

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE MESTRADO**

**ISOLADOS BACTERIANOS NA RESPOSTA FISIOLÓGICA DE
BANANA GRAND NAINÉ SOB DÉFICIT HÍDRICO**

Sirlânda da Silva dos Santos

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
SETEMBRO - 2025**

ISOLADOS BACTERIANOS NA RESPOSTA FISIOLÓGICA DE BANANA GRAND NAINÉ SOB DÉFICIT HÍDRICO

Sirlânda da Silva dos Santos

Licenciada em Biologia

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2023.

Dissertação apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito final para a obtenção do Título de Mestre em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Haddad

Coorientador: Dr. Leandro de Sousa Rocha

CRUZ DAS ALMAS - BAHIA

JULHO – 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

S237i

Santos, Sirlândia da Silva dos.

Isolados bacterianos na resposta fisiológica de banana Grand Naine sob déficit hídrico / Sirlândia da Silva dos Santos._ Cruz das Almas, BA, 2025.

78f.; il.

(Dissertação) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas, Mestrado em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Haddad.


Coorientador: Prof. Dr. Leandro de Sousa Rocha.

1.Banana – Cultivo – Produtividade. 2.Banana – Recursos hídricos – Análise. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas. II.Título.


CDD: 634.772

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE MESTRADO


COMISSÃO EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Documento assinado digitalmente
 FERNANDO HADDAD
Data: 18/11/2025 16:57:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fernando Haddad
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 LEILANE SILVEIRA D'ÁVILA
Data: 12/11/2025 16:34:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Leilane Silveira D'Ávila
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB

Documento assinado digitalmente
 PAULO HENRIQUE DA SILVA
Data: 13/11/2025 08:03:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Paulo Henrique da Silva
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA

Dissertação homologada pelo Colegiado de Curso de Mestrado em Ciências Agrárias, conferindo o Grau de Mestre em Ciências Agrárias a Sirlânda da Silva dos Santos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que é o fundamento de todas as coisas e aquele que permite que qualquer obra seja realizada. Se Ele concede a capacidade, é porque acredita que somos capazes. À Virgem Maria Santíssima, a quem consagro minha vida e todas as minhas obras, expresso minha devoção e gratidão.

À minha família, especialmente aos meus pais, Joana Fernandes e Jorge dos Santos, pelo amor incondicional, apoio constante e por sempre acreditarem em mim. Aos meus irmãos, Simone, Sandro e Jossiane, agradeço pela presença, incentivo e carinho ao longo de toda a jornada.

À equipe do Laboratório de Irrigação (Tarcísio, Damina, Lenilson e Roque), expresso meu sincero agradecimento pelo auxílio prático e colaboração indispensável para a execução deste trabalho. Ao Dr. Eugênio Coelho, agradeço pelo suporte técnico e disponibilidade.

À equipe do Laboratório de Fitopatologia (Liliane, Seu João, Seu Domingos, Seu Val, Ana Luiza, Bruno, Rone, Vinícius, Angélica e Gabriella, e a minha amiga Dirlayne), agradeço profundamente por estar ao meu lado durante todo o percurso desta caminhada, oferecendo apoio, escuta e palavras de encorajamento. Assim, como auxílio prático na execução deste trabalho.

Ao meu orientador, Dr. Fernando Haddad, e ao meu coorientador, Dr. Leandro Rocha, sou imensamente grata pela orientação, paciência e confiança depositadas em mim ao longo deste processo

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa, que foi essencial para a realização desta pesquisa. À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) e à Embrapa Mandioca e Fruticultura, meu reconhecimento e gratidão pelo suporte institucional, pela estrutura e pelos conhecimentos compartilhados.

À Profa. Dra. Leilane Silveira D'Ávila e ao Dr. Paulo Henrique da Silva, agradeço pela honrosa participação na banca avaliadora, pelas contribuições valiosas, sugestões construtivas e pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigada.

