

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 18/06/2028.

Universidade Estadual Paulista – UNESP

Câmpus de Jaboticabal

**O EXTRATO FOLIAR DE *MORINGA OLEIFERA* ATENUA
EFEITOS ESTRESSANTES DA INTERAÇÃO ENTRE
DEFICIÊNCIA HÍDRICA E BROCA-DA-CANA?**

Kauane Fonseca dos Santos

Bióloga

D
I
S
S.
/
S
A
N
T
O
S

K.
F.

2
0
2
6

Universidade Estadual Paulista – UNESP

Câmpus de Jaboticabal

**O EXTRATO FOLIAR DE MORINGA OLEIFERA ATENUA
EFEITOS ESTRESSANTES DA INTERAÇÃO ENTRE
DEFICIÊNCIA HÍDRICA E BROCA-DA-CANA?**

Discente: Kauane Fonseca dos Santos

Orientadora: Prof.^a Dra. Priscila Lupino Gratão

Coorientador: Prof. Dr. Odair Aparecido Fernandes

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).

S237e Santos, Kauane Fonseca dos
O extrato foliar de Moringa oleifera atenua efeitos estressantes da interação entre deficiência hídrica e broca-da-cana? / Kauane Fonseca dos Santos. -- Jaboticabal, 2026
64 p. : tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientadora: Priscila Lupino Gratão
Coorientador: Odair Aparecido Fernandes

1. Broca-da-cana-de-açúcar. 2. Moringa oleifera. 3. Irrigação com déficit hídrico. 4. Estresse oxidativo. 5. Extratos vegetais. I. Título.

Impacto potencial desta pesquisa

A cana-de-açúcar é vital para a economia e a matriz energética do Brasil, sendo a base para a produção de açúcar e etanol. Contudo, as mudanças climáticas intensificaram secas, ondas de calor e o surgimento de pragas, sobrecarregando as lavouras e causando grandes perdas na colheita. Para enfrentar esse desafio de forma sustentável, o uso de extratos vegetais surge como uma inovação biológica que fortalece as defesas naturais da planta. Essa abordagem gera impactos em três frentes fundamentais: **científico**, ao avançar no conhecimento de biostimulantes e defesas vegetais frente a múltiplos estresses; **econômico**, ao proteger a produtividade por hectare e reduzir os custos com insumos químicos; e **social**, ao fortalecer a segurança energética, manter empregos no campo e incentivar a transição para uma agricultura limpa. Alinhado às diretrizes da CAPES e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (**ODS 7, 9, 12, 13 e 15**), este trabalho impulsiona o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para o setor sucroenergético.

Potential impact of this research

Sugarcane is vital to Brazil's economy and energy matrix, serving as the foundation for sugar and ethanol production. However, climate change has intensified droughts, heatwaves, and pest outbreaks, overburdening crops and causing major harvest losses. To address this challenge sustainably, the use of plant extracts emerges as a biological innovation that strengthens the plant's natural defenses. This approach delivers impacts across three key pillars: **scientific**, by advancing research on biostimulants and plant resistance under combined stresses; **economic**, by safeguarding yields per hectare and reducing costs associated with chemical inputs; and **social**, by enhancing energy security, supporting rural employment, and driving the transition toward clean agriculture. Aligned with CAPES guidelines and the United Nations Sustainable Development Goals (**SDGs 7, 9, 12, 13, and 15**), this research fosters sustainable technological solutions for the sugarcane sector.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: O EXTRATO FOLIAR DE *MORINGA OLEIFERA* ATENUA EFEITOS ESTRESSANTES DA INTERAÇÃO ENTRE DEFICIÊNCIA HÍDRICA E BROCA-DA-CANA?

AUTORA: KAUANE FONSECA DOS SANTOS

ORIENTADORA: PRISCILA LUPINO GRATÃO

COORDENADOR: ODAIR APARECIDO FERNANDES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. PRISCILA LUPINO GRATÃO (Participação Presencial)
Departamento de Biologia / UNESP / Câmpus de Jaboticabal - FCAV

Pós-doutorando JOÃO RAFAEL SILVA SOARES (Participação Presencial)
ESALQ USP / Piracicaba/SP

Pós-doutorando ALLAN LOPES BACHA (Participação Presencial)
Departamento de Biologia / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 18 de junho de 2026.

KAUANE FONSECA DOS SANTOS – Nascida em 30 de abril de 2001, na cidade de Jacareí, São Paulo. Filha de Rosana Cristina Fonseca dos Santos e Augusto José dos Santos Neto, irmã de Natanael Augusto Fonseca dos Santos e Natali Cristina Fonseca dos Santos. Em 2019 ingressou no curso de bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, câmpus de Jaboticabal (Unesp/FCAV), optando em 2020 pelo Eixo em Meio Ambiente e Biodiversidade. Durante a graduação, desenvolveu atividade de monitoria na disciplina de Química Orgânica e na Diretoria Técnica de Informática (DTI), atuou nos anos de 2020 e 2021 como Vice-diretora Administrativa e Tesoureira na Jornada Anual Biológica Unesp (JABU) e paralelamente foi ritmista e Mestre da Liga Acadêmica Recreativa Bateria Universitária Batuka. Em 2022 foi bolsista (CNPq) de Iniciação Científica sob orientação da Profª Drª Priscila Lupino Gratão, projeto intitulado de “EFEITO DO PRÉ-TRATAMENTO DE SEMENTES DE ALGODÃO COM EXTRATO FOLIAR DE *MORINGA OLEIFERA* GERMINADAS SOB DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE SALINIDADE”. Em 2024 recebeu o título de bacharel em Ciências Biológicas pela Unesp. No mesmo ano, ingressou no curso de Mestrado Acadêmico no Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, câmpus de Jaboticabal (Unesp/FCAV), onde sob a orientação da Profª Drª Priscila Lupino Gratão e coorientação do Profº Drº Odair Aparecido Fernandes, está desenvolvendo pesquisas vinculadas à área de Fisiologia Vegetal, com foco nas respostas do sistema antioxidante enzimático e não enzimático ao estresse em plantas cultivadas.

*“Abrace a sua sombra e traga ela pra vida,
Às vezes no escuro, se encontra a saída”
”*

Fresno – *Abrace a sua sombra*

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - FCAV/Unesp e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) pela oportunidade e aprendizado.

Ao Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária, ao Departamento de Fitossanidade, ao Laboratório de Fisiologia Vegetal e ao Laboratório de Ecologia Aplicada pela estrutura oferecida para a realização deste trabalho.

À Banca do Exame Geral de Qualificação, pelas sugestões, que foram de extrema importância para a melhoria do presente trabalho.

À minha família, em especial à minha mãe, por sempre ter incentivado os filhos a estudarem e que mesmo com muitos momentos sendo desfavoráveis, conseguiu formar três filhos em universidades públicas.

À minha orientadora Prof^a Dr^a Priscila Lupino Gratão e ao meu coorientador Prof^o Dr^o Odair Aparecido Fernandes pela confiança, disposição e ensinamentos.

À nossa querida técnica de laboratório, Sônia Maria Carregari por toda ajuda oferecida e paciência.

Aos meus colegas de laboratório, em especial à Julia e à Lara, cuja ajuda foi crucial para a finalização do experimento.

À minha namorada Gabriela pelo carinho, cuidado, amor, pelo apoio emocional e pela ajuda na finalização de algumas análises.

Aos meus amigos Mateus, José Henrique, Angel, Guilherme, Gabriel e às amigas Adrielly, Maria Eduarda, Maria Luiza e Ana Laura pelas risadas e por todo o apoio.

Por fim, a todas as pessoas que direta ou indiretamente, de alguma forma contribuíram para o crescente aprendizado nestes dois anos de mestrado.

OBRIGADA!

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1	Contexto geral, usos da cana-de-açúcar e mudanças climáticas	3
2.2	Estresse hídrico e alterações morfofisiológicas em cana-de-açúcar.....	5
2.3	Estresse biótico ocasionado por broqueadores de colmo e alterações morfofisiológicas em cana-de-açúcar	7
2.4	Interação entre deficiência hídrica e broqueadores de colmo	9
2.5	<i>Moringa oleífera</i> e sua aplicação como extrato vegetal na família Poacea ..	11
3	HIPÓTESES.....	14
4	OBJETIVOS.....	14
4.1	Objetivo geral	14
4.2	Objetivos específicos.....	14
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	15
5.1	Material vegetal e condução do experimento.....	15
5.2	Confecção do extrato foliar de <i>M. oleífera</i>	15
5.3	Análises bioquímicas.....	15
5.3.1	Estresse oxidativo.....	15
5.3.2	Quantificação de pigmentos	15
5.3.3	Antioxidantes enzimáticos	15
5.4	Análise biométrica.....	15
5.4.1	Altura	15
5.5	Análise estatística	15
6	RESULTADOS.....	15
6.1	Análises bioquímicas.....	15
6.1.1	Estresse oxidativo.....	15
6.1.2	Quantificação de pigmentos	15
6.1.3	Antioxidantes enzimáticos	15
6.2	Análises biométricas	15
6.2.1	Altura	15
7	DISCUSSÃO	15

8	CONCLUSÃO	16
9	REFERÊNCIAS.....	17

O EXTRATO FOLIAR DE MORINGA OLEIFERA ATENUA EFEITOS ESTRESSANTES DA INTERAÇÃO ENTRE DEFICIÊNCIA HÍDRICA E BROCA-DA-CANA?

