

Teonis Batista da Silva
Jenilton Gomes da Cunha
(Orgs.)

INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E SUSTENTABILIDADE

O FUTURO DA AGRICULTURA



científica digital



CIENTÍFICA DIGITAL EDITORIAL LTDA

Barueri - São Paulo - Brasil
www.cientificadigital.org - contato@cientificadigital.org

Diagramação e Arte Edição © 2026 Científica Digital
Diego Santos Texto © 2026 Os Autores
Diogo Lima 1ª Edição - 2026
Imagens da Capa Acesso Livre - Open Access
Adobe Stock - 2026

© COPYRIGHT - TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. A editora detém os direitos autorais sobre a edição e o projeto gráfico, enquanto os autores mantêm os direitos autorais de seus respectivos textos. Esta obra está licenciada sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional, permitindo o download e compartilhamento integral ou parcial, desde que a fonte seja devidamente citada e os créditos atribuídos aos autores. É obrigatório que a obra permaneça em formato de Acesso Livre (Open Access), sem qualquer alteração. A catalogação em plataformas de acesso restrito ou com fins comerciais é estritamente proibida.



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

1946 Inovações tecnológicas e sustentabilidade: o futuro da agricultura/ Organização de Teonis Batista da Silva, Jenilton Gomes da Cunha. – Barueri-SP: Científica Digital, 2026.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui Bibliografia
ISBN 978-65-6155-019-2
DOI 10.37885/978-65-6155-019-2

1. Agronomia. I. Silva, Teonis Batista da (Organizador). II. Cunha, Jenilton Gomes da (Organizador). III. Título.

CDD 630

Elaborado por Janaína Ramos – CRB-8/9166

Índice para catálogo sistemático:

I. Agronomia

E-BOOK

ACESSO LIVRE ON LINE - IMPRESSÃO PROIBIDA

2026

Teonis Batista da Silva
Jenilton Gomes da Cunha
(Orgs.)

**Inovações Tecnológicas e
Sustentabilidade:
o Futuro da Agricultura**

1ª EDIÇÃO



científica digital

2026 - BARUERI - SP

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. André Cutrim Carvalho
Prof. Dr. Antônio Marcos Mota Miranda
Prof^a. Ma. Auristela Correa Castro
Prof. Dr. Carlos Alberto Martins Cordeiro
Prof. Dr. Carlos Alexandre Oelke
Prof^a. Dra. Caroline Nóbrega de Almeida
Prof^a. Dra. Clara Mockdece Neves
Prof^a. Dra. Claudia Maria Rinhel-Silva
Prof^a. Dra. Clecia Simone Gonçalves Rosa Pacheco
Prof. Dr. Cristiano Marins
Prof^a. Dra. Cristina Berger Fadel
Prof. Dr. Daniel Luciano Gevehr
Prof. Dr. Diogo da Silva Cardoso
Prof. Dr. Ernane Rosa Martins
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes
Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves
Prof^a. Dra. Fernanda Rezende
Prof. Dr. Flávio Aparecido de Almeida
Prof^a. Dra. Francine Náthalie Ferraresi Queluz
Prof^a. Dra. Geuciane Felipe Guerim Fernandes
Prof. Dr. Humberto Costa

Prof. Dr. Joachin Melo Azevedo Neto
Prof. Dr. Jónata Ferreira de Moura
Prof. Dr. José Aderval Aragão
Prof. Me. Julianno Pizzano Ayoub
Prof. Dr. Leonardo Augusto Couto Finelli
Prof. Dr. Luiz Gonzaga Lapa Junior
Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva
Prof^a. Dra. Maria Cristina Zago
Prof^a. Dra. Maria Otília Zangão
Prof. Dr. Mário Henrique Gomes
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes
Prof. Dr. Nelson J. Almeida
Prof. Dr. Pedro Afonso Cortez
Prof. Dr. Reinaldo Pacheco dos Santos
Prof. Dr. Rogério de Melo Grillo
Prof^a. Dra. Rosenery Pimentel Nascimento
Prof. Dr. Rossano Sartori Dal Molin
Prof. Me. Silvio Almeida Junior
Prof^a. Dra. Thays Zigante Furlan Ribeiro
Prof. Dr. Wescley Viana Evangelista
Prof. Dr. Willian Carboni Viana
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Acesse a lista completa dos Membros do Conselho Editorial em www.editoracientifica.com.br/conselho

Parecer e revisão por pares

Os textos que compõem esta obra passaram por avaliação do Conselho Editorial e revisão por pares externos (*Peer Review*), recebendo a devida recomendação para publicação.

Nota: Esta obra é fruto de um processo colaborativo, configurando-se como uma coletânea na qual os direitos autorais permanecem resguardados para os respectivos autores. Alguns capítulos podem ter origem em trabalhos anteriormente apresentados em eventos acadêmicos; no entanto, os autores foram orientados a adotar o devido rigor na prevenção do autoplágio. A responsabilidade pelo conteúdo de cada capítulo, assim como pela originalidade e integridade das informações publicadas, é inteiramente dos respectivos autores e autoras. O conteúdo da obra não reflete, necessariamente, a opinião da editora, dos organizadores ou dos membros do conselho editorial.

APRESENTAÇÃO

Esta obra é fruto de um esforço colaborativo que reuniu professores, estudantes e pesquisadores cujo envolvimento enriqueceu significativamente as discussões neste espaço formativo. Além disso, resulta de iniciativas interinstitucionais e ações voltadas ao incentivo à pesquisa, congregando especialistas de diversas áreas do conhecimento, vinculados a Instituições de Educação Superior, públicas e privadas, em âmbito nacional e internacional.

Seu principal objetivo é fortalecer a integração entre instituições, tanto no Brasil quanto no exterior, por meio de redes de pesquisa comprometidas com a formação continuada de profissionais da educação. Para isso, busca-se a produção e a ampla disseminação do conhecimento em distintas áreas do saber.

Expressamos nossa profunda gratidão aos autores pelo empenho, comprometimento e dedicação na concepção e finalização desta obra. Esperamos que ela se consolide como um recurso didático-pedagógico valioso, atendendo às necessidades de estudantes, docentes de todos os níveis de ensino e demais interessados na temática.

Teonis Batista da Silva
Jenilton Gomes da Cunha

SUMÁRIO

Capítulo 01

A MANDIOCA NO BRASIL E NO MUNDO: PASSADO, PRESENTE E FUTURO

Tammires Lorena Costa Santana; Carolina Oliveira de Santana; Tahise Neiva Campodonio; Carine Tondo Alves; Taíse Bomfim de Jesus

doi 10.37885/250719807 8

Capítulo 02

ATIVIDADE ALELOPÁTICA DE EXTRATOS DE *EUCALYPTUS SP.* E *MANGIFERA INDICA L.* SOBRE A GERMINAÇÃO DE SEMENTES E ÍNDICES FISIOLÓGICOS DE *ALLIUM CEPA L.*

Florine Alves de Sousa Pinheiro; Amanda Cristine Abreu Silva; Juliano dos Santos; Emerson Ferreira Abreu; Carlos Eduardo Barbosa Gomes; Leonardo da Silva Nascimento; Luana Larissa Aires Franco; Cláudia Quintino da Rocha; Adriani Hass; Ilisandra Zanandrea

doi 10.37885/251120636 31

Capítulo 03

EXTRAÇÃO ORGANOSOLV DE LIGNINA A PARTIR DE BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS PARA APLICAÇÕES EM BIOCOMPÓSITOS SUSTENTÁVEIS

Jordanna Layse Bezerra Costa; Aisha Victória Silva Pereira; Daniel Queiroz Nobre; Adriano Magalhães Freitas; Daynara Alves da Silva Sousa; Gustavo Oliveira De Paula; Josuel dos Santos Araújo; Rafael Viana Sales; Heloíse Oliveira Medeiros de Araújo Moura; Luciene Santos de Carvalho

doi 10.37885/251220867 52

Capítulo 04

ASPECTOS BIOLÓGICOS E INTERAÇÃO COM INSETOS-PRAGA DE *CORDYCEPS FUMOSOROSEA* (ASCOMYCOTA: HYPOCREALES): UMA REVISÃO DA LITERATURA

Enrique Yamakawa ; Marcus Cesar Bochi Reis dos Santos ; Fábio de Deus Oliveira-Junior ; Julio Cesar Polonio; Maria Claudia Colla Ruvolo-Takasusuki ; Bruno Vinícius Daquila ; Helio Conte

doi 10.37885/251220894 67

Capítulo 05**PLANT PHYSIOLOGY UNDER ABIOTIC STRESSES: AN INTEGRATIVE REVIEW OF THE MECHANISMS, RESPONSES, AND TOLERANCE STRATEGIES**

Rebeca Queiroz Pereira; Teonis Batista da Silva; Djair Alves da Mata; Flávia Cartaxo Ramalho Vilar; Alysson Lívio Vasconcelos Guedes; Marcos Felipe Queiroz dos Santos; Erick Matheus Ferreira dos Santos Costa; Jenilton Gomes da Cunha

 10.37885/260121104 **89**

SOBRE OS ORGANIZADORES **111**

ÍNDICE REMISSIVO **112**

A MANDIOCA NO BRASIL E NO MUNDO: PASSADO, PRESENTE E FUTURO

Tammires Lorena Costa Santana
Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)

Carolina Oliveira de Santana
Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)

Tahise Neiva Campodonio
Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)

Carine Tondo Alves
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)

Taíse Bomfim de Jesus
Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)

RESUMO

A mandioca destaca-se pela boa adaptabilidade para as diversas características do solo, clima, além de tolerância à seca, sendo estratégica para sistemas agrícolas familiares. Este capítulo examina sua domesticação e difusão histórica, práticas agrônomicas otimizadas como plantio direto, manejo nutricional e uso de bioestimulantes, além de estratégias sustentáveis de cultivo. O beneficiamento da raiz é analisado desde métodos tradicionais até processos industriais modernos, enfatizando a agregação de valor e aproveitamento integral da biomassa. Destacam-se inovações tecnológicas na cadeia produtiva, incluindo produção de bioenergia, materiais biodegradáveis, alimentos funcionais e potencial em sistemas de biorrefinaria. O trabalho demonstra a necessidade de integrar saberes tradicionais com avanços científicos para fortalecer uma cadeia produtiva eficiente, resiliente e ambientalmente sustentável. A mandioca emerge como cultura estratégica para enfrentar desafios alimentares e ambientais atuais, oferecendo múltiplas possibilidades de aproveitamento econômico e sustentável.

Palavras-chave: Resíduo agroindustrial; bioeconomia; mandiocultura.

INTRODUÇÃO

A mandioca (*Manihot esculenta Crantz*) é uma planta de grande importância para a agricultura brasileira, destacando-se por sua rusticidade e versatilidade. Considerada uma cultura alimentar, energética e industrial, encontra no Brasil um dos principais centros de origem e dispersão genética. Devido à ampla diversidade de germoplasma, a mandioca está bem adaptada às diferentes condições ambientais do território nacional, desde o Sul até o Norte do país. A região Nordeste responde por cerca de metade da produção nacional, onde a cultura se mantém como uma das mais resilientes frente aos períodos de estiagem que frequentemente afetam a região (IBGE, 2023; Vidigal Filho *et al.*, 2022).

Seu uso predominante é voltado à alimentação humana e animal, ocupando aproximadamente dois milhões de hectares em território brasileiro. Além disso, a mandioca está entre os principais produtos agrícolas de exportação, em sua forma processada e fresca, sendo uma base alimentar energética por meio de suas raízes e proteica por meio de suas folhas, que compõem a dieta de diversas populações ao redor do mundo (Maniezo; Araújo, 2022).

Para melhorar a produtividade da cultura, a adoção de boas práticas agrícolas é frequentemente o primeiro passo. Algumas recomendações técnicas têm se mostrado amplamente aplicáveis em diferentes contextos, enquanto outras exigem adaptações específicas às condições locais de clima e solo (de Leão, 2021). A mandioca é reconhecida por sua elevada produção de carboidratos, sendo nativa da América tropical, tolerante à seca, adaptada a solos de baixa fertilidade e acidez, e relativamente resistente a pragas e doenças. Sua flexibilidade quanto ao tempo de colheita podendo permanecer no solo por longos períodos a torna uma importante reserva alimentar em tempos de escassez (Modesto Junior; Alves, 2016).

Diante de sua relevância estratégica, este levantamento bibliográfico tem como objetivo reunir e organizar o conhecimento técnico e científico disponível sobre a mandioca. A análise abrange desde sua origem e expansão global até os processos de beneficiamento, os produtos derivados e os avanços científicos mais recentes. Além disso, busca-se identificar lacunas ainda existentes na literatura, contribuindo para o fortalecimento da base de conhecimento sobre essa cultura essencial à segurança alimentar e ao desenvolvimento sustentável.

ABORDAGEM HISTÓRICA DA MANDIOCA

A mandioca desempenhou um papel fundamental na formação da sociedade brasileira, desde os tempos pré-coloniais até os dias atuais. Sua história está intimamente ligada à agricultura familiar, à subsistência de milhões de pequenos agricultores e à dieta das populações rurais, especialmente nas regiões norte e nordeste do país. Apesar de sua presença contínua, o cultivo e a importância da mandioca sofreram transformações significativas ao longo dos séculos, especialmente em regiões de intenso crescimento econômico, como o estado de São Paulo (Silva; Murrieta, 2014).

Para compreender essa trajetória e sua relevância cultural, é importante revisitar as origens da mandioca e o modo como foi incorporada nas práticas alimentares e sociais das comunidades originárias brasileiras. Esses povos desenvolveram uma relação complexa com a mandioca que iam além dos simples hábitos alimentares. Vivendo em habitações coletivas alongadas, cobertas com palmas e suspensas do solo para proteção contra animais e perigos noturnos, os povos originários fundamentaram sua dieta nesta raiz nativa processada em farinha, estabelecendo desde cedo a mandioca como elemento central da cultura local (Abbate; Albuquerque, 2024).

A disponibilidade abundante da planta permitiu que desenvolvessem sofisticadas técnicas de processamento da raiz, incluindo métodos de fermentação nos quais mastigavam as raízes para reduzir o tamanho e as deixavam azedar em água, criando bebidas sazonais que variavam conforme a disponibilidade de outros tubérculos como a taioba (Barléu, 2005). Esse conhecimento técnico e cultural seria posteriormente fundamental para a sobrevivência dos colonizadores europeus.

Com a chegada dos colonizadores europeus, a mandioca manteve sua centralidade, tornando-se essencial para a sobrevivência dos colonos nos primeiros séculos da colonização. No litoral, especialmente na capitania de São Vicente, os europeus adotaram as técnicas das comunidades originárias de cultivo, como a agricultura de corte e queima, que se adaptava bem aos solos pobres das áreas florestais. A mandioca, por sua resistência e versatilidade, tornou-se a base da alimentação, consumida principalmente na forma de farinha, beiju e outros derivados (Pinto e Silva, 2005).

A geografia diversificada do território brasileiro determinou diferentes padrões de cultivo que se mantiveram ao longo do período colonial. Enquanto as regiões planas próximas aos rios favoreciam a cana-de-açúcar, considerada iguaria para estrangeiros, as áreas montanhosas e vales demonstravam maior fertilidade para a mandioca. Esta distribuição geográfica natural seria posteriormente aproveitada pelas políticas coloniais, que reconheceram na mandioca não apenas um alimento de subsistência, mas um recurso estratégico para a manutenção da ordem colonial. Durante períodos de escassez, quando os suprimentos europeus se tornavam insuficientes, a mandioca emergia como solução para as crises alimentares, evidenciando sua importância crescente na economia colonial (Barléu, 2005).

A formalização dessa importância atingiu seu ápice durante o período do Brasil Holandês (1630-1654). Segundo o relato de Barléu (2005), o território possuía 166 engenhos distribuídos entre ativos, em construção ou inativos. Durante esta fase, a gestão de Maurício de Nassau institucionalizou completamente o controle da produção através de quotas obrigatórias, penalidades severas para descumpridores e sistemas de prestação de contas ao conselho supremo. Cada proprietário devia declarar anualmente suas quotas de plantio e produção de farinha, permitindo às autoridades calcular precisamente os recursos disponíveis para o abastecimento militar e civil.

Este controle administrativo consolidou a mandioca como um dos três pilares econômicos do Brasil colonial, junto ao açúcar e à madeira. As flutuações de preços demonstravam tanto a dependência estrutural da população quanto a instabilidade de uma economia agrícola baseada em poucos produtos.

A valorização local da mandioca não impediu que ela se expandisse globalmente através do comércio colonial português, servindo como alimento básico para escravizados e estabelecendo-se em entrepostos mundiais. Atualmente, os países da África lideram a produção mundial enquanto o Brasil ocupa a quinta posição (FAO, 2024). O estudo de Van Acker *et al.* (2024) destacou que a mandioca desempenhou um papel importante na estabilidade alimentar da região africana, sendo amplamente cultivada e consumida após sua introdução.

Apesar dessa expansão global, a mandioca manteve sua associação com a subsistência. Valorizada pela capacidade de saciar a fome, mas sem prestígio gastronômico, permanece como símbolo de alimentação básica (Atala, 2021). Esta

percepção refletia-se na organização social das propriedades coloniais, onde a correlação entre cana-de-açúcar e mandioca tornou-se particularmente evidente.

O papel das mulheres indígenas foi fundamental neste processo de estabelecimento da cultura da mandioca. Conforme demonstraram O'Leary (2024), entre os povos Tupi, elas eram responsáveis pelo cultivo, processamento e armazenamento da mandioca entre 1500 e 1650, garantindo a segurança alimentar tanto das comunidades indígenas quanto dos colonizadores. No entanto, com a expansão das plantações açucareiras, seus conhecimentos foram gradualmente apropriados e marginalizados, culminando na substituição das mulheres indígenas por escravizados africanos e mamelucos. Este processo de apagamento revelou como a colonização não apenas explorou, mas também silenciou saberes tradicionais fundamentais.

Segundo Soares (2009), que observou quadros de engenho do artista Frans Post, as culturas de cana-de-açúcar e mandioca coexistiram frequentemente na mesma propriedade, já que a produção açucareira dependia da farinha de mandioca para alimentar escravizados e habitantes dos engenhos. Nos engenhos de mandioca, utilizavam-se utensílios cerâmicos específicos para o processamento que, conforme observa de Souza (2010), não apenas refletiam aspectos culturais fundamentais, mas também contribuíam para criar assimetrias sociais entre indígenas, negros e brancos, evidenciando como práticas alimentares aparentemente neutras reproduziam hierarquias sociais.

Esta relação revelava uma hierarquia social marcante, na qual o açúcar associava-se ao prestígio, enquanto a farinha era vista como produto de menor *status*, levando as classes elevadas a evitarem vínculos com esse alimento. Tal distinção se refletiu no próprio significado de engenho. Conforme o estudo de Andermann (1996), o termo "engenho de farinha" foi substituído por "casa de farinha", evidenciando uma diferenciação social entre os dois produtos: a cana-de-açúcar e a mandioca.

No entanto, a partir do século XIX, iniciou-se um processo de declínio do cultivo da mandioca em determinadas regiões, como São Paulo, onde o crescimento econômico e a expansão da monocultura do café transformaram a paisagem rural. A introdução de novos hábitos alimentares pelos imigrantes europeus, a mecanização da agricultura e a pressão para modernizar as técnicas de cultivo contribuíram para a diminuição do espaço dedicado à mandioca. No século XX,

esse processo se intensificou, com a mandioca sendo substituída por culturas mais rentáveis ou por alimentos industrializados (Silva; Murrieta, 2014).

Ainda assim, mesmo com o declínio regional, a mandioca consolidou-se como símbolo de resistência cultural e alimentar. Nas comunidades indígenas, quilombolas e entre os pequenos agricultores, seu cultivo e processamento artesanal continuaram a ser praticados, preservando saberes tradicionais. A farinha de mandioca, por exemplo, é até hoje um alimento essencial em muitas regiões do país, seja como acompanhamento de pratos típicos, seja como ingrediente versátil na culinária (Abbate; Albuquerque, 2024; Atala, 2021; Maniezo; Araújo, 2022).

CULTIVO DA MANDIOCA

Além desse valor cultural, a mandioca também representa uma cultura estratégica para o desenvolvimento agrícola, devido à sua adaptabilidade, baixo custo de produção e múltiplas possibilidades de aproveitamento. No Brasil, esta cultura continua desempenhando papel fundamental tanto na subsistência de propriedades familiares quanto no potencial industrial e forrageiro, servindo como matéria-prima para diversas indústrias (Streck *et al.*, 2014). O sucesso do cultivo da mandioca depende de múltiplos fatores interligados, desde a escolha da época de plantio até as práticas de manejo do solo e nutrição da planta.

A escolha da época adequada de plantio representa um dos fatores mais críticos para maximizar a produtividade da mandioca. Estudos demonstram que existe uma janela ótima de plantio que varia conforme a região climática. No Rio Grande do Sul, ambiente subtropical, o plantio no início de agosto proporciona os melhores rendimentos e o atraso no plantio cria uma lacuna significativa na produtividade (Borges *et al.*, 2020). Já no Agreste de Alagoas, o plantio no início da estação chuvosa (abril a maio) favorece o desenvolvimento vegetativo e aumenta o rendimento das raízes com maior teor de amido. Em contrapartida, plantios tardios, como os realizados em julho, enfrentam maior risco de déficit hídrico, comprometendo significativamente o crescimento e a produtividade (Silva *et al.*, 2025).

Para o Cerrado brasileiro devido às condições do bioma, são encontradas particularidades específicas, no qual o plantio após agosto reduz o teor de amido em 3,0 g por 5 kg de mandioca, enquanto plantios antes de maio também

diminuem a concentração de amido (Zebalho *et al.*, 2024). Fatores que corroboram com os dados históricos, que destacam que cultivos iniciados entre maio e agosto apresentam maior rendimento em comparação com aqueles plantados nos outros meses (Normanha; Pereira, 1950).

A influência da época de plantio também se reflete na absorção de nutrientes, tendo maior impacto do que a irrigação, influenciando a taxa de acumulação e o índice de colheita de nutrientes. A mandioca cultivada na estação chuvosa precoce apresenta maior absorção de nutrientes, enquanto a estação pós-chuva favorece a eficiência no uso de nutrientes e o rendimento das raízes (Janket *et al.*, 2025).

A cultura requer solos profundos e permeáveis para desenvolvimento adequado das raízes tuberosas. Demonstra notável tolerância a estresse hídrico e baixa fertilidade, adaptando-se desde sistemas de subsistência até cultivos comerciais intensivos. O preparo do solo deve garantir condições adequadas de aeração, temperatura e densidade para o desenvolvimento adequado da cultura (da Silva; Mendes; Kageyama, 2008; Paolino *et al.*, 2023; Vidigal Filho *et al.*, 2022). O sistema de plantio direto tem ganhado destaque como alternativa sustentável ao cultivo convencional da mandioca. Embora o plantio convencional ainda apresente maior rendimento absoluto, o sistema de plantio direto oferece benefícios ambientais significativos, trazendo uma redução a emissão de gases de efeito estufa, minimizando a erosão do solo e melhorando os teores de matéria orgânica, tornando o solo mais produtivo e menos suscetível à lixiviação de nutrientes (Devide *et al.*, 2017; Aguiar *et al.*, 2021).

Além do preparo e conservação do solo, o espaçamento entre plantas e a profundidade de plantio influenciam diretamente a produtividade da mandioca. Espaçamentos menores aumentam a produtividade por área, enquanto maiores favorecem raízes maiores e maior produção por planta, permitindo ajustes conforme os objetivos do cultivo (Streck *et al.*, 2014). Quanto à profundidade, 0,10 m oferece melhor rendimento e facilidade de colheita, enquanto profundidades maiores reduzem o tombamento, mas dificultam a colheita e podem diminuir a produtividade (Gabriel Filho *et al.*, 2003).

Complementando as práticas agrônômicas, o manejo nutricional adequado é importante para o crescimento da planta e a qualidade dos tubérculos. O nitrogênio, essencial para a síntese de proteínas e ácidos nucleicos,

influencia diretamente a fotossíntese, a produção de biomassa e a alocação de carboidratos entre os órgãos da planta. Sua aplicação adequada favorece o acúmulo de carboidratos nos tubérculos entre 3 e 8 meses após o plantio, enquanto doses excessivas podem comprometer a absorção de nutrientes e o desenvolvimento da cultura (Gili *et al.*, 2025).

Além do nitrogênio, uma adubação fosfatada tem demonstrado capacidade de aumentar consideravelmente a produção de raízes e melhorar a qualidade do amido (Normanha; Pereira, 1950). Por outro lado, a fertilização com potássio foi identificada como um dos principais fatores que podem impactar negativamente o rendimento quando mal manejada, destacando a importância do equilíbrio nutricional (Zebalho *et al.*, 2024).

Visando equilibrar a nutrição mineral com a sustentabilidade agrícola, fertilizantes orgânicos como esterco bovino e resíduos de caule de mandioca triturados mostram ser eficazes na substituição de fertilizantes químicos, mantendo alta produtividade (Ardian *et al.*, 2025). Além disso, características vegetativas como número e peso de folhas apresentam alta variação das características de fatores genéticos, sendo úteis na seleção clonal. A fertilização orgânica também contribui para reduzir a incidência e severidade de doenças na cultura (Msimo *et al.*, 2025).

Complementando o conceito de sustentabilidade além da fertilização orgânica, algumas estratégias de manejo sustentável como o uso de culturas de cobertura têm se mostrado promissoras. Alternativas como o uso de sorgo, crotalária, braquiária e coquetéis de culturas podem melhorar a sustentabilidade do cultivo da mandioca. Já que a crotalária possui a capacidade de fixar nitrogênio e controlar nematoides, a braquiária protege o solo e forma palhada, e os coquetéis de culturas combinam espécies para melhorar fertilidade, manejo de pragas e cobertura vegetal, sendo estratégias-chave na agricultura sustentável e plantio direto (Mushtaq *et al.*, 2024; Souza *et al.*, 2024). Estas práticas oferecem benefícios ambientais e produtivos, contribuindo para a conservação do solo e o aumento da matéria orgânica (Devide *et al.*, 2017).

Na mesma linha de aproveitamento de recursos orgânicos, os resíduos agrícolas como farelo de soja, farelo de amendoim, folhas de carvalho e borra de café também têm demonstrado capacidade de aumentar o pH do solo, a

matéria orgânica e a capacidade de troca de cátions, além de reduzir a biodisponibilidade de metais pesados como Cd, Pb e Zn (Yu; Gao; Zhang, 2025).

Embora as práticas de manejo sustentável sejam fundamentais para otimizar o cultivo da mandioca, é importante reconhecer que os fatores climáticos exercem papel decisivo no desenvolvimento fisiológico da mandioca, no qual a temperatura e o fotoperíodo exercem influência direta na velocidade de emissão de folhas e no número final delas na planta. O início da acumulação de amido ocorre quando a haste principal atinge aproximadamente 21 folhas, independentemente da época de plantio (Schons *et al.*, 2007). A mandioca apresenta crescimento diferenciado entre suas hastes, sendo que a competição por nutrientes e luz afeta a taxa de desenvolvimento (Fagundes *et al.*, 2009). Especificamente em relação à temperatura, temperaturas médias entre 24,31°C e 26,15°C durante os períodos de 4-5 meses e 6-10 meses após o plantio podem impactar negativamente a produtividade, aumentando a taxa de evapotranspiração e reduzindo a disponibilidade de água para a planta (Phanthanong *et al.*, 2025).

Além dos desafios impostos pelos fatores climáticos, o controle de doenças se torna essencial para evitar perdas de produtividade, representando outro aspecto importante para o sucesso do cultivo da mandioca. A doença do mosaico da mandioca constitui uma ameaça global que pode reduzir a produtividade em até 70%, afetando principalmente pequenos agricultores. O manejo integrado inclui o uso de variedades resistentes, materiais de plantio livres de doenças e controle integrado de pragas (Bhaargavi *et al.*, 2024).

Associado ao controle de doenças, o manejo eficiente de pragas e plantas daninhas também deve ser incorporado ao planejamento produtivo, uma vez que esses fatores competem diretamente por recursos essenciais, como água, luz e nutrientes. Nesse contexto, o manejo integrado de pragas ganha destaque, com práticas como rotação de culturas e ajuste de épocas de plantio, que ajudam a interromper ciclos reprodutivos de insetos e patógenos (Vidigal Filho *et al.*, 2022). Como exemplo, variedades resistentes, como *Mkuranga 1* e *Kipusa*, demonstraram melhor desempenho em áreas de alto risco, enquanto a adoção de rotação de culturas e o planejamento adequado do plantio se mostraram decisivos para aumentar a produtividade e a resiliência da cultura (Msimo *et al.*, 2025).

Esses ganhos produtivos ficam consolidados ao longo do ciclo cultural, desde a implantação até a colheita. Embora considerada cultura esgotante, a mandioca pode atingir altas produtividades mesmo com baixa aplicação de fertilizantes em condições específicas. Sendo importante destacar que o momento da colheita varia conforme o destino da produção: para consumo direto ocorre entre 8-14 meses, enquanto para uso industrial estende-se de 8-24 meses, período em que se observa aumento progressivo tanto na produtividade quanto no teor de amido (Vidigal Filho *et al.*, 2022).

Nesse contexto de variedades, a predominância da mandioca '*Vassourinha*' mantém relevância histórica. Atualmente, a seleção de clones com alto rendimento e colheita precoce representa uma estratégia fundamental para conciliar produtividade elevada com sustentabilidade agrícola (Normanha; Pereira, 1950; Ardian *et al.*, 2025) fechando assim o ciclo de boas práticas que vão desde a escolha do material de plantio até a colheita final.

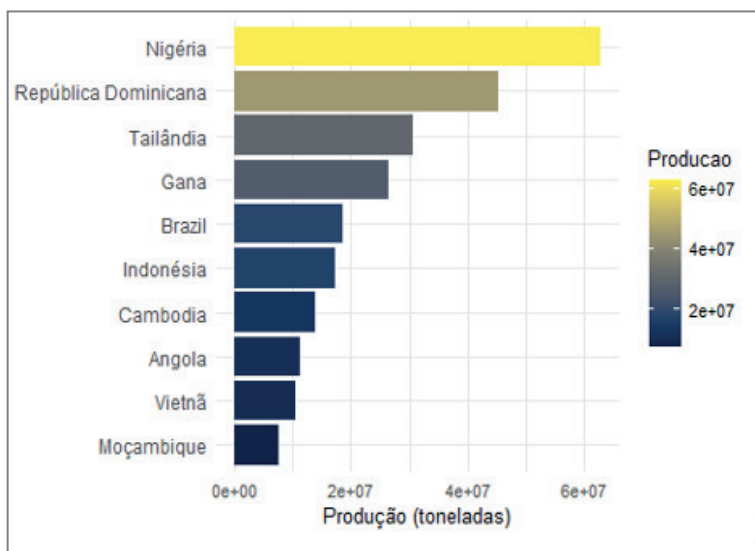
O cultivo eficiente da mandioca requer uma abordagem integrada que considere todos os fatores mencionados. A adoção de práticas adequadas de manejo pode resultar em aumentos significativos na produção, com possibilidade de elevar a oferta em mais de 1,5 milhão de toneladas e aumentar a disponibilidade de amido em mais de 400 mil toneladas (Zebalho *et al.*, 2024). A combinação de técnicas sustentáveis, manejo nutricional equilibrado, escolha adequada da época de plantio e controle eficaz de doenças representa o caminho para maximizar tanto a produtividade quanto a sustentabilidade desta cultura fundamental para a segurança alimentar global.