*"Aceita tudo o que te acontecer: na dor,
permanece firme; na humilhação, tenha
paciência.*

*Pois é pelo fogo que se experimentam
o ouro e a prata,
e os homens agradáveis a Deus, pelo
caminho da humilhação."*

(Eclesiástico 2, 4-5)

ISOLADOS BACTERIANOS NA RESPOSTA FISIOLÓGICA DE BANANA GRAND NAINÉ SOB DÉFICIT HÍDRICO

RESUMO: A escassez hídrica representa um grande desafio para a agricultura, impactando negativamente culturas sensíveis como a bananeira (*Musa spp.*) e comprometendo sua produtividade. Este estudo objetivou avaliar a influência de isolados bacterianos na promoção do aumento na tolerância ao déficit hídrico em bananeiras da cultivar Grand Naine. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, na Embrapa Mandioca e Fruticultura (Cruz das Almas, BA), utilizando delineamento em blocos casualizados, com seis isolados bacterianos (BAC01, BAC05, BAC07, BAC09, BAC10 e BAC11) e quatro níveis de estresse hídrico (100%, 75%, 50% e 25% da capacidade de campo), em esquema fatorial 6 × 4 com cinco repetições. As mudas foram avaliadas ao longo de 74 dias quanto os parâmetros de crescimento, características fisiológicas, morfologia e desenvolvimento radicular. Complementarmente, realizou-se um experimento in vitro para avaliar a tolerância térmica de três isolados (BAC09, BAC01 e BAC07), testando seu crescimento em meio TSA 10% suplementado com sorbitol, sob diferentes temperaturas (30 °C, 40 °C, 50 °C e 55 °C). Os resultados mostraram que os níveis de estresse hídrico tiveram impacto decisivo no desempenho das plantas. Entre os isolados testados, BAC09 foi o mais eficiente na promoção do crescimento e na mitigação dos efeitos do déficit hídrico em todas as intensidades avaliadas. O BAC10 destacou-se sob déficit moderado (50% da lâmina), enquanto o BAC01 apresentou melhor desempenho em estresse severo (25%). O BAC07 apresentou resultados semelhantes aos do controle. No experimento in vitro o BAC09 e BAC01, mantiveram crescimento até 50 °C, evidenciando seu potencial como bioinoculantes para ambientes quentes e sob déficit hídrico.

Palavras-chave: bactérias promotoras de crescimento, bananicultura, bioinoculante, sustentabilidade, estresse hídrico.

BACTERIAL ISOLATES IN THE PHYSIOLOGICAL RESPONSE OF GRAND NAINÉ BANANA UNDER WATER DEFICIT

ABSTRACT: Water scarcity represents a major challenge for agriculture, negatively impacting sensitive crops such as banana (*Musa* spp.) and compromising their productivity. This study aimed to evaluate the influence of bacterial isolates in promoting increased tolerance to water deficit in banana plants of the Grand Nainé cultivar. The experiment was carried out in a greenhouse at Embrapa Cassava and Fruits (Cruz das Almas, BA), using a randomized block design with six bacterial isolates (BAC01, BAC05, BAC07, BAC09, BAC10, and BAC11) and four levels of water stress (100%, 75%, 50%, and 25% of field capacity), in a 6 × 4 factorial scheme with five replications. Seedlings were evaluated over 74 days for growth parameters, physiological traits, morphology, and root development. Additionally, an *in vitro* experiment was conducted to assess the thermal tolerance of three isolates (BAC09, BAC01, and BAC07), testing their growth in TSA 10% medium supplemented with sorbitol, under different temperatures (30 °C, 40 °C, 50 °C, and 55 °C). Results showed that water stress levels had a decisive impact on plant performance. Among the isolates tested, BAC09 was the most efficient in promoting growth and mitigating the effects of water deficit at all intensities. BAC10 stood out under moderate deficit (50% of the water supply), while BAC01 performed best under severe stress (25%). BAC07 presented results similar to the control. In the *in vitro* experiment, BAC09 and BAC01 maintained growth up to 50 °C, highlighting their potential as bioinoculants for hot and water-deficit environments.

Keywords: plant growth-promoting bacteria, banana cultivation, bioinoculant, sustainability, water stress.

LISTA DE ABREVIATURAS

AACP	Área Abaixo da Curva de Progresso
ABA	Ácido Abscísico
AIA	Ácido Indol-3-Acético
ANOVA	Análise de Variância
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
BDA	Batata-Dextrose-Ágar
BOD	Biochemical Oxygen Demand
BPCP	Bactérias Promotoras de Crescimento de Plantas
CTNBio	Comissão Técnica Nacional de Biossegurança
DBC	Delineamento em Blocos Casualizados
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EROs	Espécies Reativas de Oxigênio
FMA	Fungos Micorrizos Arbusculares
IRGA	InfraRed Gas Analyzer
ISR	Induzirem Resistência Sistêmica
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
OD	Densidade Óptica
TDR	Reflectometria no Domínio do Tempo