RESUMO - A cana-de-açúcar é cultivada em mais de 120 países do mundo, sendo o Brasil principal protagonista em sua produção. Essa cultura possui elevada relevância no setor sucroenergético global, contudo a sua produtividade é frequentemente desafiada por estresses abióticos, como a deficiência hídrica e estresses bióticos, como o ataque por *D. saccharalis*, principal broqueador de colmo das Américas. O uso do extrato foliar de *Moringa oleifera* (EFM) surge como uma alternativa bioestimulante para reforçar a resiliência do cultivo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial do EFM como atenuante dos efeitos da deficiência hídrica, do estresse por *D. saccharalis* e da combinação entre ambos na cultivar RB075322. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 2x4 (com ou sem EFM X Controle [70% CC], DH [50% CC], SB [3 larvas/planta] e DH+SB), com cinco repetições. Os estresses foram mantidos por 22 dias para DH e 14 dias para SB efetivo no colmo (120 DAT). Avaliaram-se a altura das plantas, pigmentos fotossintéticos, estresse oxidativo (MDA e H₂O₂) e a atividade de enzimas antioxidantes (GPOX, SOD, GSH-Px e APX). Sob restrição hídrica e herbivoria isoladas, as condições microclimáticas de umidade e a rusticidade da cultivar RB075322 atenuaram os danos oxidativos e preservaram os pigmentos fotossintéticos e o crescimento. Contudo, na ausência de EFM, a infestação isolada por *D. saccharalis* provocou a redução da altura das plantas e esgotou a atividade da GPOX devido ao consumo de substratos fenólicos. Na condição de estresse combinado (DH+SB), a aplicação foliar de EFM elevou os teores de H₂O₂, agundo como molécula sinalizadora, disparando o incremento coordenado das enzimas peroxidases (GPOX e GSH-Px) e conferindo proteção superior contra a peroxidação lipídica, reduzindo expressivamente os teores de MDA. Além disso, o EFM reestabeleceu os teores de clorofila *b* e carotenoides. Conclui-se que a cultivar RB075322 apresenta elevada tolerância às adversidades isoladas, e que o extrato foliar de *Moringa oleifera* atua como um eficiente bioestimulante fisiológico, fortalecendo o sistema antioxidante enzimático, protegendo as membranas celulares e mantendo a homeostase metabólica da cana-de-açúcar, sobretudo sob estresse combinado.

Palavras-chave: Broca-da-cana-de-açúcar, *Moringa oleifera*, Irrigação com déficit hídrico, Estresse oxidativo, Extratos vegetais

DOES MORINGA OLEIFERA EXTRACT ATTENUATE THE STRESSFUL EFFECTS OF THE INTERACTION BETWEEN DROUGHT STRESS AND SUGARCANE BORER?

ABSTRACT Sugarcane is cultivated in over 120 countries, with Brazil being the leading producer. This crop plays a crucial role in the global sugar-energy sector; however, its productivity is frequently challenged by abiotic stresses, such as water deficit, and biotic stresses, such as attacks by *D. saccharalis*, the primary stalk borer in the Americas. The use of *Moringa oleifera* leaf extract (MLE) emerges as a biostimulant alternative to enhance crop resilience. This study aimed to evaluate the potential of MLE to mitigate the effects of water deficit, *D. saccharalis* stress, and the combination of both in the RB075322 cultivar. The experiment was conducted in a greenhouse using a randomized block design with a 2x4 factorial arrangement (with or without MLE × Control [70% field capacity], Water Deficit [50% field capacity], Stalk Borer [3 larvae/plant], and Water Deficit + Stalk Borer) and five replicates. Stress treatments were applied for 22 days for water deficit and 14 days for active stalk borer infestation (starting at 120 days after transplanting). Evaluations included plant height, photosynthetic pigments, oxidative stress markers (MDA and H₂O₂), and antioxidant enzyme activity (GPOX, SOD, GSH-Px, and APX). Under isolated water restriction and herbivory, microclimatic humidity conditions and the hardiness of the RB075322 cultivar mitigated oxidative damage and preserved photosynthetic pigments and growth. However, in the absence of MLE, isolated *D. saccharalis* infestation reduced plant height and depleted GPOX activity due to the consumption of phenolic substrates. Under combined stress conditions (DH+SB), foliar application of EFM increased H₂O₂ levels; acting as a signaling molecule, this triggered a coordinated rise in peroxidase enzymes (GPOX and GSH-Px) and conferred superior protection against lipid peroxidation, significantly reducing MDA levels. Furthermore, EFM restored chlorophyll b and carotenoid levels. It is concluded that the RB075322 cultivar exhibits high tolerance to individual stress factors and that *Moringa oleifera* leaf extract acts as an efficient physiological biostimulant, strengthening the enzymatic antioxidant system, protecting cell membranes, and maintaining metabolic homeostasis in sugarcane, particularly under combined stress.

Keywords: Sugarcane borer, *Moringa oleifera*, Deficit irrigation, Oxidative stress, Plant extract

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura de importância global, cultivada em mais de 120 países (FAO, 2023), com destaque para Brasil, Índia, China, Tailândia e Paquistão como maiores produtores (FAO, 2023; USDA, 2024). Sua utilização é diversificada, abrangendo a produção de açúcar, biocombustíveis e outros bioprodutos (Malik *et al.*, 2022). Nesse contexto, o conceito de biorrefinaria tem ganhado destaque ao promover o aproveitamento integral da biomassa, incluindo bagaço e palha, agregando valor aos resíduos e possibilitando a geração de coprodutos como biogás, biopolímeros e enzimas industriais (Maraveas, 2020; Ravindran *et al.*, 2018). Paralelamente, o setor tem evoluído com a integração de tecnologias como inteligência artificial, biologia sintética e modelagem de dados para otimização de processos e monitoramento de precisão (Pan *et al.*, 2024; Rial, 2024; Shukla *et al.*, 2023).

Apesar desses avanços, a cadeia produtiva da cana-de-açúcar enfrenta desafios crescentes associados às mudanças climáticas (IPCC, 2023). Eventos extremos como secas, geadas e o aumento de temperaturas impactam negativamente a produtividade (Li; Zhao, 2015), sendo a deficiência hídrica um dos estresses abióticos mais críticos para essa cultura (Dinh *et al.*, 2017), com elevada demanda hídrica ao longo do ciclo, apesar da sua alta eficiência no uso da água. Tais condições adversas desencadeiam uma série de respostas morfofisiológicas prejudiciais na planta, incluindo redução da fotossíntese, da área foliar, do crescimento (Verma *et al.*, 2020; Verma *et al.*, 2021) e desequilíbrio no balanço oxidativo celular, com acúmulo de Espécies Reativas de Oxigênio (ERO) que causam estresse oxidativo (Apel; Hirt, 2004; Gill; Tuteja, 2010).

Além dos estresses abióticos, no cenário global a cana-de-açúcar é afetada por estresses bióticos, especialmente pelo ataque de insetos broqueadores do colmo, como espécies dos gêneros *Diatraea*, *Chilo* (Lepidoptera: Crambidae) e *Eldana* (Lepidoptera: Pyralidae) (Li *et al.*, 2024; Priya; Kumar; Singh, 2023). Esses insetos causam danos internos aos tecidos vegetais, comprometem o transporte de água e nutrientes e resultam em perdas de produtividade e qualidade do caldo (Oliva *et al.*, 2021; Soares *et al.*, 2025). No cenário brasileiro, o gênero *Diatraea* é de interesse econômico por ser o único que está presente. Apesar de sua relevância econômica,

ainda há lacunas significativas no conhecimento sobre as respostas bioquímicas e antioxidantes da cana-de-açúcar a esse tipo de herbivoria.

A interação entre o estresse hídrico e o ataque de broqueadores é uma fronteira de pesquisa ainda pouco explorada. Estudos anteriores indicam que períodos de seca podem estar correlacionados a surtos mais severos de algumas pragas (Wang; Zhao, 2025), mas os mecanismos fisiológicos e moleculares subjacentes a essa interação são complexos e não lineares. Resultados iniciais sugerem que as respostas podem ser aditivas, sinérgicas ou antagônicas (Soares *et al.*, 2025), variando conforme a intensidade do estresse e a espécie de inseto, sendo urgente investigações que integrem escalas ecológicas, fisiológicas e moleculares (Le Roux *et al.*, 2024).

