄/AgCu₂. Isso confirma que as nanopartículas metálicas atuam como capturadoras de elétrons, reduzindo a recombinação e aumentando a vida útil das cargas fotogeradas.

As imagens de MEV/EDS mostraram nanofolhas de g-C₃N₄ com deposição uniforme das nanopartículas metálicas, exceto para a amostra com Ag pura, que apresentou alguns aglomerados. O mapeamento EDS confirmou a presença e distribuição dos metais. As imagens de HR-TEM revelaram aglomerados de Ag com tamanhos variando entre 9,6 nm e 94,3 nm, que diminuíram com a redução da proporção de Ag. Para as amostras com Cu, não foram observados aglomerados visíveis, corroborando a hipótese de formação de single-atoms de cobre coordenados às cavidades da heptazina.

Os nanocompósitos de g-C₃N₄ com Ag, Cu e ligas bimetálicas foram sintetizados com sucesso. As caracterizações confirmaram a preservação da estrutura do g-C₃N₄ e a efetiva deposição das nanopartículas metálicas. A adição dos metais reduziu o band-gap de 2,83 eV para até 2,60 eV (g-C₃N₄/AgCu), deslocando a absorção para a região visível. Além disso, houve forte supressão da recombinação eletrônica, especialmente nas amostras contendo cobre. Os resultados indicam que os compósitos, em especial o g-C₃N₄/AgCu e g-C₃N₄/AgCu₂, apresentam propriedades ópticas e eletrônicas superiores ao material puro, sendo candidatos promissores para aplicações em fotocatalise e remediação ambiental. Estudos futuros devem avaliar a atividade fotocatalítica desses materiais na degradação de poluentes orgânicos.

6 Referências

BABU, P. et al. Prominence of Cu in a plasmonic Cu-Ag alloy decorated SiO₂@S-doped C₃N₄ core-shell nanostructured photocatalyst. *Nanoscale Advances*, v. 4, p. 150-162, 2022.

HIMANSHI *et al.* Next-generation g-C₃N₄ Photocatalysts for hydrogen evolution: Synergistic roles of doping, surface Engineering and heterojunctions. **Materials Science and Engineering: B**, v. 329, p. 119396, 1 jul. 2026.

KUMAR, AJAY *et al.* Frontier nanoarchitectonics of graphitic carbon nitride based plasmonic photocatalysts and photoelectrocatalysts for energy, environment and organic reactions. **Materials Chemistry Frontiers**, v. 7, n. 7, p. 1197–1247, 27 mar. 2023.

MUHAMMED, M. M.; MOKKATH, J. H. Dopant-rich surface alloying effects on photoexcited carrier pathways in Cu nanoclusters with adsorbed CH₄ and CO₂. **Nanoscale**, 2026.

THACHARAKKAL, D. *et al.* Band gap engineered, dendritic g-C₃N₄–carbon interfaces for kinetically enhanced sunlight-driven H₂ production. **Carbon**, v. 247, p. 121046, 1 fev. 2026.

NANOMATERIAIS APLICADOS NA AGROINDÚSTRIA E O ENFRENTAMENTO DA FOME: ENTRE A INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E A JUSTIÇA SOCIAL A PARTIR DA EXPERIÊNCIA DA REDE DE COZINHAS COMUNITÁRIAS DO GRANDE BOM JARDIM

Luciana Ribeiro Moura: Doutoranda, Universidade Estadual do Ceará (UECE).

Eduardo Gomes Machado: Doutor, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB).

Alba Maria Pinho de Carvalho: Doutora, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Janaína Sobreira Rocha: Doutora, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nuteq) (Orientadora).

Resumo: Este artigo analisa o potencial dos nanomateriais aplicados na agroindústria no enfrentamento da fome, articulando inovação tecnológica e justiça social a partir da experiência empírica da Rede de Cozinhas Comunitárias do Grande Bom Jardim (Fortaleza/CE). Parte-se da compreensão da fome como fenômeno estrutural, conforme formulado por Josué de Castro, e como privação de capacidades, segundo Amartya Sen. A metodologia baseia-se em revisão bibliográfica interdisciplinar e análise qualitativa de experiências territoriais. Os resultados indicam que, embora os nanomateriais ampliem a eficiência produtiva e a conservação de alimentos, sua efetividade no combate à fome depende da articulação com práticas sociais comunitárias. Conclui-se que a integração entre tecnologia e organização popular é fundamental para a construção de sistemas alimentares mais justos.

Palavras-chave: Nanomateriais; Agroindústria; Fome; Justiça social; Segurança alimentar.

1 Introdução

A fome, longe de ser resultado exclusivo da escassez de alimentos, expressa desigualdades históricas e estruturais. Josué de Castro já denunciava que a fome é produto de relações sociais e econômicas desiguais, enquanto Amartya Sen enfatiza que ela decorre da ausência de acesso e de capacidades.

No contexto contemporâneo, a nanotecnologia surge como uma das principais inovações no campo da agroindústria, oferecendo soluções para conservação, qualidade e produtividade alimentar. Entretanto, essa dimensão tecnológica precisa ser analisada à luz das realidades territoriais, especialmente em contextos periféricos urbanos.

É nesse ponto que a experiência da Rede de Cozinhas Comunitárias do Grande Bom Jardim, em Fortaleza, se torna central. Trata-se de uma tecnologia social viva que atua diretamente no enfrentamento da fome, articulando solidariedade, organização comunitária e incidência política. A partir dessa experiência, torna-se possível tensionar o papel da inovação tecnológica no combate à fome.

2 Objetivo

Analisar a contribuição dos nanomateriais na agroindústria para o enfrentamento da fome, articulando essa dimensão tecnológica com a experiência da Rede de Cozinhas Comunitárias do Grande Bom Jardim, evidenciando os limites e possibilidades dessa integração no campo da justiça social.

3 Metodologia

A pesquisa adota abordagem qualitativa e interdisciplinar, composta por: Revisão bibliográfica sobre nanotecnologia aplicada à agroindústria; Análise teórica da sociologia da fome; Incorporação de evidências empíricas oriundas da atuação da Rede de Cozinhas Comunitárias do Grande Bom Jardim, com base em observações de campo, registros de reuniões e práticas comunitárias.

A análise busca articular dois níveis: 1 - O nível macro, relacionado à inovação tecnológica e 2 - O nível micro-territorial, representado pelas práticas concretas de enfrentamento da fome.

4 Resultados e Discussão

Os resultados revelam uma tensão produtiva entre tecnologia e realidade social, organizada em três dimensões:

4.1 Inovação tecnológica e potencial dos nanomateriais

Os nanomateriais apresentam contribuições relevantes para a agroindústria: Embalagens inteligentes que prolongam a vida útil dos alimentos; Nanoencapsulação de nutrientes, ampliando o valor nutricional; e Sensores de qualidade, que reduzem perdas na cadeia alimentar. Essas inovações podem, em tese, contribuir para reduzir o desperdício e ampliar a disponibilidade de alimentos.