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo	31
Tabela 2. Curva de retenção de água no solo	33
Tabela 3. Níveis de irrigação e os valores correspondentes, lidos na TDR	34
Tabela 4. Estatísticas descritivas das variáveis analisadas	55
Tabela 5. Análise de variância para variáveis radiculares e aéreas de mudas de bananeira submetidas a diferentes níveis de estresse hídrico e tratamentos bacterianos	56
Tabela 6. Médias por tratamento e letras de agrupamento para as variáveis com efeito significativo de tratamento	58
Tabela 7. Resultados da análise de variância (ANOVA) para o diâmetro das colônias bacterianas	62
Tabela 8. Médias e desvios-padrão do diâmetro das colônias bacterianas sob diferentes temperaturas	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curvas sobrepostas das regressões lineares do valor relativo de DIAM em função do tempo dentro de cada déficit (0, 25, 50, 75%).	41
Figura 2. Curvas sobrepostas das regressões do valor relativo de NFO em função do tempo (por déficit).	43
Figura 3. Curvas sobrepostas das regressões do valor relativo de AFOL em função do tempo (por déficit).	44
Figura 4. Curvas sobrepostas das regressões do valor relativo de ACOP (ICA) em função do tempo (por déficit).	45
Figura 5. Box-plots da AACP_DIAM para todos os tratamentos em cada déficit (0%, 25%, 50% e 75%).	47
Figura 6. Box-plots da AACP_NFO por tratamento em cada déficit.	48
Figura 7. Box-plots da AACP_AFOL por tratamento e déficit.	49
Figura 8. Box-plots da AACP_ACOP por tratamento em cada déficit. Elementos gráficos como acima.	50
Figura 9. Regressões AACP_DIAM ~ Déficit (%) por tratamento.	51
Figura 10. Regressões AACP_NFO ~ Déficit (%) por tratamento.	51
Figura 11. Regressões AACP_AFOL ~ Déficit (%) por tratamento.	52
Figura 12. Regressões AACP_ACOP ~ Déficit (%) por tratamento.	52
Figura 13. Biomassa fresca da parte aérea de bananeiras.	59
Figura 14. Médias do diâmetro das colônias bacterianas dos isolados BAC01, BAC09 e BAC7 sob diferentes temperaturas (30, 40, 50 e 55 °C).	62
Figura 15. Crescimento in vitro dos isolados bacterianos BAC09, BAC01 e BAC07 sob diferentes temperaturas (30, 40, 50 e 55 °C).	64
Figura 16. BAC09 em diferentes níveis de estresse, se comparado ao grupo de controle.	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Potenciais dos Isolados Bacterianos Seleccionados.....	30
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Bananicultura	15
2.2 Semiárido brasileiro	17
2.3 Estresse Hídrico.....	19
2.4 Fisiologia da Bananeira sob Estresse Hídrico.....	22
2.5 Microrganismos na Agricultura.....	24
2.6 Bioinsumos na Agricultura Brasileira.....	27
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 Condução do experimento	29
3.2 Isolados bacterianos e tratamentos	30
3.3 Delineamento experimental	31
3.4 Preparação do solo e calibração das sondas de TDR	31
3.5 Manejo de irrigação e condições de déficit hídrico.....	34
3.6 Preparação e aplicação do inóculo bacteriano	35
3.7 Avaliações experimentais	36
3.8 Análise Estatística.....	37
3.9 Experimento Complementar in vitro: avaliação da tolerância térmica dos isolados bacterianos selecionados	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 Crescimento das plantas em função do tempo e regime hídrico	40
4.1.1 AACP - Comparações gerais em função dos déficits.....	46
4.1.2 AACP - Comparações Significativas vs. C1 (Direção da Diferença)	50
4.2 Análise Fisiológica das Plantas em Função do Regime Hídrico	55
4.3 Desenvolvimento Radicular das plantas em Função do Regime Hídrico	56
4.4 Resultados complementares do experimento in vitro.....	61
5 CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

A banana (*Musa* spp.) é reconhecida como uma das frutas tropicais mais relevantes do ponto de vista econômico, social e alimentar, sendo cultivada e consumida em larga escala em todo o mundo (Shahbandeh, 2025; Oliveira et al., 2024). Além de contribuir para a segurança alimentar de milhões de pessoas, a bananeira desempenha papel importante na geração de renda em regiões tropicais e subtropicais (Leonel et al., 2024). No Brasil, de acordo com dados do IBGE (2023), a produção nacional ultrapassou 6,8 milhões de toneladas, com produtividade média de 15,1 t ha⁻¹, destacando-se a cultivar Grand Naine, muito utilizada para exportação por suas características morfológicas e organolépticas, como sabor, textura e aparência (Nomura et al., 2020).