Apesar dos avanços tecnológicos que elevaram a produtividade média da cultura da mandioca no Brasil e em outros países sul-americanos, a posição do continente no cenário global ainda revela um paradoxo histórico. Conforme destacado por Mohammed e Favretto (2025) a mandioca, introduzida na África durante o período colonial, adaptou-se de forma notável aos sistemas agrícolas locais e às condições edafoclimáticas do continente, tornando-se a principal base da segurança alimentar em diversas regiões. Atualmente, segundo dados da FAO (2024), a produção mundial de mandioca ultrapassa 300 milhões de toneladas por ano, sendo os maiores produtores a Nigéria, Tailândia, Indonésia, Congo e Brasil (Figura 1).

No Brasil, a cultura é vital para a segurança alimentar e a geração de renda, especialmente entre pequenos produtores. Em 2023, a produção nacional alcançou 18.514.317 toneladas, com o estado do Pará liderando com 3.769.677 toneladas. A Bahia destacou-se entre os estados nordestinos, com 808.028 toneladas, sendo o município de Laje o maior produtor estadual. Outros estados do Nordeste também apresentaram volumes expressivos, como o Ceará (727.878 toneladas), Pernambuco (520.504 toneladas), Alagoas (518.234 toneladas) e Piauí (489.577 toneladas). Maranhão (398.360 toneladas), Rio Grande do Norte (297.506 toneladas), Sergipe (166.103 toneladas) e Paraíba (144.559 toneladas) completam o panorama regional, evidenciando a importância da mandioca para a economia agrícola do Nordeste e reforçando seu papel estratégico no contexto da agricultura familiar brasileira (IBGE, 2023).

Diante dos expressivos volumes de produção de mandioca no Brasil, aproveitar bem essa matéria-prima se torna essencial para transformar seu potencial em benefícios reais. Quando a mandioca é processada e convertida em produtos com maior valor agregado, como farinha, fécula ou tucupi, não só se amplia a renda dos produtores, como também se fortalece a segurança alimentar e se impulsiona o desenvolvimento de cadeias produtivas mais sustentáveis. Nesse cenário, o beneficiamento da mandioca deixa de ser apenas uma etapa técnica e passa a ser um elo importante entre o campo e o mercado, criando oportunidades concretas de trabalho, renda e crescimento para as comunidades envolvidas.

Figura 1 - Produção de mandioca em toneladas dos 10 maiores países produtores de mandioca.



Fonte: FAO (2024).

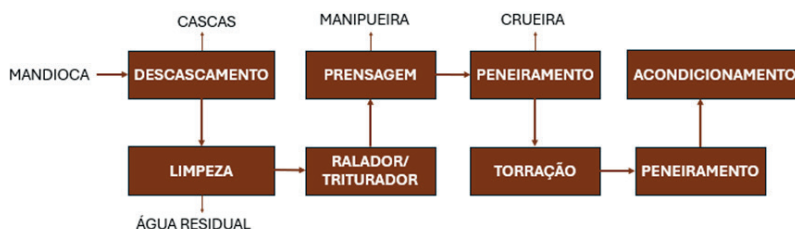
PRINCIPAIS ROTAS DE BENEFICIAMENTO DA MANDIOCA

Seu beneficiamento constitui um processo complexo que transforma a raiz fresca em diversos produtos de valor agregado, abrangendo desde alimentos básicos até bioprodutos industriais avançados a partir dos resíduos gerados (figura 2). Este conjunto de etapas fundamentais varia entre métodos tradicionais e industriais, refletindo a diversidade regional e cultural brasileira.

Nas regiões Norte e Nordeste, o beneficiamento da mandioca mantém características tradicionais, com forte participação da agricultura familiar e métodos manuais. Esta abordagem preserva saberes ancestrais e identidades culturais locais, como observado em comunidades do Baixo Tocantins, onde o "fazer-farinha" constitui um processo coletivo que articula técnica, cultura e identidade (Gabriela; Aguiar; Kubo, 2020). Contrastando com estas práticas tradicionais, a região Centro-Sul desenvolve uma lógica industrial voltada principalmente à produção de fécula, com maior investimento em tecnologia e inserção no agronegócio. Nas feculares de Paranavaí (PR), por exemplo, o processamento é técnico, operando em larga escala com foco nas indústrias alimentícia, química, têxtil e petrolífera. Esta transformação evidencia a transição

da mandioca de alimento de subsistência para commodity estratégica (dos Anjos; Gomes, 2023).

Figura 2 - Fluxograma do processamento da mandioca, desde a etapa de descascamento até o acondicionamento final, incluindo a geração de subprodutos como água residual e manipueira.



Fonte: EMBRAPA (2002).

A qualidade dos produtos depende dos cuidados na fase pós-colheita, que representa a etapa inicial do beneficiamento. Devido à alta perecibilidade das raízes, fatores como tempo entre colheita e processamento, condições de armazenamento e manuseio adequado são determinantes para o sucesso de todo o processo. A EMBRAPA (2002) destaca que exposição ao sol, empilhamento inadequado e fermentos nas raízes aceleram significativamente a deterioração. Para mitigar essas perdas, recomenda-se colher nas horas mais frescas do dia, utilizando ferramentas apropriadas e promovendo transporte ágil até a unidade de beneficiamento. Em algumas regiões, práticas como armazenamento temporário em tanques com água ou ambientes sombreados podem prolongar a vida útil das raízes por até 48 horas.

O processamento propriamente dito inicia-se com a classificação da matéria-prima, sendo a mandioca dividida em dois grupos principais: a mandioca de mesa ou doce, consumida in natura após cozimento, e a mandioca brava, destinada ao beneficiamento industrial devido ao maior teor de compostos cianogênicos. Esta distinção é essencial para garantir a segurança alimentar e definir as rotas de processamento adequadas (EMBRAPA, 2002).

O processo tradicional de produção de farinha, conforme observado em comunidades como Estrela de Alagoas, compreende etapas bem definidas que combinam tecnologias híbridas. O processo inicia-se com o transporte e recepção das raízes até a unidade processadora, seguido pela trituração para

fragmentação das raízes e facilitar operações subsequentes. A terceira etapa consiste na prensagem hidráulica para remoção da manipueira, o líquido residual rico em amido. Posteriormente, realiza-se a peneiração para separação e uniformização da massa, finalizando com a torração da massa em fornos a lenha operados com pás mecânicas. Esta estrutura preserva os saberes locais, embora apresente desafios ambientais e energéticos significativos (EMBRAPA,2002).

A produção de tucupi, tradicional na culinária amazônica, segue processo específico que exige rigor técnico para garantir a segurança alimentar. O processamento inicia-se com a trituração das raízes de mandioca brava, seguida pela prensagem para obtenção da manipueira. O diferencial está na fermentação por até 72 horas e posterior fervura por aproximadamente 10 minutos, processo que elimina o ácido cianídrico residual, tornando o produto seguro para consumo (Chisté; Cohen, 2011). Esta sequência de etapas demonstra como o conhecimento tradicional desenvolveu métodos eficazes para o processamento seguro de variedades tóxicas da mandioca.

Em regiões como Lajedo, no Pernambuco, o beneficiamento ocorre em casas de farinha com estrutura artesanal e crescente mecanização. As etapas incluem descascamento, lavagem, trituração, prensagem, peneiração e torração, processo similar ao observado em outras regiões, mas com adaptações locais. Contudo, Barros Júnior e de Souza (2016) destacam que a maioria dos trabalhadores atua sem carteira assinada ou equipamentos de proteção adequados, refletindo a ausência de políticas públicas eficazes para o setor.

Nas fecculárias industriais do Centro-Sul, o beneficiamento utiliza tecnologia avançada com foco na produção de fécula e seus derivados. Estes produtos têm ampla aplicação industrial, sendo utilizados em alimentos, embalagens, colas, mineração, setor têxtil e farmacêutico (EMBRAPA, 2002). A fécula não temperada destina-se à alimentação básica, enquanto produtos temperados, como a farofa, agregam maior valor comercial. Esta diversificação de produtos demonstra a versatilidade da mandioca como matéria-prima industrial.

Ambos os modelos de beneficiamento, tradicional e industrial, enfrentam desafios estruturais similares, incluindo redução da área plantada, dificuldades na mecanização da colheita e escassez de mão de obra qualificada. No Nordeste, particularmente, os estabelecimentos familiares têm baixa inserção em circuitos lucrativos da cadeia produtiva, demandando políticas públicas voltadas à

valorização da mandiocultura (dos Anjos; Gomes, 2023). Esta situação contrasta com as feclarias industriais, que operam com capital intensivo e padronização produtiva, evidenciando disparidades regionais no desenvolvimento do setor.

Estudos recentes demonstram que é possível aliar conhecimento tradicional e inovação tecnológica, mesmo em microempresas artesanais. Oliveira e Almeida, (2024) mostram que em Manaus, a utilização de tecnologias como simulação computacional pode otimizar *layouts* produtivos e reduzir perdas significativamente, sem descaracterizar os processos tradicionais. Esta abordagem sugere caminhos para a modernização sustentável do setor.

O beneficiamento da mandioca no Brasil situa-se na intersecção entre tradição e modernização, representando um setor de vital importância econômica e cultural. Apesar dos desafios socioambientais e estruturais existentes, a atividade mantém sua essencialidade para diversas comunidades brasileiras. A valorização desta cadeia produtiva requer políticas públicas adequadas que promovam a adoção de práticas sustentáveis, incentivem a inovação tecnológica e fortaleçam a agricultura familiar.

INOVAÇÃO

Esse beneficiamento da mandioca gera resíduos significativos, como manipueira (30%), cascas (18%) e crueira (24% do peso das raízes). A manipueira, rica em amido, é altamente tóxica e mais poluente que o esgoto doméstico. O descarte inadequado, prática comum nos dias atuais, causam impactos ambientais (Wosiacki, Fioretto ;Cereda, 1994) Para além disso, estudos como o de Ribeiro *et al.* (2020) destacam a presença de outros tipos de contaminantes, associados a estes resíduos, como a presença de microplásticos na manipueira, oriundos de embalagens plásticas usadas no processamento.

Apesar da toxicidade, esses resíduos podem ser reaproveitados como matéria-prima para produção de bioprodutos que são de alto valor agregado, como adubo, sabão, tijolos ecológicos e bioenergias. Loureiro *et al.* (2020) destacaram em seu estudo que estes resíduos da mandioca possuem alto rendimento de açúcares fermentescíveis, o que promove uma valorização destes materiais antes descartados para produção de bioetanol. Essa transformação de passivos ambientais em ativos econômicos é impulsionada por inovações

tecnológicas, que modernizam a cadeia produtiva e ampliam as aplicações industriais sustentáveis da mandioca.

No setor de biocombustíveis, a mandioca se mostra promissora. Segundo Battaglini *et al.* (2010), a mandioca demonstrou uma eficiência energética superior ao milho e à cana-de-açúcar, devido a presença de amido residual, e propuseram que métodos de recuperação desse amido podem ampliar a sustentabilidade do processo. Como mostrado por Camili e Cabello (2012) e Suriyachai *et al.* (2024) usaram os resíduos da mandioca para otimizar a fermentação e produziram 93,87% de glicose a partir de tratamentos termoquímicos, respectivamente.

Além dos açúcares, a mandioca tem sido utilizada na produção de biogás e biohidrogênio. Lerdlattaporn *et al.* (2021) desenvolveram um sistema integrado de digestão anaeróbia de polpa de mandioca com efluentes industriais, promovendo a geração de energia e a redução de emissões, e Tagne *et al.* (2024) exploraram a fermentação escura de resíduos da mandioca para produção de biohidrogênio, destacando o pré-tratamento térmico do inóculo como fator determinante para a eficiência do processo.

No campo da agricultura sustentável, destacam-se iniciativas voltadas ao aproveitamento do caule da mandioca. Wijitkosum *et al.* (2025) demonstraram que esse material melhora a fertilidade do solo, aumenta a retenção de água e estimula a atividade microbiana, reduzindo a dependência de insumos químicos. Já, Alonso-Gómez *et al.* (2024) ampliaram essa abordagem ao propor o uso do biocarvão como substituto do carvão convencional, promovendo práticas agrícolas regenerativas.

A utilização integral da planta também tem ganhado espaço na alimentação animal. Hossain *et al.* (2025) propuseram o uso de raízes, folhas, caules e subprodutos da mandioca na alimentação de ruminantes, associando técnicas de fermentação e tratamento enzimático para melhorar o valor nutricional. Já para a alimentação humana, seguindo as inovações associadas a alimentação mais leve, a mandioca tem sido empregada como alternativa à farinha de trigo, no qual Ariani *et al.* (2025) desenvolveram macarrão instantâneo sem glúten à base de farinha mocaf (mandioca fermentada), oferecendo uma solução nutricionalmente adequada e economicamente viável, especialmente para pessoas com restrições alimentares.

Outro avanço relevante está na aplicação do amido da mandioca na fabricação de plásticos biodegradáveis. Barone *et al.* (2025) destacaram a sua qualidade como substituto de polímeros sintéticos, contribuindo para a redução de resíduos plásticos e alinhando-se às demandas por soluções sustentáveis no setor de embalagens.

Além disso, avanços em biotecnologia e genômica têm ampliado o uso diversificado da cultura. Kumar *et al.* (2025) caracterizaram 33 variedades de mandioca com base em atributos agromorfológicos, identificando genótipos superiores para programas de melhoramento, como Landi *et al.* (2025) que identificaram uma inserção estrutural inédita no genoma da variedade africana que contribui para o aprimoramento genético da espécie.

Aplicações não convencionais também têm revelado novas possibilidades para a mandioca, como na mineração e no tratamento de efluentes. Photharin *et al.* (2022) utilizaram extrato de folhas da planta como agente biolixiviante para extração de ouro de resíduos eletrônicos, oferecendo uma alternativa ambientalmente segura às técnicas tradicionais. Junto a isso, Ummalyima *et al.* (2023) propuseram o uso de águas residuais do processamento da mandioca para o cultivo de microalgas, promovendo o tratamento de efluentes e a produção de bioprodutos de alto valor agregado.

Todas essas inovações convergem para o conceito de biorrefinaria integrada, que visa otimizar o aproveitamento da mandioca, conforme proposto por Padi e Chimphango (2021), que desenvolveram um modelo baseado em resíduos da fécula de mandioca para a produção simultânea de bioetanol, ácido succínico, xarope de glicose e energia. Essa abordagem evidencia os benefícios ambientais, sociais e econômicos da mandioca como base para sistemas agroindustriais sustentáveis.

Entre eles, destacam-se a necessidade de estudos com variedades geneticamente melhoradas da mandioca, o aproveitamento ainda limitado da planta e seus resíduos, a necessidade de tecnologias de processamento mais acessíveis e a carência de estudos aprofundados sobre o ciclo de vida dos produtos derivados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mandioca desempenha um papel estruturante na formação sociocultural e econômica do Brasil, sendo um componente essencial da segurança alimentar e da identidade nacional desde os períodos pré-coloniais. Estudos recentes evidenciam avanços relevantes na cadeia produtiva, com destaque para a adoção do plantio direto e o uso de bioestimulantes, que contribuem para a sustentabilidade do sistema, embora ainda enfrentam limitações quanto à estabilidade da produtividade. A integração de práticas agronômicas, como a escolha criteriosa da época de plantio e o uso de culturas de cobertura, tem a capacidade de otimizar o desempenho agrônomo e ambiental. No âmbito do processamento, técnicas de pré-tratamento e tratamentos podem aumentar a eficácia do rendimento e da qualidade dos subprodutos, promovendo o aproveitamento integral da biomassa e fortalecendo a economia circular. A consolidação da mandioca como cultura estratégica depende de investimentos contínuos em pesquisa aplicada, incentivo à inovação tecnológica e valorização dos conhecimentos tradicionais, fortalecendo sistemas produtivos resilientes, inclusivos e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABBATE, F. M.; ALBUQUERQUE, M. B. B. Cultura alimentar indígena e os cuidados da cunhã, trocas culturais e educação não escolar na Amazônia colonial. **Revista Brasileira de História da Educação**, v. 24, n. 1, p. e340, 2024.

AGUIAR, E. B., SCHLEDER, E. J. D., DOS SANTOS BRITO, V. H., AGUENA, F. A. F. Plantio direto na cultura da mandioca. **Uniciências**, v. 25, n. 1, p. 02-09, 2021.

ALONSO-GÓMEZ, L. A, CELIS-CARMONA, D. D., RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, Y. F., CASTRO-LADINO, J. R., SOLARTE-TORO, J. C. Biochar production from cassava waste biomass: A techno-economic development approach in the Colombian context. **Bioresource Technology Reports**, v. 26, 2024.

ANDERMANN, A. S. Histórias de Engenho: Os engenhos de farinha de mandioca em Florianópolis. Economia, Cuidados coma a produção, imagens (1917-1920), 1996.

ARDIAN, K., SETIAWAN, M., KAMAL, E., PRAMONO, M.S., HADI, SUNGKONO. Genetics variances of three elite cassava clones under different environment of fertilizer types. **BIO Web of Conferences**.: EDP Sciences, 2025.

- ARIANI, D., HERAWATI, E. R. N., NURHAYATI, R., ANGWAR, M. Gluten-free instant noodles based on mocaf flour. **BIO Web of Conferences**. EDP Sciences, 2025.
- ATALA, A. Manihot utilissima pohl : mandioca. São Paulo, SP: **Alaúde Editorial**, 2021.
- BARLÉU, G. O Brasil holandês. Tradução: Cláudio Brandão. **Senado Federal** ed. v. 43, 2005.
- BARONE, A.S., MARAGONI-SANTOS, C., DE FARIAS, P.M., CORTAT, C.M.G., MANIGLIA, B.C., ONGARATTO, R. S., FERREIRA, S., FAI, A. E. C. Rethinking single-use plastics: Innovations, policies, consumer awareness and market shaping biodegradable solutions in the packaging industry. **Elsevier Ltd**, 2025.
- BARROS JÚNIOR, A. P. de; DE SOUZA, W. M. Produção de farinha da mandioca no agreste pernambucano. *Revista Equador (UFPI)*, v. 5, p. 216–238, 2016.
- BATTAGLINI, N. M. P., CABELLO, C., COUTINHO, A.P.C., TOKURA, R.K. Recuperação de amidos remanescentes em resíduos de extração da fécula de mandioca Extraction of starches in cassava residue. **Revista Raízes e Amidos Tropicais**, v. 6, p. 183–191, 2010.
- BHAARGAVI, R., LATHA, T.K.S., MAKESHKUMAR, T., HARISH, S. Cassava mosaic disease: strategies for recovery and sustainable management. **Springer Nature**, 2024.
- BORGES, J. M.; ZANON, A. J.; SILVA, M. R.; BALEST, D. S.; ALVES, A. F.; FREITAS, C. P. O.; BOTH, V.; SANTOS, A. T. L. Yield potential of Cassava Crop in a function of planting date in a subtropical environment. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 19, n. 3, p. 263–269, 2020.
- CAMILI, E. A.; CABELLO, C. Ethanol production from cassava pulp. **Revista Energia na Agricultura**, v. 27, p. 1–19, 2012.
- CHISTÉ, R. C.; COHEN, K. D. O. Teor de cianeto total e livre nas etapas de processamento do tucupi. **Rev Inst Adolfo Lutz**, v. 70, n. 1, p. 41–47, 2011.
- DA SILVA, B. B.; MENDES, F. B. G.; KAGEYAMA, P. Y. Cultura da Mandioca. **Universidade de São Paulo**, Escola Superior de Agricultura Luiz De Queiroz, 2008.
- DE LEÃO, E. V. CULTURA DE MANDIOCA: uma revisão de literatura. **Universidade Federal Rural do Amazonas (UFRA)**, 2021.
- DE SOUZA, M. A. T. Divisões sociais, utensílios cerâmicos e o preparo da farinha de mandioca no Brasil Colonial, 2010.
- DEVIDE, A. C. P.; CASTRO, C. M.; VALLE, T. L.; FELTRAN, J. C.; ALMEIDA, J. C. R. Cultivo de mandioca de mesa em plantio direto e convencional sobre diferentes culturas de cobertura, **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, 2017.
- DOS ANJOS, R. S.; GOMES, I. R. A agroindústria de mandioca no território brasileiro e o processo de reestruturação produtiva da agropecuária, 2023.
- EMBRAPA, E. B. de P. A. A cultura da Mandioca. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2002.
- FAGUNDES, L. K.; STRECK, N. A.; LOPES, S. J.; ROSA, H. T.; WALTER, L.; ZANON, A. J. Desenvolvimento vegetativo em diferentes hastes da planta de mandioca em função a época de plantio. **Ciência Rural**, v. 39, p. 657–663, 2009.
- FAO. **Food and agriculture organizations of the United Nations**, 2024. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 12 mar. 2025.

GABRIEL FILHO, A.; STROHHAECHEK, L.; FEY, E. Profundidade e espaçamento da mandioca no plantio direto na palha. **Ciência Rural**, v. 33, p. 461–467, 2003.

GABRIELA, A.; AGUIAR, R.; KUBO, R. R. O que é fazer-farinha na comunidade quilombola uxizal de mocajuba, baixo tocantins, Pará? Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/congresso-de-mandioca-2018/mandioca-em-numeros>.

GILI, O. R. S.; SUWARTO, B.; HARTONO, A.; HEDIYENI, Y. Biomass Partitioning of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) at Various Doses of Nitrogen Fertilization. **Journal of Tropical Crop Science**, v. 12, n. 1, p. 10–17, 2025.

HOSSAIN, M. D.; YAN, Q.; ZHOU, Z.; ZHANG, X.; WITTAYAKUN, S.; NAPASIRTH, V.; NAPASIRTH, P.; LUKUYU, B. A.; TAN, Z.. Cassava as a feedstuff for ruminant feeding system in Belt and Road countries: innovations, benefits and challenges. **Elsevier B.V.**, 2025.

IBGE, I. B. de G. e E. **Produção de Mandioca**, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/mandioca/br>. Acesso em: 25 jun. 2025.

JANKET, A.; JOGLOY, S.; THEERAKULPISUT, P.; VORASOOT, N.; TOOMSAN, B.; HOLBROOK, C. C.; KVIEN, C. K.; KAEWPRADIT, W.; BANTERNG, P. Nutrient uptakes and use efficiency of cassava under different moisture conditions. **Agronomy Journal**, v. 117, n. 1, 2025.

KUMAR, S. S.; PRASAD, S.; WANI, O. A.; EL-HENDAWY, S.; MATTAR, M. A.; SALEM, A. Genetic diversity and agro-morphological characterization of cassava varieties provides insight for breeding and crop improvement. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, 2025.

LANDI, M.; CARLUCCIO, A. V.; SHAH, T.; NIAZI, A.; STAVOLONE, L.; FALQUET, L.; GISEL, A.; BONGCAM-RUDLOFF, E.. Genome-wide comparison reveals large structural variants in cassava landraces. **BMC Genomics**, v. 26, n. 1, 2025.

LERDLATTAPORN, R.; PHALAKORNKULE, C.; TRAKULVICHEAN, S.; SONGKASIRI, W. Implementing circular economy concept by converting cassava pulp and wastewater to biogas for sustainable production in starch industry. **Sustainable Environment Research**, v. 31, n. 1, 2021.

LOUREIRO, A. da C., SOARES, J.V.S., CHAAR, J.da S., HIDALGO, A. F., SOUZA, L. do S. S., PEREIRA, A. M. Avaliação do potencial dos resíduos (casca, entrecasca e pontas) do beneficiamento da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) para a produção de bioetanol utilizando hidrólise ácida. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 2, p. 606–620, 2020.

mandioca em função da época de plantio. **Ciência Rural**, v.37, n.6, nov-dez, n. 6, p. 1586–1592, 2007.

MANIEZO, G. T.; ARAÚJO, G. C. C. de. Farinha de mandioca: salvaguarda das culturas alimentares desde o tratado descritivo do Brasil a indicação geográfica. **Revista Extraprensa**, v. 15, n. Especial, p. 816–832, 2022.

MODESTO JUNIOR, M. de S.; ALVES, R. N. B. Cultura da Mandioca. Embrapa, 2016.

MOHAMMED, U. K.; FAVRETTO, N. Livelihood diversification among women farmers in Nigeria's flood-resilient drylands. **Climate Risk Management**, v. 48, 2025.

MSIMO, L. J.; MANOKO, M.; JOSEPH, C. A. O.; MAHINDA, A. Interactive Effect of Irrigation Supplementation, Compost-Fertilisation and Resistant Cassava Varieties on the Control and Management of CMD and CBSD, Incidences and Severity Through Morphological Detection Technique. **Journal of Phytopathology**, v. 173, n. 2, 2025.

MUSHTAQ, S.; TAK, H.; SHEIKH, J. H.; MALIK, I. M.; NISA, U. Plant parasitic nematode management using antagonistic plants as a potential substitute to hazardous chemical control—a review. **Taylor and Francis Ltd.**, 2024.

NORMANHA, E. S.; PEREIRA, A. S. Aspectos agronômicos da cultura da mandioca (Manihot utilíssima Pohl), Boletim Técnico da Divisão de Experimentação e Pesquisas, **Instituto Agrônomo**, Campinas, 1950.

O'LEARY, J. The Uprooting of Indigenous Women's Horticultural Practices in Brazil, 1500-1650. **Past and Present**, v. 262, n. 1, p. 45–83, 2024.

OLIVEIRA, R. H. de; ALMEIDA, E. S. de. Simulação computacional do processo de beneficiamento da mandioca: um estudo de caso. **Revista Foco**, v. 17, n. 12, p. e7123, 2024. Disponível em: <https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/7123>.

PADI, R. K.; CHIMPHANGO, A. Comparative sustainability assessments for integrated cassava starch wastes biorefineries. *Journal of Cleaner Production*, v. 290, 2021.

PAOLINO, T. C.; REZENDE, M. M.; CARVALHO, A. M.; MALENOWTCH, J. V. C.; TERAMOTO, E. T.; FERRARI, S. Otimização do crescimento vegetativo e produtividade da mandioca por meio de bioestimulante e métodos de cultivo, **Nativa**, Sinop, v. 11, p. 549–557, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.31413/nativa.v11i4.16545>.

PHANTHANONG, P.; PROMNIKORN, K.; KONGSIL, P.; KRAICHAK, E.; JENWEERAWAT, S.; VUTTIPONGCHAIKIJ, S.; KITTIPADAKUL, P. Variety-specific responses to climatic and edaphic factors in cassava productivity. **Frontiers in Agronomy**, v. 7, 2025.

PHOTHARIN, Y.; WANGNGAE, S.; NGIVPROM, U.; CHANSAENPAK, K.; KAMKAEW, A.; LAI, R.-Y. Extract of cassava waste as a lixiviant for gold leaching from electronic waste. **Green Chemistry Letters and Reviews**, Taylor and Francis Ltd., 2022.

PINTO E SILVA, P. Farinha, feijão e carne seca: um tripé culinário no Brasil colonial. São Paulo: **Editora Senac**, 2005.

RIBEIRO, M. P.; OLIVEIRA, M. M. C.; SANTOS, N. S.; VALENTIM, A. C. S. Revisão bibliográfica para adequação de uma metodologia de detecção do microplástico na goma e águas residuárias resultantes do processo de beneficiamento da mandioca. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, n. 2, p. 2317–2563, 2020.

SCHONS, A.; STRECK, N. A.; KRAULICH, B.; PINHEIRO, D. G.; ZANON, A. J. Emissão de folhas e início de acumulação de amido em raízes de uma variedade de.

SILVA, H. A., MURRIETA, R.S. S. Mandioca, a rainha do Brasil? Ascensão e queda da Manihot esculenta no estado de São Paulo. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. **Ciências Humanas**, v. 9, n. 1, p. 37-60, 2014.

SILVA, R. B.; SANTOS NETO, A. L.; SANTOS, W. M.; TEODORO, I.; BARROS, A. C.; SANTOS, V. R.; SOUZA, A. A.; MARTINS, G. M. C.; COSTA, B. R. S.; SOUZA, J. W. G.; SILVA, D. M. R. Cassava growth and productive performance at different planting times in the Agreste of Alagoas, Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 6, 2025.

SOARES, M. C. Engenho sim, de açúcar não o engenho de farinha de Frans Post, **Varia História**, Belo Horizonte, vol. 25, n. 41, p.61-83, 2009.

SOUZA, L. F. N.; CIAMPITTI, I. A.; FERNANDEZ, J. A.; FAVARIN, J. L.; OLIVEIRA, S. M. Maize-Brachiaria grass intercropping: A meta-analysis of major productivity drivers in Brazil. **Field Crops Research**, v. 306, 2024.

STRECK, N. A.; PINHEIRO, D. G.; ZANON, A. J.; GABRIEL, L. F.; ROCHA, T. S. M.; SOUZA, A. T.; SILVA, M. R. Effect of plant spacing on growth, development and yield of cassava in a subtropical environment. **Bragantia**, v. 73, n. 4, p. 407–415, 2014.

SURIYACHAI, N.; IMMAN, S.; KREETACHAT, T.; LAOSIRIPOJANA, N.; KHONGCHAMNAN, P.; CHAMPREDA, V.; SUWANNAHONG, K.; SAKULTHAEW, C.; CHOKEJAROENRAT, C.; KREETACHAT, N. Enhanced bioethanol production from cassava waste: optimization of thermochemical pretreatment for maximum sugar recovery and characterisation of potential fractions. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 43, n. 1, 2024.

TAGNE, R. F. T.; COSTA, P.; CASELLA, S.; FAVARO, L. Optimization of biohydrogen production by dark fermentation of African food-processing waste streams. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, p. 266–276, 2024.

UMMALYMA, S. B.; SIROHI, R.; UDAYAN, A.; YADAV, P.; RAJ, A.; SIM, S. J.; PANDEY, A. Sustainable microalgal biomass production in food industry wastewater for low-cost biorefinery products: a review. **Phytochem Reviews**, Springer Science and Business Media B.V., 2023.

VAN ACKER, S.; PACCHIAROTTI, S.; BOSTOEN, K. The Introduction of Sugarcane in West-Central Africa: Insights from Comparative Bantu Word Histories. **Nordic Journal of African Studies**, v. 33, n. 1, p. 16–45, 2024.

VIDIGAL FILHO, P. S.; ORTIZ, A. H. T.; PEQUENO, M. G. Mandioca: do plantio à colheita. **Oficina de Textos**, 2022.

WIJITKOSUM, S.; SRIBURI, T.; CHUTIVISUT, P. Biochar amendment improves soil properties and augments soil bacteria on continuous maize cultivation over two years. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2025.

WOSIACKI, G.; FIORETTO, A. M. C.; CEREDA, M. P. Utilização da manipueira para produção de biomassa oleaginosa. In: CEREDA, M. P. (org.). **Resíduos da industrialização da mandioca no Brasil**. São Paulo, p. 151–162, 1994.