4.2 Limites estruturais: acesso e desigualdade

Entretanto, a realidade observada no Grande Bom Jardim evidencia que o problema da fome não reside apenas na disponibilidade de alimentos, mas no acesso. As cozinhas comunitárias operam em um contexto marcado por: Insegurança alimentar persistente; Baixa renda das famílias e Dependência de políticas públicas e redes de solidariedade.

Nesse cenário, tecnologias avançadas como os nanomateriais não chegam diretamente ao território. Isso reforça a análise de Amartya Sen sobre a centralidade do acesso, e não apenas da produção.

4.3 A Rede de Cozinhas Comunitárias como tecnologia social

A Rede de Cozinhas Comunitárias do Grande Bom Jardim se configura como uma tecnologia social robusta, que: Garante alimentação diária para populações vulneráveis; Articula atores comunitários, Estado e

sociedade civil e Produz inovação social baseada na solidariedade e na autogestão. Diferentemente da nanotecnologia, que opera em escala laboratorial e industrial, a rede atua no cotidiano da fome, enfrentando-a de forma imediata. Contudo, não se trata de oposição entre tecnologias, mas de possível articulação. Por exemplo: Tecnologias de conservação poderiam reduzir perdas nos insumos das cozinhas; Fortificação nutricional poderia qualificar as refeições e Inovações poderiam ser adaptadas às realidades locais, desde que mediadas por políticas públicas.

4.4 Entre tecnologia e justiça social

A principal questão que emerge é que **a tecnologia não é neutra**. Seu impacto depende de: Quem produz; Quem acessa e Como é distribuída.

Sem mediação política, os avanços tecnológicos podem aprofundar desigualdades. Por outro lado, quando articulados a iniciativas como as cozinhas comunitárias, podem potencializar o enfrentamento da fome.

5 Conclusão

Os nanomateriais aplicados na agroindústria representam uma fronteira promissora para a inovação alimentar, com potencial significativo para reduzir perdas e melhorar a qualidade dos alimentos.

Entretanto, a experiência da Rede de Cozinhas Comunitárias do Grande Bom Jardim demonstra que o enfrentamento da fome exige muito mais do que inovação tecnológica. Trata-se de uma questão estrutural, que demanda organização social, políticas públicas e justiça distributiva.

Conclui-se que a integração entre nanotecnologia e tecnologias sociais constitui um caminho potente, desde que orientado por princípios de equidade. A fome não será superada apenas com mais tecnologia, mas com a democratização do acesso aos seus benefícios.

6 Referências

- CASTRO, Josué de. *Geografia da Fome*. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1946.
- DUNCAN, T. V. Applications of nanotechnology in food packaging and food safety. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011.
- FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. *Relatórios sobre Segurança Alimentar Global*. Roma, diversos anos.
- KAUR, P.; MEHTA, S. Nanotechnology in food science: Applications and challenges. *Food Research International*, 2017.
- SEN, Amartya. *Desenvolvimento como Liberdade*. São Paulo: Companhia das Letras, 2000.

NANOTECNOLOGIA NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS: AVANÇOS RECENTES E APLICAÇÕES EMERGENTES

Paula Luciana Rodrigues de Sousa: Doutora, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).
Erilândia Sousa da Silva: Graduada, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).
Christiane Gomes da Silva Gurgel: Graduada, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).
Patrícia Mendes Barroso: Graduada, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).
Rosa Ferreira Araújo de Abreu: Doutora, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).
Antonia Fádria Valentim de Amorim: Doutora, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Resumo: A nanotecnologia tem se consolidado como uma ferramenta inovadora na indústria de alimentos, promovendo avanços em qualidade, segurança e sustentabilidade. Este trabalho tem como objetivo revisar as aplicações recentes da nanotecnologia no setor alimentício. A metodologia consiste em uma revisão bibliográfica qualitativa, com análise de estudos publicados a partir de 2020. Os resultados evidenciam o uso crescente de nanoemulsões, nanocarreadores e nanosensores, além do desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes e materiais sustentáveis. Observa-se também a ampliação das aplicações na incorporação de compostos bioativos e no monitoramento da qualidade dos alimentos. Conclui-se que a nanotecnologia apresenta elevado potencial inovador, embora desafios relacionados à segurança e regulamentação ainda persistam.

Palavras-chave: Nanotecnologia; Nanosensores; Nanoencapsulação; Nanoemulsões.

1 Introdução

A nanotecnologia tem se destacado como uma importante área de inovação na ciência e tecnologia de alimentos, impulsionada pela crescente demanda por produtos mais seguros, funcionais e sustentáveis (KUMAR et al., 2021). A atuação em escala nanométrica possibilita a modificação de propriedades dos materiais, permitindo o desenvolvimento de sistemas com desempenho aprimorado e alinhados às exigências do mercado atual.

Nesse contexto, aplicações recentes incluem nanoestruturas para encapsulação de compostos bioativos, embalagens inteligentes e sensores de alta sensibilidade, que contribuem para o aumento da vida útil e da segurança dos alimentos (PATHAKOTI; MIAO; CHEN, 2020). Além disso, a nanotecnologia apresenta potencial na redução de impactos ambientais, por meio do uso de materiais biodegradáveis e da valorização de resíduos agroindustriais, embora ainda existam desafios relacionados à avaliação de riscos, toxicidade e regulamentação para garantir seu uso seguro (EFSA, 2021).

2 Objetivo

Revisar as principais aplicações recentes da nanotecnologia na indústria de alimentos, destacando avanços, benefícios e desafios associados ao seu uso.

3 Metodologia

Este estudo consiste em uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo e descritivo. Foram selecionados artigos científicos publicados entre 2020 e 2025 em bases de dados como ScienceDirect, Scopus e Web of Science.

Os critérios de inclusão envolveram estudos relacionados às aplicações da nanotecnologia na indústria de alimentos, com ênfase em nanoestruturas, embalagens, sensores e sustentabilidade. Foram priorizados artigos de revisão e pesquisas experimentais com elevado rigor metodológico e relevância científica.

4 Resultados e Discussão

A literatura recente evidencia que a nanotecnologia desempenha papel central na inovação da indústria de alimentos, especialmente no desenvolvimento de sistemas de entrega de compostos bioativos. Nanoemulsões, lipossomas e nanocarreadores apresentam alta eficiência na proteção de substâncias sensíveis e favorecem a liberação controlada, aumentando sua biodisponibilidade e potencial funcional (KUMAR et al., 2021; YADAV et al., 2022; GUPTA et al., 2020; SINGH et al., 2022; LIU et al., 2021).

Além disso, a aplicação de nanoestruturas contribui para a melhoria das propriedades físico-químicas e sensoriais dos alimentos. Essas estruturas atuam como emulsificantes e estabilizantes mais eficientes, promovendo maior estabilidade e permitindo a redução de aditivos sintéticos, o que atende à crescente demanda por produtos com formulações mais naturais (“clean label”) (ZHANG et al., 2021; SANTOS et al., 2023; SINGH et al., 2022).