Neste contexto, os bioestimulantes emergem como uma estratégia promissora e sustentável para aumentar a resiliência da cana-de-açúcar aos estresses (BRASIL, 2020). Entre as categorias mais estudadas, destacam-se os extratos de algas marinhas, que demonstram eficácia na atenuação do estresse hídrico por meio da ativação do sistema antioxidante, melhoria do status hídrico e promoção do crescimento (Jacomassi *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2023). Outros agentes, como consórcios de bactérias promotoras de crescimento associadas a ácidos húmicos (Silva; Olivares; Canellas, 2017; Aguiar *et al.*, 2015), aminoácidos (Jacomassi *et al.*, 2024) e reguladores vegetais (Hervatin *et al.*, 2024), também têm apresentado resultados positivos na mitigação de estresses e no incremento da produtividade.

Os extratos vegetais, como o de *Moringa oleífera* (Moringaceae), representam uma frente de pesquisa com grande potencial a ser explorado na cultura da cana-de-açúcar. Rico em compostos bioativos, hormônios vegetais, antioxidantes e minerais (Latif; Mohamed, 2016; Vinodkumar *et al.*, 2025), o extrato de *M. oleífera* tem se mostrado eficaz como bioestimulante em outras culturas da família Poaceae, atenuando os efeitos dos estresses abióticos e melhorando parâmetros nutricionais e de crescimento (Basu *et al.*, 2023; Mansour *et al.*, 2023; Rehman *et al.*, 2021). Seus mecanismos de ação incluem o fortalecimento da defesa antioxidante, o acúmulo de osmólitos e a modulação hormonal (Nawaz *et al.*, 2016; Sadak; El-Lethy; Amin, 2024).

Considerando a escassez de estudos específicos com cana-de-açúcar associados à *M. oleífera* (Rahman; Karno; Kristanto, 2017), investigar o papel deste

extrato como um atenuante de estresses isolados e em combinação configura-se como uma oportunidade estratégica para o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis para o setor sucroenergético.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Contexto geral, usos da cana-de-açúcar e mudanças climáticas

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é cultivada em mais de 120 países, destacando-se o Brasil, Índia, China, Tailândia e Paquistão como os principais produtores mundiais (FAO, 2023). Além de liderar a produção agrícola, o Brasil detém posição de destaque no mercado global de açúcar, sendo responsável por 24,2% do volume mundial, seguido por Índia (15%), União Europeia (9%), China (6%) e Tailândia (6%) (USDA, 2024).

A cana-de-açúcar, além do uso na alimentação, consolidou-se como pilar da matriz de energia renovável. Historicamente impulsionada no Brasil pela criação do Programa Nacional do Álcool (ProÁlcool) em 1975, em resposta à crise do petróleo de 1973 (Freitas, 2022), a produção de biocombustíveis evoluiu do etanol de primeira geração (E1G), derivado do caldo da cana (Tse *et al.*, 2021), para o aproveitamento integral de sua biomassa, utilizado para a obtenção do etanol de segunda geração (E2G) (Baeyens *et al.*, 2022; Malik *et al.*, 2022).

O setor sucroenergético brasileiro ao ser impulsionado pela Criação do ProÁlcool, consolidou o conceito de biorefinaria, estendendo o uso da biomassa para a fabricação de biopolímeros, biogás e materiais sustentáveis de construção (Maraveas, 2020; Aprianti *et al.*, 2015). Contudo, a viabilidade industrial do E2G e de outros bioprodutos permanece condicionada à recalcitrância lignocelulósica (Alokika *et al.*, 2021), dependente da qualidade e produtividade da biomassa no campo.

A sustentabilidade do sistema produtivo enfrenta o avanço das mudanças climáticas (IPCC, 2023) como o principal desafio do século XXI. As atividades antrópicas e o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) elevaram a temperatura média global em 1,1 °C no período de 2011 a 2020, sendo o setor da agricultura, silvicultura e uso da terra causador de aproximadamente 22% das emissões globais em 2019 (IPCC, 2022; IPCC 2023). Essa alteração climática

manifesta-se no aumento da frequência de eventos extremos de seca e maior pressão de pragas e doenças com projeções de agravamento após 2050 caso as emissões de CO₂ permaneçam elevadas (Li; Zhao, 2015).

Tais cenários convertem-se diretamente em estresses abióticos e influenciando a vulnerabilidade do canavial. O déficit hídrico, em especial, impõe limitações não apenas ao crescimento vegetal, mas altera a composição de biomassa, afetando diretamente o rendimento do E2G (Andrade et al., 2019). A vulnerabilidade aos estresses ambientais varia regionalmente: Flack-Prain *et al.* (2020) demonstraram que enquanto em Luiz Antônio (SP, Brasil) a água foi o principal fator limitante para a cana sob sequeiro, em Guangxi (China) a irrigação complementar deslocou a radiação solar para o posto de fator limitante.

Em consonância com a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) destaca a urgência de adotar medidas de adaptação e mitigação. O uso de informações meteorológicas e dados de monitoramento auxilia no planejamento agrícola, definindo épocas de plantio, escolha de cultivares adaptadas e estratégias de irrigação (Guga *et al.*, 2021). No entanto, o acesso a essas tecnologias ainda é desigual, enfrentando gargalos entre produtores de menor escala devido à limitação de serviços de extensão rural, barreiras linguísticas e à falta de capacitação (Ncoyini *et al.*, 2022).

Para superar as limitações impostas pelas mudanças climáticas e promover uma agricultura de baixo carbono, a agricultura de precisão, uso de bioestimulantes e o consórcio entre culturas vêm sendo utilizados para mitigar os efeitos dos estresses e reduzir o uso de insumos agrícolas sintéticos (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018; Singh et al., 2018; Wang et al., 2020).

Embora existam modelos matemáticos que buscam prever o comportamento das cultivares frente ao clima, a simulação de múltiplos estresses simultâneos no campo ainda é um fator limitante (Verma *et al.*, 2023). Sendo assim, compreender a fisiologia do estresse torna-se essencial para a resiliência do canavial aos estresses ambientais.

2.2 Estresse hídrico e alterações morfofisiológicas em cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma cultura de ciclo longo, constantemente exposta às condições ambientais adversas. As mudanças climáticas têm intensificado a ocorrência de estresses abióticos, sendo em seu cultivo, a deficiência hídrica, um dos estresses abióticos mais relevantes (Dinh *et al.*, 2017), por essa ser uma cultura exigente em água. Resultado das baixas precipitações e altas temperaturas, a deficiência hídrica limita processos fisiológicos, bioquímicos e de crescimento vegetal. Todavia, os efeitos do estresse podem variar conforme a intensidade do estresse, a duração, umidade do ar, temperatura e da cultivar utilizada.

Os efeitos prejudiciais da deficiência hídrica no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar se iniciam pela redução do potencial hídrico no solo, ocasionado pela diminuição de água disponível para a absorção radicular. A consequência inicial é a modificação no status hídrico das plantas, dentre eles a redução do conteúdo relativo de água (RWC) nos tecidos foliares (Bezerra *et al.*, 2025; Chanaphai *et al.*, 2023). Em resposta a à redução do status hídrico, as plantas realizam ajustes osmóticos, acumulando no citoplasma solutos orgânicos, destacando-se a prolina, cospostos fenólicos e açúcares (Abou gabal *et al.*, 2025). Esse mecanismo é indispensável para a retenção de água pela planta e para a preservação da arquitetura das células.

Paralelamente às respostas hídricas, a diminuição do potencial hídrico no solo e nos tecidos foliares aciona o sinalizador hormonal ácido abscísico (ABA), promovendo o fechamento estomático como estratégia de conservação da água. O fechamento dos estômatos é responsável por reduzir a condutância estomática (g_s) (Watanabe *et al.*, 2022) e como consequência, diminui a taxa de transpiração e assimilação de CO₂.