YU, Q.; GAO, B.; ZHANG, X. Agricultural wastes improve soil quality and enhance the phytoremediation efficiency of economic crops for heavy metal-contaminated soils in mining areas. **Environmental geochemistry and health**, v. 47, n. 3, p. 65, 2025.

ZEBALHO, C. S.; PILECCO, I. B.; STRECK, N. A.; CARDOSO, P. S.; FREITAS, C. P. O.; VIEIRA, E. A.; SOARES, M. F.; TAGLIAPIETRA, B. L.; FERIGOLO, A. A.; SWAROWSKY, A.; FOLLMANN, D. N.; SOUZA, J. V. S.; ZANON, A. J. Assessing management factors limiting yield and starch content of cassava in the western Brazilian Cerrado. **Agronomy Journal**, 2024.

ATIVIDADE ALELOPÁTICA DE EXTRATOS DE *EUCALYPTUS* SP. E *MANGIFERA INDICA* L. SOBRE A GERMINAÇÃO DE SEMENTES E ÍNDICES FISIOLÓGICOS DE *ALLIUM* *CEPA* L.

Florine Alves de Sousa Pinheiro
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Amanda Cristine Abreu Silva
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Juliano dos Santos
Instituto Federal de Educação do Estado do Maranhão (IFMA)

Emerson Ferreira Abreu
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Carlos Eduardo Barbosa Gomes
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Leonardo da Silva Nascimento
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Luana Larissa Aires Franco
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Cláudia Quintino da Rocha
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Adriani Hass
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Ilisandra Zanandrea
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

RESUMO

Objetivo: O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial alelopático de extratos aquoso e etanólico de folhas de *Eucalyptus sp.* e *Mangifera indica* L. colocadas em germinação com o organismo teste *Allium cepa* L., por meio de bioensaios em laboratório. **Métodos:** O delineamento experimental utilizado foi em blocos inteiramente casualizados, sendo utilizado extrato aquoso e extrato etanólico de folhas de eucalipto e mangueira, com seis concentrações, sendo 0, 6, 12,5, 25, 50, e 100%, com quatro repetições por tratamento, onde cada repetição consistiu em uma placa contendo 20 sementes cada. **Resultados:** O índice de germinação das sementes diminuiu em todas as concentrações de extrato testadas tanto para eucalipto quanto para mangueira. o extrato aquoso de folhas de eucalipto apresentou alelopatia negativa apenas nas dosagens de 12,5% e 100%. Por outro lado, o extrato etanólico de eucalipto apresentou efeito alelopático negativo em todas as concentrações testadas (índice de alelopatia maior que 50%). **Conclusão:** Os extratos aquosos e etanólicos de *Eucalyptus sp.* e *Mangifera indica* L. apresentam efeito alelopático, reduzindo a germinação das sementes de *Allium cepa* L.

Palavras-chave: alelopatia; metabolismo secundário; metabólitos; crescimento; desenvolvimento.

INTRODUÇÃO

A intensificação do uso do solo agrícola, associada ao manejo inadequado e ao uso recorrente de insumos químicos sintéticos, tem contribuído significativamente para a degradação Ambiental. Isso pode ser observado em processos como erosão, contaminação do solo e da água, perda de biodiversidade e riscos à saúde humana (SANTANA, 2005; KHAN *et al.*, 2017). Simultaneamente, observa-se um aumento na demanda por sistemas produtivos que sejam mais sustentáveis, de modo a buscar alternativas de manejo que reduzam a dependência de herbicidas sintéticos e promovam menor impacto ambiental.

Dentre essas alternativas, pode-se destacar a alelopatia, que é um fenômeno ecológico caracterizado pela liberação de compostos químicos por plantas capazes de interferir positiva ou negativamente no desenvolvimento de outros organismos vegetais (IAS, 2012; FERREIRA & ÁQUILA, 2000), bem como nos processos dinâmicos de ecossistemas agrícolas e naturais (LATIF *et al.*, 2017). Esses compostos, conhecidos como aleloquímicos, são originados principalmente do metabolismo secundário e podem ser liberados por exsudação radicular, lixiviação foliar ou durante a decomposição de partes vegetais, como folhas, raízes e caules (BAIS *et al.*, 2006; SAHOO *et al.*, 2023). Estudos recentes têm demonstrado que esses aleloquímicos afetam processos fisiológicos essenciais, como germinação de sementes, crescimento inicial das plântulas, fotossíntese através da degradação de clorofilas, abertura estomática, respiração, síntese de proteínas, inibição do transporte através da membrana e atividade de enzimas essenciais ao metabolismo, indicando seu uso potencial no manejo de plantas daninhas (GULZAR *et al.*, 2017; ZHAO *et al.*, 2022, BASHAR *et al.*, 2023).

A produção e a atividade dos metabólitos secundários estão diretamente relacionadas a fatores ambientais, como luminosidade, disponibilidade hídrica, temperatura e características do solo, além de sua influência nas interações com microrganismos presentes no solo (BASHAR *et al.*, 2023). Essas variáveis influenciam tanto a concentração quanto a eficiência dos aleloquímicos, o que reforça a necessidade de estudos experimentais que avaliem seus efeitos sob condições controladas. Nesse contexto, a identificação de espécies vegetais com comprovado potencial alelopático pode subsidiar o desenvolvimento de

bioherbicidas e outras tecnologias de base natural, alinhadas aos princípios da agricultura sustentável (BLAIR *et al.*, 2009; DEBAEKE *et al.*, 2021).

Dentre as espécies amplamente distribuídas no Brasil, *Eucalyptus* sp. (eucalipto) e *Mangifera indica* L. (mangueira) têm sido citadas na literatura por apresentarem compostos secundários biologicamente ativos. Espécies do gênero *Eucalyptus* produzem óleos essenciais, taninos e terpenoides associados à inibição do crescimento de plantas competidoras, sendo investigadas como ferramentas auxiliares no controle de plantas invasoras (GOETZE & THOMÉ, 2004; YAMAGUSHI; GUSMAN; VESTENA, 2011). Da mesma forma, a mangueira apresenta elevada diversidade de compostos fenólicos, como flavonoides e xantonas, com reconhecida atividade biológica, incluindo efeitos alelopáticos e antioxidantes (BERARDINI *et al.*, 2005; ABDALLA *et al.*, 2007; BARRETO *et al.*, 2008).

Há necessidade de descobertas de novas moléculas de herbicidas e métodos naturais que não causam danos ao solo e ao meio ambiente (MORAIS *et al.*, 2017). Apesar do avanço das pesquisas na área, ainda são escassos estudos comparativos que integrem a avaliação do potencial alelopático e o perfil fitoquímico de extratos obtidos por diferentes solventes, especialmente utilizando bioensaios simples e sensíveis, pois alelopatia é uma técnica natural de baixo custo, não poluente e que não requer equipamentos sofisticados para sua aplicação (OLIVEIRA *et al.*, 2020). Parte-se da hipótese de que tanto extratos aquosos quanto etanólicos de folhas de *Eucalyptus* sp. e *Mangifera indica* L. apresentem composição química distinta e efeitos diferenciados sobre a germinação de sementes e o crescimento inicial de plantas indicadoras.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial alelopático e o perfil fitoquímico de extratos aquoso e etanólico de folhas de *Eucalyptus* sp. e *Mangifera indica* L. sobre a germinação de sementes de *Allium cepa* L., por meio de bioensaios conduzidos em laboratório, contribuindo para o entendimento das interações químicas entre plantas e para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis no manejo agrícola.

MÉTODOS

Local de Coleta

Foram coletadas folhas de *Mangifera indica* L. e *Eucalyptus* sp. na Universidade Federal do Maranhão, *Campus* Dom Delgado, São Luís, Maranhão (-2°31'52" S, 43°52'34" W). As folhas foram coletadas e secas em uma estufa com circulação de ar, a 60°C, por 48 horas, e posteriormente trituradas.

Preparo dos Extratos

Para a obtenção do extrato aquoso, foi adicionado 100g de massa seca das folhas em 1L de água destilada, o qual permaneceu em infusão em temperatura ambiente, no escuro, por 72 horas. Após este período, o extrato foi filtrado em papel filtro e mantido em geladeira, ao abrigo da luz.

Para obtenção do extrato etanólico 95%, foi realizada a maceração das folhas secas utilizando etanol 95%, deixando a solução em infusão por 72h. Após, o solvente foi filtrado e teve seu volume reduzido em um rotaevaporador sob pressão reduzida, obtendo-se o extrato bruto etanólico 95%. A determinação da massa seca deste extrato foi feita pelo método gravimétrico (FARMACOPÉIA BRASILEIRA, 2002).

Perfil Fitoquímico dos Extratos

Cada extrato bruto foi submetido a uma avaliação para obtenção do perfil das amostras, utilizando a cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), e os extratos secos foram diluídos a 10 mg/mL em solvente HPLC. Posteriormente, alíquotas de 20 µL foram injetadas diretamente no HPLC-PDA com detecção a 254 nm. Utilizou-se um sistema HPLC modelo Shimadzu (Shimadzu Corp., Kyoto, Japan), consistindo de um módulo de distribuição de solvente com uma bomba de pistão de duplo, detector UV-VIS (SPA-10A). A coluna utilizada foi Luna 5 µm C18 100 A (150 µm x 4.6 µm). Os solventes de eluição utilizados foram A (ácido acético 2% em água) e B (metanol). As amostras foram eluídas de acordo com o seguinte gradiente: 5% a 100% de B em 50 min. O fluxo foi

de 1 mL / min. A temperatura da coluna foi de 20 °C e o volume de injeção da amostra foi de 20 µL. Os dados foram coletados e processados utilizando o software LC Solution (Shimadzu).

Potencial Alelopático

Para analisar o potencial alelopático, foram utilizadas cinco concentrações de cada extrato: 100% (extrato bruto), 50%, 25%, 12,5%, 6% e zero (controle negativo, somente com água destilada).

Foi utilizado *Allium cepa* L. como planta teste. As sementes foram lavadas com água deionizada autoclavada, colocadas em placas de Petri, forradas com dois discos de papel de germinação, embebido com três mililitros do extrato, e em seguida, colocadas para germinar em local com temperatura ambiente (28 ±2°C) e fotoperíodo de 12h.

As variáveis analisadas foram: porcentagem de germinação de sementes (IG%), velocidade média de germinação (VMG), índice de velocidade de germinação (IVG), tempo médio de germinação (TMG), índice de alelopátia (IA%), crescimento radicular médio (CRM) e índice de velocidade de crescimento de raiz (IVCR) (MAGUIRE, 1962; BALSALOBRE *et al.*, 2006). Logo após o processo de germinação da primeira raiz (protusão radicular), as placas foram fotografadas, por quatro dias, e analisadas em software gratuito Image J.

A germinabilidade das sementes baseia-se no conceito de germinação fisiológica citada por Marcos Filho (2005), que aponta o início da germinação com a embebição da semente e seu final com a protrusão da radícula. A contagem de sementes germinadas foi realizada a cada 12 horas. Para o comprimento da raiz foi medida a distância, em mm, do colo até o ápice meristemático.

A Germinação (G) foi calculada pela fórmula $G = (N/100) \times 100$, em que: N = número de sementes germinadas ao final do teste. Unidade: %. O Índice de velocidade de germinação (IVG) foi calculado pela fórmula $IVG = \sum (n_i / t_i)$, em que: n_i = número de sementes que germinaram no tempo 'i'; t_i = tempo após instalação do experimento. Unidade: adimensional. O Tempo médio de germinação (TMG) foi calculado pela fórmula $TMG = (\sum n_i t_i) / \sum n_i$, em que: n_i = número de sementes germinadas por dia; t_i = tempo de incubação; $i = 1 \rightarrow 63$ dias. Unidade: dias. A Velocidade média de germinação (VMG) foi calculada

pela fórmula $VMG = 1/t$ em que: t = tempo médio de germinação. Unidade: dias⁻¹. O Índice de Velocidade de Crescimento da Raiz (IVCR): foicalculado pela fórmula $\sum (ci/ti)$ em que ci = tamanho médio das radículas no tempo i ; ti = tempo após instalação do teste; $i = 1-6$. O Crescimento Radicular Médio (CRM) = $(\sum Cmi) /t$ em que cmi = comp. Médio no dia i ; t = tempo total do experimento; $i = 1-6$.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições por tratamento, e a unidade experimental foi constituída por uma placa contendo 20 sementes. Todos os dados foram avaliados usando ANOVA, seguida do teste de Dunnett ($p < 0,05$), utilizando o software GraphPadPrism (*GraphPad Software, San diego, CA*).

RESULTADOS

Perfil Fitoquímico dos Extratos

Foi possível observar grande complexidade e diversidade na composição química da matriz, avaliada pelo grande número de picos eluídos ao longo da corrida cromatográfica.

O perfil cromatográfico do extrato etanólico de folhas de eucalipto apresenta baixo pico de ácidos fenólicos no início, e em maior quantidade picos contendo taninos ou resíduos e média concentração de flavonoides pelo fato de ser apolar, no final do espectro (Figura 1A). Para o extrato aquoso foliar de eucalipto, foram predominantes flavonoides agliconas por apresentar solubilidade em solventes orgânicos polares e, por possuírem caráter fenólico, em soluções aquosas alcalinas (Figura 1B). Resultados semelhantes foram observados por Sivagurunathan e colaboradores (1997), onde verificaram que os compostos químicos como ácidos gálico e outros compostos fenólicos presentes em folhas, cascas e raízes de três espécies de eucalipto (*E. citriodora*, *E. globulus* e *E. tereticornis*) apresentaram efeito alelopático a sobre a cultura do tomate.

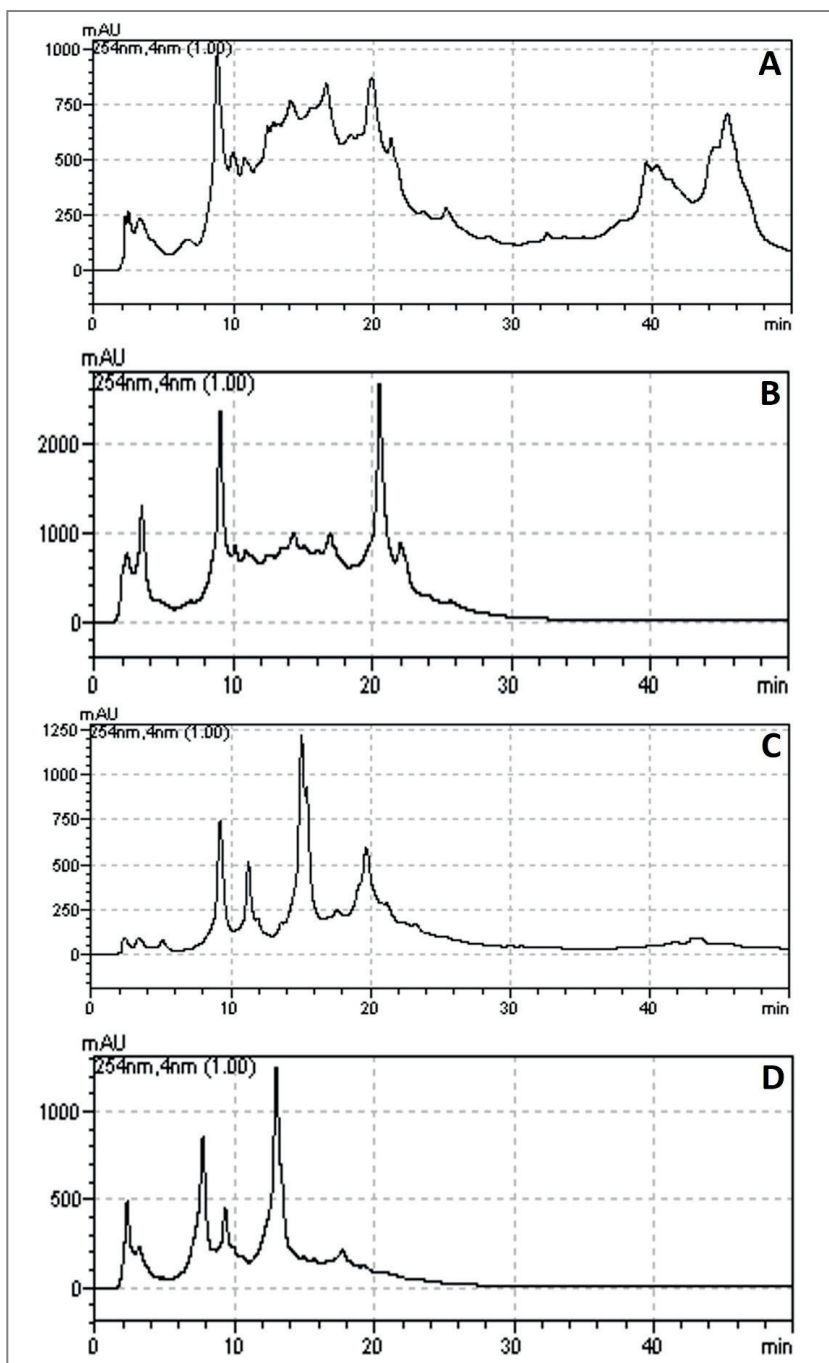
Os compostos químicos como ácidos fenólicos, taninos e flavonoides agliconas quando misturados afetou o crescimento inicial causando a redução, inibição e interferem no vigor das sementes comprovando os efeitos alelopáticos devido aos compostos químicos presentes modificando a estrutura das

sementes de cebola. A inibição do crescimento normal das plântulas de cebola tem relação com a intervenção dos compostos fenólicos alterando processos metabólicos importantes.

Os cromatogramas obtidos por HPLC-PDA mostram compostos com características relacionadas à presença de fenólicos, e a principal delas, os flavonoides e ácidos fenólicos. A comprovação da presença de flavonóides e derivados de ácidos fenólicos foram constatados pelo aparecimento de espectros com bandas características dessas classes em todos os extratos analisados. Para os extratos aquosos e etanólicos foliar de mangueira predominou os flavonoides glicosilados e os ácidos fenólicos (Figura 1C e 1D).

Quando analisadas as características do Perfil cromatográfico do extrato etanólico de folhas de mangueira, verificou-se baixo pico de ácidos fenólicos e ácido gálico, seguido por picos elevados contendo flavonoides glicosilados e ácido fenólico, por apresentar polaridade em sua estrutura (Figura 1D). A classe dos compostos fenólicos compreende os fenóis simples, os ácidos fenólicos (derivados de ácidos benzóico e cinâmico), as cumarinas, os flavonóides (flavonas, flavanonas, isoflavonas, flavonóis, flavanonóis, flavan-3-óis e antocianidinas), os estilbenos, e muitos deles apresentam atividades biológicas, tais como herbicidas e inseticidas (SOUSA *et al.*, 2007).

Figura 1 - Perfil cromatográfico do extrato etanólico foliar de eucalipto (A), extrato aquoso foliar de eucalipto (B), extrato etanólico foliar de mangueira (C), extrato aquoso foliar de mangueira (D), 254nm.



Os extratos aquosos de folhas de *Eucalyptus sp.* e *Mangifera indica L.* apresentaram em sua estrutura pouca diferença entre si por serem mais polares e bastante diversificado em relação aos extratos etanólico analisados que são apolares. Os derivados de ácidos fenólicos sempre apresentam única banda de absorção que será referente ao sistema benzílico, com máxima na região do UV variando entre 260 – 280 nm. Os Flavonóides apresentam duas bandas de absorção referentes aos sistemas aromáticos que são encontrados em agliconas: a Banda II, com máximos na faixa espectral de 240 -290 nm, atribuído ao anel A e a Banda I, com faixa máxima em espectral de 300 – 390 nm, atribuída ao anel B. A Banda I é associada à absorção de anel B, que possui o sistema cinamoil com maior extensão de conjugação eletrônica. A Banda II é atribuída ao anel A, que envolve a absorção do sistema benzoil de menor conjugação.

Potencial Alelopático

O índice de germinação das sementes diminuiu em todas as concentrações de extrato testadas tanto para eucalipto quanto para mangueira (Tabela 1). Cabe ressaltar que a germinação das sementes foi altamente comprometida quando utilizada a concentração de 100% de extrato aquoso de eucalipto, ficando 64% menor que o controle. Quando utilizado extrato etanólico de folhas de eucalipto, houve redução progressiva com o aumento da concentração testada (Tabela 1).

Em relação ao índice de alelopátia de um extrato, quando o resultado é superior a 50%, é considerado negativo para o efeito alelopático, de forma que valores acima de 50% refletem na capacidade de germinação das sementes. Neste trabalho, foi possível observar que o extrato aquoso de folhas de eucalipto apresentou alelopátia negativa apenas nas dosagens de 12,5% e 100%. Por outro lado, o extrato etanólico de eucalipto apresentou efeito alelopático negativo em todas as concentrações testadas (índice de alelopátia maior que 50%) (Tabela 1).

Resultados semelhantes foram observados por Bidinet (2006), onde o extrato de folha de eucalipto (*Eucalyptus citriodora*) reduziu a velocidade de germinação do tomate (*Lycopersicum esculentum M*), além de interferir no seu desenvolvimento inicial. Estudos realizados por Gatti *et al.* (2007) com extrato aquoso de folhas de mangueira (*Mangifera indica*) também mostraram redução da taxa de germinação e índice de velocidade de germinação de alface, aroeira

e ipê, quando em contato com esta solução, além de diminuição na velocidade e taxa de emergência de sementes de angico e aroeira e redução na emergência de sementes de cedro, quando utilizado solo coletado sob a copa da árvore.

Tabela 1 - Índice de germinação e índice de alelopatia de sementes de *Allium cepa* L. submetidas ao tratamento com diferentes concentrações de extrato aquoso e etanólico de folhas de *Eucalyptus* sp. e *Mangífera indica* L.

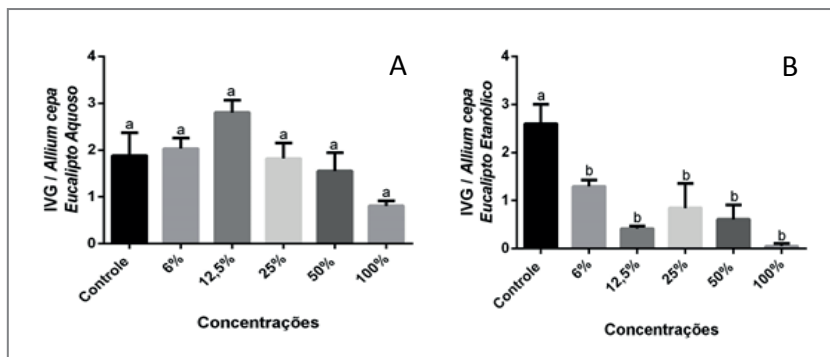
Tratamentos	Extrato aquoso de eucalipto	Extrato etanólico de eucalipto	Extrato aquoso de mangueira	Extrato etanólico de mangueira
Índice de Germinação (%)	0 %	46,67 a	46,67 a	46,67 a
	6%	18,33 b	11,67 b	25,00 b
	12,5%	28,33 b	6,67 b	35,00 b
	25%	18,33 b	10,00 b	30,00 b
	50%	21,67 b	3,33 c	3,33 c
	100%	8,33 c	1,67 c	25,00 b
Índice de Alelopatia (%)	0%	0,00	0,00	0,00
	6%	0,00	53,33	50,00
	12,5%	63,64	73,33	3,57
	25%	0,00	60,00	35,71
	50%	18,18	86,67	92,86
	100%	54,55	93,33	42,86

Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Dunnet ($\alpha < 0,05$).

Fonte: Autores.

Para o Índice de Velocidade de Germinação (IVG), verificou-se que, apesar de não haver diferença estatística, as sementes germinaram mais lentamente com a concentração de 100% de extrato aquoso de eucalipto (Figura 2A). Quando utilizado extrato etanólico de eucalipto, houve uma diminuição drástica na velocidade de germinação das sementes, em todas as concentrações testadas, destacando que com a concentração de 100% de extrato o IVG houve uma queda expressiva em relação às demais concentrações (Figura 2B).

Figura 2 - Índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de *Allium cepa* com diferentes concentrações de extrato aquoso de folhas de eucalipto (A) e extrato etanólico de folhas de eucalipto (B).



Não houve diferença no tempo médio de germinação (TMG) (Figura 3A e 3B) e na velocidade média de germinação (Figura 4A e 4B) das sementes tanto para o extrato aquoso quanto para o etanólico de eucalipto. Resultados parecidos foram analisados por Ferreira, Souza e Faria (2007), quando utilizaram extrato de *Eucalyptus citriodora* Hook e *Pinus elliottii* Engelm, em que não observaram diferença estatística na redução do percentual de germinação e no crescimento radicular quando testado em sementes de *Lactuca sativa* L. independentes das concentrações submetidas.

Figura 3 - Tempo médio de germinação (TMG) de sementes de *Allium cepa* com diferentes concentrações de extrato aquoso de folhas de eucalipto (A) e extrato etanólico de folhas de eucalipto (B).

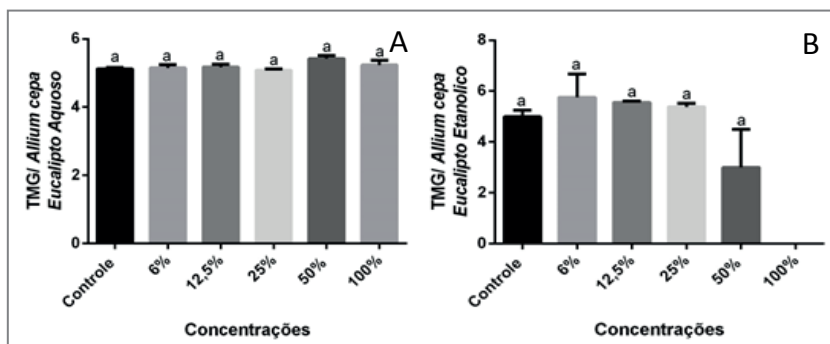
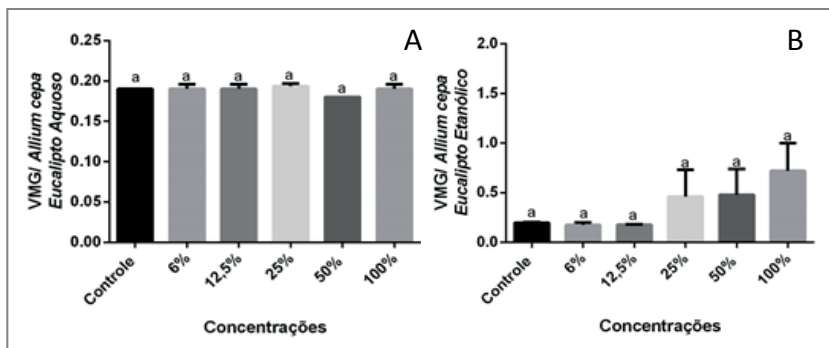


Figura 4 - Velocidade média de germinação (VMG) de sementes de *Allium cepa* com diferentes concentrações de extrato aquoso de folhas de eucalipto (A) e extrato etanólico de folhas de eucalipto (B).



Houve um estímulo no crescimento radicular (CRM) e no índice de velocidade de crescimento da raiz (IVCR) das sementes tratadas com extrato aquoso de eucalipto a 6%, enquanto que nas demais concentrações não houve diferença em relação ao controle (Figuras 5A e 6A). Quando tratadas com extrato etanólico de eucalipto, houve redução no comprimento radicular em todas as concentrações testadas, quando comparadas ao controle (Figuras 5B e 6B).

Figura 5 - Crescimento radicular médio (CRM) de sementes de *Allium cepa* com diferentes concentrações de extrato aquoso de folhas de eucalipto (A) e extrato etanólico de folhas de eucalipto (B).

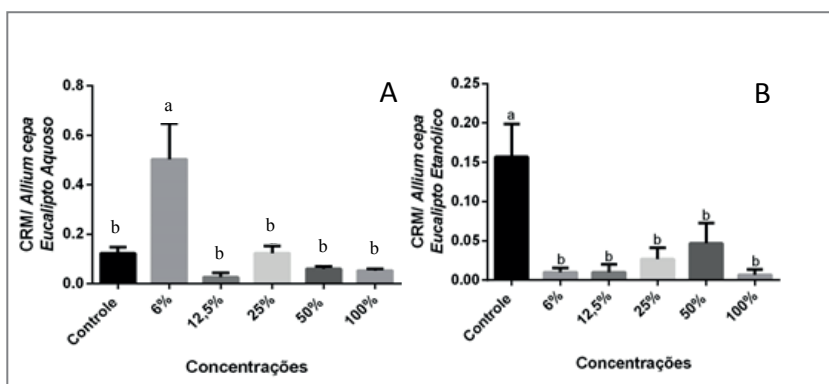
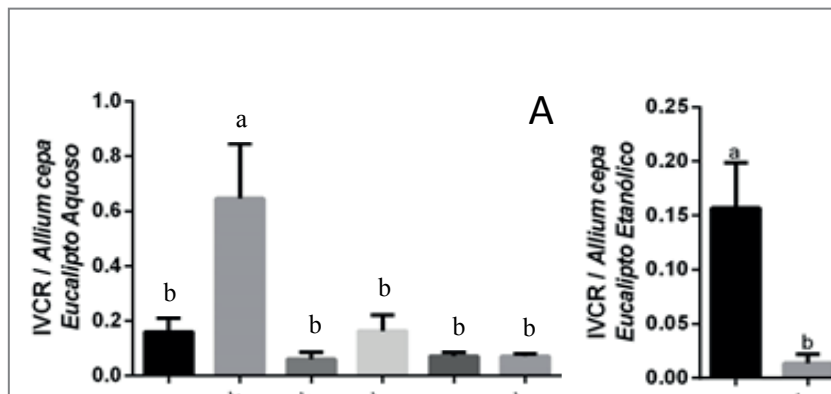


Figura 6 - Índice de velocidade de crescimento radicular (IVCR) de sementes de *Allium cepa* L. com diferentes concentrações de extrato aquoso de folhas de eucalipto (A) e extrato etanólico de folhas de eucalipto (B).

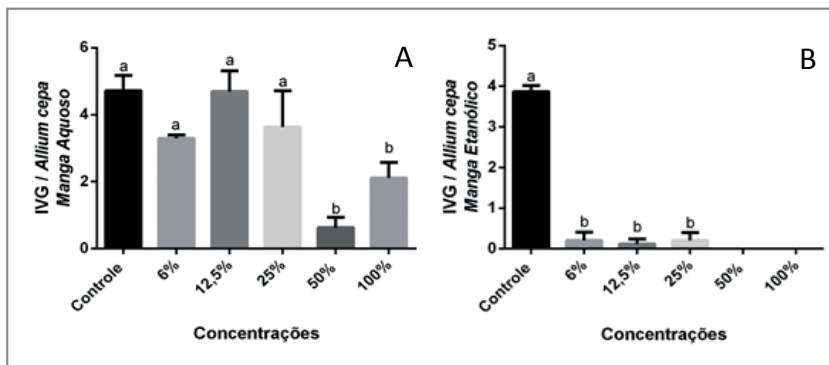


O extrato aquoso de mangueira fez com que a germinação diminuísse em todas as concentrações testadas, entretanto essa redução foi mais acentuada com 50% do extrato, onde a germinação foi 72% menor que no controle. Já o extrato etanólico de mangueira causou uma redução já na menor concentração testada (6%), impedindo completamente a germinação nas concentrações de 50% e 100% de extrato (Tabela 1).