No campo das embalagens, destacam-se materiais nanoestruturados com propriedades antimicrobianas e embalagens inteligentes com nanosensores capazes de monitorar alterações em tempo real, ampliando a vida útil e a segurança dos alimentos (YADAV et al., 2022; ALI et al., 2022; PATHAKOTI; MIAO; CHEN, 2020; SHARMA et al., 2021). Os nanosensores também se destacam na detecção rápida e sensível de contaminantes, contribuindo para maior confiabilidade e rastreabilidade (KUMAR et al., 2021; EFSA, 2021; RAI et al., 2021).

No âmbito da sustentabilidade, a nanotecnologia tem sido aplicada no desenvolvimento de materiais biodegradáveis, na valorização de resíduos agroindustriais e em revestimentos comestíveis que prolongam a vida útil de alimentos perecíveis (SINGH et al., 2022; KUMAR; DAS, 2023; SANTOS et al., 2023; LIU et al., 2021; ZHANG et al., 2021; ALI et al., 2022). Apesar dos avanços, ainda persistem desafios relacionados à toxicidade, bioacumulação e regulamentação, exigindo maior rigor na avaliação de riscos e padronização normativa (EFSA, 2021; RAI et al., 2021; SHARMA et al., 2021).

5 Conclusão

A nanotecnologia consolida-se como uma abordagem estratégica para a inovação na indústria de alimentos, promovendo melhorias na qualidade, segurança e funcionalidade dos produtos. Avanços recentes evidenciam que sistemas nanoestruturados aumentam a estabilidade e a biodisponibilidade de compostos bioativos, além de aprimorarem características sensoriais e tecnológicas. Destacam-se também as aplicações em

embalagens ativas e inteligentes, que ampliam a vida útil e permitem o monitoramento contínuo da qualidade dos alimentos. No contexto da sustentabilidade, a nanotecnologia contribui para a redução de impactos ambientais e para a valorização de resíduos agroindustriais. Contudo, sua ampla aplicação ainda depende do avanço em estudos de toxicidade, da padronização de métodos de avaliação de risco e do estabelecimento de regulamentações específicas que garantam a segurança do consumidor.

6 Referências

- ALI, A.; MAQBOOL, M.; RAMACHANDRAN, S. Nanotechnology applications in food packaging: recent trends and future prospects. *Food Control*, v. 130, p. 108-120, 2022.
- EFSA. European Food Safety Authority. Guidance on risk assessment of nanomaterials to be applied in the food and feed chain. *EFSA Journal*, v. 19, n. 8, p. 1-36, 2021.
- GUPTA, A.; ERAL, H. B.; HATTON, T. A.; DOYLE, P. S. Nanoemulsions: formation, properties and applications. *Soft Matter*, v. 16, p. 282-299, 2020.
- KUMAR, R.; SINGH, A.; KUMAR, V.; PANDEY, A. Nanotechnology applications in food industry: recent advances and future perspectives. *Food Chemistry*, v. 353, p. 129-142, 2021.
- KUMAR, S.; DAS, M. Sustainable nanomaterials in food packaging: a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 382, p. 135-150, 2023.
- LIU, Y.; WANG, Q.; LI, B. Nano-delivery systems in functional foods: recent advances and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, v. 112, p. 241-251, 2021.
- PATHAKOTI, K.; MIAO, W.; CHEN, L. Nanotechnology in food safety: recent developments and future perspectives. *Journal of Food Safety*, v. 40, n. 4, e12803, 2020.
- RAI, M.; YADAV, A.; GADE, A. Nanotechnology in food safety: detection of contaminants and pathogens. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 61, n. 1, p. 1-15, 2021.
- SANTOS, J. P.; SILVA, R. M.; OLIVEIRA, L. F. Aplicações recentes da nanotecnologia na indústria de alimentos. *Ciência Rural*, v. 53, n. 4, p. 1-12, 2023.
- SHARMA, S.; KUMAR, A.; DHULL, S. B. Smart packaging systems in food industry: an overview. *Trends in Food Science & Technology*, v. 111, p. 548-560, 2021.
- SINGH, T.; SHARMA, S.; KUMAR, M.; KUMAR, R. Advances in nano-enabled food packaging and preservation: a review. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 30, p. 100-120, 2022.
- YADAV, N.; KHAN, S.; MALIK, P.; SHARMA, G. Recent trends in nanotechnology-based food applications and safety concerns. *Trends in Food Science & Technology*, v. 118, p. 1-15, 2022.
- ZHANG, L.; LUO, Y.; WANG, Q. Development of nano-coatings for food preservation: a review. *Food Hydrocolloids*, v. 120, p. 106-115, 2021.

NITRETO DE CARBONO GRAFÍTICO DOPADO (X-g-C₃N₄; X = MG, P E P/MG) COMO NANO FERTILIZANTE PARA MELHORIA DO DESEMPENHO FISIOLÓGICO DO MILHO

Francisco Dheyson de Quadro Carvalho: Mestre, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Pedro Hilton L. Baracho: Graduado, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Claudio José R. de Carvalho: Doutor, Embrapa Agroindústria Tropical.

Pierre B. A. Fechine: Doutor, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Tiago Melo Freire: Doutor, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Resumo: O g-C₃N₄ tem despertado interesse na agricultura por seu potencial em melhorar processos fisiológicos vegetais e aumentar a tolerância das culturas a condições adversas. Nesse contexto, o presente trabalho sintetiza, por meio da termopolimerização, as amostras de g-C₃N₄ dopado com magnésio (Mg-g-C₃N₄) e com fósforo e magnésio (P/Mg-g-C₃N₄), e avalia seus efeitos como fertilizante foliar para a cultura do milho. Os amostras sintetizadas foram caracterizados por FTIR, difração de raios X e microscopia eletrônica de transmissão de alta resolução (HRTEM), e aplicados por meio de uma pulverização foliar às mudas de milho no estágio de quatro folhas. Os resultados confirmaram a incorporação dos dopantes à estrutura do g-C₃N₄ e mostraram aumento do band gap nos materiais modificados. Agronomicamente, os tratamentos promoveram ganhos expressivos no crescimento e no desempenho fisiológico das plantas, com destaque para P/Mg-g-C₃N₄ a 100 mg L⁻¹, que elevou a taxa assimilatória líquida e favoreceu o desenvolvimento radicular. Conclui-se que esses nanomateriais apresentam potencial como nanofertilizantes mais eficientes e sustentáveis para a cultura do milho.

Palavras-chave: *Zea mays* L.; crescimento radicular; produtividade agrícola; sustentabilidade.

1 Introdução

O milho (*Zea mays* L.) destaca-se como uma das culturas agrícolas mais importantes do mundo, devido à sua ampla utilização na alimentação humana e animal, além de sua aplicação na produção de biocombustíveis e outros bioprodutos. No Brasil, essa cultura possui grande relevância econômica e social, sendo cultivada em diferentes regiões e sistemas de produção. Em áreas sujeitas a limitações hídricas e nutricionais, como o semiárido nordestino, a busca por estratégias que promovam maior eficiência fisiológica e melhor aproveitamento dos recursos disponíveis torna-se essencial para a manutenção da produtividade agrícola.