Apesar de sua relevância, a produção da bananeira enfrenta grandes desafios relacionados à escassez hídrica, especialmente em regiões semiáridas, onde a irregularidade das chuvas e as elevadas temperaturas comprometem diretamente a produtividade. O déficit hídrico é considerado um dos principais fatores limitantes para a bananicultura, afetando processos fisiológicos essenciais, como fotossíntese, respiração, transporte e assimilação de nutrientes, o que resulta em crescimento reduzido e menor rendimento (Musika et al., 2023; Taiz et al., 2017). Sob estresse prolongado, há acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), que, em excesso, causam danos oxidativos a membranas, proteínas e DNA, levando a alterações morfofisiológicas, como diminuição da área foliar, redução da eficiência fotossintética e acúmulo de solutos osmoprotetores (Hasanuzzaman et al., 2020; Zhang et al., 2023).

Na busca por alternativas que minimizem esses impactos, estratégias sustentáveis têm recebido atenção crescente. Entre elas, destacam-se as Bactérias Promotoras de Crescimento de Plantas (BPCP), microrganismos capazes de atenuar os efeitos negativos do déficit hídrico por meio de diferentes mecanismos. Esses incluem: produção de fitormônios reguladores do crescimento, indução de resistência sistêmica, excreção de exopolissacarídeos que ajudam na retenção de umidade do solo, redução do estresse oxidativo e melhorias no desenvolvimento radicular, favorecendo maior eficiência na absorção de água e nutrientes (Marulanda et al., 2010; Peleg et al., 2011; Vurukonda et al., 2016). Estudos em diversas culturas já demonstraram o

potencial das BPCP em aumentar a resiliência ao estresse, mas ainda são escassos os trabalhos aplicados especificamente à bananeira (Berg, 2009; Díaz-Rodríguez et al., 2021; Porto et al., 2022).

Essa lacuna de conhecimento é especialmente relevante no contexto da cultivar Grand Naine, reconhecida por sua elevada exigência hídrica e grande importância econômica no Brasil e no mercado internacional. Considerando as demandas reais do setor produtivo, marcado pela necessidade de maior resiliência frente às mudanças climáticas, a utilização de isolados bacterianos como bioinoculantes representa uma alternativa biotecnológica promissora, com potencial de reduzir a dependência de insumos químicos e contribuir para sistemas agrícolas mais sustentáveis (Silva et al., 2020).

Partindo da hipótese de que a inoculação com BPCP pode aumentar a tolerância das bananeiras ao déficit hídrico, este estudo teve como objetivo avaliar a influência de isolados bacterianos na resposta fisiológica da cultivar Grand Naine submetida a diferentes níveis de estresse hídrico. A expectativa é que tais microrganismos favoreçam o crescimento saudável das plantas mesmo em condições adversas, reduzindo os impactos da seca e promovendo maior sustentabilidade na produção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Bananicultura

A banana (*Musa spp.*), pertencente à família Musaceae, é uma planta perene originária do sudeste asiático, tendo evoluído a partir das espécies selvagens *Musa acuminata* e *M. balbisiana* (Dantas & Filho, 2000). Atualmente, constitui uma das frutíferas de maior relevância socioeconômica no mundo, sendo cultivada em mais de 135 países e considerada a segunda fruta mais consumida globalmente. Além de desempenhar papel central na segurança alimentar, a cultura da banana representa importante fonte de geração de renda e emprego rural (FAO, 2023; da Mata et al., 2024).

A produção mundial ultrapassa 5 milhões de hectares, e o Brasil ocupa a quarta posição entre os maiores produtores, com cultivo presente em todos os estados e destaque para São Paulo, Bahia, Minas Gerais e Santa Catarina. Em 2024, a produção nacional atingiu 6,88 milhões de toneladas, resultado

associado a avanços tecnológicos como a melhoria do material genético, o aprimoramento do manejo fitossanitário e, sobretudo, o uso eficiente da irrigação (IBGE, 2024; SEBRAE, 2023; Lichterberg & Lichterberg, 2011).

O cultivo da banana é tipicamente tropical e condicionado a fatores climáticos específicos. As condições ideais incluem temperaturas entre 15 °C e 35 °C, precipitações bem distribuídas, mais de 2.000 horas de luminosidade anual e umidade relativa acima de 80%. Por outro lado, fatores como ventos excessivos podem ocasionar danos mecânicos às plantas, enquanto a escassez de água representa um dos principais entraves ao desenvolvimento da cultura, comprometendo o crescimento, a área foliar e a produtividade (SENAR, 2011).