Em relação ao índice de alelopátia, quando testado o extrato aquoso de mangueira, houve efeito alelopático negativo nas concentrações de 6% e 50%, enquanto que o extrato etanólico desta planta apresentou efeito alelopático em todas as concentrações testadas (Tabela 1). É importante ressaltar que essas diferenças podem estar relacionadas, além da ação do extrato, à qualidade fisiológica das sementes, pois mesmo no controle, onde foi utilizada somente água, a germinação não chegou a 50%, e que novos testes serão realizados para confirmar esses resultados.

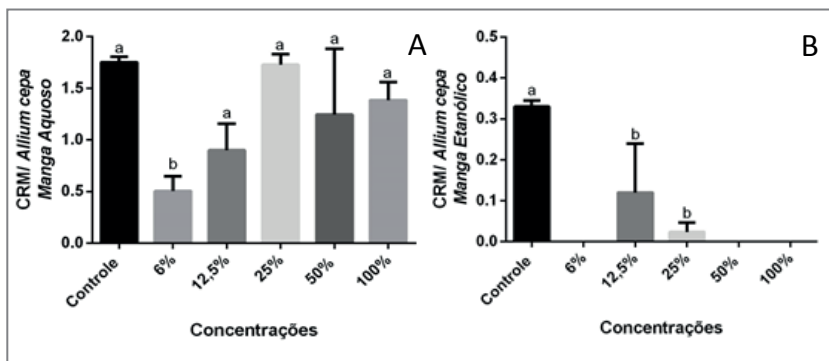
O IVG das sementes foi menor nas concentrações de 50% e 100% do extrato aquoso de mangueira (Figura 7A). Quando testado o extrato etanólico, houve redução acentuada desta variável em todas as concentrações testadas (Figura 7B), indicando a presença de substâncias que retardam ou inibem o processo de germinação de *A. cepa* L.

Figura 7 - Índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de *Allium cepa* L. com diferentes concentrações de extrato aquoso de folhas de mangaueira (A) e extrato etanólico de folhas de mangaueira (B).



O crescimento radicular foi menor na concentração de 6% de extrato aquoso de mangaueira, não diferindo do controle nas demais concentrações (Figura 8A). Por outro lado, houve um menor crescimento radicular com o extrato etanólico desta planta, em todas as concentrações testadas (Figura 8B).

Figura 8 - Crescimento radicular médio (CRM) de *Allium cepa* L. com diferentes concentrações de extrato aquoso de folhas de mangaueira (A) e extrato etanólico de folhas de mangaueira (B).



Resultados semelhantes foram observados por Ferreira *et al.* (2008) quando avaliaram o efeito de extratos etanólicos de *Eucalyptus citriodora* Hook. sobre a germinação de alface (*L. sativa* L.) e verificaram que a aplicação do extrato desde concentrações de 2% reduziu significativamente o índice de velocidade de germinação e o índice de velocidade do crescimento radicular. Segundo

os resultados obtidos por Cremonez *et al.* (2013), o extrato de eucalipto pode apresentar efeito inibitório sobre a germinação e desenvolvimento, ou apenas no decréscimo destes. Corroborando também com os resultados alcançados por Yamagushi; Gusman; Vestena (2011), em que o índice de velocidade de germinação e o desenvolvimento inicial apresentam atrasos no crescimento da plântula, através dos resultados obtidos nesta pesquisa pode-se afirmar que o eucalipto é uma das espécies com maior potencial inibitório sobre hortaliças. Segundo Bedin *et al.* (2006), a semente do tomateiro não teve diferença significativa na germinação quando submetidas ao extrato foliar de eucalipto, mas à medida que as concentrações aumentaram houve um atraso na germinação das sementes interferindo na produção final.

Os efeitos alelopáticos negativos, quando analisados em campo, afetam o processo de desenvolvimento inicial da cultura, causando modificações em sua estrutura, pois os compostos aleloquímicos podem atuar como sinalizadores no processo do desgaste celular (ALMEIDA *et al.*, 2008). Alterações nas vias metabólicas internas reproduzem danos na ontogênese modificando etapas importantes para o desenvolvimento inicial das plântulas (FERREIRA; AQUILA, 2000).

Dessa forma, a efetividade dos extratos está relacionada com modo de preparo/obtenção do extrato e o tipo de solvente em que o material vegetal é submetido. Os extratos de mangueira apresentam compostos químicos com alta atividade fitotóxica na germinação de *Allium cepa*. No trabalho de Comiotto *et al.* (2011) foram obtidos resultados similares, onde o extrato aquoso de *Schinus terebinthifolius Raddi* mostrou efeito inibitório dose dependente para a taxa de germinação e índice de velocidade de germinação de sementes de alface. Segundo Ferreira e Borghetti (2004), o efeito alelopático interfere na velocidade de germinação ou através de processos específicos. E esse efeito pode interromper o fluxo das vias metabólicas, modificando o padrão polimodal de distribuição de germinação das sementes.

Os extratos etanólicos foliares de *Eucalyptus sp.* e *Mangifera indica L.* limitaram a germinação de sementes de *Allium cepa*, esse fato está relacionado à grande captação de grupos químicos devido à sua polaridade. Grande parte dos compostos aleloquímicos aumentam a sua efetividade quando misturados com outras classes de compostos (LARCHER, 2006), e a alta toxicidade no extrato é

responsável por esclarecer os resultados obtidos no índice de germinação que através de interações potencializa o efeito negativo sobre as sementes utilizadas.

De acordo com o aumento das proporções dos extratos, nota-se que ocorreu uma diminuição no índice de germinação. Isso se deve ao fato de que as concentrações de aleloquímicos ficaram maiores, resultando em um número menor de sementes que conseguiram emitir radícula. Os extratos aquosos apresentados são mais polares quando em contato com os compostos alelopáticos por apresentar camadas mais densas com facilidade para solvatar, e apresentar menor número de substâncias.

De acordo com Jacobi e Ferreira (1991), um vegetal pode inibir o crescimento de outros em altas concentrações, enquanto em baixa concentração podem estimular o desenvolvimento do mesmo, em descontração com o trabalho de Seabra Júnior *et al.* (2017) onde a influência alelopática foi proporcional à concentração dos extratos, resultando em influência inibitória observada também a baixas concentrações. As modificações observadas nos padrões de germinação sugerem que ocorreram alterações de rotas metabólicas e alteração dos processos fundamentais para o desenvolvimento do embrião, modificando sua ontogênese. Estas alterações podem estar relacionadas com efeitos sobre a permeabilidade de membranas, transcrição e tradução de material genético, as reações enzimáticas e a respiração celular (SILVA, 2012).

Os resultados obtidos utilizando os extratos de eucalipto corroboram com os resultados encontrados por Yamagushi; Gusman; Vestena (2011), e o efeito alelopático observado nos ensaios pode ser explicado devido à presença de compostos fenólicos como eucaliptol, taninos e monoterpenos presentes no eucalipto. Autores como Souto, Gonzalez e Reigosa (1994) também perceberam que *Eucalyptus globulus* e *Pinus radiata* afetaram o crescimento e o desenvolvimento de sementes de alface devido aos compostos fenólicos presentes em suas estruturas.

Ensaios laboratoriais utilizando extratos vegetais para analisar efeito alelopático em outras espécies de plantas são de suma importância para a produção e manejo de culturas, de forma que podem amenizar os danos causados aos biosistemas e contribuindo com métodos relativamente baratos para a prática da agricultura sustentável (SOUZA-FILHO *et al.*, 2010; GOLDFARB *et al.*, 2009).

CONCLUSÃO

As classes de compostos químicos encontrados no extrato aquoso de eucalipto foram ácido fenólico e flavonoides aglicanos e no extrato etanólico foram os ácidos fenólicos, taninos e flavonoides. No extrato aquoso e etanólico de folhas de mangueira foram os ácidos fenólicos e flavonoides glicolizados. Os extratos aquosos e etanólicos de folhas de eucalipto promoveram queda na taxa de germinação de sementes de cebola, independente da concentração.

O extrato aquoso de folhas de mangueira faz com que a germinação diminuísse em todas as concentrações testadas, sendo mais acentuada a 50%. Já o extrato etanólico causou essa redução a partir da menor concentração testada. Os extratos aquosos e etanólicos de *Eucalyptus sp.* e *Mangifera indica L.* apresentam efeito alelopático na germinação das sementes de *Allium cepa L.*

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, A.E.; DARWISH, S.M.; AYADA, E.H.E.; EL-HAMAHMY, R.M. Polyphenols of mango (*Mangifera indica L.*) by-products. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, p. 5739–5745, 2007.
- BASHAR, S. M.; TORODE, A. M.; KHAN, G. A.; ALI, M. Environmental regulation of plant secondary metabolites and allelopathy. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 196, p. 1–12, 2023.
- ALMEIDA, G.D; ZUCOLOTO, M.; ZETUN, M.C.; COELHO, I.; SOBREIR, F.M. Estresse oxidativo em células vegetais mediante aleloquímicos. **Revista Facultad Nacional de Agronomía**, v. 61, n. 1, p. 4237-4247, 2008.
- BAIS, H.P.; WEIR, T.L.; PERRY, L.G.; GILROY, S.; VIVANCO, J.M. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. **Annual Review of Plant Biology**, v. 57, p. 233–266, 2006.
- BARRETO, J.C.; TREVISAN, M.T.S.; HULL, W.E.; ERBEN, G.; BRITO, E.S.; PFUNDSTEIN, B.; WURTELE, G.; SPIEGELHALDER, B.; OWEN, R.W. Characterization and quantitation of polyphenolic compounds in bark, kernel, leaves, and peel of mango (*Mangifera indica L.*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 14, p. 5599-5610, 2008.
- BEDIN, C.; TRECENTE, L.B.; SILVA, V.C.; SANTANA, J.M. Efeito alelopático de extrato de eucalyptus citriodora na germinação de sementes de tomate (*Lycopersicum esculentum M.*). **Revista Científica Eletônica de Agronomia**, ano V, n. 10, 2006.
- BERARDINI, N.; FEZER, R.; CONRAD, J.; BEIFUSS, U.; CARLE, R.; SHEIEBER, A. Screening of mango (*Mangifera indica L.*) cultivars for their contents of flavonol O- and xanthone C-glycosides, anthocyanins and pectin. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, p. 1563-1570, 2005.

BLAIR, A.C.; WESTON, L.A.; NISSEN, S.J.; BRUNK, G.R.; HUFBAUER, R.A. The importance of analytical techniques in allelopathy studies with the reported allelochemical catechin as an example. **Biological Invasions**, v. 11, n. 2, p. 325-332, 2009.

CARMO, F.M.S.; BORGES, E.E.L.; TAKAKI, M.M. Alelopatia de extratos aquosos de canelas assafrás (Ocotea odorifera (Vell.) Rohrer). **Acta Botanica Brasilica**, v. 21, p. 697-705, 2007.

COMIOTTO, A.; MORAES, D.M.; LOPES, N.F. Potencial alelopático de extratos aquosos de aroeira sobre germinação e crescimento de plântulas de alface. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 10, n. 3, p. 23-31, 2011.

CREMONEZ, F.E.; CREMONEZ, P.A.; CAMARGO, M.P.; FEIDEN, A. Principais plantas com potencial alelopático encontradas nos sistemas agrícolas brasileiros. **Acta Iguazu**, v.2, p. 70-88, 2013.

DEBAEKE, P.; CASADEBAIG, P.; LANGLADE, N.B. New challenges for sunflower ideotyping in changing environments and more ecological cropping systems. **OCL**, v. 28-29, p. 1-23, 2021.

DHAWAN D.; GUPTA J. Research article comparison of different solvents for phytochemical extraction potential from datura metel plant leaves. **International Journal of Biology and Chemistry**, v. 11, p. 17-22, 2017.

FERREIRA, A.G.; AQUILA, M.E.A. Alelopatia: uma área emergente da ecofisiologia. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 12, n. 1, p. 175-204, 2000.

FERREIRA, A.G.; BORGUETTI, F. Germinação: do básico ao aplicado. Porto Alegre: Artmed. 323p, 2004.

FERREIRA, M.C.; SOUZA, J.R.P.; FARIA, T.J. Potenciação alelopática de extratos vegetais na germinação e no crescimento inicial de picão-preto e alface. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 4, p. 1054-1060, 2007.

GOETZE, M.; THOMÉ, G.C.H. Efeito alelopático de extratos de *Nicotiana tabacum* e *Eucalyptus grandis* sobre a germinação de três espécies de hortaliças. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 10, n. 1, p. 43-50, 2004.

GOLDFARB, M.; PIMENTEL, L.W.; PIMENTEL, N.W. Alelopatia: Relações nos agroecossistemas. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 3, n. 1, p. 23-28, 2009.

GRISI, P.U. (2010). **Potencial alelopático de *Sapindus saponaria* L. (Sapindaceae)**. 127 p. Dissertação (Mestrado em ecologia e Recursos Naturais). Universidade Federal de São Carlos São Carlos, São Carlos-SP.

GULZAR, A.; SIDDIQUI, M.B. Allelopathic effect of *Calotropis procera* (Ait.) R. Br. on growth and antioxidant activity of *Brassica oleracea* var. botrytis. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 16, n. 4, p. 375-382, 2017.

GUSMAN, G. S. *et al.* Allelopathy in agricultural systems. *Planta Daninha*, v. 33, p. 749-758, 2015.

IAS – International Allelopathy Society. **Constitution and Bylaws**. 2012. Disponível em < <http://www-ias.uca.es/bylaws.htm#SECTION>>. Acesso em: Dez, 2019.

JACOBI, U.S.; FERREIRA, A.G. Efeitos alelopáticos de *Mimosa bimucronata* (DC) OK. sobre espécies cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 7, p. 935-943, 1991.

KHAN, A.U.; ULLAH, F.; MEHMOOD, S.; IRSHAD, M.; KHAN, F.U. Allelopathic effects of *Jatropha curcas* L. leaf aqueous extract on early seedling growth of *Parthenium hysterophorus*. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 30, n. 1, p. 45-54, 2017.

KUO, Y.L.; CHOU, C.H.; HU, T.W. Allelopathic potencial of *Leucaena leucocephala*. *Leucaena. Research Report*, v. 3, p. 65-70, 1986.

LATIF S.; CHIAPUSIO G.; WESTON L.A. **Allelopathy and the Role of Allelochemicals in Plant Defence**. In: **How Plants Communicate with their Biotic Environment**; Becard G.B.T.-A. in B.R., Ed.; Academic Press, v. 82, p. 19-54, 2017.

MAGUIRE, J.D. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, v. 2, n. 2, p. 176-177, 1962.

MANO, A.R.O. (2006). **Efeito alelopático do extrato aquoso de sementes de cumaru (*Amburana cearensis* S.) sobre a germinação de sementes, desenvolvimento e crescimento de plântulas de alface, picão-preto e carrapicho**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Agronomia, Fitotecnia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-Ceará.

Ministério da Saúde. **Farmacopéia Brasileira** (2002). São Paulo: Atheneu, SP Ltda. 4 ed. Parte II. http://portal.anvisa.gov.br/documents/33832/260950/4_edicao_fasc4.pdf/0368065b-cbf3-45b8-8714-d4a9db9b204b Acesso em: Set. 2019.

MORAIS, P.L.D.; PINHEIRO, E.B.; ARAUJO, E.L.; AMBRÓSIO, M.M.Q.; PONTES, F.M. Diagnóstico Fitossanitário da Produção Integrada de Manga no Vale do Assu (RN). **Magistra**, v. 26, n. 2, p. 231-241, 2017.

OLIVEIRA, Y.R.; SILVA, P.H.; ABREU, M.C.; LEAL, C.B.; OLIVEIRA, L.P. Potencial alelopático de espécies da família Fabaceae Lindl. **Ensaios e Ciência**, v. 24, n. 1, 2020.

PEREIRA, R.J.; CARDOSO M.G. Metabólitos secundários vegetais e benefícios antioxidantes. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. p. 146-152, 2012.

SAHOO, T.R. *et al.* Effects of sunflower residue management options on productivity and profitability of succeeding rice under different crop establishment methods. **Field Crops Research**, v. 290, p. 108763, 2023.

SANTANA, D.P. **A agricultura e o desafio do desenvolvimento sustentável. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. Embrapa Milho e Sorgo**. Comunicado Técnico, 132. 2005. 18p.

SEABRA-JÚNIOR, E. Analysis of allelopathic effects of *Canavalia ensiformis* in *Jatropha curcas*. **Ciência e Técnica Vitivinícola**, v. 32 n. 11, p. 82-92., 2017.

SEMERDJIEVA, I. *et al.* Allelopathic effects of Juniper essential oils on seed germination and seedling growth of some weed seeds. **Industrial Crops and Products**, v. 180, p. 114768, 2022.

SILVA, P.S.S. Atuação dos aleloquímicos no organismo vegetal e formas de utilização da alelopatia na agronomia. **Biotemas**, v. 21, n. 3, p. 65-74, 2012.

SIVAGURUNATHAN, M.; DEVI, G.S.; RAMASAMY, K. Allelopathic compounds in *Eucalyptus* spp. **Allelopathy Journal**, v. 4, p. 313-320, 1997.

SOUSA, C.M.M.; SILVA, H.R.; VIEIRA-JR, G.M.; AYRES, M.C.C.; COSTA, C.L.S.; ARAÚJO, D.S.; CALVACANTE, L.C.D.; BARROS, E.D.S.; ARAÚJO, P.B.M.; BRANDÃO, M.S.; CHAVES, M.H. Fenóis totais e atividade antioxidante de cinco plantas medicinais. **Química Nova**, v. 30, n. 2, p. 351-355, 2007.

SOUTO, X.C.; GONZALEZ, L.; REIGOSA, M.J. Comparative analysis of allelopathic effects produced by four forestry species during decomposition process in their soils in Galicia. **Journal of Chemical Ecology**, n. 20, p. 3005 - 3015, 1994.

SOUZA-FILHO, A.P.S.; GUILHON, G.M.S.P.; SANTOS, L.S. Metodologias empregadas em estudos de avaliação da atividade alelopática em condições de laboratório – revisão crítica. **Planta Daninha**, v. 28, n. 3, p. 689-697, 2010.

TEIXEIRA, C.M.; CARVALHO, G.J.; ARAÚJO, J.B.S. Potencial alelopático de plantas de cobertura no controle de picão-preto (*Bidens pilosa* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 3, p. 91-695, 2015.

TOKURA, L.K.; NÓBREGA, L.H.P. Alelopatia de cultivos de cobertura vegetal sobre plantas infestantes. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 28, n. 3, p. 379-384, 2006.

YAMAGUSHI, M.Q.; GUSMAN, G.S.; VESTENA, S. Efeito alelopático de extratos aquosos de *Eucalyptus globulus* Labill. e de *Casearia sylvestris* Sw. sobre espécies cultivadas. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 4, p. 1361-1374, 2011.

ZHAO, J.; YANG, Z.; ZOU, J.; LI, Q. Allelopathic effects of sesame extracts on seed germination of moso bamboo and identification of potential allelochemicals. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 6661, 2022.

EXTRAÇÃO ORGANOSOLV DE LIGNINA A PARTIR DE BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS PARA APLICAÇÕES EM BIOCAMPÓSITOS SUSTENTÁVEIS

Jordanna Layse Bezerra Costa

Laboratório de Tecnologias Energéticas (LABTEN-UFRN)

Aisha Victória Silva Pereira

Laboratório de Tecnologias Energéticas (LABTEN-UFRN)

Daniel Queiroz Nobre

Laboratório de Tecnologias Energéticas (LABTEN-UFRN)

Adriano Magalhães Freitas

Laboratório de Tecnologias Energéticas (LABTEN-UFRN)

Daynara Alves da Silva Sousa

Laboratório de Tecnologias Energéticas (LABTEN-UFRN)

Gustavo Oliveira De Paula

Laboratório de Tecnologias Energéticas (LABTEN-UFRN)

Josuel dos Santos Araújo

Laboratório de Tecnologias Energéticas (LABTEN-UFRN)

Rafael Viana Sales

Laboratório de Tecnologias Energéticas (LABTEN-UFRN)

Heloise Oliveira Medeiros de Araújo Moura

Laboratório de Tecnologias Energéticas (LABTEN-UFRN)

Luciene Santos de Carvalho

Laboratório de Tecnologias Energéticas (LABTEN-UFRN)

RESUMO

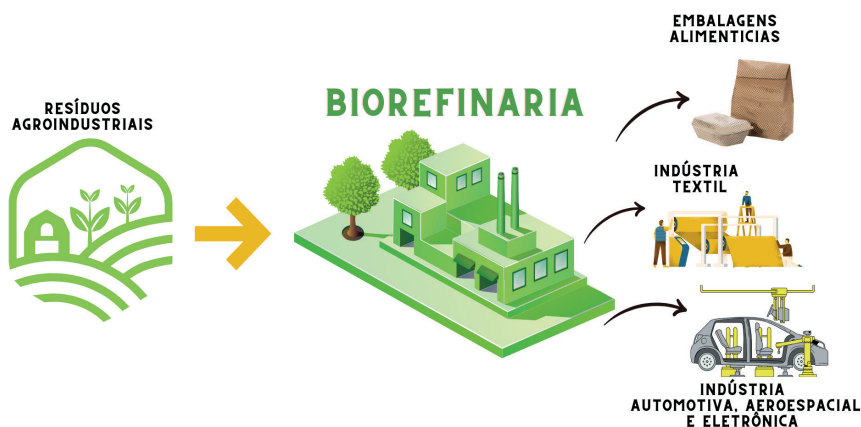
A crescente demanda por materiais sustentáveis e a redução da dependência de fontes fósseis têm impulsionado pesquisas voltadas ao aproveitamento de resíduos lignocelulósicos. Entre os principais componentes dessas biomassas, a lignina se destaca pelo elevado teor aromático, ampla disponibilidade e alto potencial para aplicações em bioprodutos. Apesar disso, sua utilização ainda é limitada, sendo frequentemente destinada à queima ou tratada como resíduo de baixo valor agregado, o que compromete o aproveitamento integral da biomassa. Nesse contexto, a extração da lignina pelo processo organosolv surge como uma alternativa promissora, uma vez que utiliza solventes menos tóxicos, permite a obtenção de lignina com maior grau de pureza e preserva características estruturais importantes para aplicações tecnológicas. Este projeto propõe a extração, caracterização e valorização da lignina obtida a partir de diferentes biomassas residuais por meio do método organosolv, com foco em sua aplicação no desenvolvimento de biocompósitos sustentáveis. As ligninas extraídas serão caracterizadas por técnicas como difração de raios X (DRX), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e análises térmicas (TG/DTG), visando compreender sua estrutura, estabilidade térmica e grau de pureza. Paralelamente, as condições do processo de extração serão otimizadas com base nos rendimentos e nas propriedades obtidas. Posteriormente, serão conduzidos ensaios preliminares de aplicação da lignina em formulações de biocompósitos, explorando seu potencial como substituto parcial de materiais sintéticos. Espera-se que os resultados contribuam para o avanço da biorrefinaria lignocelulósica e para o fortalecimento de cadeias produtivas mais sustentáveis.

Palavras-chave: Lignina; Biorrefinaria; Resíduos; Organosolv.

BIOMASSA E LIGNINA

Ao longo das últimas décadas, os produtos químicos, em especial os polímeros, tornaram-se pilares essenciais do desenvolvimento da sociedade moderna, estando presentes em praticamente todos os setores produtivos. Suas aplicações abrangem desde embalagens alimentares, dispositivos médicos e têxteis até componentes de alta performance utilizados nas indústrias automotiva, aeroespacial e eletrônica, como está mostrado na Figura 1. Esse crescimento contínuo da demanda por materiais poliméricos impulsionou fortemente a utilização de combustíveis fósseis como principal fonte de matérias-primas da indústria química. Como consequência, esse setor consolidou-se como um dos grandes responsáveis pelas emissões globais de dióxido de carbono, sendo, até o ano de 2019, o terceiro maior emissor de CO₂ em escala mundial (Lopez *et al.*, 2023; Shorey *et al.*, 2024).

Figura 1 - Representação esquemática de uma biorrefinaria de biomassa lignocelulósica.



Fonte: Autores, 2025.

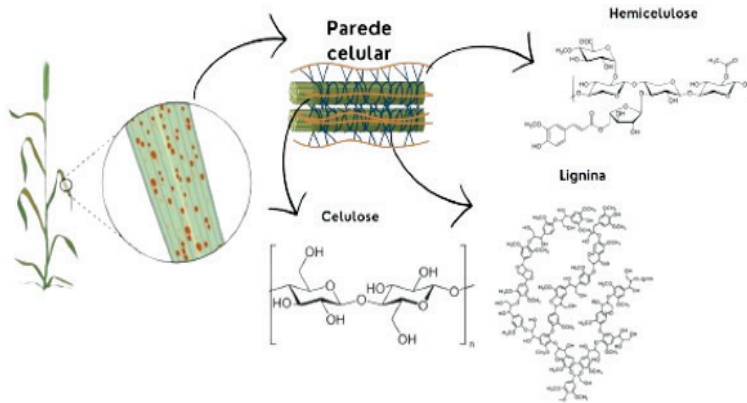
Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de transformação do modelo produtivo vigente. Para o cumprimento das metas estabelecidas pelo Acordo de Paris e para a mitigação efetiva das emissões de gases de efeito estufa, é fundamental o desenvolvimento de uma indústria química mais sustentável,

com redução significativa da dependência de matérias-primas de origem fóssil e maior inserção de fontes renováveis em seus processos produtivos (Governo Federal, 2023). Nesse contexto, o conceito de biorrefinaria surge como uma alternativa estratégica e promissora. As biorrefinarias podem ser compreendidas como indústrias análogas às refinarias de petróleo, uma vez que integram diferentes processos para a produção simultânea de combustíveis, energia e produtos químicos, porém utilizando matérias-primas renováveis.

Entre essas fontes, destaca-se a biomassa lignocelulósica, amplamente disponível e proveniente, em grande parte, de resíduos agroindustriais. O aproveitamento desses resíduos representa uma solução ambientalmente adequada e economicamente atrativa, pois alia o conceito de economia circular à geração de produtos de base biológica, incluindo polímeros de alto valor agregado e materiais avançados com elevado potencial tecnológico (Moura *et al.*, 2024).

A biomassa lignocelulósica configura-se como um recurso natural renovável, abundante e estratégico. Sua composição estrutural é majoritariamente formada por polissacarídeos, como a celulose (23%–50%) e a hemicelulose (12%–29%), além do polímero aromático lignina (13%–31%), conforme ilustrado na Figura 2. A proporção desses constituintes varia de acordo com a origem e o tipo da biomassa, influenciando diretamente suas rotas de processamento e aplicações. No contexto das biorrefinarias, esses componentes podem ser fracionados e convertidos em uma ampla gama de compostos químicos, incluindo biopolímeros, aditivos funcionais e materiais de alta tecnologia, reforçando o potencial da biomassa lignocelulósica como alternativa sustentável às matérias-primas fósseis tradicionais (Moura, 2019).

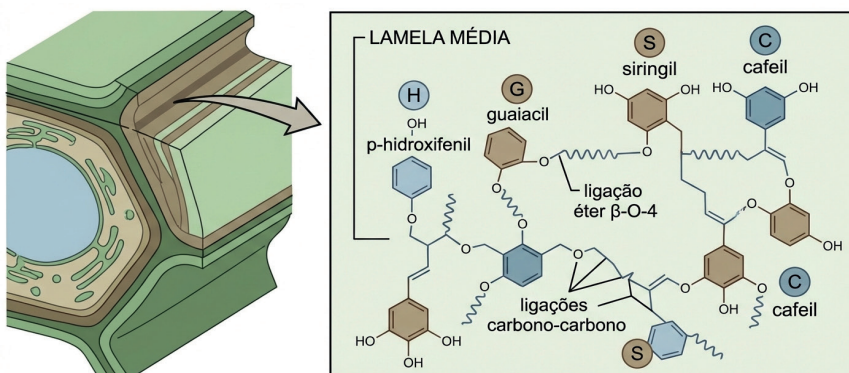
Figura 2 - Representação das biomassas lignocelulósicas.



Fonte: Autores, 2025.

A lignina destaca-se como uma alternativa promissora de matéria-prima renovável, sendo o segundo biopolímero natural mais abundante na biosfera, ficando atrás apenas da celulose. Trata-se de um polímero aromático complexo, responsável pela rigidez estrutural das plantas, pela resistência mecânica da parede celular e pela proteção contra ataques biológicos e degradação química. Sua estrutura tridimensional é formada a partir de três unidades precursoras principais, os monolignóis álcool *p*-cumarílico, álcool coniferílico e álcool sinapílico. Esses precursores são biossintetizados nas plantas e polimerizados principalmente na lamela média, originando macrounidades conhecidas como *p*-hidroxifenil (H), guaiacil (G), siringil (S) e, mais recentemente identificada, cafeil (C), que pode ser observada na Figura 3. A interligação dessas unidades ocorre majoritariamente por ligações éter do tipo β -O-4, além de outras ligações carbono-carbono, conferindo à lignina elevada complexidade estrutural e diversidade química (Linan *et al.*, 2023).

Figura 3 - Representação das biomassas lignocelulósicas.



Biossíntese e Diversidade Estrutural da Lignina: Polimerização das subunidades H, G, S e C na lamela média da planta.

Fonte: Autores, 2025.

Estima-se que existam aproximadamente 300 bilhões de toneladas de lignina distribuídas na biosfera, sendo que entre 50 e 70 milhões de toneladas são geradas anualmente como subproduto do licor negro proveniente da indústria de papel e celulose em escala global (Bajwa *et al.*, 2019). Apesar desse volume expressivo, a maior parte da lignina industrial, principalmente na forma de lignina kraft e lignossulfonatos, ainda é destinada à queima para geração de energia e vapor de processo, sendo utilizada como combustível de baixo valor agregado. Apenas uma fração reduzida é direcionada para aplicações industriais mais nobres, como a produção de dispersantes, adesivos, surfactantes e aditivos para materiais poliméricos (Bajwa *et al.*, 2019; Shorey *et al.*, 2024). Dessa forma, a valorização da lignina surge como uma estratégia fundamental no contexto das biorrefinarias, permitindo a transformação de um subproduto subutilizado em insumos químicos e materiais de maior valor econômico e tecnológico.

De acordo com Shorey (2024), a lignina pode ser obtida por diferentes rotas de extração, incluindo processos químicos, térmicos e enzimáticos. Entretanto, o desenvolvimento de métodos eficientes ainda enfrenta desafios relacionados à heterogeneidade estrutural da lignina, ao grau de degradação durante a extração e à presença de impurezas. Com o avanço do conceito de biorrefinaria, novas abordagens passaram a ser investigadas, destacando-se a lignina extraída pelo processo organosolv. Esse tipo de lignina tem ganhado

espaço na síntese de produtos de maior valor agregado, uma vez que é isenta de enxofre, emprega solventes orgânicos mais ecológicos, com baixos pontos de ebulição, inflamabilidade e volatilidade, além de utilizar pequenas quantidades de ácido inorgânico como catalisador. Como resultado, obtém-se uma lignina relativamente pura, menos degradada, quimicamente mais reativa, solúvel em diversos solventes orgânicos e adequada para conversão em uma ampla gama de produtos químicos e materiais avançados (Liu *et al.*, 2019; Linan *et al.*, 2023).