Entre os principais fatores que limitam o desenvolvimento vegetal, destaca-se a disponibilidade de nutrientes e sua absorção pelas plantas. Embora os fertilizantes convencionais tenham contribuído para o aumento da produção agrícola, seu uso excessivo e ineficiente está associado a impactos ambientais, como lixiviação de nutrientes, eutrofização de corpos d'água e degradação do solo (PAUDEL, 2025). Além disso, o aumento dos custos dos fertilizantes minerais reforça a necessidade de alternativas mais eficientes e sustentáveis (AYENNEW et al., 2025).

Nesse contexto, a nanotecnologia tem se consolidado como uma ferramenta promissora para o setor agrícola (AYENEW et al., 2025). Os nanomateriais apresentam propriedades diferenciadas, como elevada área superficial, maior reatividade e capacidade de modulação estrutural, óptica e eletrônica, favorecendo sua aplicação como nanofertilizantes, com potencial para liberação controlada de nutrientes e maior eficiência de absorção pelas plantas (MEHTA et al., 2024).

Dentre esses materiais, o nitreto de carbono grafítico ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) destaca-se por sua estrutura bidimensional, elevada estabilidade térmica e química, baixo custo de síntese e propriedades semicondutoras ajustáveis. Esse material pode atuar tanto como plataforma de transporte de nutrientes quanto como modulador de processos fisiológicos vegetais, em função de suas propriedades ópticas e eletrônica (HAO et al., 2023). Modificações estruturais, como a dopagem com elementos metálicos e não metálicos, têm sido investigadas para aprimorar seu desempenho.

A dopagem do $\text{g-C}_3\text{N}_4$ com magnésio e fósforo representa uma abordagem relevante para aplicações agronômicas, pois esses elementos podem alterar suas propriedades eletrônicas e contribuir diretamente para processos fisiológicos essenciais nas plantas (XU et al., 2024). O magnésio está associado à molécula de clorofila, enquanto o fósforo participa de processos energéticos, crescimento e desenvolvimento vegetal, podendo gerar efeitos sinérgicos no desempenho das culturas.

Considerando a importância do milho e a necessidade de soluções mais sustentáveis para o manejo nutricional, o uso de nanomateriais à base de $\text{g-C}_3\text{N}_4$ surge como uma alternativa promissora (CHRISTIN; OSBORNE, 2014). Assim, este estudo propõe investigar o potencial do nitreto de carbono grafítico enriquecido com magnésio e fósforo como nanofertilizante, avaliando sua influência sobre parâmetros fisiológicos e agronômicos do milho.

2 Objetivo

Avaliar o potencial do nitreto de carbono grafítico incrementado com magnésio e fósforo como nanofertilizante, bem como seus efeitos sobre o desempenho fisiológico e o crescimento de plantas de milho.

3 Metodologia

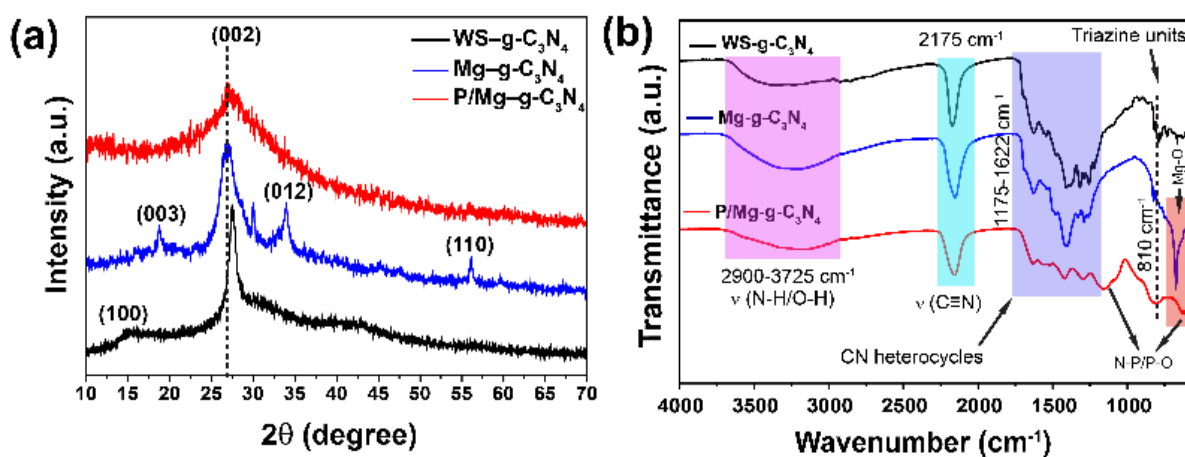
O $\text{g-C}_3\text{N}_4$ foi sintetizado por termopolimerização da melamina em meio salino. Inicialmente, melamina (0,0713 mol), NaCl (0,05 mol) e KCl (0,05 mol) foram dissolvidos em água destilada (0,2 L) a 90 °C sob agitação. Após evaporação do solvente (100–110 °C), o material foi calcinado a 670 °C (2 °C min^{-1}) por 45 min. O sólido obtido foi purificado por diálise (membrana de 1 kDa) por 72 h, seguido de congelamento (-80 °C) e liofilização. Para obtenção dos materiais dopados, MgCl_2 (0,00473 mol) e/ou $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (0,0054 mol) foram adicionados à solução inicial, mantendo-se as mesmas condições experimentais. Os materiais foram caracterizados por FTIR, DRX e espectroscopia eletrônica de transmissão (HRTEM). O ensaio agronômico foi conduzido em casa de vegetação, com aplicação foliar dos nanomateriais (50–200 mg L^{-1}) no estádio V4, utilizando solução contendo 0,3%

(v/v) de Tween 80. As aplicações foram realizadas semanalmente, totalizando três ciclos, sob condições controladas de temperatura, umidade e radiação.

4 Resultados e Discussão

Os resultados de caracterização (Figura 1) confirmaram a formação estrutural do g-C₃N₄ e a incorporação eficiente de Mg e P, evidenciada por modificações nos padrões de DRX e nas bandas vibracionais de FTIR. As imagens de HRTEM revelaram uma morfologia lamelar bem definida, com elevada homogeneidade e dispersão dos nanomateriais.

Figura 1 – (a) Padrões de difração de raios X (DRX) e (b) espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) de WS-g-C₃N₄, Mg-g-C₃N₄ e P/Mg-g-C₃N₄.



Fonte: Autores (2026).

O desempenho agrônomo, os tratamentos promoveram ganhos expressivos nos parâmetros fisiológicos, com destaque para o P/Mg-g-C₃N₄, que aumentou a Taxa de Crescimento Absoluto (AGR) em até 392% e a Taxa de Assimilação Líquida (NAR) em 219%. Adicionalmente, a avaliação visual evidenciou maior vigor e desenvolvimento vegetativo nas plantas tratadas. Esses achados demonstram que a dopagem sinérgica com Mg e P potencializa as propriedades do g-C₃N₄, consolidando seu uso como nanofertilizante altamente eficiente para culturas agrícolas.