Dentre as cultivares, a Grand Naine (*Musa spp.*, AAA), pertencente ao grupo Cavendish, destaca-se pelo alto rendimento, qualidade dos frutos e ampla aceitação nos mercados nacional e internacional. Apesar da boa adaptação a diferentes condições edafoclimáticas, apresenta sensibilidade ao déficit hídrico, sendo o manejo da água um dos principais fatores para o sucesso produtivo (Amorim *et al.*, 2021). A estrutura herbácea e o metabolismo intensivo da bananeira conferem alta exigência hídrica ao longo de todo o ciclo de cultivo.

Nesse cenário, os sistemas de irrigação têm papel estratégico na manutenção da produtividade e estabilidade da bananicultura. A irrigação por microaspersão é amplamente utilizada pela sua eficiência na economia de água e energia e pela possibilidade de fertirrigação, enquanto o gotejamento se mostra mais eficiente em regiões semiáridas, ao reduzir perdas por evaporação e lixiviação, podendo economizar até 50% de água em comparação a métodos tradicionais. Evidências demonstram ganhos expressivos de produtividade em culturas irrigadas por gotejamento, como uva, melão e manga, o que reforça seu potencial também para a banana (Guerra *et al.*, 2010; Costa *et al.*, 2020).

A escassez hídrica, intensificada pelas mudanças climáticas, afeta diretamente processos fisiológicos das plantas, como a fotossíntese, a condutância estomática e a absorção de nutrientes. Esses impactos levam à redução do crescimento, à senescência precoce e à diminuição da produção, demandando estratégias complementares de mitigação. Entre as alternativas sustentáveis, destaca-se o uso de microrganismos promotores de crescimento vegetal (PGPB), que contribuem para a resiliência ao estresse hídrico por meio

da síntese de fitohormônios, acúmulo de solutos compatíveis e ativação de mecanismos antioxidantes (Chieb & Gachomo, 2023; Fadiji *et al.*, 2022).

O emprego de bactérias endofíticas e rizosféricas adaptadas às condições locais apresenta-se como alternativa de baixo custo, aplicável tanto na agricultura familiar quanto em sistemas comerciais. Além de reduzir a dependência de fertilizantes e defensivos químicos, essa estratégia promove o equilíbrio biológico e potencializa a produtividade, mesmo em cenários de adversidade ambiental (Santoyo *et al.*, 2021).

2.2 Semiárido Brasileiro

O semiárido brasileiro enfrenta desafios climáticos severos, com secas periódicas que resultam em calamidades sociais e econômicas, reforçando a percepção de uma área marcada por adversidades climáticas e atrasos estruturais (Buainain & Garcia, 2013).

As mudanças climáticas globais, associadas ao aquecimento global, têm agravado os distúrbios fisiológicos em culturas comerciais e em atividades pecuárias, comprometendo a oferta de alimentos e, por consequência, a segurança alimentar. Regiões áridas e semiáridas são particularmente impactadas, devido às limitações impostas pelas condições ambientais extremas (Porto *et al.*, 2022).

As secas, tradicionalmente associadas ao semiárido nordestino, também afetam outras regiões tropicais, evidenciando a necessidade de ampliar a compreensão sobre sua ocorrência. Segundo Ferreira (2024), embora o semiárido do Nordeste brasileiro seja marcado por secas severas com repercussões sociais, econômicas e políticas significativas, essas condições não são exclusivas dessa região. O autor destaca que fenômenos climáticos como o El Niño, que influenciam a variabilidade das chuvas, têm impacto em diversas áreas tropicais, incluindo a Amazônia oriental, demonstrando que a seca é uma realidade presente em diferentes regiões tropicais do Brasil.

Nesse contexto, a irrigação surge como uma estratégia para mitigar os efeitos das secas, embora enfrente desafios significativos. Segundo Freitas *et al.* (2008), embora a irrigação seja uma prática fundamental para aumentar a

produtividade em áreas áridas e semiáridas, ela consome grandes volumes de recursos hídricos, pressionando ainda mais a disponibilidade de água em regiões com recursos escassos. Essa pressão sobre os recursos hídricos reforça a necessidade de buscar estratégias sustentáveis que equilibrem o aumento da produção agrícola com a preservação hídrica.

A baixa adoção de tecnologias apropriadas e adaptadas às condições do semiárido é outro obstáculo relevante. Essa situação expõe as populações locais a problemas graves, como a redução da qualidade de vida e a sustentabilidade das comunidades. De acordo com Lemos (2020), a vulnerabilidade econômica da região está associada às desigualdades no acesso a recursos naturais, à baixa fertilidade do solo e à falta de investimentos produtivos. Cerca de 70% dos produtores relatam prejuízos devido às condições climáticas adversas, com dificuldades no acesso à água sendo um dos principais entraves (Oliveira, 2013).