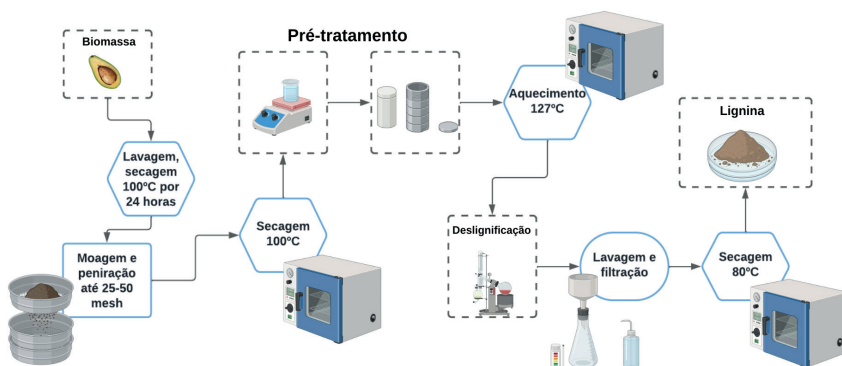
Nesse cenário, resíduos agroindustriais têm se mostrado fontes particularmente atrativas para a extração de lignina. O abacate (*Persea americana*), fruto comestível amplamente consumido e cultivado em regiões tropicais e subtropicais, destaca-se pela elevada geração de resíduos sólidos. Em 2021, a produção mundial de abacate atingiu aproximadamente 8,69 milhões de toneladas, com México e Peru figurando como os principais produtores e exportadores (Machado *et al.*, 2024). No mesmo período, o Brasil produziu cerca de 300.284 toneladas, ocupando a sexta posição no ranking mundial, com destaque para o estado de São Paulo. O caroço ou semente do abacate, correspondente ao endocarpo do fruto, é descartado após o consumo da polpa e representa cerca de 10 a 13% da massa total do fruto, o que corresponde a aproximadamente 30 a 39 mil toneladas de resíduos gerados anualmente no país (Machado *et al.*, 2024).

A lignina presente nesses resíduos pode ser convertida em uma variedade de combustíveis e produtos químicos, incluindo gás de síntese, hidrocarbonetos, fenóis, resinas e macromoléculas oxidadas, ampliando significativamente seu espectro de aplicações industriais (Kim *et al.*, 2021). Assim, sua extração e valorização não apenas possibilitam o aproveitamento de resíduos antes considerados descartáveis, mas também contribuem para a redução dos impactos ambientais associados ao acúmulo e descarte inadequado desses materiais. Além disso, a integração da lignina em cadeias produtivas de maior valor agregado favorece o desenvolvimento sustentável da agroindústria, alinhando-se aos princípios da economia circular e da química verde, ao ressignificar resíduos e transformá-los em recursos estratégicos (Ariyanta *et al.*, 2023).

MÉTODOS

Todas as metodologias experimentais (Figura 4) e analíticas empregadas neste trabalho serão detalhadas ao longo deste tópico, juntamente com os materiais, reagentes e equipamentos utilizados.

Figura 4 - Fluxograma simplificado da metodologia aplicada.



Fonte: Autores, 2025.

Preparação da biomassa

Os abacates foram adquiridos comercialmente, e os caroços foram coletados para uso em nossa pesquisa. A biomassa foi lavada em água corrente e, em seguida, seca em estufa a 100°C por 24 horas. Após a secagem, os caroços foram triturados em um moinho de facas (Black+Decker M200-B2) e peneirados (peneiras Tyler mesh) para obter partículas entre 25 e 50 mesh. A maceração prévia das amostras foi realizada para desagregar os grãos e aumentar a área superficial antes do tratamento. A biomassa in natura, previamente preparada, foi submetida a análises de FTIR, TG/DTG e DRX, tanto antes quanto após o pré-tratamento organosolv, para avaliar a eficiência da extração da lignina do material. Os rendimentos obtidos com os tratamentos foram calculados por

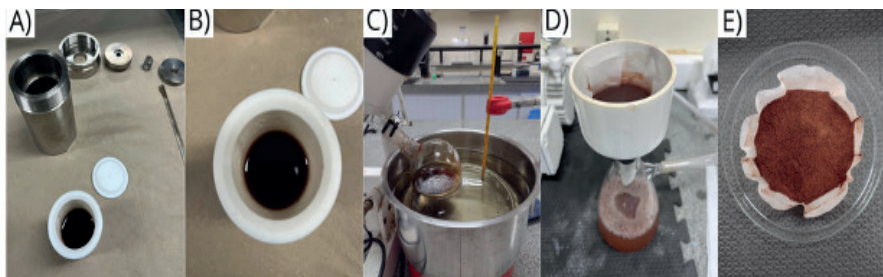
meio da Equação 1, onde, m_1 é a massa inicial do material a ser tratado, e m_2 é a massa obtida após o tratamento:

$$\text{Rendimento} = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad \text{Equação 1}$$

Pré-tratamento organosolv

Para a extração da lignina seguiu-se a metodologia adaptada do Linan (2023). Foram adicionados 5 g de biomassa moída (seca previamente a 100°C) em um béquer, juntamente com 50 mL de ácido acético 85% e 0,2 mL de solução de H₂SO₄ a 0,32% (v/v). A mistura pode ser agitada manualmente com um bastão de vidro ou em um agitador magnético por 5 a 10 minutos. Após a agitação, foi transferida para um recipiente de teflon e colocada em um reator autoclave, que foi aquecido em estufa a 127°C com variação no tempo de 60 a 120 minutos, após a estabilização da temperatura. Esta etapa foi denominada pré-tratamento, e o resultado dela pode ser visto na Figura 5 nos itens A) e B). Em seguida, a mistura resultante foi transferida para um balão de fundo redondo de 250 mL e acoplada a um evaporador rotativo (802 D Fisatom), sendo imersa em banho de glicerina vegetal bi-destilada a 95°C por 60 minutos, com agitação constante de 60 rpm. Esta etapa foi chamada de deslignificação, e processo pode ser observado no item C). Após a extração, o sólido foi resfriado, filtrado e lavado com água destilada até atingir pH neutro, e podemos ver parte da filtração no item D). O produto final foi seco em estufa a 80°C por 24 horas, e o resultado desta extração observamos no item E).

Figura 5 - A) e B) resultado de processo de pré-tratamento, C) segunda etapa do processo, que seria a deslignificação no rota evaporador; D) filtração da mistura; E) lignina organosolv.

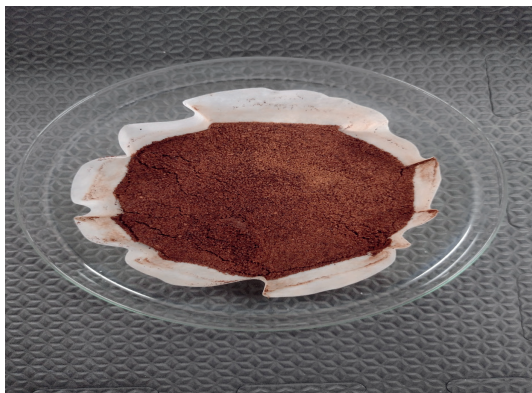


Fonte: Autores, 2025.

DISCUSSÃO

O pré-tratamento organosolv utilizado mostrou-se eficaz na extração de lignina, mostrada na Figura 5, com rendimentos superiores a 60% em todos os testes realizados, seguindo a metodologia adaptada de Linan (2024). Os resultados deste estudo são significativos, pois abrem novas perspectivas para pesquisas futuras sobre a derivatização da lignina em moléculas e produtos de alto valor agregado, além de destacar seu potencial de aplicação em biorrefinarias. As caracterizações composicionais estão sendo realizadas, e serão necessárias para avaliar a efetividade do pré-tratamento na obtenção da lignina organosolv bem como a análise termogravimétrica.

Figura 6 - Lignina extraída pela metodologia



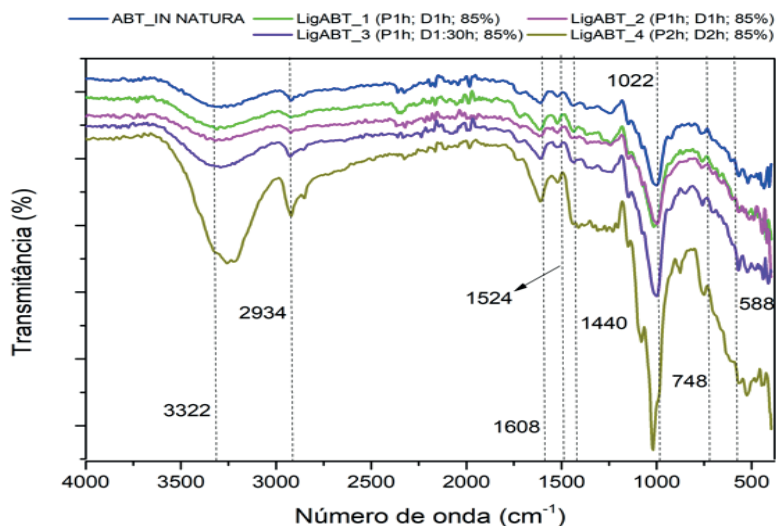
Fonte: Autores, 2025.

A aplicabilidade da lignina extraída pode ser comprovada por análises de difratometria de raios X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG), que estão em andamento. No entanto, com base nos rendimentos dos experimentos já realizados, podemos concluir que a metodologia é bastante promissora, pois os rendimentos variaram entre 62,68% e 68,22%, indicando um aproveitamento de mais de 50% da biomassa utilizada.

Além disso, a espectroscopia de FTIR foi utilizada para identificar as bandas características dos grupos químicos nos principais componentes das biomassas e detectar variações na intensidade dessas bandas, indicando mudanças na composição após os pré-tratamentos (Moura, 2019). Os espectros de FTIR foram

adquiridos junto ao LAMMEN - ECT/UFRN, através do equipamento Vertex 70 da BRUKER acoplado com dispositivo ATR (Reflectância Total Atenuada), com prisma de diamante, com uma faixa de varredura de 4000 a 500 cm^{-1} em modo 16 varreduras, com resolução de 4,0 cm^{-1} . Na Figura 5, encontra-se o FTIR da lignina extraída do caroço do abacate.

Figura 6 - Espectro de FTIR da lignina extraída pela metodologia.



Fonte: Autores, 2025.

A Figura apresenta os espectros de FTIR da biomassa ABT in natura e das ligninas obtidas após diferentes condições do processo organosolv, no qual P corresponde ao tempo de reação, D ao tempo de deslignificação e 85% à concentração do solvente ácido acético. A comparação entre os espectros permite avaliar de forma clara as alterações estruturais promovidas pelo processo de extração da lignina.

De modo geral, observa-se que a amostra ABT in natura apresenta bandas características de uma biomassa lignocelulósica íntegra, com contribuições simultâneas de celulose, hemicelulose e lignina. A banda larga em torno de 3322 cm^{-1} está associada ao estiramento O-H de grupos hidroxila, típicos de polissacarídeos e fenóis. Após o tratamento organosolv, essa banda permanece,

porém com alterações de intensidade, indicando a preservação de grupos fenólicos da lignina extraída e possíveis mudanças no ambiente químico dessas hidroxilas. A presença da banda larga em torno de $3.200\text{--}3.600\text{ cm}^{-1}$, atribuída ao estiramento O–H de grupos hidroxila fenólicos e alcoólicos, é amplamente reportada como uma das principais assinaturas espectrais da lignina, estando associada à elevada densidade de grupos hidroxila e à formação de extensas redes de ligações de hidrogênio (WANG *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2023).

A banda em 2934 cm^{-1} , atribuída ao estiramento C–H de grupos metila e metileno alifáticos, é observada em todas as amostras, mas com redução relativa de intensidade nas ligninas extraídas, sugerindo a remoção parcial de componentes polissacarídicos durante a deslignificação. A redução relativa da intensidade da banda em aproximadamente 2.930 cm^{-1} , atribuída ao estiramento C–H de grupos metila e metileno alifáticos, está de acordo com estudos que associam esse comportamento à remoção parcial de componentes polissacarídicos durante a deslignificação, resultando em um espectro enriquecido em contribuições aromáticas (SUN *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2023). Essa tendência é mais evidente nas amostras submetidas a maiores tempos de reação e deslignificação, como a LigABT_3 (P1h; D1:30h; 85%) e a LigABT_4 (P2h; D2h; 85%).

As bandas localizadas em 1608 cm^{-1} e 1524 cm^{-1} são atribuídas às vibrações do esqueleto aromático da lignina, associadas às ligações C=C dos anéis aromáticos. O aumento relativo das bandas em torno de 1.608 e 1.524 cm^{-1} , atribuídas às vibrações do esqueleto aromático (C=C), confirma o enriquecimento em lignina nas amostras extraídas, sendo essas bandas consideradas diagnósticas e recorrentes em ligninas técnicas de diferentes origens (MIMINI *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2022). O aumento relativo da intensidade dessas bandas nas amostras extraídas, quando comparadas à biomassa in natura, confirma o enriquecimento em lignina após o processo organosolv. Esse comportamento indica que o ácido acético a 85% foi eficiente na solubilização e separação da lignina da matriz lignocelulósica.

A banda em 1440 cm^{-1} está relacionada às vibrações de deformação C–H e às estruturas aromáticas, sendo típica de unidades guaiacil e siringil. As bandas observadas em aproximadamente 1.440 cm^{-1} , associadas a deformações C–H em estruturas aromáticas e cadeias laterais, são características de unidades guaiacil e siringil, em concordância com resultados reportados para ligninas

provenientes de biomassas herbáceas e resíduos agroindustriais (SUN *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2023).

Já a banda em 1022 cm^{-1} pode ser atribuída às vibrações C–O de ligações éter e alcoólicas, incluindo aquelas relacionadas às ligações β -O-4, é frequentemente descrita na literatura e pode indicar a presença residual de carboidratos em amostras submetidas a condições mais brandas de deslignificação (WANG *et al.*, 2022), sugerindo que pequenas quantidades de polissacarídeos ainda podem estar presentes, especialmente nas condições de menor tempo de deslignificação.

As bandas em 748 cm^{-1} e 588 cm^{-1} , mais pronunciadas em algumas amostras, estão associadas às vibrações fora do plano do anel aromático, reforçando a presença de estruturas aromáticas condensadas. Nota-se que o aumento do tempo de reação (P) e do tempo de deslignificação (D) promove espectros com bandas aromáticas mais definidas, indicando maior eficiência na extração e maior grau de pureza da lignina.

CONCLUSÃO

A pesquisa desenvolvida neste trabalho permite concluir que a valorização da lignina desempenha um papel estratégico para a viabilidade econômica e tecnológica das biorrefinarias lignocelulósicas, uma vez que esse biopolímero apresenta ampla aplicabilidade e elevado potencial de agregação de valor. Suas propriedades intrínsecas, como alta estabilidade térmica, biodegradabilidade, poder antioxidante e rigidez estrutural, tornam a lignina um material altamente atrativo para o desenvolvimento de novos produtos sustentáveis, conforme destacado por Linan *et al.* (2021). Nesse sentido, a conversão da lignina de um subproduto de baixo valor para um insumo funcional representa um avanço significativo no conceito de aproveitamento integral da biomassa.

Além disso, estudos recentes indicam que a lignina tem despertado crescente interesse industrial. De acordo com Shorey (2024), diversas empresas já vêm incorporando a lignina em formulações comerciais, atuando como estabilizante de emulsões, agente dispersante e complexante, bem como em aplicações mais avançadas, como a substituição parcial de fenóis derivados do petróleo em espumas isolantes, compostos de moldagem e sistemas adesivos.

Esses avanços reforçam o potencial da lignina como alternativa renovável a materiais sintéticos convencionais, contribuindo para a redução da pegada ambiental dos processos industriais.

Nesse contexto, este trabalho explora de forma aprofundada a utilização da lignina funcionalizada em produtos de alto valor agregado, com ênfase na área de biocompósitos. A lignina extraída e modificada apresenta-se como uma abordagem promissora para a obtenção de bioplásticos mais duráveis, sustentáveis e versáteis, com aplicações potenciais em setores como construção civil, embalagens, automotivo e bens de consumo. Assim, os resultados obtidos reforçam a relevância da lignina como um material-chave para o desenvolvimento de tecnologias alinhadas aos princípios da economia circular e da sustentabilidade.

Agradecimentos

O apoio do IQ/UFRN, do Grupo de Pesquisa em Tecnologias Energéticas (GTEN), ao LAMMEN (ECT/URFN) e ao LABPEMOL (Laboratório de Peneiras Moleculares).

REFERÊNCIAS

LOPEZ, Gabriel *et al.* From fossil to green chemicals: sustainable pathways and new carbon feedstocks for the global chemical industry. *Energy & Environmental Science*, v. 16, n. 7, p. 2879-2909, 2023.

SHOREY, Rohan *et al.* Valorization of lignin for advanced material applications: a review. *RSC Sustainability*, 2024.

ACORDO DE PARIS. Governo Federal. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html#> (Acesso em: 14 ago. 2024).

MOURA, Heloíse Oliveira Medeiros de Araújo. Investigação do efeito de pré-tratamentos na estrutura de biomassas lignocelulósicas para o isolamento de celuloses de alta reatividade. 2019. Dissertação de Mestrado. Brasil.

MOURA, Heloíse OMA *et al.* Optimization of synthesis method for carboxymethylcellulose (CMC) from agro-food wastes by response surface methodology (RSM) using D-Optimal algorithm. *Industrial Crops and Products*, v. 220, p. 119413, 2024.

- LINAN, Lamia Zuniga *et al.* Acid-based organosolv lignin extraction from acai berry bagasse. *Bioresource Technology Reports*, v. 22, p. 101493, 2023.
- KIM, Tae Hoon *et al.* Reaction characteristics of organosolv-fractionation process for selective extraction of carbohydrates and lignin from rice husks. *Energies*, v. 14, n. 3, p. 686, 2021.
- ARIYANTA, Harits Atika *et al.* Current roles of lignin for the agroindustry: Applications, challenges, and opportunities. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 240, p. 124523, 2023.
- BAJWA, D. S. *et al.* A concise review of current lignin production, applications, products and their environmental impact. *Industrial Crops and Products*, v. 139, p. 111526, 2019.
- LIU, Yanrong *et al.* Cascade utilization of lignocellulosic biomass to high-value products. *Green Chemistry*, v. 21, n. 13, p. 3499-3535, 2019.
- MACHADO, Régis B. *et al.* Avaliação da degradação térmica do caroço de abacate residual para a produção de biocarvões. *Química Nova*, v. 47, n. 1, p. e-20230086, 2024.
- DIFRAÇÃO DE RAIOS-X. Unesp. Disponível em: <https://www.iq.unesp.br/#!/lacaque/difracao-de-raios-x/apresentacao/> (Acesso em: 15 ago. 2024).
- COSTA, Carina A. Esteves *et al.* Assessment of key features of lignin from lignocellulosic crops: Stalks and roots of corn, cotton, sugarcane, and tobacco. *Industrial Crops and Products*, v. 92, p. 136-148, 2016.
- LINAN, Lamia Zuniga *et al.* Utilization of acai berry residual biomass for extraction of lignocellulosic byproducts. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, v. 6, n. 4, p. 323-337, 2021.
- BOERIU, C. G.; BRINKER, M.; GOSSELINK, R. J. A.; DAM, J. E. G.; VAN DAM, J. E. G. Structural characterization of lignin isolated from different biomass resources by FTIR spectroscopy. *Industrial Crops and Products*, Amsterdam, v. 20, n. 2, p. 205-218, 2004.
- FAIX, O. Classification of lignins from different botanical origins by FTIR spectroscopy. *Holzforschung*, Berlin, v. 45, n. s1, p. 21-27, 1991.
- MIMINI, V.; SYKACEK, E.; HASHIM, S. N. A. S.; HOLZWEBER, J.; HETTEGGER, H.; FACKLER, K.; POTTHAST, A.; MUNDIGLER, N.; ROSENAU, T. Compatibility of kraft lignin, organosolv lignin and lignosulfonate with PLA in 3D printing. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, London, v. 39, n. 1, p. 14-30, 2019.
- SUN, R.; TOMKINSON, J.; MA, P. Lignin isolation and structural characterization of lignins from corn stover and corn cob. *Industrial Crops and Products*, Amsterdam, v. 83, p. 1-10, 2016.
- WANG, S.; RUAN, Y.; HU, J.; ZHANG, L.; LI, J. Structural characteristics of lignin isolated from agricultural residues and their antioxidant activity. *RSC Advances*, London, v. 12, n. 18, p. 11021-11031, 2022.
- ZHANG, Y.; LIU, X.; WANG, J.; LI, H. Comparative FTIR and NMR analysis of technical lignins obtained by different extraction methods. *RSC Advances*, London, v. 13, n. 27, p. 18245-18255, 2023.

ASPECTOS BIOLÓGICOS E INTERAÇÃO COM INSETOS-PRAGA DE *CORDYCEPS FUMOSOROSEA* (ASCOMYCOTA: HYPOCREALES): UMA REVISÃO DA LITERATURA

Enrique Yamakawa

Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Marcus Cesar Bochi Reis dos Santos

Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Fábio de Deus Oliveira-Junior

Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Julio Cesar Polonio

Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Maria Claudia Colla Ruvolo-Takasusuki

Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Bruno Vinícius Daquila

Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Helio Conte

Universidade Estadual de Maringá (UEM)

RESUMO

Existem cerca de 100 mil espécies de fungos e 1 milhão de espécies de insetos descritos, dos quais, alguns demonstram relações ecológicas interespecíficas. O gênero *Cordyceps* inclui fungos parasitas, sendo a espécie *Cordyceps fumosorosea* o principal representante com interações junto a insetos-praga. *C. fumosorosea* é um fungo entomopatogênico e cosmopolita, que anteriormente pertencia ao gênero *Isaria*, mas que com o advento dos estudos filogenéticos moleculares, foi remanejado para o gênero *Cordyceps* por conta de sua semelhança genética. Esse microrganismo pode ser isolado de solos, com predominância em solos orgânicos e com a umidade elevada, além de insetos mortos. A interação *C. fumosorosea*-insetos-praga é baseada em seu ciclo de vida (devido capacidade de colonização), características que garantem seu uso em formulações de bioinseticidas indicados para o Manejo Integrado de Pragas (MIP). A infecção fúngica ocorre em etapas sequenciais: i) adesão dos conídios na cutícula do inseto, mediado por proteínas não específicas; ii) formação do grampo acessório e germinação; iii) penetração com liberação de enzimas hidrolíticas, micotoxinas e a colonização; iv) extrusão e reprodução para novos ciclos. Por outro lado, a defesa dos insetos se divide em imunidade inata e humoral, onde moléculas que reconhecem o agente estranho sinalizam a ativação das vias de defesa e a produção de peptídeos antimicrobianos (AMP). No entanto, mesmo com todos esses mecanismos de defesa do inseto, o fungo tem sucesso em sua infecção, com diversos casos relatados nas diferentes ordens de pragas, sendo os mais suscetíveis, coleópteros, hemípteros e lepidópteros.

Palavras-chave: Biotecnologia; Controle Biológico; Entomopatógeno; Manejo Integrado de Pragas; Sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

Existem aproximadamente 100 mil espécies de fungos e 1 milhão de espécies de insetos descritos em todo o planeta, considerando as espécies ainda desconhecidas e aquelas que foram extintas, estima-se que esse número possa ser próximo aos 3,8 e 6 milhões de espécies, respectivamente (ARAÚJO; HUGHES, 2016; STORK *et al.*, 2015; LI e WIENS, 2023; TIHELKA *et al.*, 2021). Toda essa biodiversidade observada em ambos os grupos, promoveu a ocorrência de relações ecológicas interespecíficas harmônicas e desarmônicas, como por exemplo, o mutualismo e o parasitismo (BRONSTEIN, 2015; HAJEK *et al.*, 1994; BIEDERMANN; VEGA, 2020).

O gênero *Cordyceps*, abrange diversas espécies de fungos com interesse biotecnológico (GOETTEL *et al.*, 2011; OLANTUJI *et al.*, 2018; QU *et al.*, 2022; WENG *et al.*, 2019). Dentre as espécies de interesse fitossanitário, destaca-se *Cordyceps fumosorosea* (Isaria) (Ascomycota: Hypocreales), um entomopatógeno com elevada capacidade para parasitar e colonizar diferentes espécies de insetos-praga hospedeiros (ZIMMERMAN, 2008). Devida essa característica entomopatogênica, esse agente tem sido utilizado como ingrediente ativo em formulações de bioinseticidas utilizados no Manejo Integrado de Pragas (MIP) (DUNLAP *et al.*, 2017).

A ação de *C. fumosorosea* sobre insetos-alvo ocorre em algumas etapas (SHARMA *et al.*, 2023); contudo, os sistemas de defesa dos insetos atuam desde o processo inicial da infecção, quando os conídios fúngicos aderem a cutícula do hospedeiro (XIAO *et al.*, 2023). A diversidade de proteínas e quitina na cutícula dos insetos dificulta a adesão conidial e a penetração fúngica, além disso, diversas vias de sinalizações de seu sistema humoral tornam-se ativas, e com isso, a síntese de peptídeos antimicrobianos é elevada no hospedeiro (HONG *et al.*, 2024; XIAO *et al.*, 2023).

Porém, o fungo consegue atravessar todo o sistema de defesa dos insetos e promover de forma bem-sucedida sua infecção, atuando eficientemente como agente biocontrolador de insetos (LACEY *et al.*, 2008; LUO *et al.*, 2022; DU *et al.*, 2021; LEI *et al.*, 2021). Diante do exposto, o presente estudo objetivou conduzir uma revisão narrativa da literatura publicada nos últimos 15 anos acerca do fungo entomopatogênico *Cordyceps fumosorosea* e de sua relação com insetos-praga

de importância fitossanitária, considerando artigos indexados nas bases Web of Science, Scopus e Google Scholar. Foram incluídos estudos que apresentassem informações sobre sua taxonomia, morfologia, micotoxinas, interação patógeno-hospedeiro e controle microbiano de insetos-praga.

DESENVOLVIMENTO

Taxonomia

A ordem Hypocreales abrange diversas espécies fúngicas, que possuem em sua maioria, a característica primária de parasitismo. Inicialmente, esses organismos foram atribuídos a uma única família, Clavicipitaceae (HUMBER, 2008; VEGA *et al.*, 2012), contudo, com a evolução da genética molecular e o uso de marcadores moleculares, surgiram modificações na árvore filogenética, dentre as quais, a separação da ordem Hypocreales e a formação das grandes famílias, Bionectriaceae, Clavicipitaceae, Cocoonihabitaceae, Cordycipitaceae, Hypocreaceae, Ophiocordycipitaceae e Polycephalomycetaceae, sendo essa, uma ordem polifilética (XIAO *et al.*, 2023; ZHUANG; ZENG, 2017).

Cordyceps fumosorosea é uma das espécies que passou por alterações em sua taxonomia. No início dos anos 2000 esse organismo estava inserido na seção Isarioidea do gênero *Paecilomyces*; posteriormente passou a ser denominado *Isaria fumosorosea*, com estudos moleculares apontando a necessidade de diferenciar o gênero *Isaria* e delinear em um grupo monofilético (LUANGSA-ARD *et al.*, 2004; HODGE *et al.*, 2005; INGLIS; TIGANO, 2006). Seguindo os estudos taxonômicos, a partir de 2015 com base na nova filogenia da região ITS e dos locus LSU, SSU, TEF, RPB1 e RPB2, foi proposto que *I. fumosorosea* pertencia ao gênero *Cordyceps*, obtendo maior semelhança genética com esse grupo, portanto sua classificação passou a ser *C. fumosorosea* (KEPLER *et al.*, 2017).

Considerando as últimas alterações taxonômicas, novos representantes foram inseridos no grupo *Cordyceps*, sendo as análises filogenéticas o principal fator para a inclusão de novas espécies nesse gênero, além disso, houve a inclusão de novos gêneros na família Cordycipitaceae (CHEN *et al.*, 2021; QUANDT *et al.*, 2014; KEPLER *et al.*, 2017), sendo que agora, essa família possui 22 gêneros (SRIDHAR *et al.*, 2024).

Cordyceps fumosorosea

C. fumosorosea é um fungo entomopatogênico cosmopolita com uma ampla distribuição geográfica, que foi descrito pela primeira vez em 1904, na Ucrânia (WIZE, 1904; ZIMMERMAN, 2008). Esse entomopatógeno pode ser isolado de insetos presentes em várias regiões do planeta, inclusive aquelas com baixas temperaturas ou onde o frio é predominante, demonstrando sua elevada capacidade de adaptação e resistência (ZIMMERMAN, 2008; TKACZUK *et al.*, 2012).

Colônias de *C. fumosorosea* possuem crescimento rápido, inicialmente com coloração branca (Fig. 1), mudando para o amarelo escuro com o avanço em seu desenvolvimento (DU *et al.*, 2021; ZIMMERMAN, 2008). Suas estruturas reprodutivas possuem forma de bastão ovalado, de cilíndrico a fusiforme, com tons amarelados ou cinzas (DU *et al.*, 2021; LUO *et al.*, 2022). No ápice dos conidióforos estão presentes fiálides, onde os conídios se desenvolvem (DU *et al.*, 2021). Os conídios são estruturas com elevada resistência a tensões ambientais, como os elevados índices de metais pesados, decorrente da fertilização sequencial dos solos e a radiação UV-B (MAJCHROWSKA-SAFARYAN *et al.*, 2017; SUÁREZ-VERGEL *et al.*, 2022).

Figura 1. *Cordyceps fumosorosea* cultivado em meio de cultura batata dextrose ágar (BDA).



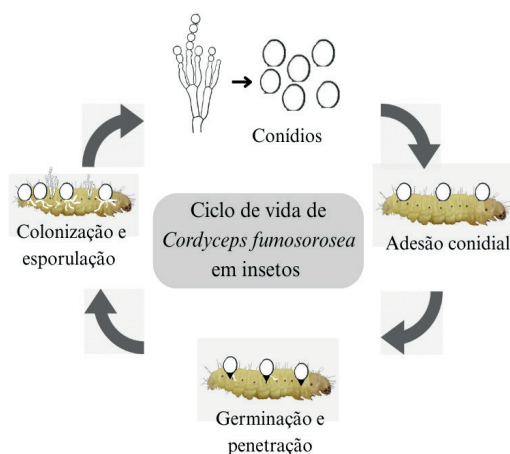
Fonte: autores.

Outras características do solo, como pH, umidade, temperatura, textura e a microbiota desempenham papéis fundamentais para o desenvolvimento de *C. fumosorosea*; os solos são reservatórios ideais para os conídios desse fungo, até que encontrem hospedeiros ideais (QUESADA-MORANGA *et al.*, 2023). Além dos solos, esse agente biocontrolador também pode ser isolado de plantas e insetos mortos (ZIMMERMAN, 2008; QAYYUM *et al.*, 2021; QUESADA-MORANGA *et al.*, 2023; MEYLING *et al.*, 2012; ROJAS *et al.*, 2023; ZIMMERMAN, 2008).