5 Conclusão

O g-C₃N₄ dopado com magnésio e fósforo apresenta elevado potencial como nanofertilizante, promovendo melhorias no desempenho fisiológico e no crescimento do milho. A dopagem modifica as propriedades do material e aumenta sua eficiência agrônoma, com destaque para o P/Mg-g-C₃N₄. Os resultados indicam a viabilidade do uso desses nanomateriais como alternativa sustentável na agricultura. Estudos futuros devem avaliar os mecanismos de ação e a aplicação em condições de campo.

6 Referências

AYENNEW, Birara Melku; SATHEESH, Neela; ZEGEYE, Zemenu Birhan; KASSIE, Desalegn Adisu. A review on the production of nanofertilizers and its application in agriculture. *Heliyon*, [S. l.], v. 11, n. 1, p. e41243, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41243>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240584402417274X>.

CHRISTIN, Pascal-Antoine; OSBORNE, Colin P. The evolutionary ecology of C4 plants. *New Phytologist*, [S. l.], v. 204, n. 4, p. 765–781, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.13033>. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/nph.13033>.

HAO, Yi et al. Root Exposure of Graphitic Carbon Nitride (g-C₃N₄) Modulates Metabolite Profile and Endophytic Bacterial Community to Alleviate Cadmium- and Arsenate-Induced Phytotoxicity to Rice (*Oryza sativa* L.). *ACS Nano*, [S. l.], v. 17, n. 20, p. 19724–19739, 2023. DOI: 10.1021/acsnano.3c03066. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c03066>.

MEHTA, Shabnam; THAKUR, Anjali; KURBAH, Ibajanai; CHAUHAN, Neha; THAKUR, Rimpika. Nanotechnology in plant nutrition: Ensuring sustainable agriculture through nanofertilizers. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, [S. l.], v. 187, n. 5, p. 589–603, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.202300288>. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jpln.202300288>.

PAUDEL, Jayash. Fertile grounds: Navigating the environmental impact of fertilizer consumption. *European Review of Agricultural Economics*, [S. l.], v. 52, n. 4, p. 617–643, 2025. DOI: 10.1093/erae/jbaf033. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/erae/jbaf033>.

XU, Kai et al. Soil application of graphitic carbon nitride nanosheets alleviate cadmium toxicity by altering subcellular distribution, chemical forms of cadmium and improving nitrogen availability in soybean (*Glycine max* L.). *Journal of Environmental Management*, [S. l.], v. 368, p. 122204, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122204>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147972402190X>.

DESENVOLVIMENTO DE NANOEMULSÃO À BASE DE ÓLEO DE SOJA E SUA CARACTERIZAÇÃO PARA APLICAÇÃO NO CONTROLE DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA

Mabelle Lima Paiva: Graduanda, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Juliana Sales Osterno Leitão: Doutoranda, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Lillian Maria Uchôa Dutra Fechine: Doutora, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Pierre Basílio Almeida Fechine: Doutor, Universidade Federal do Ceará (UFC) (Orientador).

Guilherme Julião Zocolo: Doutor, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa).

Resumo: A ferrugem asiática, causada por *Phakopsora pachyrhizi*, é uma das principais doenças da soja, gerando grandes prejuízos econômicos e dificuldades de controle devido à resistência aos fungicidas convencionais. Neste contexto, nanoemulsões surgem como alternativas promissoras por favorecerem maior eficiência, liberação controlada de compostos ativos e menor impacto ambiental. Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma nanoemulsão estável com ingredientes naturais e óleos essenciais para aplicação em cultivos de soja. Foram avaliadas 11 formulações obtidas por planejamento experimental, variando-se as proporções das fases oleosa e aquosa, com lecitina de soja como emulsificante. As emulsões foram produzidas por irradiação ultrassônica e caracterizadas por espalhamento dinâmico de luz. A formulação 3 apresentou os melhores resultados, com índice de polidispersividade (PDI) de 0,270 e tamanho médio de partícula de 241,4 nm, além de estabilidade em ampla faixa de pH. Esses resultados indicam potencial de aplicação no manejo sustentável da ferrugem asiática.

Palavras-chave: Nanoemulsão; Agricultura; Fitopatógenos; Óleos essenciais; Formulação.

1 Introdução

A ferrugem asiática, causada por *Phakopsora pachyrhizi*, é uma doença foliar de grande impacto econômico na soja, devido à dificuldade de controle e às perdas significativas de produtividade, especialmente em lavouras com manejo inadequado (HOSSAIN et al., 2024). Nesse contexto, os nanomateriais se destacam por reduzirem a quantidade de ingredientes ativos necessária, favorecerem a liberação controlada, aumentarem a eficácia e a durabilidade dos compostos e diminuir os impactos ambientais (COELHO, 2020). Entre essas estratégias, as nanoemulsões surgem como alternativas sustentáveis e promissoras (BAMISAYE et al., 2023), sobretudo quando associadas a ingredientes ativos naturais, como óleos essenciais, que podem ter sua eficácia e segurança ampliadas pelo uso da nanotecnologia.

2 Objetivo

Desenvolver uma nanoemulsão estável, formulada com ingredientes naturais e óleos essenciais como bioativos para aplicação em cultivos de soja como estratégia mais sustentável para manejo da ferrugem asiática.

3 Metodologia

Foram testadas 11 formulações geradas por planejamento experimental no software *Statistica*, variando-se as proporções entre as fases oleosa composta por óleo de soja, e aquosa, com a lecitina de soja, utilizada como emulsificante (KLANG; VALENTA, 2011).

Para preparo da emulsão dissolveu-se a lecitina de soja em água. Em seguida, adicionou-se o óleo de soja gota a gota e levou-se para agitação magnética em cerca de 400 rpm sob 25°C durante 5 minutos. Submeteu-se as emulsões a irradiação ultrassônica, pelo tempo 3 minutos, pulso 2 on 1 off, em temperatura de 20°C, em amplitude de 90% (DAMMAK; SOBRAL, 2018). Assim formou-se as emulsões que foram caracterizadas quanto ao tamanho e distribuição de partículas pela técnica de Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS).

A partir da identificação da formulação ótima, foram realizadas análises de estabilidade em pHs de 2 a 10, obtidos por meio de incrementos de soluções de hidróxido de sódio (NaOH) e ácido clorídrico (HCl) 0,1M e 0,01M. Da mesma forma, após a modificação do pH a emulsão foi caracterizada pela técnica de DLS.