A seca severa registrada entre 2012 e 2013, considerada a pior das últimas décadas, agravou ainda mais os desafios no semiárido. Os impactos econômicos e sociais foram devastadores, afetando mais de 1.000 municípios e resultando em perdas de 6 bilhões de dólares até 2015 (Marengo *et al.*, 2016). Essa realidade serve como um alerta para a possibilidade de novos eventos extremos, ressaltando a importância de estudar e implementar estratégias eficazes de adaptação e mitigação, a fim de estarmos preparados para futuras secas e mantermos a normalidade das atividades econômicas e sociais mesmo diante de cenários adversos. Durante esse período, a agricultura familiar e a pecuária sofreram grandes prejuízos, com quedas acentuadas na produção de culturas temporárias, como frutas e hortaliças, especialmente no norte da Bahia (Sávio; Rodrigues Martins & Rocha Magalhães, 2018).

Diante desse cenário, estratégias como a fenologia agrícola têm sido apontadas como ferramentas cruciais para adaptar culturas a condições ambientais adversas. O uso de técnicas que consideram os estágios de desenvolvimento das plantas em relação a fatores climáticos permite otimizar a escolha e o manejo de cultivos, promovendo uma agricultura mais eficiente e adaptada (Oliveira, 2012).

A implementação de práticas agrícolas sustentáveis no semiárido é indispensável para enfrentar os desafios impostos pelas estiagens prolongadas. Culturas básicas, como milho, feijão e mandioca, são particularmente

vulneráveis ao estresse hídrico. Nesse contexto, o desenvolvimento de cultivares tolerantes à seca, associado ao manejo eficiente da água, é fundamental para garantir a sustentabilidade da produção (Silva *et al.*, 2020).

Paralelamente, avanços no melhoramento genético e na biotecnologia têm possibilitado o desenvolvimento de cultivares com maior eficiência no uso da água e maior tolerância à seca (Blum, 2011). No Submédio São Francisco, a irrigação no cultivo da bananeira é uma prática agrícola crucial que demanda atenção especial às condições hídricas da região. O sistema de produção descrito pela Embrapa envolve técnicas específicas de irrigação e manejo da cultura, considerando as características semiáridas da região (EMBRAPA, 2014).

De acordo com Freitas *et al.* (2023), a eficiência dos sistemas de irrigação desempenha um papel crucial na gestão da demanda hídrica da cultura da banana, especialmente em regiões semiáridas. A adoção de tecnologias mais eficientes é essencial para promover a sustentabilidade da produção agrícola em cenários de recursos hídricos limitados.

Portanto, a adoção de práticas inovadoras, o investimento em tecnologia e a implementação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade são caminhos indispensáveis para superar os desafios da agricultura no semiárido brasileiro, promovendo um futuro mais resiliente e produtivo para a região.

2.3 Estresse Hídrico

O estresse hídrico é uma das principais limitações ao crescimento e desenvolvimento das plantas, especialmente em regiões com disponibilidade limitada de água. Essa condição ocorre quando o suprimento de água no solo é insuficiente para atender às demandas fisiológicas da planta, afetando diretamente processos como fotossíntese, crescimento e produção (Chaves *et al.*, 2009).

Segundo Bogati e Walczak (2024), o estresse hídrico, causado pela escassez hídrica pode afetar significativamente a comunidade microbiana do solo, as atividades enzimáticas e o crescimento das plantas, alterando a dinâmica ecológica e a eficiência das plantas em condições de seca. O impacto do estresse hídrico é particularmente significativo na bananeira, uma planta

tropical que possui um sistema radicular superficial e uma alta demanda evotranspiratória (Turner *et al.*, 2007). Esse estresse afeta a taxa de fotossíntese devido ao fechamento dos estômatos, limitando a entrada de CO₂ nas folhas, além de reduzir a condutância estomática, a transpiração e a eficiência do uso da água (Taiz *et al.*, 2017).