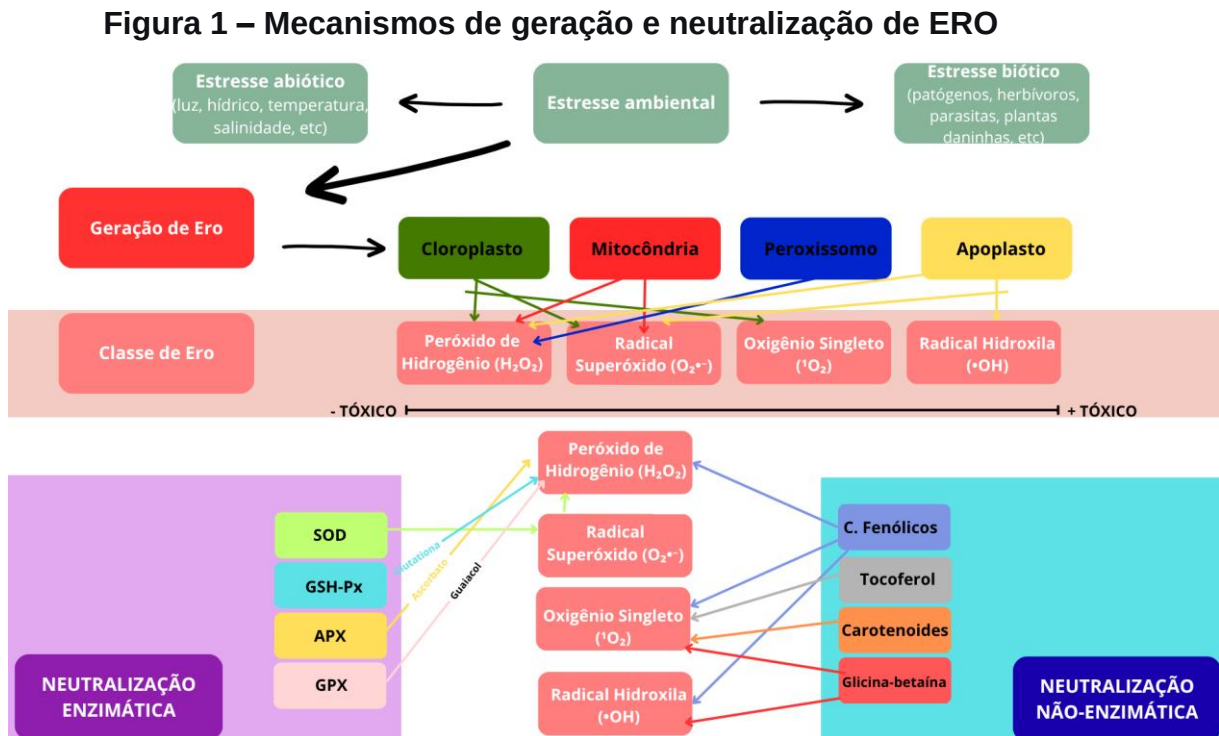
Apesar dessa resposta restringir a perda de água por evapotranspiração, ela também impõe uma barreira para a entrada de gás carbônico (CO_2), comprometendo a taxa fotossintética líquida e a taxa de assimilação líquida (Wiangwiset; Songsri; Jongrunklang, 2026). Dependendo da intensidade e da duração da deficiência hídrica, pode ocorrer a fotorredução do aparato fotossintético, degradando os teores de pigmentos fotossintéticos (Camargo *et al.*, 2022) e colapsando a eficiência do fotossistema II (Linh *et al.*, 2024).

Com a paralisação da fixação do carbono bem como sob contínua exposição à radiação solar, ocorre um excesso de energia de excitação nos cloroplastos, perturbando o equilíbrio redox das plantas e podendo ocasionar o aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) pelas plantas. As espécies reativas de oxigênio (ERO) são moléculas instáveis formadas como subprodutos do metabolismo celular das plantas, como por exemplo, durante a fotossíntese e a respiração.

Nas plantas, essas moléculas são predominantemente produzidas nos cloroplastos, mitocôndrias e peroxissomos (Apel; Hirt, 2004). Em condições normais, há homeostase entre a produção de ERO e sua eliminação, pelo sistema antioxidante. Contudo, em condições adversas, como a seca, o aumento expressivo na produção de ERO ocasiona o desequilíbrio redox e seu acúmulo no meio intracelular resulta no estresse oxidativo (Verma *et al.*, 2021). Em baixas concentrações, as ERO atuam como moléculas sinalizadoras, desencadeando respostas de defesa.

Para neutralizar a toxicidade das ERO, as plantas recrutam um aparato de detoxificação antioxidante, combinando vias enzimáticas e não enzimáticas. Dentre as enzimas antioxidantes enzimáticas, a superóxido dismutase (SOD), catalisa o ânion superóxido em peróxido de hidrogênio (Rani *et al.*, 2024). Em sequência, o peróxido de hidrogênio é metabolizado em monóxido de dihidrogênio e oxigênio por moléculas como a catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX), guaiacol peroxidase (GPOX), glutathione peroxidase (GSH-Px) e demais peroxidases (POD) (Rani *et al.*, 2024; Ahmad *et al.*, 2024).

Paralelamente, agentes não enzimáticos, como a glutatona reduzida (GSH) (Ahmad *et al.*, 2024), fenóis (Abou Gabal *et al.*, 2025), carotenoides e glicina-betaína são responsáveis pela doação de elétrons, mantendo a homeostase celular. Os mecanismos de geração e neutralização de ERO estão simplificados na Figura 1.



(Fonte: Elaborado pelo autor)

O efeito acumulado da restrição hídrica, baixa assimilação de carbono e custo de manutenção do metabolismo, manifesta-se expressivamente na biometria das plantas. A senescência induzida e a falta de expansão celular resulta no enrolamento e secagem das folhas (Wirojsirasak *et al.*, 2024), além da redução na área foliar (Katsuhama *et al.*, 2025), perfilhamento (Abou Gabal *et al.*, 2025), altura e diâmetro dos colmos (Vu *et al.*, 2025). Como consequência, há a redução no acúmulo de biomassa fresca das folhas, colmo e raízes (Mohanani *et al.*, 2024) bem como para biomassa seca (Júnior *et al.*, 2021; Vu *et al.*, 2025).

2.3 Estresse biótico ocasionado por broqueadores de colmo e alterações morfofisiológicas em cana-de-açúcar

Cerca de 1500 espécies de insetos que se alimentam da cana-de-açúcar já foram relatadas em todo o mundo (Priya; Kumar; Singh, 2023). Entre essas, os insetos da ordem Lepidoptera são considerados espécies-chave em quase todos os países produtores de cana e aproximadamente 50 espécies dessa ordem, já foram reportadas atacando esta cultura (Li *et al.*, 2024).

Os broqueadores possuem uma dominância regional, como demonstrado por Li *et al* (2024), nas Américas, o gênero *Diatraea* é predominante e com presença significativa de *Telchin licus* no nordeste do Brasil, e *Eoreuma loftini* nos Estados Unidos da América, na Ásia há a maior diversidade de brocadores, com múltiplas espécies do gênero *Chilo*, *Sesamia* e *Scirpophaga* (Li *et al.*, 2024). No continente africano, o inseto de interesse agrônômico de maior importância é a *Eldana saccharina*, mas também se faz presente em sua fauna o gênero *Chilo* e *Sesamia*. Na Oceania, as espécies predominantes fazem parte dos gêneros *Chilo* e *Scipopharga* (Li *et al.*, 2024).

Apesar de serem gêneros diferentes, o mecanismo de alimentação de algumas espécies dentro desses gêneros é semelhante. Durante a herbivoria, as lagartas penetram o colmo e constroem galerias nos internódios, segmentando os feixes vasculares mecanicamente, resultando na destruição do tecido e no enfraquecimento estrutural do colmo (Sakuno *et al.*, 2024).

Como consequência à injúria vascular, ocorre a interrupção no transporte de água, seiva e nutrientes essenciais (Oliva *et al.*, 2021; Punithavali *et al.*, 2025). A limitação de água e nutrientes reduz diretamente a taxa fotossintética, condutância estomática e a taxa de respiração (Soares *et al.*, 2025).

A degradação tecidual ocasionado pelo broqueamento do colmo é detectada pela cana-de-açúcar por meio de receptores e padrões moleculares a danos, desencadeando sinalizações iniciais como o influxo de cálcio e produção de ERO (Misra *et al.*, 2026). Consequentemente, a infestação por *D. saccharalis* culmina no aumento da concentração de Malondialdeído (MDA) (Mercês *et al.*, 2025).

Para conter os danos oxidativos e reduzir os teores de MDA, a planta aciona mecanismos de defesa não enzimáticos. Nesse contexto, Mercês *et al* (2025) observaram que o broqueamento reduz os teores de carotenoides, eleva o acúmulo de antocianinas, ascorbato e glutathione. Esse desencadeamento de respostas indica

comprometimento dos pigmentos protetores do aparato fotossintético, mas em contrapartida, as antocianinas reforçam a proteção bioquímica, enquanto o incremento de ascorbato e glutathione são componentes essenciais do ciclo ascorbato-glutathione na detoxificação celular.

Embora Mercês *et al* (2025) não tenham observado danos oxidativos que ocasionassem lesões visíveis aos tecidos vegetais, os broqueadores de colmo, ao alterar a dinâmica de gases (Soares *et al.*, 2025), podem ocasionar prejuízos nos parâmetros biométricos das plantas. Dentre eles, redução no perfilhamento, altura, diâmetro do colmo (Oliva *et al.*, 2021), biomassa, circunferência (Punithavalli; Govindaraj; Rajkumar, 2025), Brix e teor de sacarose (Priya; Kumar; Singh, 2023).

2.4 Interação entre deficiência hídrica e broqueadores de colmo

Embora as respostas da cana-de-açúcar à deficiência hídrica e aos broqueadores de colmo sejam descritas à nível morfológico, fisiológico e bioquímico, as respostas à combinação desses estresses é uma lacuna científica. Em campo, as plantas enfrentam os estresses simultaneamente, portanto, avaliações isoladas dos estresses não são adequadas para prever as respostas em combinação, podendo elas serem aditivas, sinérgicas ou antagônicas.

A precipitação, temperatura, umidade e disponibilidade hídrica em patamares críticos podem impulsionar surtos populacionais (Kokila *et al.*, 2021; Misra *et al.*, 2026). As mudanças climáticas alteram os microclimas, tendendo a impulsionar a expansão de broqueadores de colmo, como a *T. licus* (Loures-Ferreira *et al.*, 2026). Além disso, chuvas regulares estimulam a proliferação de *D. saccharalis*, enquanto chuvas intensas podem prejudicar temporariamente a ação de predadores naturais (Wilson *et al.*, 2020).