4 Resultados e Discussão

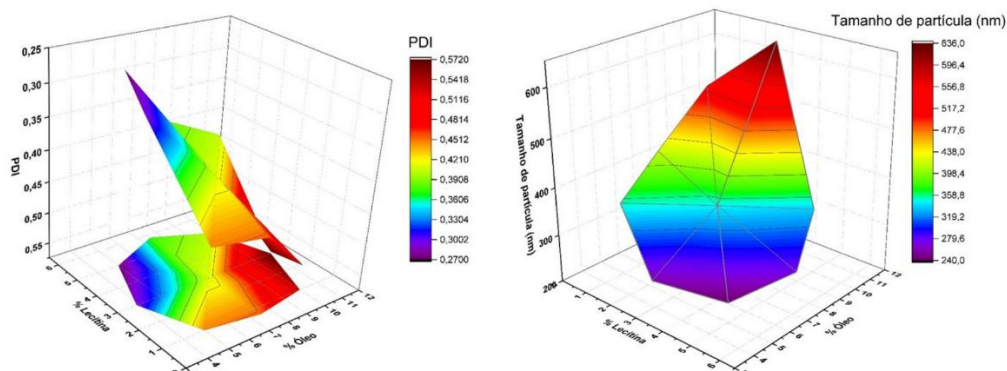
A partir dos dados da caracterização, utilizando o software *Origin*, construiu-se estes gráficos que correspondem às curvas de superfície de resposta. Na figura 1 (a), observa-se o comportamento do PDI em função das proporções de lecitina de soja e óleo de soja na formulação. Já na figura 1 (b), observa-se o comportamento do tamanho de partícula em função das mesmas variáveis.

De forma geral, os gráficos mostram que o sistema é sensível à combinação dos ingredientes. O aumento da lecitina de soja melhora a organização interfacial, reduz o tamanho de partícula e torna a distribuição de tamanhos mais uniforme até determinado limite. Em contrapartida, teores mais elevados de óleo sobrecarregam o sistema, pois ampliam a quantidade de fase dispersa a ser fragmentada sob a mesma energia de emulsificação. Assim, o efeito do óleo sobre o tamanho e a distribuição das partículas depende do teor de lecitina, e vice-versa. Pequenas variações nesses dois componentes podem elevar abruptamente o PDI e favorecer a formação de partículas maiores, caracterizando uma faixa de formulação crítica e indesejável para sistemas mais estáveis.

Figura 1 – Curvas de superfície de resposta

(a) - Curva de superfície de resposta do Pdl x % Lecitina x % Óleo de soja

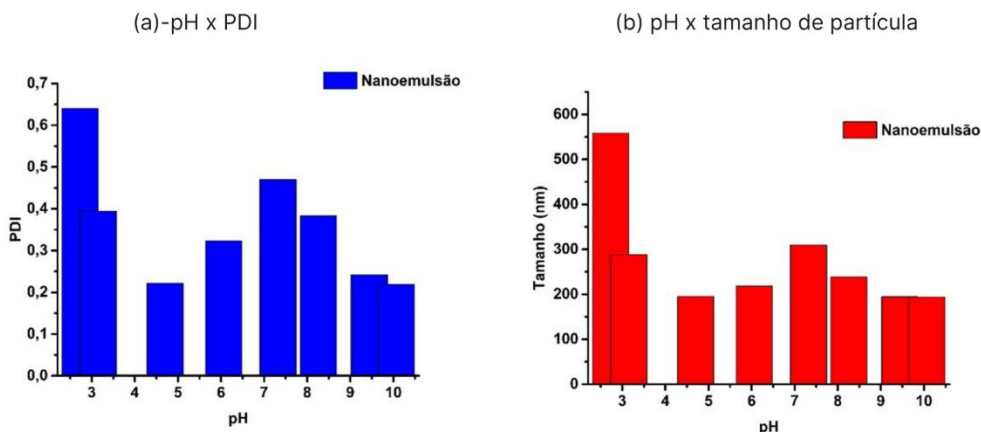
(b) - Curva de superfície de resposta do tamanho de partícula x % Lecitina x % Óleo de soja



Fonte: Autores (2026).

De acordo com as curvas de superfície resposta, a formulação 3 apresentou Pdl de 0,270 e tamanho médio de partícula de 241,4 nm, indicando estabilidade coloidal apropriada, com partículas em escala nanométrica e moderadamente polidispersas.

Figura 2 – Nanoemulsão 3 em diferentes pHs



Fonte: Autores (2026).

A figura 2 (a) exibe um gráfico em que cada barra representa o Pdl verificado da formulação 3, ajustada para um valor de pH específico. Observa-se que o Pdl é dependente do pH, em pH mais ácido e em pH neutro a nanoemulsão apresentou-se como mais polidispersa, e menos polidispersa em pH levemente ácido e em pH básico. A figura 2 (b) exibe um gráfico que representa o tamanho médio de partícula da nanoemulsão em função do pH. Observa-se que em pH muito ácido e em pH neutro a nanoemulsão apresenta tamanho maior de partícula, sugerindo reorganização menos eficiente da interface. Já em pH levemente ácido e básico apresenta tamanho de partícula menor.

5 Conclusão

Os resultados indicam que as formulações com teores intermediários de lecitina de soja e baixos a moderados de óleo de soja tendem a apresentar maior estabilidade, com menor tamanho de partícula e distribuição mais uniforme. A formulação também demonstrou estabilidade coloidal em pH levemente ácido e básico, mostrando potencial de aplicação em diferentes condições de cultivo. Assim, a nanoemulsão à base de óleo de soja se apresenta como uma alternativa promissora para o manejo da ferrugem asiática em sistemas agrícolas que conciliem produtividade e sustentabilidade. Em etapas subsequentes, a formulação será avaliada quanto à eficiência de encapsulamento e atividade antifúngica.

6 Referências

BAMISAYE, Abayomi; ADEGOKE, Kayode Adesina; ALLI, Yakubu Adekunle; BAMIDELE, Muyideen Olaitan; IDOWU, Mopelola Abidemi; OGUNJINMI, Oluwasayo Esther. **Recent advances in nanoemulsion for sustainable development of farm-to-fork systems**. Journal of Cleaner Production, v. 429, 2023, art. 139226. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139226.

COELHO, Marlene de Barros. **Técnicas nanotecnológicas para a agricultura e pecuária**: um enfoque em controle de pragas e doenças, nutrição e saúde animal. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2020. 50 p. (Documentos / Embrapa Gado de Corte, 273).

DAMMAK, Ilyes; SOBRAL, Paulo José do Amaral. **Formulation optimization of lecithin-enhanced Pickering emulsions stabilized by chitosan nanoparticles for hesperidin encapsulation**. Journal of Food Engineering, [S.l.], v. 229, p. 2-11, 2018. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2017.11.001.

HOSSAIN, M. M.; SULTANA, F.; YESMIN, L.; RUBAYET, M. T.; ABDULLAH, H. M.; SIDDIQUE, S. S.; BHUIYAN, M. A. B.; YAMANAKA, N. **Understanding Phakopsora pachyrhizi in soybean**: comprehensive insights, threats, and interventions from the Asian perspective. Frontiers in Microbiology, Lausanne, v. 14, e1304205, 2024. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1304205.