A ação de *C. fumosorosea* sobre seus hospedeiros ocorre em quatro etapas principais: i) adesão dos conídios, ii) germinação e formação do grampo apressório, iii) penetração, liberação de enzimas, toxinas e colonização e iv) extrusão e reprodução (Fig. 2) (SHARMA *et al.*, 2023; ORTIZ URQUIZA; KEYHANI, 2013). A aderência dos esporos sobre a cutícula dos insetos é intermediada pela proteína adesina ou polímeros de galactosaminogalactano (GAG), formando uma ancoragem adesiva para o tegumento dos insetos (HONG *et al.*,

2024). Em seguida, com a germinação conidial e formação do grampo apresório, dá-se início a penetração cuticular, liberação de micotoxinas e blastósporos. Na hemocele, os blastósporos e/ou hifas se propagam rapidamente e atingem os diferentes órgãos do hospedeiro (ALTINOK *et al.*, 2019). Ao final, quando as hifas se espalham por todo o organismo, os conidióforos poderão liberar novos conídios para novas infecções, enquanto as reservas nutricionais do hospedeiro são totalmente consumidas (ALTINOK *et al.*, 2019).

Figura 2. Ciclo de vida de *Cordyceps fumosorosea* em insetos.



Fonte: autores.

Considerando *C. fumosorosea*, foram caracterizadas mais de 15 micotoxinas ou metabólitos secundários envolvidos nos processos de colonização dos insetos hospedeiros. Essas moléculas possuem ação inseticida e suprimem o sistema imunológico do organismo-alvo. Em sua maioria, são classificadas como micotoxinas peptídicas, como beauvericinas, beauverolídeos, isaridinas e dextruxinas, e outros grupos como alcalóides e policetídeos (Tab. 1) (LIU *et al.*, 2015; QASIM *et al.*, 2020).

Tabela 1. Micotoxinas sintetizadas por *Cordyceps fumosorosea* relacionadas no processo de infecção em insetos hospedeiros.

Classificações	Nome molecular	Referências
Peptídeos	Isaridina A	SABAREESH <i>et al.</i> (2007).
	Isaridina B	SABAREESH <i>et al.</i> (2007).
	Isaridina G	QASIM <i>et al.</i> (2020).
	Isariina E	SABAREESH <i>et al.</i> (2007).
	Bassianolideo	QASIM <i>et al.</i> (2020).
	Beauvericina A	QASIM <i>et al.</i> (2020).
	Beauverolideo B	QASIM <i>et al.</i> (2020).
	Beauverolideo C	QASIM <i>et al.</i> (2020).
	Beauverolideo F	QASIM <i>et al.</i> (2020).
	Dextruxina E	WANG <i>et al.</i> (2018).
Alcaloides	Fumosorinona	LIU <i>et al.</i> (2015).
	Isariotiona A	HARITAKUM <i>et al.</i> (2007).
	Isariotina B	HARITAKUM <i>et al.</i> (2007).
	Isariotina C	HARITAKUM <i>et al.</i> (2007).
Policetídeo	Tenuipirona	ASAI <i>et al.</i> (2011).

Fonte: autores.

O sistema de imunidade inata dos insetos reconhece a invasão fúngica e moléculas de reconhecimento efetuam sinalizações para a ativação das vias Imd e Toll, enquanto outras sinalizações celulares, ativam a síntese de peptídeos antimicrobianos (AMPs) no corpo adiposo (LEMAITRE; HOFFMAN, 2007), enquanto isso, os hemócitos se mobilizam para fagocitar os invasores (FEHLBAUM *et al.*, 1994; LU; LEGER, 2016; XIAO *et al.*, 2023). As sinalizações ocasionam alterações na fisiologia dos insetos, principalmente no sistema antioxidante (crucial para resistir a infecções ocasionadas por patógenos), causando alterações em níveis de expressão das enzimas antioxidantes, superóxido dismutase e catalase (LUKASIK; GALAWSKA, 2013).

Hormônios adipocinéticos (AKH) atuam regulando o metabolismo, controlando principalmente a liberação de lipídios e a mobilização de energia (GADE *et al.*, 2020), esses hormônios também têm influência sobre o comportamento

dos insetos (JIN *et al.*, 2024); entretanto, sua resposta metabólica pode promover a infecção por fungos entomopatogênicos, (GAUTAM *et al.*, 2020), algo que possivelmente afeta o sistema imunológico, por conta da disponibilidade de nutrientes na hemolinfa através, facilitando assim, a colonização de *C. fumosorosea* em seus hospedeiros (GAUTAM *et al.*, 2020; JIN *et al.*, 2024).

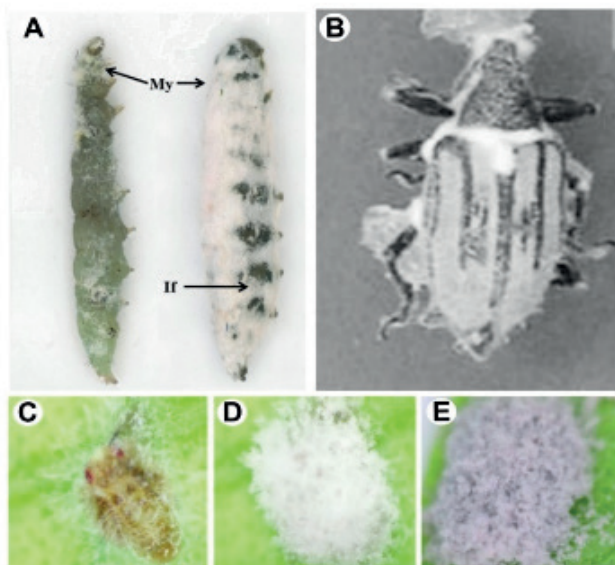
Relação entre *Cordyceps fumosorosea* e insetos-praga

A associação interespecífica entre fungos e insetos é relatada em várias atividades ecossistêmicas (BRONSTEIN, 2015; VEGA; BIEDERMANN, 2020), como por exemplo, as formigas que cultivam fungos para utilizar algumas de suas estruturas como fonte de alimento (BIRKEMOE *et al.*, 2018; CURRIE *et al.*, 2003) e o parasitismo fúngico em algumas espécies de insetos (entomopatógenos) (Fig. 3) (BIEDERMANN; VEGA, 2020). Essas associações podem ser obrigatoriamente dependentes por parte dos fungos e outras por parte dos insetos, fato que resultou na coevolução de ambos, de modo, que adaptações morfológicas, comportamentais e reprodutivas, foram selecionadas nesses indivíduos (BIEDERMANN; VEGA, 2020).

Diversos são os fatores relacionados às associações insetos-fungos, desde níveis moleculares, como a expressão de proteínas específicas e os altos níveis de nutrientes na hemolinfa dos insetos, características que facilitam a atividade e proliferação dos fungos em insetos hospedeiros (GAUTAM *et al.*, 2020). Essas interações resultam em redes especializadas, onde a extinção de uma espécie pode ocasionar uma queda brusca populacional ou extinção de outra (JACOBSEN *et al.*, 2017).

Por outro lado, a seleção natural também atuou sobre os fungos, onde espécies com elevado potencial entomopatogênico sobre diferentes espécies de insetos, foram preservadas, algo próximo a 1.200 espécies, distribuídos em 100 gêneros (JABER, 2018). Até os anos 2000, foram descritas 40 espécies de insetos hospedeiros de *C. fumosorosea*, sendo em sua maioria da ordem lepidóptera e hemíptera (Tab. 2) (ZIMMERMAN, 2008), contudo, acredita-se que esse fungo possa atuar sobre um número muito maior de hospedeiros (ZHENG *et al.*, 2020).

Figura 3. Insetos contaminados por *Cordyceps fumosorosea*. A) *Plutella xylostella*. B) *Diaprepes abbreviatus*. C, D e E) *Diaphorina citri*.



Fontes: LEI *et al.* (2021), HUNTER *et al.* (2011) e LUO *et al.* (2022).

Em culturas de soja, ninfas e adultos de mosca-branca, *Bemisia tabaci* (Genn. 1889) (Hemiptera: Aleyrodidae), são naturalmente os principais hospedeiros de *C. fumosorosea* (LACEY *et al.*, 1998; 2008). Em culturas de citrus, na Flórida (EUA) e no Brasil, foram relatadas epizootias ocasionadas por esse mesmo fungo (MEYER *et al.*, 2008) e no Brasil (ALVES *et al.*, 2004; PADULLA; ALVES, 2009) em ninfas do psilídeo, *Diaphorina citri* Kuwayama, 1908 (Hemiptera: Liviidae), uma vez que esses insetos possuem hábito gregário e se movem lentamente, algo que contribui com o desenvolvimento do entomopatógeno (PADULLA; ALVES, 2009; CORTEZ-MADRIGAL *et al.*, 2014; LUO *et al.*, 2022).

Relatos da eficiência biocontroladora de *C. fumosorosea* sobre outros hemípteros pragas também constam na literatura, como por exemplo, *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852), *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758), *Brevicoryne brassicae* (Linnaeus, 1758), *Lipaphis erysimi* (Kaltenbach, 1843), *Aphis craccivora* Kosh, 1854, *Toxoptera citricidus* (Kirkald, 1907) (Aphididae), *Homalodisca vitripennis* (Germar, 1821) (Cicadellidae) (MALIK *et al.*, 2012; HUNTER *et al.*, 2011; WU *et al.*,

2021); além disso, também podem ser observados em hemípteros benéficos, como *Orius insidiosus* (Say, 1832) (Anthocoridae) (MANFRINO; ROCCA, 2024).

Tabela 2. Exemplos de associações (parasitismo) entre *Cordyceps fumosorosea*, diferentes insetos hospedeiros e locais de ocorrência, baseados em dados disponíveis nos últimos quinze anos.

Espécies	Hospedeiros	Localidades	Referências
Insetos			
<i>C. fumosorosea</i> LCBPF 12 e LCBPF 63		São Paulo, Brasil	DOMINGUES <i>et al.</i> (2024).
<i>C. fumosorosea</i> IF-1106	<i>Bemisia tabaci</i>	Jhinzong, China	TIAN <i>et al.</i> (2015).
<i>C. fumosorosea</i> PF01-N4/N10		Província de Guangdong, China	GAO <i>et al.</i> (2017).
<i>C. javanica</i> wf GA17		Geórgia, EUA	WU <i>et al.</i> (2020).
	<i>Glycaspis brimblecombei</i>		
	<i>Schizaphis graminum</i>		
<i>C. fumosorosea</i> LCBPF 12 e LCBPF 63	<i>Rhopalosiphum padi</i>	Punjab, Paquistão	MALIK <i>et al.</i> (2012).
<i>C. fumosorosea</i> IF-01	<i>Brevicoryne brassicae</i>		
	<i>Lipaphis erysimi</i>		
<i>C. fumosorosea</i> SP502	<i>Aphis craccivora</i>	Guangzhou, China	WU <i>et al.</i> (2021).
	Lepidoptera		
<i>C. fumosorosea</i>	Hemiptera	Yunnan, China	ZHENG <i>et al.</i> (2020).
	Hymenoptera		
	Coleoptera		
<i>C. fumosorosea</i> CEP 315	<i>Orius insidiosus</i>	Buenos Aires, Argentina	MANFRINO; ROCCA (2024).
<i>C. fumosorosea</i>	<i>Diaphorina citri</i>	Flórida, Estados Unidos	HOY <i>et al.</i> (2010).
<i>C. fumosorosea</i> Ifr 4	<i>Diaphorina citri</i>	Guanajuato, México	GUTIÉRREZ <i>et al.</i> (2012).

		Zackenbergl, Groenlândia	
		Danmarkshavn, Groenlândia	MEYLING <i>et al.</i> (2012).
		Ritenbenk, Groenlândia	
<i>C. fumosorosea</i>	<i>Galleria mellonella</i>	Chojnów, Polônia	JARMUL-PIE-TRASZCZYK <i>et al.</i> (2013).
		Eslováquia	MEDO; CAGÁN (2011).
		Masovian, Polônia	GOLEBIEWSKI <i>et al.</i> (2021).
		Cidade do México, México	AYALA-ZERMENO <i>et al.</i> (2011).
<i>Cordyceps</i> spp	Elatoroidea (Coleoptera)	Sudoeste da China	ZHA <i>et al.</i> (2021).
	<i>Tenebrio molitor</i>	Cracóvia, Polônia	KUZNIAR <i>et al.</i> (2011).
<i>C. fumosorosea</i>	<i>Rhynchophorus ferrugineus</i>	Cairo, Egito	SABBOUR; ABDEL-RAHEEM (2014).
		Ismailia, Egito	
<i>C. fumosorosea</i>	<i>Galleria mellonella</i>	Rio de Janeiro, Brasil	MORA <i>et al.</i> (2016).
	<i>Tenebrio molitor</i>		
<i>C. fumosorosea</i>	<i>Lymantria monacha</i> L. (Lepidoptera: Lymantriidae)	Tbilisi, Geórgia	KERESELIDZE <i>et al.</i> (2014).
	<i>Lymantria dispar</i> L. (Lepidoptera: Lymantriidae)		
<i>C. fumosorosea</i> ESALQ-1296	<i>Spodoptera frugiperda</i>	São Paulo, Brasil	CORRÊA <i>et al.</i> (2020).
<i>C. fumosorosea</i> ESALQ-3422	<i>Chrysodeixis includens</i>		

<i>Cordyceps fumosorosea</i> IFCF01	<i>Plutella xylostella</i>	Província de Guangdong, China	LEI <i>et al.</i> (2021).
<i>C. fumosorosea</i> PF01-N4/N10	<i>Plutella xylostella</i>	Guangzhou, China	HUANG <i>et al.</i> (2016).
<i>Cordyceps fumosorosea</i> SP24	<i>Periplaneta americana</i>	Província de Yunnan. China	KHAN <i>et al.</i> (2024).
<i>Cordyceps fumosorosea</i> CCM 8367	<i>Periplaneta americana</i>	České Budějovice, República Checa	GAUTAM <i>et al.</i> (2020).
<i>Cordyceps fumosorosea</i> IBCB 130	<i>Acromyrmex heyeri</i>	Rio Grande do Sul, Brasil	SALDANHA <i>et al.</i> (2023).
<i>C. fumosorosea</i> 3581, APOPKA, 9901	<i>Diaprepes abbreviatus</i> <i>Toxoptera citricidus</i> <i>Homalodisca vitripennis</i>	Florida, Estados Unidos	HUNTER <i>et al.</i> (2011).

Flora e solo

<i>C. fumosorosea</i>	Solo	Hachimantai e Furano, Japão	SARAGIH <i>et al.</i> (2023)
<i>C. fumosorosea</i>	Solo	Eslováquia	MEDO; CAGÁN, (2011)
<i>C. fumosorosea</i>	Solo	Purzec, Polônia	TKACZUK <i>et al.</i> (2012).
		Borki, Polônia	
		Siedleckie, Polônia	
<i>C. fumosorosea</i>	Árvores/ florestas	Taiwan	CHUANG <i>et al.</i> (2024).
<i>C. fumosorosea</i>	Solo	Zawady, Polônia	MAJCHROWSKA-SAFARYAN <i>et al.</i> (2017).

<i>C. fumosorosea</i> ESALQ1741	Solo	Caatinga, Alagoas, Brasil	ROJAS <i>et al.</i> (2023).
<i>C. fumosorosea</i> ESALQ3300	Vegetação nativa	Teotônio Vilela, Alagoas	ROJAS <i>et al.</i> (2023).
<i>C. fumosorosea</i> ESALQ3422	Solo cítrico	Itirapina, São Paulo	ROJAS <i>et al.</i> (2023).
<i>C. fumosorosea</i> ESALQ4556	Vegetação nativa	Aceguá, Rio Grande do Sul	ROJAS <i>et al.</i> (2023).
<i>C. fumosorosea</i>	<i>Festuca pratensis</i> S. (Poales: Poaceae)	Krzyzeyeo, Polônia Uhnin, Polônia	KOLCZAREK; JANKOWSKI (2014).

Em coleópteros os relatos são similares, existem vários estudos sobre a infecção de *C. fumosorosea* em larvas da superfamília Elateroidea e Tenebrionoi-dea (ZHA *et al.*, 2021; ZHENG *et al.*, 2020), larvas de *Diaprepes abbreviatus* (Linnaeus, 1758), *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier, 1790) (Curculionidae) e *Tenebrio molitor* Linnaeus, 1758 (Tenebrionidae) (HUNTER *et al.*, 2011; KUZNIAR *et al.*, 2011; MEYLING *et al.*, 2012; MORA *et al.*, 2016; SABBOUR; ABDEL-RAHEEM, 2014).

Nos himenópteros, as associações com *C. fumosorosea* são mais raras, uma vez que seus principais representantes são parasitoides benéficos que podem atuar em combinação com o entomopatógeno, potencializando seu uso no manejo integrado de pragas (PICK *et al.*, 2012), entretanto, a eficácia biocontroladora desse fungo sobre o inseto-praga, *Acromyrmex heyeri* Forel, 1899 (Formicidae), foi demonstrada e os resultados obtidos foram promissores (SALDANHA *et al.*, 2023).

Portanto, *C. fumosorosea* pode atuar tanto sobre insetos-praga quanto, ainda que existam relatos escassos, sobre insetos benéficos, o que indica a possibilidade de ocorrência de efeitos adversos não intencionais em organismos não-alvo e sobre a dinâmica dos ecossistemas (ZEMEK *et al.*, 2017; MANFRINO; ROCCA, 2024). Esses riscos estão relacionados, sobretudo, à

persistência ambiental dos conídios, à amplitude de hospedeiros suscetíveis, e as micotoxinas, fatores que podem influenciar populações de insetos benéficos e a microbiota do solo, podendo resultar em riscos ecológicos, relativamente ausentes quando comparados aos químicos (WENG *et al.*, 2019). Dessa forma, a consideração do risco ecológico torna-se essencial na avaliação do uso de fungos entomopatogênicos como agentes de controle biológico.

CONCLUSÃO

O gênero *Cordyceps* passou por revisões taxonômicas expressivas na última década que contribuíram para uma compreensão mais precisa das relações evolutivas e ecológicas entre fungos entomopatogênicos e seus hospedeiros. As interações insetos-fungo configuram um sistema dinâmico de pressões interespecíficas, no qual os fungos exercem sua patogenicidade por meio de mecanismos que envolvem adesão à cutícula, penetração ativa e colonização interna, enquanto os insetos, por sua vez, desenvolveram estratégias de defesa progressivamente mais elaboradas, com início na barreira cuticular e complementadas por respostas imunes humorais e celulares.

Sob a perspectiva ecológica, *C. fumosorosea* apresenta ampla distribuição geográfica e associa-se a diversos hospedeiros, evidenciando elevada capacidade de dispersão, colonização e adaptação ambiental. Essas características, aliadas à sua eficácia no controle de insetos-praga, sustentam seu uso como agente de controle biológico e a redução do emprego de inseticidas químicos. Contudo, sua plasticidade ecológica e amplitude de hospedeiros levantam a possibilidade de efeitos adversos não intencionais sobre organismos não-alvo, incluindo insetos benéficos, embora os registros na literatura sejam escassos.

Do ponto de vista prático, os resultados indicam que *C. fumosorosea* pode ser integrada a programas de manejo integrado de pragas, desde que sua aplicação considere fatores como dose, momento e ambiente de liberação, visando minimizar potenciais impactos ecológicos. Como perspectiva, destaca-se a necessidade de estudos de risco ecológico em condições de campo e de avaliações de longo prazo sobre suas interações com organismos não-alvo, a fim de assegurar o uso seguro e ambientalmente responsável desse entomopatógeno em sistemas agrícolas complexos.

REFERÊNCIAS

- ALTINOK, H.H.; ALTINOK, M.A.; KOCA, A.S. Modes of action of entomopathogenic fungi. **Current Trends in Natural Sciences**, v. 8, p. 117-124, 2019.
- ALVES, S.B.; HUMBER, R.; LOPES, R.B.; TERSI, F.E.; PADULLA, L.F.L. Ocorrência da doença salmão-daortézia causada por um hifomiceto entomopatogênico. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 20, 2004, Gramado, RS. Resumos. Gramado, 2004.
- ARAÚJO, J.P.M.; HUGHES, D.P. Chapter One - Diversity of Entomopathogenic Fungi: Which Groups Conquered the Insect Body? **Advances in Genetics**, v. 94, p. 1-39, 2016.
- ASAI, T.; CHUNG, Y.; SAKURAI, H.; OZEKI, T.; CHANG, F.; YAMASHITA, K.; OSHIMA, Y. Tenuipyrone, a novel skeletal polyketide from the entomopathogenic fungus, *isaria tenuipes*, cultivated in the presence of epigenetic modifiers. **Organic Letters**, v. 14, p. 513-515, 2011.
- AYALA-ZERMENO, M.A.; REYES-MONTES, M.R.; ARROYO-VÁZQUEZ, E.; CALDERÓN EZQUERRO M.C.; MIER, T.; ROBLEDOR-RETANA, T.; TORIELLO, C. An *Isaria fumosorosea* SCAR marker for evaluation of soil, insect, and airborne samples. **Biocontrol Science and Technology**, v. 21:9, p. 1091-1102, 2011.
- BIEDERMANN, P.H.W.; VEGA, F.E. Ecology and Evolution of Insect-Fungus Mutualisms. **Annual Review of Entomology**, v. 65, p. 431-455, 2020.
- BIRKEMOE, T.; JACOBSEN, R.M.; SVERDRUP-THYGESON, A.; BIEDERMANN, P.H. **Insect-fungus interactions in dead wood systems**. *In*: Saprophytic Insects: Diversity, Ecology and Conservation, ed. MD Ulyshen, p. 377-427. 2018.
- BRONSTEIN J.L. **Mutualism**. Ed. 1, Oxford, UK: Oxford Univ. Press, 2015.
- CORRÊA, B.; DUARTE, V.S.; SILVA, D.M.; MASCARIN, G.M.; JÚNIOR, I.D. Comparative analysis of blastospore production and virulence of *Beauveria bassiana* and *Cordyceps fumosorosea* against soybean pests. **BioControl**, v. 65, p. 323-337, 2020.
- CORTEZ-MADRIGAL, H.; SÁNCHEZ-SAAVEDRA, DÍAZ-GODÍNEZ, G.; AGUILERA, G.M. Enzymatic activity and pathogenicity of entomopathogenic fungi from central and southeastern Mexico to *Diaphorina citri* (hemiptera: psyllidae). **Southwestern Entomologist**, v. 39, n. 3, p. 491-502, 2014.
- CURRIE, C.E.; BOT, A.N.M.; BOOMSMA, J.J. Experimental evidence of a tripartite mutualism: bacteria protect ant fungus gardens from specialized parasites. **Oikos**, v. 101, p. 91-102, 2003.
- CHEN, W.H.; HAN, Y.F.; LIANG, J.D.; TIAN, W.Y.; LIANG, Z.Q. Multi-gene phylogenetic evidence indicates that *Pleurodesmopora* belongs in Cordycipitaceae (Hypocrales, Hypocreomycetidae) and *Pleurodesmopora lepidopterum* sp. nov. on pupa from China. **Mycologia**, v. 80, p. 45-55, 2021.
- CHUANG, W.Y.; LIN, Y.C.; SHRESTHA, B.; LUANGSA-ARD, J.J.; STADLER, M.; TZEAN, S.S.; WU, S.; KO, C.C.; HSIEH, S.Y.; WU, M.L.; WANG, S.C.; SHEN, T.L.; ARIYAWANSA, H.A. Phylogenetic diversity and morphological characterization of cordycipitaceous species in Taiwan. **Studies in Mycology**, v. 109, p. 1-56, 2024.
- DOMINGUES, M.M.; SANTOS, P.L.; GÊA, B.C.C.; CARVALHO, R.V.; OLIVEIRA, F.N.; SOLIMAN, E.P.; SILVA, W.M.; ZANUNCIO, J.C.; JUNIOR, V.C.S.; WILCKEN, C.F. Isolation and molecular characterization of *Cordyceps* sp. from *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) and pathogenic to *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae). **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, 2024.

- DU, C.; WU, J.; CUTHBERTSON, A.G.S.; BASHIR, M.H.; SUN, T.; ALI, S. Morphological, molecular and virulence characterisation of six *Cordyceps* spp. isolates infecting the diamondback moth, *Plutella xylostella*. **Biocontrol Science and Technology**, v. 31, p. 373-386, 2021.
- DUNLAP, C. A., RAMIREZ, J. L., MASCARIN, G. M.; LABEDA, D. P. Entomopathogen ID: A curated sequence resource for entomopathogenic fungi. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 111, p. 897-904, 2017.
- FEHLBAUM, P.; BULET, P.; MICHAUT, L.; LAGUEUX, M.; BROEKAERT, W. F.; HETRU, C.; HOFFMANN, J.A. Insect immunity. Septic injury of *Drosophila* induces the synthesis of a potent antifungal peptide with sequence homology to plant antifungal peptides. **Journal of Biological Chemistry**, v. 269, p. 33159 -33163, 1994.
- GADE, G.; SIMEK, P.; MARCO, H.G. The Adipokinetic Peptides in Diptera: Structure, Function, and Evolutionary Trends. **Frontiers in Endocrinology**, v. 11, n. 152, 2020.
- GAO, T.; WANG, Z.; HUANG, Y.; KEYHANI, N.O.; HUANG, Z. Lack of resistance development in *Bemisia tabaci* to *Isaria fumosorosea* after multiple generations of selection. **Scientific Reports**, v.7, 2017.
- GAUTAM, U.M.; BOHATÁ, A.; SHAIK, H.A.; ZEMEK, R.; KODRÍK, D. Adipokinetic hormone promotes infection with entomopathogenic fungus *Isaria fumosorosea* in the cockroach *Periplaneta americana*. **Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology**, v. 229, 2020.
- GOETTEL, M.S.; EILENBERG, J.; GLARE, T. **Entomopathogenic fungi and their role in regulation of insect populations**. In: Insect Control: Biological and Synthetic Agents, 1.ed. cap.11, 2011.
- GOLEBIEWSKI, M.; BOJKE, A.; TKACZUK, C. Effects of the entomopathogenic fungi *Metarhizium robertsii*, *Metarhizium flavoviride*, and *Isaria fumosorosea* on the lipid composition of *Galleria mellonella* larvae. **Mycologia**, v. 113, p. 525-535, 2021.
- GUTIÉRREZ, R.L.; MOLINA-OCHOA, J.; CHÁVEZ-FLORES, O.; ÁNGEL-SAHAGÚN, C.A.; SKODA, S.R.; REYES-MARTÍNEZ, G.; BARBA-REYNOSO, M.; REBOLLEDO-DOMÍNGUEZ, O.; RUÍZ-AGUILLAR, G.M.L.; FOSTER, J.E. Use of the entomopathogenic fungi *Metarhizium anisopliae*, *Cordyceps bassiana* and *Isaria fumosorosea* to control *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) in Persian lime under field conditions. **International Journal of Tropical Insect Science** v. 32, No. 1, p. 39-44, 2012.
- HAJEK, A.E.; LEGER, R.J.S. Interactions between fungal pathogens and insect hosts. **Annual Review of Entomology**, v. 39 p. 293-322, 1994.
- HARITAKUM, R.; SRIKITIKULCHAI, P.; KHOYAIKLANG, P.; ISAKA, M. Isariotins A–D, Alkaloids from the Insect Pathogenic Fungus *Isaria tenuipes* BCC 7831. **Journal of Natural Products**, v. 70, p. 1478-1480, 2007.
- HODGE, K.T.; GAMS, W.; SAMSON, R.A.; KORF, R.P.; SEIFERT, K.A. Lectotypification and status of *Isaria*. Fr. **Taxon**, v. 54, n. 2, p. 485-489, 2005.
- HONG, S.; SHANG, J.; SUN, Y.; TANG, G.; WANG, C. Fungal infection of insects: molecular insights and prospects. **Trends in Microbiology**, v. 32, n. 3, 2024.
- HOY, M.A.; SINGH, R.; ROGERS, M.E. Evaluations of a Novel Isolate of *Isaria fumosorosea* for Control of the Asian Citrus Psyllid, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae). **Florida entomologist**, v. 93, p. 24-32, 2010.
- HUANG, Z.; HAO, Y.; GAO, T.; HUANG, Y.; REN, S.; KEYHANI, N.O. The Ifchit1 chitinase gene acts as a critical virulence factor in the insect pathogenic fungus *Isaria fumosorosea*. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, p. 5491-5503, 2016.

- HUMBER, R.A. Evolution of entomopathogenicity in fungi. *Journal of Invertebrate Pathology*, v. 98, p. 262-266, 2008.
- HUNTER, W.B.; AVERY, P.B.; PICK, D.; POWELL, C.A. Broad Spectrum Potential of *Isaria fumosorosea* Against Insect Pests of Citrus. *Florida Entomologist*, v. 94, p.1051-1054, 2011.
- INGLIS, P.W.; TIGANO, M.S. Identification and Taxonomy of Some Entomopathogenic Paecilomyces spp. (Ascomycota) Isolates Using rDNA-ITS Sequences. *Genetics and Molecular Biology*, 29, 132136, 2006.
- JABER, L.R.; OWNLEY, B.H.; Can we use entomopathogenic fungi as endophytes for dual biological control of insect pests and plant pathogens? *Biological Control*, v. 116, p. 36-45, 2018.
- JACOBSEN, R.M.; SVERDRUP-THYGESON, A.; KAUSERUD, H.; BIRKEMOE, T. Revealing hidden insect-fungus interactions; moderately specialized, modular and anti-nested detritivore networks. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 285, 2017.
- JARMUL-PIETRASZCZYK, J.; GÓRSKA, K.; KAMIONEK, M.; ZAWITKOWSKI, J. The occurrence of entomopathogenic fungi in the Chojnowski Landscape Park in Poland. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Animal Science*, v. 52, p. 37-47, 2013.
- JIN, R.; WANG, B.; ZHANG, G.; CAO, C. AKH/AKHR signalling system induced antioxidant response mediated by entomopathogenic fungi in *Nilaparvata lugens* (Stål). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, v. 206, 2024.
- KEPLER, R.M.; LUANGSA-ARD, J.J.; HYWEL-JONES, N.L.; QUANDT, C.A.; SUNG, G.; REHNER, S.A.; AIME, M.C.; HENKEL, T.W.; SANJUAN, T.; ZARE, R.; CHEN, M.; LI, Z.; ROSSMAN, A.Y.; SPATAFORA, W.J.; SHRESTHA, B. A phylogenetically- based nomenclature for Cordycipitaceae (Hypocreales). *International Mycological Association*, v. 8, n. 2, p. 335-353, 2017.
- KERESELIDZE, M.; DRAGANOVA, S.; PILARSKA, D.; LINDE, A. Susceptibility of *Lymantria monacha* and *L. dispar* to the entomopathogenic fungus *Isaria fumosorosea* WIZE. *Prethodno priopćenje - Preliminary communication*, p. 185-191, 2014.
- KHAN, T.; DONG-HAI, H.; ZHOU, J. N. *et al.* Comprehensive analysis of metabolites in the mycelium of *Cordyceps fumosorosea* cultured on *Periplaneta americana*. *Annals of Microbiology*, v. 74, n. 9, 2024.
- KOLCZAREK, R.; JANKOWSKI, K. Occurrence of entomopathogenic fungi in soils from *festuca pratensis* huds. *Crop. Journal of Ecological Engineering*, v. 15, p. 73-77, 2014.
- KUZNIAR, T.; KRYSIA, A.; ROPEK, D. The evaluation of plants and soil colonization by entomopathogenic fungus *isaria fumosorosea* used for dressing maize and faba been seeds. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, v. 56, 2011.
- LACEY, L.A.; MERCADIER, G. The Effect of Selected Allelochemicals on Germination of Conidia and Blastospores and Mycelial Growth of the Entomopathogenic Fungus, *Paecilomyces fumosoroseus* (Deuteromycotina: Hyphomycetes). *Mycopathologia*, v. 142, p. 17-25, 1998.
- LACEY, L.A.; WRAIGHT, S.P.; KIRK, A.A. **Entomopathogenic Fungi for Control of Bemisia spp.: Foreign Exploration, Research and Implementation; in Classical Biological Control of Bemisia tabaci in the USA: A Review of Interagency Research and Implementation**, Vol. 4 'Progress in Biological Control', eds J.K. Gould, K. Hoelmer and J. Goolsby (Hokkanen H., series editor). Dordrecht: Springer, p. 33-69, 2008.
- LEI, Y.; HUSSAIN, A.; GUAN, Z.; WANG, D.; JALEEL, W.; LYU, L.; HE, Y. Unraveling the Mode of Action of *Cordyceps fumosorosea*: Potential Biocontrol Agent against *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Insects*, v. 12, p. 179, 2021.