Paralelamente, a deficiência hídrica altera a fisiologia e o metabolismo das plantas, tornando-a mais suscetível ao ataque por brocas ao reduzir as defesas físicas e químicas, facilitando a penetração e o estabelecimento das larvas no interior do colmo (Shui *et al.*, 2026; Whag; Zhao, 2025). Além disso, fêmeas de *E. loftini* possuem preferência de ovoposição em plantas sob estresse hídrico severo (Shower; Castro,

2010), enquanto as fêmeas de *C. partellus* migram de gramíneas selvagens para lavouras agrícolas em condições de seca (Chidawanyika *et al.*, 2014).

No interior da planta, a formação de túneis nos internódios danifica os vasos condutores de seiva, provocando sintomas que mimetizam os efeitos observados para deficiência hídrica (Godfrey *et al.*, 1991; Godfrey *et al.*, 1992; Soares *et al.*, 2025). O estresse biótico ocasionado por *D. saccharalis* e *O. nubilalis* ocasionam o fechamento estomático, redução da transpiração e da fotossíntese líquida, idênticos aos causados pela deficiência hídrica isolada (Godfrey *et al.*, 1991; Soares *et al.*, 2025).

Todavia, na ocorrência conjunta entre os estresses, as culturas reagem de maneiras distintas, no milho ocorre a redução da produtividade e massa dos grãos (Godfrey *et al.*, 1991; Bhatt *et al.*, 2022), enquanto a cana-de-açúcar eleva a concentração interna de CO₂, mantendo o metabolismo ativo, não ocasionando prejuízos fotossintéticos adicionais (Soares *et al.*, 2025). Além disso, as respostas idênticas da cana-de-açúcar a esses estresses impossibilita o uso de sensoriamento remoto para diagnosticar esses estresses (Soares *et al.*, 2025).

Para lidar com esses estresses, de forma isolada, a cana-de-açúcar pode acionar vias genéticas antagônicas. Em nível molecular, fatores de transcrição, como os da família ShNF-Y, atuam de forma distinta, o gene ShNF-YA3 é ativado para conservação de água durante a seca e reprimido ao ataque de *E. saccharina* (Le Roux *et al.*, 2024).

No manejo agrônômico da nutrição mineral, a adubação com Silício (Si) para estresse hídrico elevou os teores de Si e aumentou a dureza da casca, enquanto para o estresse biótico, houve redução moderada no número de brocas de *E. saccharina* e no comprimento da perfuração (Kvedaras *et al.*, 2007). Além disso, na combinação entre os estresses, houve redução no número de larvas e dos danos, bem como elevou a tolerância das cultivares suscetíveis ao nível das cultivares tolerantes (Kvedaras *et al.*, 2007).

Paralelamente, a adubação potássica (K₂O) em dose ideal (80kg/ha) para a combinação entre os estresses ocasionou regulação da abertura estomática, reduzindo a perda de água e manteve o metabolismo ativo, protegendo também as plantas contra os insetos dos gêneros *Chilo* spp. e *S. excerptalis* (Bhatt *et al.*, 2022). Em contrapartida, para os estresses combinados e sem a aplicação da adubação

potássica, ocorreu o fechamento estomático, murchamento e redução no transporte dos compostos fotossintetizados, além de ter aumentado entre 20% a 30,4% a incidência de brocas em relação à área irrigada (Bhatt *et al.*, 2022).

Complementarmente, a preservação de parasitoides e de predadores naturais reduz a densidade populacional das pragas (Wilson *et al.*, 2020; Kokila *et al.*, 2021). Além disso, o uso de cultivares adaptadas garante maior tolerância fisiológica às injúrias ocasionadas ao sistema vascular (Bhatt *et al.*, 2022; Soares *et al.*, 2025).

2.5 *Moringa oleifera* e sua aplicação como extrato vegetal na família Poacea

A intensificação das mudanças no clima tem exposto cada vez mais os cultivos agrícolas às condições estressantes. A aplicação exógena de produtos químicos sintéticos e biocompostos vêm sendo utilizados para mitigar os efeitos dos estresses ambientais em plantas (Han *et al.*, 2024). Todavia, os produtos químicos sintéticos podem acarretar riscos à saúde humana e à segurança ambiental, em contrapartida, o uso de biocompostos é considerada uma prática ecológica e de baixo custo, bem como reduz a dependência de pesticidas e fertilizantes químicos (Han *et al.*, 2024).

Os bioestimulantes são produtos de origem biológica que podem ser categorizados como atenuantes de estresse, definidos como produtos que contêm substâncias naturais, aplicáveis à planta ou ao solo, com a finalidade de estimular o desenvolvimento vegetal, promover o enraizamento, equilibrar hormônios e, conseqüentemente, incrementar a produção (Brasil, 2020). Dentre os bioestimulantes, destacam-se os aminoácidos, substâncias húmicas, microrganismos, extratos de algas, extratos vegetais, entre outros.

A *M. oleifera* é uma espécie originária de áreas sub-himalaicas da Índia, reconhecida por seu rápido desenvolvimento, tolerância à deficiência hídrica e por suas propriedades nutricionais e medicinais (Kaur; Praba, 2025). Em razão dessas características, a espécie foi amplamente disseminada para os continentes africano e asiático, bem como para partes do Oriente Médio e da América Central e do Sul (Kaur; Praba, 2025). Além de seus usos medicinais, alimentares e no tratamento de água, o extrato de suas folhas, ou de outros órgãos, tem ganhado destaque na agricultura como um bioestimulante vegetal.

A ampla gama de efeitos benéficos atribuídos ao extrato de *M. oleifera*, encontra-se na diversidade de compostos presentes em sua matriz fitoquímica (Tabela 1). Evidências consolidadas na literatura apontam para a presença de metabólitos secundários, antioxidantes, fitohormônios, minerais, vitaminas e aminoácidos. Todavia, o potencial bioestimulante da *M. oleifera* é dependente do órgão utilizado (folhas, raízes, sementes, folhas e frutos), bem como do método de extração utilizado (aquoso, alcoólico, hidroalcoólico, entre outros), concentração e armazenamento (Mashamaite *et al.*, 2022).

Tabela 1: Constituintes que compõem extratos foliares de *Moringa oleifera*

Categoria	Constituintes	Referência
Antioxidantes	Prolina, fenóis, flavonoides e ácido ascórbico	Latif e Mohamed (2016)
Fitohormônios	Ácido indolacético, giberelina, cinetina, benzil adenina e ácido abscísico	Latif e Mohamed (2016)
Minerais	K, Na, Mg, Mn, Zn, Fe, Cu, Ni e Cr	Vinodkumar <i>et al</i> (2025)
Vitaminas	A, E, B e C	Gomes <i>et al</i> (2025)
Aminoácidos	Essenciais: leucina, lisina, valina, isoleucina, fenilalanina, metionina, cistina, triptofano e treonina Não essenciais: alanina, ácido aspártico, ácido glutâmico, glicina, prolina, histidina, serina e tirosina	Din <i>et al</i> (2025)

Fonte: Autor (2025)

Em condições de estresse hídrico, o EFM atua como um bioestimulante multifuncional, estimulando a síntese de osmólitos protetores como a prolina e açúcares solúveis e promove o ajuste do conteúdo relativo de água (Basu *et al.*, 2022;

Mansour *et al.*, 2023). Essa atividade bioestimulante ocorre por causa da composição do EFM, que é rico em fitohormônios, aminoácidos, antioxidantes e micronutrientes (Mansour *et al.*, 2023; Khan *et al.*, 2023).

O EFM fortalece a parede e a camada bilipídica, reduzindo o extravasamento de eletrólitos, preservando a estabilidade das membranas, atuando também como cofatores, que ativam as enzimas do sistema antioxidante (SOD, CAT, POX, POD e APX), elevam os teores de ascorbato e glutatona (Basu *et al.*, 2022) e estimula a síntese de prolina e açúcares solúveis, promovendo o ajuste osmótico, preservando a integridade das membranas e o conteúdo relativo de água (Mansour *et al.*, 2023) frente à limitação hídrica imposta.

A ativação do sistema antioxidante reduz o acúmulo de malondialdeído (MDA) e de peróxido de hidrogênio, atenuando os efeitos da peroxidação lipídica, minimizando a degradação do sistema fotossintético, preservando o ganho de área foliar e altura, mesmo sob limitação hídrica (Basu *et al.*, 2022; Mansour *et al.*, 2023; Khan *et al.*, 2023). Além disso, o EFM aumenta o comprimento da espiga em trigo (Basu *et al.*, 2022), peso, rendimento de grãos e produtividade da eficiência do uso de água em milho (Mansour *et al.*, 2023), perfilhos, comprimento, número de grãos e rendimento em arroz (Khan *et al.*, 2023) mesmo com restrição hídrica.