KLANG, V.; VALENTA, C. **Lecithin-based nanoemulsions**. Journal of Drug Delivery Science and Technology, v. 21, n. 1, p. 55-76, 2011.

POLARITONS DE SUPERFÍCIE HIPERBÓLICOS EM SUPERREDES DE VAN DER WAALS DE DICALCOGENETOS DE METAIS DE TRANSIÇÃO

Michel R. Andrade: Doutorando em Física, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Pedro L. M. S. Silva: Discente, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Diego R. da Costa: Doutor em Física, Professor, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Andrey J. Chaves: Doutor em Física, Professor, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) (Orientador).

Resumo: Investigamos as propriedades ópticas de superredes de van der Waals compostas por monocamadas de dicalcogenetos de metais de transição (TMDs) — WS_2 , WSe_2 , MoS_2 e $MoSe_2$ — encapsuladas por nitreto de boro hexagonal (hBN). Por meio do método da matriz de transferência para cristais uniaxiais, calcula-se a função perda e identificam-se polaritons éxciton-fotônicos de superfície nas polarizações transversal elétrica (TE) e transversal magnética (TM). Os componentes dentro e fora do plano do tensor dielétrico apresentam sinais opostos próximo à ressonância excitônica, caracterizando comportamento hiperbólico. Os modos TM exibem forte confinamento, com compressão de comprimento de onda da ordem de centenas de vezes, enquanto os modos TE alcançam fatores de qualidade superiores a 10^4 . Os resultados apontam as superredes TMD/hBN como plataforma versátil para nanofotônica do visível ao infravermelho próximo.

Palavras-chave: Polaritons de superfície; Dicalcogenetos de metais de transição; Nitreto de boro hexagonal; Materiais hiperbólicos; Heteroestruturas de van der Waals.

1 Introdução

Polaritons em materiais bidimensionais combinam baixas perdas, alta sintonizabilidade e forte acoplamento luz-matéria, viabilizando dispositivos nanofotônicos avançados (LOW et al., 2017; BASOV; FOGLER; GARCÍA DE ABAJO, 2016). Os polaritons éxciton-fotônicos em dicalcogenetos de metais de transição (TMDs) destacam-se por grandes energias de ligação e elevadas forças de oscilador (CHERNIKOV et al., 2014); as monocamadas WS_2 , WSe_2 , MoS_2 e $MoSe_2$ apresentam gap direto entre 1,55 e 2,01 eV (MAK et al., 2010). O nitreto de boro hexagonal (hBN) é o substrato padrão para encapsulamento, preservando o gap direto e suportando polaritons fônicos hiperbólicos (CALDWELL et al., 2019). Neste trabalho, investigamos teoricamente superredes TMD/hBN, identificando regimes de hiperbolicidade e confinamento extremos.

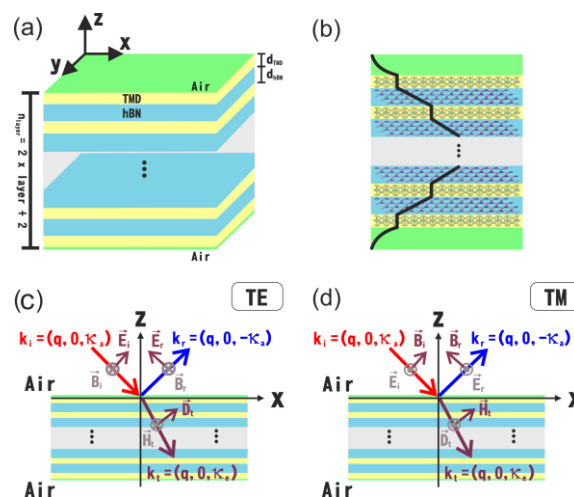
2 Objetivo

Caracterizar, por meio do método da matriz de transferência para cristais uniaxiais, as relações de dispersão, o confinamento de campo, os fatores de qualidade e a densidade local de estados ópticos dos polaritons éxciton-fotônicos de superfície em superredes TMD/hBN, comparando sistematicamente quatro materiais (WS_2 , WSe_2 , MoS_2 e $MoSe_2$) nas polarizações TE e TM.

3 Metodologia

A resposta óptica das monocamadas TMD próxima à ressonância do éxciton A foi descrita por uma função dielétrica lorentziana $\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + f / (\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)$, com parâmetros extraídos de dados experimentais de refletância (LI et al., 2014). O hBN foi tratado como meio isotrópico com $n = 2,2$ e as regiões de ar com $\epsilon = 1$. As superredes Ar/TMD/hBN/TMD/.../Ar, com N células contendo $2N+1$ interfaces, foram resolvidas por matriz de transferência considerando cristais uniaxiais com eixo óptico perpendicular às camadas, de modo que os modos TE e TM se desacoplam. A geometria considerada está esquematizada na Figura 1. A função perda $\mathcal{Z}(q, \omega) = -\text{Im}\{r(q, \omega)\}$ foi computada a partir do coeficiente de reflexão; seus máximos indicam os modos polaritônicos de superfície. Foram analisados perfis de campo, fator de qualidade $Q = \omega_0/\gamma$, densidade local de estados (LDOS) e coeficientes de Hopfield, com implementações numéricas em Python.

Figura 1 – Esquema da superrede TMD/hBN: (a) vista 3D do empilhamento Ar/TMD/hBN/.../Ar; (b) corte 2D ilustrando a propagação dos polaritons; (c)–(d) configurações de campo para os modos TE e TM.

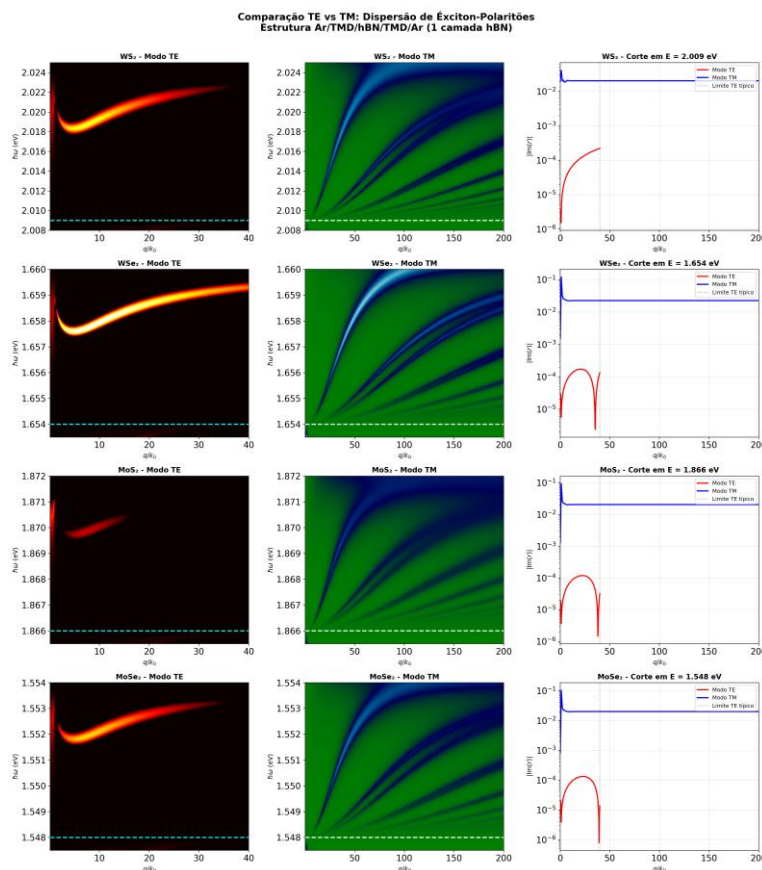


Fonte: Autores (2026).