A bananeira é uma planta herbácea de crescimento rápido e porte robusto, que consome grandes volumes de água para seu desenvolvimento (Lichterberg, 2011). Em regiões com precipitação insuficiente ou irregular, como o semiárido brasileiro, o estresse hídrico se torna um problema significativo, afetando não só o crescimento vegetativo, mas também a produção e a qualidade dos frutos. A irrigação, especialmente em períodos de déficit hídrico, é crucial para garantir o desenvolvimento adequado da cultura e evitar a redução da produtividade, bem como o surgimento de doenças (Raimundo *et al.*, 2013; Oliveira, 2018). O manejo eficiente da água de irrigação é essencial para garantir a sustentabilidade da produção agrícola, especialmente em regiões com escassez hídrica, pois envolve a aplicação de técnicas que visam otimizar o uso da água, assegurando o máximo de produtividade com o mínimo de desperdício (Marouelli *et al.*, 2020).

O balanço hídrico climatológico demonstrou que a irrigação durante períodos de seca é recomendada para manter o crescimento e aumentar o rendimento das bananeiras (Raimundo *et al.*, 2013). A mudança climática prevista até 2050 pode agravar ainda mais essa situação, com uma possível redução das áreas adequadas para o cultivo de bananas em regiões subtropicais (Voora *et al.*, 2023).

Além dos efeitos sobre o crescimento e produção, o estresse hídrico também induz alterações morfológicas e bioquímicas nas plantas. No caso da bananeira, observa-se um aumento na concentração de solutos compatíveis, como prolina e carboidratos solúveis, que ajudam na manutenção do potencial osmótico e na estabilidade das membranas celulares (Santos *et al.*, 2016). Em resposta ao estresse, as plantas podem desenvolver adaptações morfológicas, como a redução da área foliar e o espessamento da cutícula, visando minimizar a perda de água e maximizar sua absorção (Zhu, 2002).

Uma abordagem para mitigar os efeitos do estresse hídrico é o uso de microrganismos benéficos, como BPCP e os fungos micorrízicos arbusculares.

Esses microrganismos podem melhorar a eficiência da absorção de água e nutrientes, aumentar a tolerância ao estresse oxidativo e regular os hormônios vegetais. Essas bactérias promovem o crescimento radicular, melhoram a absorção de nutrientes e induzem resistência sistêmica nas plantas, contribuindo para a adaptação das culturas às condições adversas (Vurukonda *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2009). Muitas BPCP produzem exopolissacarídeos, que formam uma camada protetora ao redor das raízes, ajudando na retenção de água no solo e promovendo um ambiente mais favorável para o crescimento radicular (Marulanda *et al.*, 2010). Microrganismos como *Bacillus spp.* e *Pseudomonas spp.* podem regular a síntese de ácido abscísico (ABA), um hormônio crucial na resposta ao estresse hídrico, além de promoverem a produção de auxinas e citocininas, que estimulam o crescimento radicular e retardam a senescência foliar (Peleg *et al.*, 2011; Berg, 2009).

A inoculação de sementes com BPCP é uma prática eficiente para melhorar a germinação e o desenvolvimento inicial das plantas em condições de estresse hídrico (Vurukonda *et al.*, 2016). Além disso, a utilização de consórcios microbianos, que combinam diferentes espécies de microrganismos, têm mostrado resultados promissores, pois os efeitos benéficos são potencializados pela interação entre as espécies (Marulanda *et al.*, 2010). Esses microrganismos também ativam mecanismos de defesa sistêmica nas plantas, reduzindo os impactos do estresse hídrico, como a ativação de vias antioxidantes e a acumulação de solutos osmoticamente ativos, como prolina e açúcares solúveis (Mittler, 2002).

Embora o uso de tecnologias sustentáveis e de microrganismos benéficos tenha mostrado avanços, os desafios relacionados ao aumento da frequência de eventos climáticos extremos e à escassez de recursos hídricos em regiões semiáridas ainda limitam a expansão da bananicultura (Oliveira *et al.*, 2020). Dessa forma, o desenvolvimento de cultivares mais tolerantes à seca, aliado a práticas agrícolas sustentáveis, é essencial para garantir a sustentabilidade da produção. Além disso, o manejo integrado, que considera as condições climáticas e os recursos disponíveis, é fundamental para otimizar os resultados e reduzir os impactos ambientais (Donato, Santos e Silva, 2012).

2.4 Fisiologia da Bananeira sob Estresse Hídrico

A bananeira (*Musa* spp.) é uma planta de elevada exigência hídrica, cuja produtividade pode ser fortemente comprometida em situações de déficit de água. Seu sistema radicular é predominantemente superficial, concentrando-se nos primeiros 40 cm do solo, o que aumenta a sensibilidade às variações na disponibilidade hídrica. Além disso, o elevado índice de área foliar e a intensa atividade metabólica aumentam sua demanda por água ao longo de todo o ciclo (Amorim *et al.*, 2021).