Em estresse salino na cultura do trigo, o EFM também atuou como um bioestimulante, restringindo o acúmulo de íons tóxicos (Na^+ e Cl^-) e favorecendo a absorção de potássio (K^+), bem como elevando o acúmulo de proteínas solúveis (Yasmeen *et al.*, 2013), prolina, açúcares solúveis, ascorbato e glutatona (Rehman *et al.*, 2021), auxiliando na preservação da estabilidade da membrana, do conteúdo relativo de água e da homeostase iônica (Rehman *et al.*, 2021).

Além disso, o EFM auxilia otimização o sistema antioxidante (SOD, POD, POX e CAT) e não enzimático (Ácido ascorbico e compostos fenólicos) (Yasmeen *et al.*, 2013; Rehman *et al.*, 2021), preservando a expansão da área foliar e pigmentos, eficiência do fotossistema (F_m/F_v), garantindo o suprimento de fotoassimilados, resultando na proteção contra a perda de biomassa aérea, radicular e preservando o peso dos grãos, número de perfilhos e produtividade dos grãos (Yasmeen *et al.*, 2013; Rehman *et al.*, 2021).

Em estresse nutricional, para fósforo (P) em níveis subótimos, sendo fornecido 80% da concentração necessária, o EFM incrementou a biomassa e produtividade dos grãos, demonstrando que o EFM atuou como um bioestimulante e melhorou a eficiência da absorção de nutrientes (Brockman; Brennan, 2017).

Em estresse ocasionado pelo metal pesado cádmio (Cd), o EFM atuou reduzindo a translocação e acúmulo de Cd no sistema aéreo e radicular, bem como promoveu o acúmulo de compostos protetores, dentre eles, a glicina-betaína, prolina, tocoferol, flavonoides e fenóis, acarretando em melhorias na fluorescência da clorofila, possibilitando o acúmulo de biomassa e aumento do número de perfilhos e folhas (Farhat *et al.*, 2022).

3 HIPÓTESES

O extrato foliar de *Moringa oleífera* atenua os efeitos estressantes da deficiência hídrica;

O extrato foliar de *Moringa oleífera* atenua os efeitos estressantes ocasionados pelo broqueador de colmo (*D. saccharalis*);

O extrato foliar de *Moringa oleífera* atenua os efeitos do estresse combinado.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial do extrato foliar de *Moringa oleífera* como um atenuante dos efeitos do estresse hídrico, biótico e da combinação entre os estresses, através de parâmetros de crescimento e bioquímicos.

4.2 Objetivos específicos

Avaliar o potencial do extrato foliar de *Moringa oleífera* como um atenuante dos efeitos da deficiência hídrica em cana-de-açúcar, através de parâmetros de crescimento e bioquímicos;

Avaliar o potencial do extrato foliar de *Moringa oleífera* como um atenuante dos efeitos do estresse biótico em cana-de-açúcar, através de parâmetros de crescimento e bioquímicos;

Avaliar o potencial do extrato foliar de *Moringa oleífera* como um atenuante dos efeitos da interação entre os estresses, através de parâmetros de crescimento e bioquímicos, analisando as possíveis sinergias e antagonismos no mecanismo de defesa das planta.

5 MATERIAL E MÉTODOS

6 RESULTADOS

7 DISCUSSÃO

8 CONCLUSÃO

Com base na análise de variância (ANOVA) das variáveis biométricas, dos pigmentos e do sistema antioxidante da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp., cultivar RB075322), conclui-se que as condições impostas de deficiência hídrica, herbivoria por *Diatraea saccharalis* e a combinação entre ambas não induziram alterações estatisticamente significativas ($p > 0,05$) características de estresse oxidativo ou prejuízo fisiológico em relação às plantas controle.

Esse comportamento ratifica a elevada tolerância e rusticidade da cultivar RB075322, bem como o papel do microclima na atenuação da demanda evapotranspirativa, impedindo que as adversidades físicas e hídricas atingissem um limiar capaz de causar danos às membranas (MDA) ou ao aparelho fotossintético.

Apesar da ausência de estresse detectável pela estatística para os estresses isolados e combinados, a aplicação foliar do extrato de folha de *Moringa oleifera* (EFM) promoveu modulações metabólicas basais, otimizando os teores de pigmentos fotossintéticos e readequando a atividade das enzimas antioxidantes (GPOX e GSH-Px).

Deste modo, o EFM demonstrou atuar como um bioestimulante capaz de reforçar as respostas antioxidantes e a homeostase metabólica.

9 REFERÊNCIAS

ABOU GABAL, Ashgan E. et al. Morpho-physio-biochemical and gene expression profiling of drought-tolerant sugarcane genotypes (*Saccharum* hybrids). **Molecular Biology Reports**, v. 52, n. 1, p. 504, 2025.

AGATI, G.; MATTEINI, P.; GOTI, A.; TATTINI, M. Chloroplast-located flavonoids can scavenge singlet oxygen. *New Phytologist*, v. 174, n. 1, p. 77–89, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01986.x>.

AGUIAR, N. O. et al. Metabolic profile and antioxidant responses during drought stress recovery in sugarcane treated with humic acids and endophytic diazotrophic bacteria. **Annals of Applied Biology**, v. 168, n. 2, p. 203-213, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/aab.12256>.

AHMAD, Shakeel et al. Foliar application of plant growth regulators enhances drought tolerance by modulating growth and biochemical responses in sugarcane varieties. *Journal of Agronomy and Crop Science*, v. 210, n. 6, p. e12784, 2024.

ALEXIEVA, V. et al. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell & Environment**, v. 24, n. 12, p. 1337-1344, 2001.

ALOKIKA et al. Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 169, p. 564-582, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.175>.

ANDRADE, L. M. et al. Biomass accumulation and cell wall structure of rice plants overexpressing a dirigent-jacalin of sugarcane (ShDJ) under varying conditions of water availability. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 10, p. 65, 2019. DOI: 10.3389/fpls.2019.00065.

APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 55, p. 373-399, 2004.

APRIANTI, Evi S. A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production – a review part II. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 142, p. 4178-4194, 20 jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.115>.

APRIANTI, Evi; SHAFIGH, Payam; BAHRI, Syamsul; FARAHANI, Javad Nodeh. Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 74, p. 176-187, 15 jan. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.010>.

BAEYENS, Jan et al. Challenges and opportunities in improving the production of bio-ethanol. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 47, p. 60-88, 2015. DOI <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.10.003>.

BASU, S. et al. Micronutrient and redox homeostasis contribute to *Moringa oleifera*-regulated drought tolerance in wheat. **Plant Growth Regulation**, v. 100, p. 467–478, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00795-z>.

BEZERRA, Fabiano Simplicio et al. Amorphous silica improves growth, water relations, and photosynthetic performance of sugarcane under moderate and severe water deficit. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 25, n. 3, p. 5719-5739, 2025.

BHATT, Rajan et al. Growth, yield, quality and insect-pests in sugarcane (*Saccharum officinarum*) as affected by differential regimes of irrigation and potash under stressed conditions. *Agronomy*, v. 12, n. 8, p. 1942, 2022.

BROCKMAN, Henry G.; BRENNAN, Ross F. The effect of foliar application of *Moringa* leaf extract on biomass, grain yield of wheat and applied nutrient efficiency. **Journal of Plant Nutrition**, v. 40, n. 19, p. 2728-2736, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1381723>

CAMARGO, Mônica Sartori et al. Silicon fertilization enhances photosynthetic activity and sugar metabolism in sugarcane cultivars under water deficit at the ripening phase. *Silicon*, v. 15, n. 7, p. 3021-3033, 2023.

CASTRO-CAMBA, R.; SÁNCHEZ, C.; VIDAL, N.; VIELBA, J. M. Plant Development and Crop Yield: The Role of Gibberellins. **Plants**, v. 11, n. 19, p. 2650, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11192650>.

CHANAPHAI, P. et al. Response of photosynthetic and root traits of sugarcane genotypes under drought and recovery conditions. *Sugar Tech*, v. 25, n. 5, p. 1102-1114, 2023.

CHAVES, Manuela M.; MAROCO, João P.; PEREIRA, João S. Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. **Functional plant biology**, v. 30, n. 3, p. 239-264, 2003.

CHEN, D. et al. Effect of Seaweed Extract on Droughty Resistance of Sugarcane Seedling. **Botanical Research**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 60-67, 2018. DOI: <https://doi.org/10.12677/br.2018.71009>.

CHEN, D. et al. Seaweed extract enhances drought resistance in sugarcane via modulating root configuration and soil physicochemical properties. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], v. 194, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116321>.

CHIDAWANYIKA, Frank et al. Oviposition acceptance and larval development of *C. hirsutus* stem borers in drought-stressed wild and cultivated grasses of East Africa. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, v. 151, n. 3, p. 209-217, 2014.

DIN, Raza Mohai Ud; EMAN, Salwa; ZAFAR, Muhammad Hammad; CHONG, Zhang; SALEH, Ahmed A.; HUSIEN, Hosameldeen Mohamed; WANG, Mengzhi. *Moringa oleifera* as a multifunctional feed additive: synergistic nutritional and immunomodulatory mechanisms in livestock production. **Frontiers in Nutrition**, v. 12, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1615349>

DINH, Hoang Thai et al. Effects of drought stress at early growth stage on response of sugarcane to different nitrogen application. *Sugar Tech*, v. 20, n. 4, p. 420-430, 2017.