4 Resultados e Discussão

A Figura 2 compara a dispersão dos polaritons éxciton-fotônicos nos modos TE e TM para os quatro TMDs ($\gamma = 2$ meV, uma camada espaçadora de hBN). A coluna esquerda exibe a função perda do modo TE, com o anti-cruzamento característico próximo à ressonância excitônica e ramos inferior e superior aproximando-se assintoticamente da linha do éxciton e do cone de luz. A coluna central revela a estrutura mais rica do modo TM, com múltiplos ramos estendendo-se a momentos elevados ($q/k_0 > 200$) — assinatura de comportamento hiperbólico decorrente da inversão de sinal entre $\epsilon_{\perp}$ e $\epsilon_{\parallel}$ próximo à ressonância excitônica. Os cortes em energia (coluna direita) demonstram que os modos TM concentram peso espectral em momentos muito maiores que os modos TE.

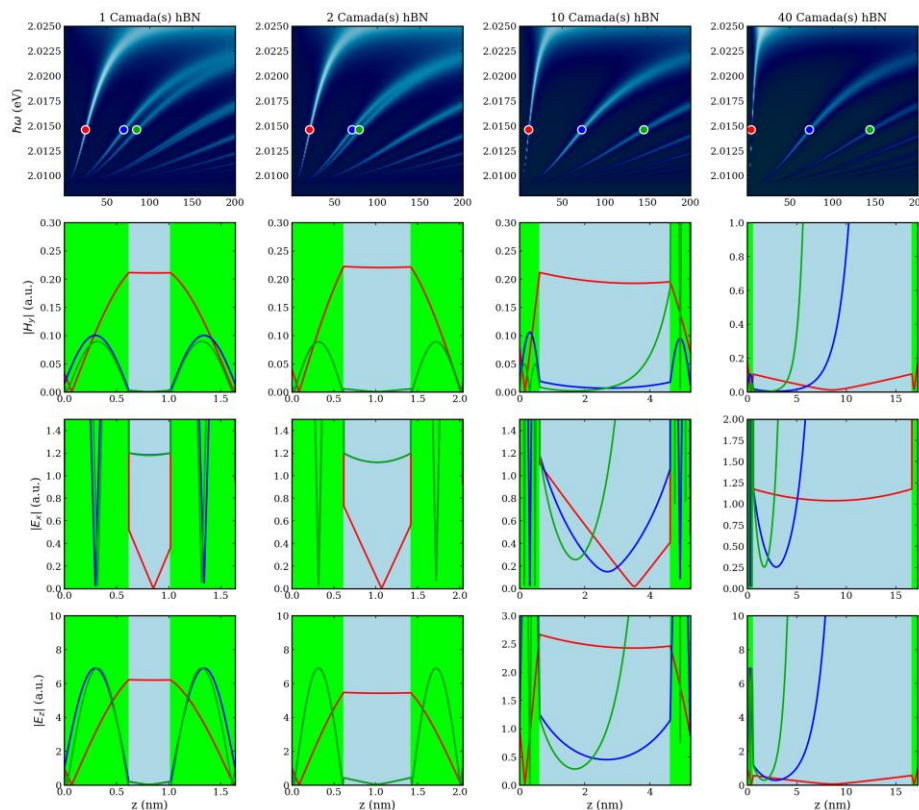
Figura 2 – Comparação da dispersão dos polaritons éxciton-fotônicos para os modos TE (esquerda) e TM (centro) nos quatro TMDs; cortes na energia do éxciton (direita) comparam o peso espectral dos modos TE (azul) e TM (vermelho). $\gamma = 2$ meV; uma camada espaçadora de hBN.



Fonte: Autores (2026).

A Figura 3 apresenta a evolução do campo eletromagnético TM em superredes WS_2/hBN com 1, 2, 10 e 40 camadas espaçadoras. Com o aumento de N , a energia eletromagnética torna-se progressivamente confinada no interior da heteroestrutura e, para $N = 40$, a estrutura comporta-se como meio hiperbólico, com campos oscilatórios no interior e decaimento exponencial nas regiões de ar. A compressão máxima de comprimento de onda λ_o/λ_{eff} supera 700 em WSe_2 e $MoSe_2$, os modos TE em WS_2/hBN atingem $Q > 10^4$, e coeficientes de Hopfield próximos a 0,5 na ressonância confirmam o regime de acoplamento forte.

Figura 3 – Evolução da distribuição do campo eletromagnético com o número de camadas espaçadoras de hBN para a polarização TM em superredes WS₂/hBN. Linha superior: mapas da função perda; linhas seguintes: perfis



de $|H_y|$, $|E_x|$ e $|E_z|$.

Fonte: Autores (2026).

5 Conclusão

Superredes TMD/hBN constituem plataforma versátil para nanofotônica no visível e infravermelho próximo: os modos TM oferecem confinamento extremo ($\lambda_{\text{eff}} < 1$ nm) graças ao caráter hiperbólico da resposta dielétrica, enquanto os modos TE alcançam fatores de qualidade compatíveis com aplicações de longa coerência polaritônica. A metodologia é extensível a outras heteroestruturas de van der Waals (grafeno, fosforeno negro, éxcitons de moiré), abrindo perspectivas para nanofotônica integrada em materiais 2D.

6 Referências

- BASOV, D. N.; FOGLER, M. M.; GARCÍA DE ABAJO, F. J. Polaritons in van der Waals materials. *Science*, v. 354, n. 6309, 2016.
- CALDWELL, J. D. et al. Photonics with hexagonal boron nitride. *Nature Reviews Materials*, v. 4, p. 552-567, 2019.
- CHERNIKOV, A. et al. Exciton binding energy and nonhydrogenic Rydberg series in monolayer WS₂. *Physical Review Letters*, v. 113, p. 076802, 2014.
- LI, Y. et al. Measurement of the optical dielectric function of monolayer transition-metal dichalcogenides. *Physical Review B*, v. 90, n. 20, p. 205422, 2014.
- LOW, T. et al. Polaritons in layered two-dimensional materials. *Nature Materials*, v. 16, n. 2, p. 182-194, 2017.

MAK, K. F. et al. Atomically thin MoS₂: a new direct-gap semiconductor. Physical Review Letters, v. 105, n. 13, p. 136805, 2010.