- LEMAITRE, B.; HOFFMAN, J. The host defense of *Drosophila melanogaster*. **Annual Review of Immunology**, v. 25, p. 697-743, 2007.
- LI, X.; WIENS, J.J. Estimating Global Biodiversity: The Role of Cryptic Insect Species. **Society of Systematic Biologists**, v. 72, p. 391-403, 2023.
- LIU, L.; ZHANG, J.; CHEN, C.; TENG, J.; WANG, C.; LUO, D. Structure and biosynthesis of fumosorinone, a new protein tyrosine phosphatase 1B inhibitor firstly isolated from the entomogenous fungus *Isaria fumosorosea*. **Fungal Genetics and Biology**, 2015.
- LU, H.L.; LEGER, R.J.S. Insect Immunity to Entomopathogenic Fungi. **Advance in Genetics**, v. 94, p. 251-285, 2016.
- LUANGSA-ARD, J.J., HYWEL-JONES, N.L., AND SAMSON, R.A. The Polyphyletic Nature of Paecilomyces Sensu Lato Based on 18S-generated rDNA Phylogeny. **Mycologia**, v. 96, p. 773-780, 2004.
- LUKASIK, I.; GALAWSKA, S. Effect of host plant on levels of reactive oxygen species and antioxidants in the cereal aphids *Sitobion avenae* and *Rhopalosiphum padi*. **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 51, p. 232-239, 2013.
- LUO, Y.; WU, S.; HE, X.; WANG, D.; HE, Y.; NIAN, X. Identification of a *Cordyceps fumosorosea* Fungus Isolate and Its Pathogenicity against Asian Citrus Psyllid, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). **Insects**, v. 13, p. 374, 2022.
- MAJCHROWSKA-SAFARYAN, A.; TKACZUK, C.; KUZiemska, B. Effects of mineral fertilization with the addition of zinc and copper salts on the occurrence and infectious potential of entomopathogenic fungi in soil. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 27, p. 8765-8772, 2017.
- MALIK, M.N.; FREED, S.; GUL, H.T.; AKMAL, M. Pathogenicity of insect pathogenic fungus *Isaria fumosorosea* to different aphid species. **Frontiers in Agriculture**, p. 21-27, 2012.
- MANFRINO, R.G.; ROCCA, M. Susceptibility of *Orius insidiosus* to *Beauveria bassiana*, *Akanthomyces muscarius*, and *Cordyceps fumosorosea* and their effects on predator behavior. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v. 172 p. 902-909, 2024.
- MEDO, J.; CAGÁN, L. Factors affecting the occurrence of entomopathogenic fungi in soils of Slovakia as revealed using two methods. **Biological Control**, v. 59, p. 200-208, 2011.
- MEYER, J. M.; HOY, M. A.; BOUCIAS, D. G. Isolation and characterization of an *Isaria fumosorosea* isolate infecting the Asian citrus psyllid in Florida. **Journal of Invertebrate Pathology**, v. 99, p. 96-102, 2008.
- MEYLING, N.V.; SCHMIDT, N.M.; EILENBERG, J. Occurrence and diversity of fungal entomopathogens in soils of low and high Arctic Greenland. **Polar Biology**, v. 35, p. 1439- 1445, 2012.
- MORA, M.A.E.; ROUWS, J.R.C.; FRAGA, M.E. Occurrence of entomopathogenic fungi in Atlantic forest soils. **Microbiology Discovery**, v. 4, 2016.
- OLANTUJI, O.P.; TANG, J.; TOLA, A.; AUBERON, F.; OLUWANIYI, O.; OUYANG, Z. The genus *Cordyceps*: An extensive review of its traditional uses, phytochemistry and pharmacology. **Fitoterapia**, v. 129, p. 293-316, 2018.
- ORTIZ-URQUIZA, A.; KEYHANI, N.O. Action on the surface: Entomopathogenic fungi versus insect cuticle. **Insects**, v. 4, p. 357-374, 2013.
- PADULLA, L.F.L.; ALVES, S.B. Suscetibilidade de ninfas de *diaphorina citri* a fungos entomopatogênicos. Comunicação científica, **Arquivos do Instituto Biológico**, São Paulo, v.76, n.2, p.297-302, 2009.

PICK, D.A.; AVERY, P.B.; HUNTER, W.B.; POWELL, P.A.; ARTHURS, S.P. effect of *isaria fumosorosea* (hypocreales: cordycipitaceae) and *lysiphlebus testaceipes*, (hymenoptera: braconidae) on the brown citrus aphid: preliminary assessment of a compatibility study. **Florida Entomologist**, v. 95, p. 764-766, 2012.

QASIM, M.; ISLAM, S.U.; ISLAM, W.; NOMAN, A.; KHAN, K.A.; HAFEEZ, M.; HUSSAIN, D.; DASH, C.K.; BAMISILE, B.S.; AKUTSE, K.S.; RIZWAN, M.; NISAR, M.S.; JAN, S.; WANG, L. Characterization of mycotoxins from entomopathogenic fungi (*Cordyceps fumosorosea*) and their toxic effects to the development of asian citrus psyllid reared on healthy and diseased citrus plants. **Toxicon**, v. 188, p. 39-47, 2020.

QAYYUM, M.A.; SAEED, S.; RIAZ, H.; AHMED, N.; WAKIL, W.; YASIM, M.; CHAUDHRY, M.A.; BASHIR, M.A.; BILAL, H.; GHAZANFAR, M.A.; MAQSOOD, S.; HASHEM, M.; ALAMRI, S. Diversity and Correlation of Entomopathogenic and Associated Fungi with Soil Factors. **Journal of King Saud University – Science**, 2021.

QU, S.L.; LI, S.; LI, D.; ZHAO, P. Metabolites and Their Bioactivities from the Genus *Cordyceps*. **Microrganisms**, v. 10, 1489, 2022.

QUESADA-MORANGA, E.; GARRIDO-JURADO, I.; GONZÁLEZ-MAS, M.; YOUSEF-YOUSEF, M. Ecosystem services of entomopathogenic ascomycetes. **Journal of Invertebrate Pathology**, v. 201, 2023.

QUANDT, C.A.; KEPLER, R.M.; GAMS, W.; ARAÚJO, J.P.; BAN, S. Phylogenetic-based nomenclatural proposals for Ophycordycipitaceae (Hypocrales) with new combinations in Tolypocladium. **IMA Fungus**, v. 5, p. 121-134, 2014.

ROJAS, V.M.A.; IWANICKI, N.S.; D'ALESSANDRO, C.P.; FATORETTO, M.B.; DEMÉTRIO, C.G.B.; DELALIBERA, I.J. Characterization of Brazilian *Cordyceps fumosorosea* isolates: Conidial production, tolerance to ultraviolet-B radiation, and elevated temperature. **Journal of Invertebrate Pathology**, v. 197, 2023.

SABAREESH, V.; RANGANAYAKI, R.S.; RAGHOTHAMA, S.; BOPANNA, M.P.; BALARAM, H.; SRINIVASAN, M.C.; BALARAM, P. Identification and characterization of a library of microheterogeneous cyclohexadepsipeptides from the fungus *Isaria*. **Journal of Natural Products**, v. 70, p. 715-729, 2007.

SABBOUR, M.M.; ABDEL-RAHEEM, M.A.; Evaluations of *Isaria fumosorosea* Isolates against the Red Palm Weevil *Rhynchophorus ferrugineus* under Laboratory and Field Conditions. **Current Science International**, v. 3, p. 179-185, 2014.

SALDANHA, M.A.; COSTA, E.C.; MUNIZ, M.F.B.; QUEVEDO, A.C.; SARZI, J.S. Pathogenicity of isolates of entomopathogenic fungi to workers of *Acromyrmex heyeri* (forel, 1899) (hymenoptera: formicidae). **Revista Floresta**, v. 53, n.1, p. 072-079, 2023.

SARAGIH, S.A.; TAKEMOTO, S.; SATO, H.; KAMATA, N. Specific Primer Designing for Quantitative PCR (qPCR) of Entomopathogenic Fungi *Isaria fumosorosea* from Soil Samples. **Journal Perlindungan Tanaman Indonesia**, v. 27, p. 51-57, 2023.

SHARMA, A.; SHARMA, S.; YADAV, P.K. Entomopathogenic fungi and their relevance in sustainable agriculture: A review. **Cogent Food & Agriculture**, v. 9, p. 1-21, 2023.

SRIDHAR, K.R.; DESHMUKH, S.K.; FUNG, S.Y.; MAHADEVAKUMAR, S. **Advances in Cordyceps Research: Prospects and Avenues**, 1 ed., CRC Press, 2024.

STORK, N.E.; MCBROOM, J.; GELY, C.; HAMILTON, A.J. New approaches narrow global species estimates for beetles, insects, and terrestrial arthropods. **PNAS**, v. 112 p. 7519-23, 2015.

- SUÁREZ-VERGEL, G.; FIGUEROA-MARTINEZ, F.; GARZA-LOPEZ, P.M.; GARCÍA-ORTIZ, N.; LOERA, O. DOPA-melanin, component and tolerance factor to heat and UV-B radiation in the conidia of two species of *Cordyceps*. **Biocontrol Science and Technology**, v. 32, p. 437-454, 2022.
- TKACZUK, C.; KRZYCZKOWSKI, T.; WEGENSTEINER, R. The occurrence of entomopathogenic fungi in soils from mid-field woodlots and adjacent small-scale arable fields. **Acta Mycologia**, v. 47, p. 191-202, 2012.
- TIAN, J.; DIAO, H.; LIANG, L.; HAO, C.; ARTHURS, S.; MA, R. Pathogenicity of *Isaria fumosorosea* to *Bemisia tabaci*, with some observations on the fungal infection process and host immune response. **Journal of Invertebrate Pathology**, v. 130, p. 147-153, 2015.
- TIHELKA, E.; CAI, C.; GIACOMELLI, M.; LORENZO-FERNANDEZ, J.; ROTA-STABELLI, O.; HUANG, D.; ENGEL, M.S.; DONOGHUE, P.C.J.; PISANI, D. The evolution of insect biodiversity. **Current Biology**, v. 21, p. 1299-1311, 2021.
- VEGA, F.E.; BIEDERMANN, P.H.W. On interactions, associations, mycetangia, mutualists and symbiotes in insect-fungus symbioses. **Fungal Ecology**, v. 44, 2020.
- VEGA, F.E.; MEYLING, N.V.; LUANGSA-ARD, J.J.; BLACKWELL, M. **Fungal Entomopathogens**. In: VEGA, F.; KAYA, H.K. editors. Insect Pathology. 2nd Edition. San Diego, CA: Academic Press. p. 171-220, 2012.
- WANG, X.; GONG, X.; LI, P.; LAI, D.; ZHOU, L. Structural Diversity and Biological Activities of Cyclic Depsipeptides from Fungi. **Molecules**, v. 23, 169, 2018.
- WENG, Q.; ZHANG, X.; CHEN, W.; HU, Q. Secondary metabolites and the risks of *Isaria fumosorosea* and *Isaria farinosa*. **Molecules**, v. 24, p. 664, 2019.
- WU, S.; TOEWS, M.D.; OLIVEIRA-HOFMANN, C.; BEHLE, R.W.; SIMMONS, A.M.; SHAPIRO-ILLAN, D.I. Environmental Tolerance of Entomopathogenic Fungi: A New Strain of *Cordyceps javanica* Isolated from a Whitefly Epizootic Versus Commercial Fungal Strains. **Insects**, v. 11, p. 711, 2020.
- WU, J.; YANG, B.; XU, J.; CUTHBERTSON, A.G.S.; ALI, S. Characterization and Toxicity of Crude Toxins Produced by *Cordyceps fumosorosea* against *Bemisia tabaci* (Gennadius) and *Aphis craccivora* (Koch). **Toxins**, v. 13, 220, 2021.
- XIAO, Y.P.; WANG, Y.B.; HYDE, K.D.; ELENÍ, G.; SUN, J.; TANG, Y.; MENG, J.; YU, H.; WEN, T. Polycephalomycetaceae, a new family of clavicipitoid fungi segregates from Ophiocordycipitaceae. **Fungal Diversity**, v. 120 p. 1-76, 2023.
- XIAO, Z.; YAO, X.; BAI, S.; WEI, J.; AN, S. Involvement of an Enhanced Immunity Mechanism in the Resistance to *Bacillus thuringiensis* in Lepidopteran Pests. **Insects**, v. 14, p. 151, 2023.
- ZEMEK, R.; PRENEROVÁ, E.; VOLTER, L.; AWAD, M.; WEYDA, F.; HUSSEIN, H. M.; HABUŠTOVÁ SKOKOVÁ, O.; PŮŽA, V. **Non-target impacts of *Isaria fumosorosea* (Hypocreales: Cordycipitaceae) on natural enemies of arthropod pests**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BIOLOGICAL CONTROL OF ARTHROPODS, 5., 2017, Langkawi. Proceedings of the 5th International Symposium on Biological Control of Arthropods. Wallingford: CAB International, 2017. Poster 25.
- ZIMMERMAN, G. The entomopathogenic fungi *Isaria farinosa* (formerly *Paecilomyces farinosus*) and the *Isaria fumosorosea* species complex (formerly *Paecilomyces fumosoroseus*): biology, ecology and use in biological control. **Biocontrol Science and Technology**, v. 18, n. 9, p. 865-901, 2008.

ZHA, L.; KRYUKOV, V.U.; DING, J.; JEEWON, R.; CHOMNUNTI, P. Novel taxa and species diversity of *Cordyceps* sensu lato (Hypocreales, Ascomycota) developing on wireworms (Elateroidea and Tenebrionoidea, Coleoptera). **Mycokeys**, v. 78, p. 79-117, 2021.

ZHENG, Y.; WANG, W.; CHEN, B.; PHANGTHAVONG, S.; ZHAO, Y.; XU, T.; XIAO, G. Spatiotemporal Dynamics and Host Diversity of *Isaria fumosorosea* in Xishuangbanna Tropical Rain Forests. **Chinese Journal of Biological Control**, v. 36, p. 371-380, 2020.

ZHUANG WY, ZENG ZQ. Cocoonihabitus sinensis gen. et sp. nov. on remaining leaf veins of cocoons in a new family (Cocoonihabitateae fam. nov.) of Hypocreales. **Mycosystema**, v. 36, p. 1591-1598, 2017.

PLANT PHYSIOLOGY UNDER ABIOTIC STRESSES: AN INTEGRATIVE REVIEW OF THE MECHANISMS, RESPONSES, AND TOLERANCE STRATEGIES

Rebeca Queiroz Pereira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano (IFSertãoPE)

Teonis Batista da Silva

Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Djair Alves da Mata

Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Flávia Cartaxo Ramalho Vilar

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano (IFSertãoPE)

Alysson Lívio Vasconcelos Guedes

Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Marcos Felipe Queiroz dos Santos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano (IFSertãoPE)

Erick Matheus Ferreira dos Santos Costa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano (IFSertãoPE)

Jenilton Gomes da Cunha

Universidade Federal do Piauí (UFPI)

ABSTRACT

Abiotic factors exert a strong influence on plant physiology, as they determine how plants grow, develop, and adapt to the environment. The present study aims to address the main effects of these stresses on plant physiology. Water deficiency, for example, leads to stomatal closure, reducing carbon dioxide uptake and, consequently, the rate of photosynthesis. Salinity causes osmotic imbalance and impairs nutrient absorption, compromising growth. Extreme temperatures also affect metabolism: cold reduces enzymatic activity and membrane fluidity, whereas heat accelerates respiration and may denature proteins. Intense solar radiation, especially ultraviolet radiation, damages pigments and DNA, requiring defense mechanisms such as antioxidant production. In addition, nutrient availability in the soil is essential for vital processes, and both deficiency and excess can generate physiological stress. In response to these challenges, plants develop adaptations such as the accumulation of osmoprotective solutes, the synthesis of heat shock proteins, and the production of antioxidant compounds. Thus, abiotic factors shape plant physiology and directly influence agricultural productivity, making proper management and the development of resistant varieties essential to ensure crop sustainability and yield.

Keywords: Physiological Adaptation; Agricultural Productivity; Abiotic Stress.

INTRODUCTION

Stress can be understood as any deviation from the ideal conditions required for the maintenance of life. This imbalance triggers functional changes in the plant organism that, at first, may be reversible. However, when stress is prolonged, such modifications tend to become consolidated, gradually reducing plant vitality. Once the capacity for physiological adjustment is exceeded, hidden disturbances become evident, resulting in chronic diseases or irreversible damage to tissues and vital functions (Dias, 2018).

Climate change intensifies abiotic stresses, such as drought, heat, and salinity, by increasing their frequency, severity, and simultaneous occurrence, thereby significantly compromising plant growth and agricultural productivity (Zandalinas *et al.*, 2022).

Stress or a stressor is any environmental factor (abiotic stress) that withdraws energy from organisms, restricts growth and reproduction, or disturbs the balance of a system, mobilizing its resources, in addition to increasing its energetic demands, thus indicating a stimulus (Dias, 2018). Such factors include extreme temperatures (heat or cold), droughts, floods, ultraviolet (UV) radiation, salinity, deficiencies of essential nutrients, and contamination by heavy metals, increased soil erosion, diseases, insect pests, weeds, loss of biodiversity, landscape fragmentation, among others (Vitousek *et al.*, 1997; Chatterjee *et al.*, 2019; Lanna *et al.*, 2021).

Among the different types of abiotic stresses, thermal stress (climatic factors), water scarcity, and salinity stress stand out as the most harmful, as they cause severe physiological alterations and significantly compromise plant development and survival.

Extreme temperatures, whether very high or very low, constitute one of the main causes of losses in agricultural production (Chatterjee *et al.*, 2019). The unavailability of water in the soil is considered one of the most limiting factors for plant distribution and productivity on a global scale. As water deficit worsens, dehydration of the protoplasm occurs, impairing vital processes such as cell growth (Bahadur *et al.*, 2011; Chatterjee & Solankey, 2015).

In addition, the concentration of soluble salts in water (salinity) represents another restrictive factor for the growth and development of several crops

(Lacerda *et al.*, 2011). According to Munns (2005), the inhibition of plant growth under saline conditions results from two main mechanisms: the osmotic effect, which reduces water uptake, and the specific toxic effect of excess ions, which enter the transpiration stream and may cause tissue injury, impairing growth and the absorption of essential elements.

In Brazil, whose economic base remains strongly supported by agriculture and livestock production, the effects of climate change are manifested broadly, although with unequal intensity among regions. In the Northeastern Semi-Arid region, prolonged droughts stand out; in the Cerrado, extreme climatic events prevail; in the South and Southeast regions, a reduction in grain productivity is observed; dairy farming is affected by thermal stress; and in areas of agricultural expansion such as Matopiba, there is increased pressure on water resources, which contributes to the intensification of abiotic stresses (EMBRAPA, 2020; PBMC, 2016; Destefani *et al.*, 2025).

General concepts of abiotic stress in plants

Abiotic stress is defined by primary environmental parameters that affect plant growth, including light (intensity, quality, and duration), water (soil availability and humidity), carbon dioxide, oxygen, soil nutrient content and availability, temperature, and toxins (i.e., heavy metals and salinity). Fluctuations of these environmental factors beyond their normal limits generally have negative biochemical and physiological consequences for plants (Taiz *et al.*, 2017).

The degree of stress may range from zero to moderate to severe and is related to the amount of energy expended in the process of change in the living system (Embrapa, 2009). Plants may recover from damage if stress is mild or of short duration, as the effect is temporary, whereas severe stresses lead to plant death, preventing flowering and seed formation and inducing senescence (Verma, Nizam, & Verma, 2013).

Phenotypic plasticity corresponds to the ability of the same genotype to modify its physiology and morphology in response to environmental variations, allowing the species to develop under different conditions. When these changes concern the form and appearance of plant organs, they are referred to

as morphological plasticity, resulting from the interaction between the genetic potential for adaptation and local conditions (Verly, 2023).

In this context, plants adjust their physiology and morphology to ensure survival and reproduction without relying on immediate genetic changes. When such responses become more effective after repeated exposure to stress, they are termed acclimation, which is characterized as temporary and reversible. Epigenetic mechanisms may prolong these responses and may even render them heritable. When genetic modifications become fixed throughout the population over many generations under selective environmental pressure, this process is termed adaptation (Taiz *et al.*, 2017).

Metabolic responses to isolated abiotic stresses are already well documented in different plant systems, both in perennial and annual species (Wang *et al.*, 2016; Kang *et al.*, 2019; Muchate *et al.*, 2019; Zandalinas *et al.*, 2022). However, under field conditions, plants generally face multiple simultaneous stresses, which impose additional and specific metabolic demands (Mittler, 2006; Zandalinas *et al.*, 2018; Rivero *et al.*, 2022).

One example is salinity stress, which causes osmotic alterations resulting from reductions in relative water content, turgor pressure, and cellular water potential. In addition, ionic toxicity caused by excess sodium (Na^+) and chloride (Cl^-) compromises stomatal regulation, reduces leaf growth, and decreases biomass production (Toppa & Brambilla, 2011). In soils with high salt concentrations, these osmotic alterations induce water deficiency, resulting in reduced crop productivity and changes in several metabolic processes (Munns & Tester, 2008).

Saline Stress

Characterization of saline stress

The Global Map of Salt-Affected Soils, released by the Food and Agriculture Organization of the United Nations, reveals that 8.7% of the world's soils are saline (ONU, 2021). This type of soil is found mainly in naturally arid and semi-arid environments (Costa, 2024).

Brazil has approximately 160 thousand square kilometers of saline soils, corresponding to about 16 million hectares, which represents 2% of the national

territory. Of this total, 57% (about 9.1 million hectares) are concentrated in the Northeastern Semi-Arid region. The remaining 43% (approximately 6.9 million hectares) are distributed in regions such as western Mato Grosso do Sul, eastern and central Rio Grande do Sul, as well as coastal areas (Santos *et al.*, 2018; Costa, 2024).

Greater importance regarding this issue in Brazil is given to the Northeastern backlands (*sertão*), where evapotranspiration exceeds precipitation and, consequently, prevents water percolation through the soil profile and, therefore, the leaching of salts from the soil (Freire & Freire, 2007; Schossler, 2012).

The scarce rainfall in these areas, combined with reduced bioclimatic activity, low levels of weathering, insufficient drainage, and the use of poor-quality water, favors the formation of soils with high salt concentrations (Holanda *et al.*, 2007; Pedrotti *et al.*, 2015).

The salinization process results from environmental characteristics (primary salinization) and/or anthropogenic actions (secondary salinization) (Daliakopoulos *et al.*, 2016). Among the environmental factors, the following stand out: transport of sediments containing salts to non-saline areas, capillary rise of saline water to the soil surface, and high evapotranspiration rates. Among the anthropogenic factors, the following are highlighted: irrigation with water containing high salt concentrations, inefficient drainage, and the application of fertilizers and agricultural pesticides. The impacts of soil salinization over recent decades have included reductions in agricultural production and population displacement from rural areas toward cities, negatively affecting food security and the economic conditions of communities (Castro & Santos, 2020; Costa, 2024).

The formation of saline soils is associated both with the predominant geological characteristics of the landscape and with drainage conditions. Thus, the genesis of salinity problems is closely linked to the soil formation process itself (Ribeiro, Freire, & Montenegro, 2003; Figueiredo, 2005). According to Daker (1988) and Pedrotti (2015), salts derived from primary minerals found in soils and rocks are transported by water and eventually accumulate in the soil. This accumulation occurs as water is evaporated or used by crops, triggering the salinization process.

The salinization process results from the accumulation of soluble salts, mainly composed of the ions Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , and Mg^{2+} (Pereira, 1983). For

classification purposes, salt-affected soils are grouped into three categories: saline, sodic, and saline-sodic. This typology was established by the U.S. Department of Agriculture Salinity Laboratory, considering saline and sodic characteristics (Richards, 1970). The criteria used are based on the concentration of soluble salts and on the Exchangeable Sodium Percentage (ESP), calculated in relation to the soil Cation Exchange Capacity (CEC at pH 7) (Guařoni & Silva, 2013).

Physiological effects of salt stress

Understanding the effects of salts on plants, as well as the associated phenomena, is essential for the adoption of appropriate water and crop management practices, especially when the goal is to make agricultural production feasible using saline water. The reduction in plant growth and reproduction as a function of increasing soil salinity is modulated by three effects: osmotic, ionic, and nutritional imbalance (Salatta, 2019).

Excess salts in the soil can affect plants in two main ways. First, high salinity reduces the soil water potential, making it difficult or even preventing water absorption by the plant, since this absorption depends on the existence of a water potential gradient (Marques *et al.*, 2011).

Roots are able to take up water when the imbibition force of their tissues exceeds the retention force exerted by the soil. However, the presence of salts in the soil solution intensifies this retention due to the osmotic effect, aggravating water scarcity. The increase in osmotic pressure (OP), caused by the accumulation of soluble salts, may reach levels at which roots do not have sufficient suction force to overcome it (Dos Santos Esteves & Suzuki, 2008; Pedrotti, 2015).

Under these conditions, the plant ceases to absorb water, even in apparently moist soils, characterizing the so-called physiological drought, also causing severe nutritional imbalance due to significant changes in the processes of nutrient absorption, transport, assimilation, and distribution in the plant, such as, for example, excess Na^+ inhibiting the absorption of nutrients such as K^+ and Ca^{2+} . In more severe situations, instead of absorbing water, the plant may lose water from its interior. This process, called plasmolysis, occurs when plant cells come into contact with highly concentrated solutions, resulting in the exit of

water from the cells to the external environment (Dos Santos Esteves & Suzuki, 2008; Pedrotti, 2015).

Upon sensing this “physiological drought,” roots synthesize the phytohormone abscisic acid (ABA), which is transported to stomatal cells, promoting their closure. This mechanism blocks CO₂ entry into chlorophyll-containing cells, reducing the photosynthetic rate and, consequently, biomass production (Costa, 2024).

In addition, ionic toxicity caused by specific ions such as sodium and chloride compromises the structure of enzymes and other macromolecules, damages cellular organelles, interrupts vital processes such as photosynthesis and respiration, inhibits protein synthesis, and induces nutritional deficiencies, thereby affecting plant development throughout its life cycle (Salatta, 2019).

Mechanisms of salinity tolerance

Plant responses to salinity stress vary according to genotype, such that some species exhibit high tolerance to salinity, whereas others are highly sensitive. In this context, plants can be classified into two main groups: halophytes, which naturally develop in environments with high salt concentrations, especially sodium (Na⁺) and chloride (Cl⁻), and glycophytes, which are unable to survive under saline conditions (Willadino, 2010).

Halophytes, being adapted to salt-rich environments, have developed specific mechanisms to cope with excess ions. Among these mechanisms, salt compartmentalization stands out, in which the storage of ions in the cellular vacuole prevents high salt concentrations from reaching the protoplasm, ensuring internal regulation and reducing the toxic and osmotic effects of salt accumulation. In addition, ionic exclusion performed by the roots selectively regulates salt uptake, preventing excessive accumulation in tissues. Many halophytes also possess salt glands, specialized structures that secrete NaCl through the leaves, maintaining internal ion concentrations at adequate levels (Hogarth, 1999; Levitt, 1980; Dos Santos Esteves & Suzuki, 2008).

This set of mechanisms is essential because high salt concentrations in the soil reduce the osmotic potential of water, making its absorption by plants more difficult. To overcome this condition, plants must decrease their own water

potential, making it lower than that of the soil. This process, called osmotic adjustment, occurs through an increase in the concentration of organic and inorganic solutes within cells, which ensures the maintenance of turgor, cell volume, and plant growth (Ahmed *et al.*, 2021).

In halophytes, salinity tolerance is frequently associated with the accumulation of ions such as sodium and, especially, potassium, which favor osmotic adjustment. In addition, both halophytes and glycophytes produce organic solutes in the cytoplasm to balance the low osmotic potential of the vacuole caused by excess salts. These compounds are known as compatible solutes or osmoprotectants, as they are soluble and do not interfere with cellular metabolism, even at high concentrations (Willadino, 2010).

Another mechanism involves the concept of compatible solutes proposed by Wyn Jones and collaborators in 1977. These solutes play two main roles: at high concentrations, they contribute to osmotic adjustment; at low concentrations, they act as protectors of cellular structures (Munns, 2005). Among the main compatible solutes are amino acids such as proline; quaternary ammonium compounds such as glycine betaine and proline betaine; sulfonium compounds such as DMSP; polyols such as mannitol and pinitol; soluble sugars such as fructose, sucrose, and trehalose; polymeric sugars such as fructans; as well as polyamines such as putrescine, spermidine, and spermine (Hasegawa *et al.*, 2000; Bray *et al.*, 2000; Willadino *et al.*, 1996). Also included are enzymes that eliminate free radicals and proteins that stabilize other proteins, further reinforcing cellular protection in saline environments (Munns, 2005; Willadino, 2010).

Water stress (water deficit and excess)

Concepts and types of water stress

According to Taiz *et al.* (2017), water deficit can affect different stages of plant growth and development in distinct ways, causing cellular dehydration and compromising physiological processes in general. Under this condition, the water potential of the apoplast becomes more negative relative to that of the symplast, leading to a reduction in turgor. As a consequence, cellular dehydration occurs, increasing ion concentration and potentially rendering them

cytotoxic. In addition, water stress promotes the uncoupling of photosystems, preventing free electrons generated in reaction centers from being transferred to NADP⁺, thereby favoring the formation of reactive oxygen species (ROS).

These include the superoxide ion (O₂⁻), hydrogen peroxide (H₂O₂), hydroxyl radical (OH⁻), and peroxy radical (HO₂⁻). These molecules cause oxidative stress in plants, leading to damage to proteins, enzymes, lipids, and nucleic acids (Hasanuzzaman, 2013). Furthermore, they can peroxidize membrane lipids, alter DNA methylation patterns, remove or substitute bases, and generate chromosomal modifications, such as aneuploidy, polyploidy, and structural rearrangements (Willadino, 2010).