EDGE, R.; TRUSCOTT, T. G. Singlet oxygen and free radical reactions of retinoids and carotenoids—a review. *Antioxidants*, v. 7, n. 1, p. 5, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox7010005>.

FAO. **FAOSTAT: Rankings – Countries by Commodity**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, [2023]. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity. Acesso em: 20 out. 2024.

FLACK-PRAIN, S. et al. The impact of climate change and climate extremes on sugarcane production. **Global Change Biology Bioenergy**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 181-199, 22 dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12797>.

FOYER, Christine H.; NOCTOR, Graham. Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. **The plant cell**, v. 17, n. 7, p. 1866-1875, 2005.

FREITAS, YNAÊ ROSSETTI DE. O FUTURO SUSTENTÁVEL DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA: A IMPORTÂNCIA E VIABILIDADE DO ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO NO PERÍODO DE TRANSIÇÃO COM ÊNFASE NO SETOR DE TRANSPORTES. 2022.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 48, n. 12, p. 909-930, dez. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>

GODFREY, L. D. et al. European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae) tunneling and drought stress: effects on corn yield. *Journal of economic entomology*, v. 84, n. 6, p. 1850-1860, 1991.

GODFREY, L. D.; HOLTZER, T. O.; NORMAN, J. M. Effects of European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae) tunneling and drought stress on field corn gas exchange parameters. *Journal of economic entomology*, v. 84, n. 4, p. 1370-1380, 1991.

GODFREY, L. D.; NORMAN, J. M.; HOLTZER, T. O. Interactive effects of European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae) tunneling and drought stress on field corn water relations. *Environmental Entomology*, v. 21, n. 5, p. 1060-1071, 1992.

GOMES, Olívia J. S.; LEITÃO, Anabela; SOUSA, Hermínio C. de; GANDOLF-FERREIRA, Licínio M.; BRAGA, Mara E. M. Bioactive Compounds Extraction From *Moringa oleifera* Leaves: A Comparative Study of Vacuum-Assisted and Bed-Stirred Extractions. *Journal of Food Science*, [s. l.], 17 nov. 2025. DOI: 10.1111/1750-3841.70700.

GUGA, S. et al. Combining MaxEnt model and landscape pattern theory for analyzing interdecadal variation of sugarcane climate suitability in Guangxi, China. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 129, 108152, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108152>.

HAN, Mingzhao et al. Plant Extracts as Biostimulant Agents: A Promising Strategy for Managing Environmental Stress in Sustainable Agriculture. **Phyton** (0031-9457), v. 93, n. 9, 2024.

HERVATIN, C. M.; PRADO FILHO, A. P. A.; MOMESSO, L. et al. Effects of Plant Growth Regulators on Sugarcane Productivity and Quality of the Art Through the Increase in Photosynthetic and Antioxidant Activity. *Journal of Plant Growth Regulation*, v. 43, p. 4003–4017, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11354-3>.

JACOMASSI, L. M. et al. A Seaweed Extract-Based Biostimulant Mitigates Drought Stress in Sugarcane. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.865291>.

JACOMASSI, Lucas Moraes et al. Foliar Application of Amino Acids and Nutrients as a Tool to Mitigate Water Stress and Stabilize Sugarcane Yield and

Bioenergy Generation. **Plants**, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 461, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13030461>

JÚNIOR, Sebastião de Oliveira Maia et al. Respostas da aplicação foliar de glicina betaína em cana-de-açúcar submetida a estresse hídrico e reidratação. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 20, n. 2, p. 128-133, 2021.

KAMILARIS, A.; PRENAFETA-BOLDÚ, F. X. A review of the use of convolutional neural networks in agriculture. **The Journal of Agricultural Science**, v. 156, n. 3, p. 312-322, 2018. DOI: 10.1017/S0021859618000436.

KATSUHAMA, Naoya et al. Root water uptake and photosynthesis synergistically enhance drought tolerance in interspecific hybrid sugarcane. *Plant Production Science*, p. 1-13, 2025.

KAUR, Ramanjot; PRABA, Umesh Preethi. Taxonomy and Distribution Significance of Moringa sps.: A Review. **Journal of Advances in Biology & Biotechnology**, v. 28, n. 11, p. 1-13, 10 nov. 2025. DOI: <https://doi.org/10.9734/jabb/2025/v28i113271>.

KHAN, Shahbaz et al. Moringa leaf extract mitigates the adverse impacts of drought and improves the yield and grain quality of rice through enhanced physiological, biochemical, and antioxidant activities. **Plants**, v. 12, n. 13, p. 2511, 2023.

KOKILA, Ranganathan et al. A GIS-based tool for the analysis of the distribution and abundance of Chilo sacchariphagus indicus under the influence of biotic and abiotic factors. *Environmental Technology & Innovation*, v. 21, p. 101357, 2021.

KVEDARAS, Olivia L. et al. Water stress augments silicon-mediated resistance of susceptible sugarcane cultivars to the stalk borer Eldana saccharina (Lepidoptera: Pyralidae). **Bulletin of entomological research**, v. 97, n. 2, p. 175-183, 2007.

LATIF, H. H.; MOHAMED, H. I. Exogenous applications of moringa leaf extract effect on retrotransposon, ultrastructural and biochemical contents of common bean plants under environmental stresses. **South African Journal of Botany**, v. 106, p. 221-231, 2016. DOI: 10.1016/j.sajb.2016.07.010.

LE ROUX, Jancke et al. Identification and expression analysis of nuclear factor Y transcription factor genes under drought, cold and Eldana infestation in sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid). *Genes & Genomics*, v. 46, n. 8, p. 927-940, 2024.

LI, Yang-Rui; ZHAO, Duli. Climate Change and Sugarcane Production: Potential Impact and Mitigation Strategies. *International Journal of Agronomy*, [S. l.], v. 2015, p. 1-10, 22 out. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/547386>.

LICHTENTHALER, Hartmut K. [34] Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In: **Methods in enzymology**. Academic Press, 1987. p. 350-382.

LINH, Vu Khanh et al. Growth characterization of sugarcane (*Saccharum* spp.) under salinity and drought stresses at the seedling stage. *Vietnam Journal of Agricultural Sciences*, v. 7, n. 3, p. 2185-2194, 2024.

LOURES-FERREIRA, Marinaldo et al. Predicting the current and future distribution of *Telchin licus* (Lepidoptera: Castniidae) based on the maximum entropy model. *International Journal of Tropical Insect Science*, v. 46, n. 1, p. 385-394, 2026.

MALAVOLTA E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres; 1980.

MALIK, Kamran et al. Lignocellulosic biomass for bioethanol: Insight into the advanced pretreatment and fermentation approaches. *Industrial Crops and Products*, v. 188, p. 115569, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115569>.

MANSOUR, Elsayed et al. Enhancing drought tolerance and water productivity of diverse maize hybrids (*Zea mays*) using exogenously applied biostimulants under varying irrigation levels. *Agronomy*, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 1320, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051320>.

MAO, H. T.; PANG, X.; LI, T.; QIN, Y.; ZHANG, Z. W.; YUAN, S. et al. Chlorophyll b is essential for the growth, photoprotection, and photosystem I assembly in wheat. *The Plant Journal*, v. 123, e70442, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.70442>.

MARAVEAS, Chrysanthos. Production of Sustainable and Biodegradable Polymers from Agricultural Waste. **Polymers**, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 1127, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12051127>.

MELLO, U. S.; VIDIGAL, P. M. P.; VITAL, C. E.; TOMAZ, A. C.; FIGUEIREDO, M.; PETERNELLI, L. A. et al. An overview of the transcriptional responses of two tolerant and susceptible sugarcane cultivars to borer (*Diatraea saccharalis*) infestation. *Functional & Integrative Genomics*, v. 20, n. 6, p. 839–855, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10142-020-00755-8>.

MERCÊS, Júlia Karoline Rodrigues das et al. Methyl jasmonate modulates non-enzymatic antioxidant defenses in sugarcane under *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) infestation. **BMC Plant Biology**, v. 26, n. 1, p. 126, 2025.

MERWAD, A. R. M. A. Using Moringa oleifera extract as biostimulant enhancing the growth, yield and nutrients accumulation of pea plants. *Journal of Plant Nutrition*, v. 41, n. 4, p. 425–431, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1384012>.

MIHARA et al. Thiobarbituric acid value on fresh homogenate of rat as a parameter of lipid peroxidation in aging, CCl₄ intoxication, and vitamin E deficiency. *Biochem Med.* 1980;23(3):302–11.

MISRA, Varucha et al. Emerging insights into silicon-mediated defence systems against insect pests in sugarcane. **Discover Plants**, v. 3, n. 1, p. 215, 2026.

MOHANAN, Manoj Vadakkenchery et al. Transgenic sugarcane overexpressing Glyoxalase III improved germination and biomass production at formative stage under salinity and water-deficit stress conditions. *3 Biotech*, v. 14, n. 2, p. 52, 2024.