These free radicals induce membrane peroxidation, degradation of biological macromolecules, and, in extreme cases, cell death. The ability of plants to neutralize the toxic effects of ROS is considered one of the main determinants of stress tolerance. In this context, antioxidants represent the first line of defense and are essential for maintaining cellular integrity (Rajput *et al.*, 2021). The primary antioxidant response involves enzyme activity in response to drought; the antioxidant defense system consists of enzymatic components (superoxide dismutase, catalase, peroxidase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase) and non-enzymatic components (cysteine, ascorbic acid, and carotenoids), which are produced to protect against oxidative damage by neutralizing ROS (Bittencourt & Silva, 2018).

Another condition of water stress is excess water in the soil, since several areas are subject to temporary flooding, especially in locations with a water table close to the soil surface (Righi, 2020). In these flooded soils, due to low infiltration capacity and/or high rainfall concentration during certain periods of the year, anoxia or hypoxia may occur, which is the absence or low concentration of available oxygen. This condition affects root respiration and ATP production, inhibiting plant growth (Dias-Filho & Andrade, 2005).

Heat stress (high and low temperatures)

Characterization of thermal stress

Temperature affects biophysical and biochemical processes and, in this way, strongly influences the physiology of plants that are exposed to high incidences of light energy and to cold and desiccating atmospheres (Ramalho, 2018).

Thermal stress in plants may be manifested through three main physiological response pathways: freezing, caused by temperatures below zero; chilling, characterized by changes resulting from temperatures close to freezing but prior to the formation of ice crystals (Ruelland & Zachowiski, 2010); and heating, associated with temperature increases above 45 °C (O'Sullivan *et al.*, 2017). Regardless of the form of thermal stress, some responses are common, such as cellular dehydration (Larcher, 2000; Lambers *et al.*, 2008) and damage to young and growing tissues (Björkman, Badger, & Arnold, 1980).

From an agronomic point of view, temperature is of vital importance for plant growth and development, as well as for agricultural production. Many physiological processes in higher plants occur between temperatures of 0.0 and 40.0 °C. Therefore, there is a wide temperature range for growth, although some crops are adapted to low, moderate, or high temperatures (De Medeiros & Da Silva, 2016).

The optimal temperatures for photosynthesis and respiration processes in subtropical and tropical species generally occur in the range between 25 and 35 °C (Zhu *et al.*, 2018). Reductions in leaf temperatures to 10 to 15 °C usually represent a period of loss of metabolic efficiency and characterize chilling stress (Sakai & Larcher, 1987; Yamori *et al.*, 2010).

Physiological effects of high-temperature stress

Thermal stress affects all aspects of plant processes, such as germination, growth, development, reproduction, and productivity (Hasanuzzaman *et al.*, 2013; Mittler & Blumwald, 2010; McClung & Davis, 2010), differentially affecting the stability of various proteins, membranes, RNA species, and cytoskeletal structures, and altering the efficiency of enzymatic reactions in the cell,

which impairs major physiological processes and creates metabolic imbalance (Hasanuzzaman *et al.*, 2013).

One of the most widely recognized effects of exposure to high temperatures is protein denaturation (Silva, 2010). Temperature increases beyond optimal limits favor the disruption of noncovalent bonds in the hydrophobic core of proteins, leading to a decrease in the rate of catalytic reactions and culminating in the loss of their functional conformation (Alberts, 2017; Anfinsen, 1973).

These protein denaturations resulting from very high or very low temperatures can cause problems in plant cell membranes (Mouga, 2024). When temperature rises, molecules move faster and collide more frequently, increasing the spaces between them and making the membrane more permeable. In addition, some protein bonds break, opening larger pores and facilitating the passage of substances. If heat is very intense, the membrane may even be destroyed (Vodopich & Moore, 2023).

When temperature drops below 37 °C, membrane lipids change state, shifting from a liquid (fluid) state to a gel-like (semi-solid) state. This greatly reduces molecular diffusion (Lodish *et al.*, 2016). Between 0 and 10 °C, the membrane becomes more permeable and solutes may leak out of the cell due to phase changes in phospholipids (Simon, 1974). If temperature continues to decrease, water freezes and forms ice crystals, which expand and break interactions with lipids, leading to membrane rupture (Vodopich & Moore, 2023).

Even when complete destruction does not occur, temperature variation alters membrane fluidity, hindering processes such as simple diffusion (Mouga, 2024).

Heat exerts negative effects on plant leaves, such as reductions in leaf water potential, decreases in leaf area, and the occurrence of premature senescence, factors that compromise the overall performance of photosynthesis. Under prolonged thermal stress, depletion of carbohydrate reserves is also observed, which may lead to plant starvation.

The decline in photosynthetic efficiency at high temperatures results from the interaction of several physiological and biochemical factors that impair cellular function. Among the main mechanisms, enzyme denaturation stands out, such as that of Rubisco, which is essential for CO₂ fixation during photosynthesis. This enzyme plays a central role in primary productivity, being responsible for the annual fixation of more than 1.011 tons of atmospheric CO₂ (Mathur, Agrawal, &

Jajoo, 2014). However, under excessive heat, its affinity for CO₂ decreases, while its affinity for O₂ increases, favoring photorespiration. In this process, energy is consumed and CO₂ is released without sugar production, reducing overall photosynthetic efficiency (Kluge, Tezotto-Uliana, & Da Silva, 2015).

In addition, the photosynthetic apparatus may suffer direct damage. Studies by Vasconcellos Barros and Lemos Filho (2007) demonstrate that plants exposed to extreme temperatures, such as 10 °C and 40 °C, show reductions in photosystem II efficiency and in CO₂ assimilation capacity. Another defense mechanism observed is stomatal closure, which occurs in response to high temperatures to avoid excessive water loss. However, by reducing transpiration, stomata also limit CO₂ entry, compromising carboxylation and intensifying photorespiration (Bittencourt & Silva, 2018).

Mechanisms of tolerance to thermal stress

Under conditions of thermal stress, several heat-inducible genes, known as heat shock genes (HSGs), are activated. These genes encode heat shock proteins (HSPs), whose products play an essential role in maintaining plant survival when exposed to extremely high temperatures (Chang *et al.*, 2007).

Heat shock proteins (HSPs) are produced when plants face high temperatures. They function as chaperones, helping other proteins avoid denaturation and maintaining their structure and function. The production of these HSPs occurs at specific stages of plant development, such as seed germination, embryo formation, pollen production, and fruit maturation (Baniwal *et al.*, 2004; Prasinós *et al.*, 2005).

In plants, the known HSPs are divided into five main groups: HSP100, HSP90, HSP70, HSP60, and HSP20 (sHSP). Among them, HSP70 and HSP60 are highly conserved in nature, highlighting their essential importance in protection against heat-induced stress (Swindell, Huebner, & Weber, 2007; Kulz, 2003).

Strategies for mitigating abiotic stresses

Plant breeding consists of the manipulation and selection of desirable traits in plants, aiming to increase productivity, enhance resistance to pests and

diseases, and strengthen tolerance to environmental stresses such as drought, salinity, and high temperatures (Hodgkin & Bordoni, 2012; Da Silva *et al.*, 2024). With recent advances in biotechnology and genomics, the possibilities for improvement have been significantly expanded. Tools such as marker-assisted selection, genetic engineering, and, more recently, gene editing using the CRISPR/Cas9 system allow the introduction of specific traits in a faster and more precise manner compared with conventional methods (Ayanoglu, Elçin, & Elçin, 2020). These innovations are transforming agriculture, offering effective solutions to address the challenges imposed by climate change (Da Silva *et al.*, 2024).

Improvement of soil quality can be achieved through practices such as crop rotation, balanced fertilization, and the increase of organic matter, which favor water and nutrient retention, as well as the use of soil conditioners such as gypsum and lime to reduce the effects of salinity and excessive acidity. The use of biostimulants and stress tolerance inducers, such as amino acids, plant hormones (cytokinins and auxins), and beneficial microorganisms, assists in plant recovery and increases their resistance, also improving nutrient uptake efficiency (MY FARM AGRO, 2025).

Proper water management, with localized irrigation and soil moisture monitoring, prevents water deficits or excesses, while the selection of genetically adapted cultivars to adverse conditions such as drought, salinity, and high temperatures ensures greater resilience. Finally, integrated management techniques, such as the use of cover crops to improve soil structure and reduce surface temperature, associated with pest and disease control, contribute to minimizing the effects of abiotic stresses and climate change and to maintaining sustainable agricultural productivity (MY FARM AGRO, 2025).

FINAL CONSIDERATIONS

Abiotic stresses trigger complex physiological, biochemical, and morphological responses in plants that aim to minimize damage and ensure survival. These responses include osmotic adjustment, changes in photosynthesis and respiration, antioxidant production, synthesis of protective proteins, and alterations in growth patterns, which may result in short-term acclimation or long-term genetic adaptation. Although substantial progress has been made in

understanding individual stress factors, important knowledge gaps remain regarding plant responses to multiple, simultaneous stresses under field conditions. Furthermore, limited comparative studies on sustainable agricultural practices, inconsistent results on the use of biostimulants and beneficial microorganisms, and insufficient understanding of agroforestry systems highlight the need for further research. Addressing these gaps will be essential for developing resilient cropping systems and improving plant tolerance to abiotic stresses in changing environmental conditions.

REFERENCES

- ALBERTS, B. *et al.* **Biologia molecular da célula**. 6. ed. Porto Alegre: ArtMed, 2017. E-book. p. 172. ISBN 9788582714232. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788582714232/>. Acesso em: 12 mar. 2025.
- ANFINSEN, C. B. Principles that govern the folding of protein chains. **Science**, v. 181, n. 4096, p. 223–230, 20 jul. 1973. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1126/science.181.4096.223>. Acesso em: 12 mar. 2025.
- AHMED, K. B. M. *et al.* Photosynthetic and cellular responses in plants under saline conditions. *In*: AHMAD, P. *et al.* (ed.). **Photosynthesis under stress: biotic and abiotic constraints**. Cambridge: Academic Press, 2021. p. 293–365. DOI: 10.1016/B978-0-323-90943-3.00007-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90943-3.00007-9>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- AYANOGLU, F. B.; ELÇİN, A. E.; ELÇİN, Y. M. Bioethical issues in genome editing by CRISPR-Cas9 technology. **Turkish Journal of Biology**, v. 44, n. 2, p. 110–120, 2020. DOI: 10.3906/biy-1912-52.
- BAHADUR, A. *et al.* Physiological and biochemical basis of drought tolerance in vegetables. **Vegetable Science**, v. 38, n. 1, p. 1–16, 2011.
- BANIWAL, S. K. *et al.* Resposta ao estresse térmico em plantas: um jogo complexo com chaperonas e mais de vinte fatores de transcrição de estresse térmico. **Journal of Biosciences**, v. 29, n. 4, p. 471–487, 2004. DOI: 10.1007/BF02712120.
- BITTENCOURT, P. P.; SILVA, L. N. N. Estresse hídrico em plantas: aspectos morfofisiológicos, adaptações e mecanismos de resposta. *In*: **BOTÂNICA NO INVERNO 2018**. Organizadores: Laboratório de Algas Marinhas. 2018. p. 235.
- BRAY, E. A. *et al.* (ed.). **Biochemistry & molecular biology of plants**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. cap. 22, p. 1158–1203. Disponível em: <https://archive.org/details/biochemistrymole00buch>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- BJORKMAN, O.; BADGER, M.; ARNOLD, S. Thermal acclimation of photosynthesis in higher plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 77, n. 1, p. 137–141, 1980. DOI: 10.1073/pnas.77.1.137. Acesso em: 15 jan. 2026.
- CAMARA, T. R.; WILLADINO, L. Compreendendo o estresse abiótico in vitro. *In*: NOGUEIRA, R. J. M. C. *et al.* (ed.). **Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas**. Recife: MXM Gráfica e Editora, 2005. parte V, cap. 29, p. 325–335.

CASTRO, F. C.; SANTOS, A. M. dos. Salinidade do solo e risco de desertificação na região semiárida. **Mercator**, v. 19, e19002, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mercator/a/rpNjRffgtMLP3LYtLn7kNbh/>. Acesso em: 4 jan. 2026.

COSTA, L. de L. **Silício como atenuador do estresse salino na fisiologia e crescimento da planta e qualidade da minimelancia**. 2024. 84 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2024. Disponível em: https://ppgfito.ufersa.edu.br/wp-content/uploads/sites/222/2025/01/Dissertacao_Letycia-Lima-da-Costa.pdf. Acesso em: 15 jan. 2026.

CHATTERJEE, A.; SOLANKEY, S. S. Functional physiology in drought tolerance of vegetable crops – an approach to mitigate climate change impact. In: CHAUDHARY, M. L. *et al.* (ed.). **Climate change: the principles and applications in horticultural science**. Boca Raton: Academic Press, 2015. p. 149–171.

CHATTERJEE, A. *et al.* Beneficial microorganisms and abiotic stress tolerance in plants. In: HASANUZZAMAN, M. *et al.* (ed.). **Approaches for enhancing abiotic stress tolerance in plants**. Boca Raton: CRC Press, 2019. p. 473–502.

CHANG, H. C. *et al.* SnapShot: chaperonas moleculares, parte I. **Cell**, v. 128, 2007. DOI: 10.1016/j.cell.2007.01.001.

DAKER, A. **A água na agricultura: irrigação e drenagem**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1988. 543 p.

DALIAKOPOULOS, I. N. *et al.* The threat of soil salinity: a European scale review. **Science of the Total Environment**, v. 573, p. 727–739, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177>. Acesso em: 15 jan. 2026.

DA SILVA, C. M. Melhoramento genético de plantas para adaptabilidade às mudanças climáticas. **Revista de Gestão e Secretariado (GeSec)**, v. 15, n. 9, p. 1–20, 2024. DOI: 10.7769/gesec.v15i9.4161. Acesso em: 15 jan. 2026.

DE MEDEIROS, R. M.; DA SILVA, M. V. Oscilação das temperaturas máximas, mínima e média do ar e da precipitação. In: DE MEDEIROS, R. M. (org.). **Estudo climático do município de Matinhas-PB**. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2018. p. 117.

DE VASCONCELLOS BARROS, F.; LEMOS FILHO, J. P. Resposta fotossintética de plântulas de *Dalbergia nigra* Allem. em relação à temperatura. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, n. S2, p. 351–353, 2007.

DESTEFANI, W. C. *et al.* Mudanças climáticas e seus impactos nos setores agropecuários. **Revista Regeo**, São José dos Pinhais, v. 16, n. 5, p. 1–18, 2025. DOI: 10.56238/revgeov16n5-167. Acesso em: 15 jan. 2026.

DIAS, J. P. T. **Respostas e adaptação a diferentes estresses abióticos**. Belo Horizonte: Editora da Universidade do Estado de Minas Gerais, 2018. p. 19.

DIAS, N. da S. *et al.* Efeitos dos sais no solo e na planta. In: **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2010. v. 1, p. 129–141.

DIAS-FILHO, M. B.; ANDRADE, C. M. S. de. Pastagens no ecossistema do trópico úmido. In: **SIMPÓSIO SOBRE PASTAGENS NOS ECOSISTEMAS BRASILEIROS**, 2005, Goiânia. Anais [...]. Goiânia: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2005. p. 95–104. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/115098>. Acesso em: 15 jan. 2026.

DOS SANTOS ESTEVES, B.; SUZUKI, M. S. Efeito da salinidade sobre as plantas. **Oecologia Brasiliensis**, v. 12, n. 4, p. 6–15, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/oecol/a/9kzFf9JtYy7mQxv9hLw9t9P/>. Acesso em: 15 jan. 2026.

EMBRAPA. **Estresse abiótico**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2009. (Documentos, 239). 25 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/697072/1/doc-239-p25.pdf>.

EMBRAPA AGROBIOLOGIA. **Práticas agroecológicas de adaptação às mudanças climáticas: experiências de base comunitária**. Seropédica: Embrapa, 2020.

FIGUEIRÊDO, A. F. R. **Análise do risco de salinização dos solos da bacia hidrográfica do Rio Colônia – Sul da Bahia**. 2005. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2005. Disponível em: <https://btdt.ibict.br/vufind/>. Acesso em: 15 jan. 2026.

FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Redox signaling in plants. **Antioxidants & Redox Signaling**, v. 18, p. 2087–2090, 2013.

FREIRE, M. B. G. S.; FREIRE, F. J. Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais. In: NOVAIS, R. F. *et al.* (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 929–954. Disponível em: <https://archive.org/details/fertilidade-do-solo-roberto-ferreira-novais-victor-hugo-alvarez-1>. Acesso em: 15 jan. 2026.

GUARÇONI, M. A.; SILVA, J. G. F. da. **Solos afetados por sais e qualidade da água para irrigação**. Vitória: Incaper, 2013. (Documentos, 156). Disponível em: <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/handle/item/1089>. Acesso em: 15 jan. 2026.

HASEGAWA, P. M. *et al.* Plant cellular and molecular responses to high salinity. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 51, p. 463–499, 2000. DOI: 10.1146/annurev.arplant.51.1.463. Acesso em: 15 jan. 2026.

HASANUZZAMAN, M. *et al.* Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 14, n. 5, p. 9643–9684, 2013. DOI: 10.3390/ijms14059643. Acesso em: 15 jan. 2026.

HOLANDA, A. C. *et al.* Desenvolvimento inicial de espécies arbóreas em ambientes degradados por sais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 7, n. 1, p. 39–50, 2007. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=50007105>. Acesso em: 15 jan. 2026.

HODGKIN, T.; BORDONI, P. Climate change and the conservation of plant genetic resources. **Plant Genetic Resources**, v. 26, n. 3, p. 329–345, 2012. DOI: 10.1080/15427528.2011.609928.

HOGARTH, P. J. **The biology of mangroves**. New York: Oxford University Press, 1999. Disponível em: <https://archive.org/details/biologyofmangrov0000hoga>. Acesso em: 15 jan. 2026.

KANG, Z. *et al.* Comparative metabolomic profiling in roots and leaves of contrasting genotypes reveals complex mechanisms involved in post-anthesis drought tolerance in wheat. **PLoS One**, v. 14, n. 3, e0213502, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213502>. Acesso em: 15 jan. 2026.

KLUGE, R. A.; TEZOTTO-ULIANA, J. V.; DA SILVA, P. P. M. Aspectos fisiológicos e ambientais da fotossíntese. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 56–73, 2015.

KÜLTZ, D. Evolution of the cellular stress proteome: from monophyletic origin to ubiquitous function. **Journal of Experimental Biology**, v. 206, p. 3119–3124, 2003. DOI: 10.1242/jeb.00549.

LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L. **Plant physiological ecology**. 2. ed. New York: Springer, 2008. 605 p. DOI: 10.1007/978-0-387-78341-3. Acesso em: 15 jan. 2026.

LANNA, A. C. *et al.* Mitigação dos estresses abióticos na agricultura mediada pela interação de microrganismos e plantas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 64, n. 1, p. 1–12, 2021. DOI: 10.22491/rca.2021.364. Acesso em: 15 jan. 2026.

LACERDA, C. F. *et al.* Soil salinization and maize and cowpea yield in the crop rotation system using saline waters. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 4, p. 663–675, 2011. DOI: 10.1590/S0100-69162011000400005. Acesso em: 15 jan. 2026.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2000. 531 p. Disponível em: <https://www.worldcat.org/title/ecofisiologia-vegetal/oclc/49225265>. Acesso em: 15 jan. 2026.

LEVITT, J. **Responses of plants to environmental stress: chilling, freezing, and high temperature stresses**. 2. ed. New York: Academic Press, 1980. 497 p. Disponível em: <https://archive.org/details/responsesofplant0001levi>. Acesso em: 15 jan. 2026.

LODISH, H. *et al.* **Molecular cell biology**. 5. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 2016.

MARQUES, E. C. *et al.* Efeitos do estresse salino na germinação, emergência e estabelecimento da plântula de cajueiro anão precoce. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 993–999, 2011.

MATHUR, S.; AGRAWAL, D.; JAJOO, A. Photosynthesis: response to high temperature stress. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 137, p. 116–126, 2014.

MCCLUNG, C. R.; DAVIS, S. J. Environmental thermometers in plants: from physiological responses to thermal sensing mechanisms. **Current Biology**, v. 20, p. 1086–1092, 2010.

MITTLER, R. Abiotic stress, the field environment and stress combination. **Trends in Plant Science**, v. 11, n. 1, p. 15–19, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2005.11.002>. Acesso em: 15 jan. 2026.

MITTLER, R.; BLUMWALD, E. Genetic engineering for modern agriculture: challenges and perspectives. **Annual Review of Plant Biology**, v. 61, p. 443–462, 2010.

MOUGA, T. Integridade da membrana: a resposta da membrana plasmática ao estresse térmico e a solventes orgânicos em células de beterraba. **Capturing Science and Environment for All**, v. 13, p. 1–13, 2024.

MUCHATE, N. S. *et al.* NaCl induced salt adaptive changes and enhanced accumulation of 20-hydroxyecdysone in *in vitro* shoot cultures of *Spinacia oleracea* (L.). **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 12522, 2019. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-48737-6>. Acesso em: 15 jan. 2026.

MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, Cell & Environment**, v. 25, p. 239–250, 2002.

MUNNS, R. Genes and salt tolerance: bringing them together. **New Phytologist**, v. 167, n. 3, p. 645–663, 2005. DOI: 10.1111/nph.13519.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, p. 651–681, 2008.

MY FARM AGRO. Estresse vegetal: impactos, danos e manejo para mitigação. Cuiabá, 19 mar. 2025. Disponível em: <https://blog.myfarmagroeducacao.com.br/estresse-vegetal-impactos-danos-e-manejo-para-mitigacao/>. Acesso em: 13 jan. 2026.

NAWAZ, F. *et al.* Supplemental selenium improves wheat grain yield and quality through alterations in biochemical processes under normal and water deficit conditions. **Food Chemistry**, v. 175, p. 350–357, 2015.

NOCTOR, G.; FOYER, C. H. Intracellular redox compartmentation and ROS-related communication in regulation and signaling. **Plant Physiology**, v. 171, p. 1581–1592, 2016.

O'SULLIVAN, O. S. *et al.* Thermal limits of leaf metabolism across biomes. **Global Change Biology**, v. 23, n. 2, p. 209–223, 2017. DOI: 10.1111/gcb.13477. Acesso em: 15 jan. 2026.

ONU. 1,5 bilhão de pessoas vivem com solo salgado demais para ser fértil. **Nações Unidas Brasil**, 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/152392-15-bilh%C3%A3o-de-pessoas-vivem-com-solo-salgado-demais-para-ser-f%C3%A9rtil>. Acesso em: 4 jan. 2026.

PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Sumário executivo setorial – agricultura, pecuária e silvicultura**. Rio de Janeiro: PBMC, 2016.

PRASINOS, C. *et al.* Tight regulation of two cytosolic Hsp90 genes of *Arabidopsis* during embryogenesis. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, n. 412, p. 633–644, 2005.

PEDROTTI, A. *et al.* Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 1308–1324, 2015. DOI: 10.5902/2236117016544. Acesso em: 15 jan. 2026.

PEREIRA, J. R. Solos salinos e sódicos. In: **REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO**, 15., 1982, Campinas. **Acidez e calagem no Brasil**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983. p. 127–143. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/132817>. Acesso em: 15 jan. 2026.

RAMALHO, H. D. S. **Avaliação do estresse térmico na flora dos inselbergs do Alto Itatiaia**. 2018. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.bdtu.uerj.br/handle/1/7914>. Acesso em: 15 jan. 2026.

RAJPUT, V. D. *et al.* Recent developments in enzymatic antioxidant defense mechanism in plants with special reference to abiotic stress. **Biology**, v. 10, n. 4, p. 267, 2021. DOI: 10.3390/biology10040267. Acesso em: 15 jan. 2026.

RIVERO, R. M. *et al.* Developing climate-resilient crops: improving plant tolerance to stress combination. **The Plant Journal**, v. 109, n. 2, p. 373–389, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/tpj.15483>. Acesso em: 15 jan. 2026.

RIBEIRO, M. R.; FREIRE, F. J.; MONTENEGRO, A. A. A. Solos halomórficos no Brasil: ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável. In: CURTI, N. *et al.* (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 3, p. 165–208, 2003.

RIGHI, R. S. M. **Tolerância de cultivares de *Panicum maximum* ao estresse hídrico**. 2020. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020. Disponível em: https://ufr.edu.br/zootecnia/wp-content/uploads/2020/02/TCZOO_RIGHI_RSM_2020_1.pdf.pdf. Acesso em: 15 jan. 2026.

RICHARDS, L. A. **Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos**. Washington: United States Department of Agriculture, 1970. (Agriculture Handbook, 60). 172 p.

RUELLAND, E.; ZACHOWSKI, A. How plants sense temperature. **Environmental and Experimental Botany**, v. 69, n. 3, p. 225–232, 2010. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2010.05.011. Acesso em: 15 jan. 2026.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SAKAI, A.; LARCHER, W. **Frost survival of plants: responses and adaptation to freezing stress**. Berlin: Springer-Verlag, 1987. 321 p.

SALATTA, F. V. **Estresse salino: efeitos sobre o metabolismo dos fenilpropanoides em colmos de milho**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2019. Disponível em: http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/8555/1/Fabio%20Vieira%20Salatta_2019.pdf. Acesso em: 15 jan. 2026.

SILVA, V. C. T. da. **Efeito da alta temperatura na germinação e desenvolvimento inicial de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg.** 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2025. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/604f5612-eadb-4ae2-9c4f-864cf992f8fb>. Acesso em: 15 jan. 2026.

SIMON, E. W. Phospholipids and plant membrane permeability. **New Phytologist**, v. 73, p. 377–420, 1974.

SCHOSSLER, T. R. *et al.* Salinidade: efeitos na fisiologia e na nutrição mineral de plantas. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 15, p. 1563–1578, 2012.

SWINDELL, W. R.; HUEBNER, M.; WEBER, A. P. Transcriptome profiling of heat shock proteins and transcription factors in *Arabidopsis* reveals extensive overlap between heat and non-heat stress response pathways. **BMC Genomics**, v. 8, p. 125, 2007. DOI: 10.1186/1471-2164-8-125.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p. ISBN 9788582713662. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788582714232/>. Acesso em: 13 jan. 2026.

TOPPA, E. V. B.; BRAMBILLA, W. P. O melhoramento de plantas e a salinidade dos solos. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 6, n. 1, p. 21–25, 2011. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7429747>. Acesso em: 15 jan. 2026.

VERLY, O. A importância da plasticidade fenotípica na identificação florestal. **Matanativa**, 9 fev. 2023. Disponível em: <https://matanativa.com.br/a-importancia-da-plasticidade-fenotipica-na-identificacao-florestal/>. Acesso em: 13 jan. 2026.

VERMA, S.; NIZAM, S.; VERMA, P. K. Biotic and abiotic stress signaling in plants. *In: Stress signaling in plants: genomics and proteomics perspective*. v. 1, p. 25–49, 2013.

VITOUSEK, P. M. *et al.* Human domination of Earth’s ecosystems. **Science**, v. 277, n. 5325, p. 494–499, 1997. DOI: 10.1126/science.277.5325.494.

VODOPICH, D. S.; MOORE, R. **Biology laboratory manual**. 12. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2023. 704 p.

YAMORI, W. *et al.* Effects of internal conductance on the temperature dependence of photosynthesis in spinach leaves from contrasting growth temperatures. **Plant, Cell & Environment**, v. 33, n. 5, p. 920–928, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02113.x>. Acesso em: 15 jan. 2026.

ZANDALINAS, S. I. *et al.* Plant responses to climate change: metabolic changes under combined abiotic stresses. **Journal of Experimental Botany**, v. 73, n. 11, p. 3339–3354, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erac073>. Acesso em: 15 jan. 2026.

ZHU, J. *et al.* The effects of temperature on photosynthesis and respiration in tropical and subtropical plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 127, p. 89–96, 2018.

WANG, W. S. *et al.* Complex molecular mechanisms underlying salt tolerance in rice seedlings revealed by comparative transcriptome and metabolome profiling. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 1, p. 405–419, 2016.

WILLADINO, L.; CAMARA, T. R. Tolerância das plantas à salinidade: aspectos fisiológicos e bioquímicos. **Enciclopédia Biosfera**, v. 6, n. 11, p. 1–23, 2010.

SOBRE OS ORGANIZADORES

Teonis Batista da Silva

Bacharel em Agronomia pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, *Campus* Petrolina Zona Rural. Especialista em Agronomia pela Faculdade FAVENI, Mestre em Agronomia com ênfase em Horticultura Irrigada pela Universidade do Estado da Bahia (UNEB), *Campus* III, Juazeiro (BA), e atualmente curso Doutorado em Ciências Agrárias pela Universidade Federal do Piauí (UFPI). Atuação e experiência: Minha linha de pesquisa concentra-se em propagação e manejo cultural de plantas, com ampla experiência técnica, científica e acadêmica. Atuo na elaboração de projetos, análises laboratoriais e docência em cursos de nível superior e técnico. Tenho expertise em aulas práticas e teóricas, contribuindo para disciplinas como Anatomia Vegetal, Fisiologia Vegetal, agricultura especial I, Botânica Sistemática e Plantas Medicinais.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9667459552094357>

Jenilton Gomes da Cunha

Graduado em Engenharia Agrônoma pela Universidade Estadual do Piauí (2017), Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (2019) e Doutorado em Ciências Agrárias pela Universidade Federal do Piauí (2024). Atualmente é bolsista de Pós-doutorado Júnior do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Revisor de periódicos científicos nacionais e internacionais. Desenvolve pesquisas nas áreas de Fisiologia de Plantas Cultivadas com ênfase no desenvolvimento de estratégias para mitigação do estresse abiótico em plantas, Manejo e Tratos Culturais e nutrição mineral de plantas.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2273843380199883>

ÍNDICE REMISSIVO

A

Alelopatia: 32, 33, 34, 36, 40, 41, 44, 49, 50, 51

B

Bioeconomia: 9

Biorrefinaria: 9, 25, 53, 54, 55, 57

Biotecnologia: 25, 68

C

Controle Biológico: 68, 81

E

Entomopatógeno: 68, 69, 71, 76, 80, 82

Eucalipto: 32, 34, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 46, 47, 48

L

Lignina: 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65

M

Mandiocultura: 9, 23

Manga: 50

Metabolismo Secundário: 32, 33

MIP: 68, 69

P

Processo Organosolv: 53, 57, 62, 63

R

Resíduo Agroindustrial: 9

Resíduos Lignocelulósicos: 53

S

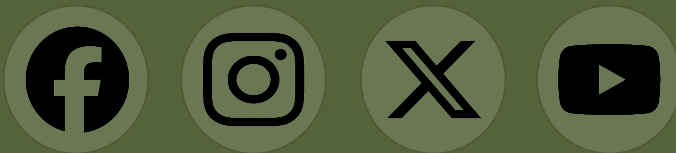
Sustentabilidade: 16, 18, 24, 26, 65, 68



científica digital



VENDA PROIBIDA - ACESSO LIVRE - OPEN ACCESS



www.cientificadigital.org | contato@cientificadigital.org