NAWAZ, Hamid et al. Exogenous Application of Growth Enhancers Mitigate Water Stress in Wheat by Antioxidant Elevation. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00597>.

NCOYINI, Z.; SAVAGE, M. J.; STRYDOM, S. Limited access and use of climate information by small-scale sugarcane farmers in South Africa: A case study. **Climate Services**, [S. l.], v. 26, 100285, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100285>.

OLIVA, K. M. E.; SILVA, F. B. V.; ARAÚJO, P. R. M.; OLIVEIRA, E. C. A.; NASCIMENTO, C. W. A. Amorphous silica-based fertilizer increases stalks and sugar yield and resistance to stalk borer in sugarcane grown under field conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 21, n. 3, p. 2518–2529, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00543-8>.

PAN, S. et al. Technoeconomic and environmental perspectives of biofuel production from sugarcane bagasse: Current status, challenges and future outlook. *Industrial Crops and Products*, v. 188, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115684>.

PELOSO, Renata Maria Froio. Efeitos da aplicação de bioestimulantes no crescimento e desenvolvimento iniciais da cana-de-açúcar. 2023.

PRIYA; KUMAR, Rajinder; SINGH, Dhanwinder. Silicon Uptake and Accumulation in Sugarcane for Resistance Against Top Borer *Scirpophaga excerptalis* Walker and its Influence on Larval Mandibles. *Silicon*, [S. l.], v. 15, p. 5997–6013, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02479-3>.

RAHMAN, Miftahur; KARNNO, Karno; KRISTANTO, Budi Adi. Pemanfaatan tanaman kelor (*Moringa oleifera*) sebagai hormon tumbuh pada pembibitan tanaman tebu (*Saccharum officinarum* L.). *Journal of Agro Complex*, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 94-100, out. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.14710/joac.1.3.94-100>.

RANI, Varsha; SENGAR, R. S.; CHAUHAN, Chetan. Assessment of physio-biochemical assessment and gene expression analysis of sugarcane genotypes under water stress. *Molecular Biology Reports*, v. 51, n. 1, p. 315, 2024.

RAVINDRAN, Rajeev; HASSAN, Shady S.; WILLIAMS, Gwilym A.; JAISWAL, Amit K. A Review on Bioconversion of Agro-Industrial Wastes to Industrially Important Enzymes. *Bioengineering*, [S. l.], v. 5, n. 4, p. 93, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/bioengineering5040093>.

REHMAN, H. U.; ALHARBY, H. F.; BAMAGOOS, A. A.; ABDELHAMID, M. T.; RADY, M. M. Sequenced application of glutathione as an antioxidant with an organic biostimulant improves physiological and metabolic adaptation to salinity in wheat. *Plant*

Physiology and Biochemistry, v. 158, p. 43–52, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.041>.

REHMAN, Hafeez Ur et al. Sequenced application of glutathione as an antioxidant with an organic biostimulant improves physiological and metabolic adaptation to salinity in wheat. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 158, p. 43-52, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.041>.

RIAL, R. C. Biofuels versus climate change: Exploring potentials and challenges in the energy transition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 189, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114369>.

SADAK, Mervat; EL-LETHY, Safaa; AMIN, Rania Samy Hanafy. Assessing the usefulness of Moringa oleifera leaf extract and zeatin as a biostimulant in enhancing growth, phytohormones, antioxidant enzymes and osmoprotectants of wheat plant under salinity stress. **Egyptian Journal of Botany**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21608/EJBO.2024.252447.2587>.

SAKUNO, Caroline Izabel R. et al. Transgenic sugarcane expressing Bacillus thuringiensis Cry1Ac protein offers new possibilities for controlling the giant borer, Telchin licus (Drury), a pest difficult to control. Crop Protection, [S. l.], v. 180, p. 106469, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106469>.

SHOWLER, Allan T.; CASTRO, Boris A. Influence of drought stress on Mexican rice borer (Lepidoptera: Crambidae) oviposition preference in sugarcane. Crop Protection, v. 29, n. 5, p. 415-421, 2010.

SHUI, Junfeng et al. Stem borer pest outbreaks in cereal crops are associated with summer drought under climate change: A national-scale study. Pest Management Science, 2026.

SHUKLA, A. et al. Strategies of pretreatment of feedstocks for optimized bioethanol production: distinct and integrated approaches. **Biotechnology for Biofuels and Bioproducts**, v. 16, n. 44, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02295-2>.

SINGH, Ishwar et al. Can we not mitigate climate change using seaweed based biostimulant: A case study with sugarcane cultivation in India. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 204, p. 992-1004, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.070>

SINGH, Ishwar et al. Environmental benefits of an alternative practice for sugarcane cultivation using Gracilaria-based seaweed biostimulant. **Sugar Tech**, v. 25, p. 440-452, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01207-2>. Acesso em: 23 out. 2023.

SINGH, S. R.; YADAV, Monika; PATHAK, A. D. Impact of Seaweed Extract Based Organic Fertilizers on Cane Yield and Soil Quality in Sugarcane-Ratoon System. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2025.2509580>.

SOARES, João Rafael Silva et al. An investigation into the interaction between water deficit and injury of sugarcane borer (Lepidoptera: Crambidae) in the gas exchange parameters and spectral reflectance of sugarcane. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 105, n. 15, p. 8551-8560, 2025.

SUN, T.; RAO, S.; ZHOU, X.; LI, L. Plant carotenoids: recent advances and future perspectives. *Molecular Horticulture*, v. 2, n. 1, p. 3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43897-022-00023-2>.

TSE, Timothy J.; WIENS, Daniel J.; REANEY, Martin J. T. Bioethanol fermentation: An overview of current trends and advancements. *Fermentation*, v. 7, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation7040268>.

USDA. **Production: Sugarcane**. Washington, DC: United States Department of Agriculture, [2024]. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0612000>. Acesso em: 20 out. 2024.

VERMA, Amit Kumar et al. Variety-specific sugarcane yield simulations and climate change impacts on sugarcane yield using DSSAT-CSM-CANEGRO model. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 279, 108034, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108034>

VERMA, Krishan K. et al. Characteristics of Leaf Stomata and Their Relationship with Photosynthesis in *Saccharum officinarum* Under Drought and Silicon Application. **ACS Omega**, [S. l.], v. 5, n. 37, p. 24145-24153, 2020. DOI: 10.1021/acsomega.0c03820.

VERMA, Krishan K. et al. Functional relationship between photosynthetic leaf gas exchange in response to silicon application and water stress mitigation in sugarcane. **Biological Research**, v. 54, n. 1, p. 15, 2021.

VINODKUMAR, T.; DINESH, T.; GHOSH, K. et al. A comprehensive analysis of minerals in *Moringa oleifera* leaves, seeds, stem bark, and ash using inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy (ICP-OES). **Discovery Chemistry**, v. 2, p. 36, 2025. DOI: 10.1007/s44371-025-00115-0.

VU, Ngoc-Thang et al. Effects of biochar application on sugarcane growth and physiology under combined saline and drought stress conditions. *Plant Production Science*, v. 28, n. 3, p. 223-235, 2025.

WANG, Leyun; ZHAO, Zihua. Seasonal drought drives sugarcane borer outbreaks. *Journal of Economic Entomology*, v. 118, n. 1, p. 145-151, 2025.

WAQAS, M. A.; KHAN, I.; AKHTER, M. J.; NOOR, M. A.; ASHRAF, U. Exogenous application of plant growth regulators (PGRs) induces chilling tolerance in short-duration hybrid maize. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 24, n. 12, p. 11459–11471, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8768-0>.

WATANABE, Kenta et al. Fundamental study on water stress detection in sugarcane using thermal image combined with photosynthesis measurement under a greenhouse condition. *Sugar Tech*, v. 24, n. 5, p. 1382-1390, 2022.

WIANGWISET, Kanlayanee; SONGSRI, Patcharin; JONGRUNGKLANG, Nakorn. Responses of leaf anatomy, growth, and physiology in backcross 1 progeny from *Saccharum* spp. hybrids and *S. spontaneum* under drought stress at early growth phase. *PeerJ*, v. 14, p. e20822, 2026.

WILSON, B. E. et al. Population trends of the sugarcane borer (Lepidoptera: Crambidae) in Louisiana sugarcane. *Environmental entomology*, v. 49, n. 6, p. 1455-1461, 2020.

WIROJSIRASAK, Warodom et al. Determination of morpho-physiological traits for assessing drought tolerance in sugarcane. *Plants*, v. 13, n. 8, p. 1072, 2024.

YASMEEN, A.; BASRA, S. M. A.; FAROOQ, M.; REHMAN, H.; HUSSAIN, N.; ATHAR, H. R. Exogenous application of moringa leaf extract modulates the antioxidant enzyme system to improve wheat performance under saline conditions. *Plant Growth Regulation*, v. 69, n. 3, p. 225–233, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9764-5>.

YASMEEN, Azra et al. Exogenous application of moringa leaf extract modulates the antioxidant enzyme system to improve wheat performance under saline conditions. ***Plant Growth Regulation***, v. 69, n. 3, p. 225-233, 2013.

APÊNDICES