O estresse hídrico afeta diretamente diversos processos fisiológicos na bananeira. Um dos primeiros mecanismos de resposta é o fechamento estomático, que visa reduzir a perda de água por transpiração. Embora seja uma estratégia de proteção, o fechamento estomático limita a entrada de CO₂, resultando na redução da taxa fotossintética e na queda na produção de fotoassimilados, comprometendo o crescimento vegetativo e o acúmulo de biomassa (Leite *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2023). A condutância estomática sofre diminuição significativa, reduzindo também a transpiração e a troca gasosa, comprometendo o resfriamento foliar e podendo levar ao superaquecimento das folhas (Pereira *et al.*, 2020).

Com a continuidade do déficit hídrico, ocorre diminuição no conteúdo relativo de água (RWC) e no potencial hídrico foliar, desencadeando mecanismos fisiológicos como o acúmulo de osmólitos compatíveis, prolina, glicina-betaína, sacarose e sorbitol, que auxiliam na manutenção do turgor celular (Silva & Gomes, 2021; Moreira *et al.*, 2021). Adicionalmente, o estresse hídrico induz a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), como o peróxido de hidrogênio (H₂O₂), que podem danificar membranas, proteínas e DNA. Para mitigar esses efeitos, a planta ativa enzimas antioxidantes, incluindo superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidases (POD e APX), promovendo a neutralização do estresse oxidativo e a preservação da integridade celular (Fernandes & Pinto, 2021; Souza *et al.*, 2022).

Outro mecanismo adaptativo envolve o acúmulo de ácido abscísico (ABA), que regula o fechamento estomático e sinaliza o estado hídrico da planta, modulando respostas fisiológicas frente ao déficit de água. Estudos também indicam alterações no metabolismo secundário e na expressão de proteínas

relacionadas à defesa e à regulação do crescimento, incluindo vias de biossíntese de lignina, flavonoides e proteínas de choque térmico (Costa *et al.*, 2023).

O estresse hídrico compromete o crescimento vegetativo, reduzindo a emissão de folhas, a área foliar, a altura da planta e o diâmetro do pseudocaule. A senescência foliar é antecipada, especialmente nas folhas mais velhas, associada à degradação de clorofila, à redução da atividade fotossintética e ao aumento de EROs (Matos *et al.*, 2022; Ferreira *et al.*, 2022). Além disso, o déficit hídrico pode interferir na formação de cachos, reduzindo o número de frutos por penca, o peso dos frutos e a qualidade comercial, comprometendo a viabilidade econômica da cultura. Cultivares como a Grand Naine são particularmente sensíveis a essas condições, exigindo estratégias de manejo eficientes para garantir produtividade em regiões semiáridas (Lima *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o uso de microrganismos benéficos tem se mostrado uma estratégia para mitigar os efeitos do déficit hídrico. As bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPB ou BPCP) contribuem para a tolerância ao estresse, promovendo o crescimento radicular, a saúde do sistema radicular e a manutenção da fotossíntese e do equilíbrio hídrico (Berg, 2009; Vurukonda *et al.*, 2016; Fadiji & Babalola, 2022). Os mecanismos de ação de bactérias promotoras de crescimento vegetal podem ocorrer de forma direta, como a síntese de metabólitos, produção de fitormônios, oxidação de compostos sulfurados, formação de biofilmes e aumento da disponibilidade de nutrientes; ou de forma indireta, envolvendo a competição com fitopatógenos e a produção de substâncias antimicrobianas. Dependendo de sua diversidade genética e metabólica, tais microrganismos podem atuar como biofertilizantes ou biopesticidas, contribuindo para o desenvolvimento saudável das plantas mesmo em condições adversas (DUNN; BECERRA-RIVERA, 2023; ANANDHAM *et al.*, 2007; ZHANG *et al.*, 2020).

A compreensão detalhada da fisiologia da bananeira sob déficit hídrico, aliada à utilização de bioinsumos microbianos, é essencial para o desenvolvimento de práticas de manejo sustentável. Tais estratégias permitem melhorar a tolerância da cultura ao estresse hídrico, garantindo maior produtividade e resiliência em regiões com irregularidade pluviométrica ou

restrição de irrigação, além de representar soluções viáveis diante das mudanças climáticas globais e da crescente escassez de recursos hídricos.

2.5 Microrganismos na Agricultura

O estresse hídrico representa um dos maiores desafios para a agricultura mundial, resultando em perdas significativas na produtividade das culturas (FAO, 2023; IPCC, 2022). Nesse contexto, a interação entre plantas e microrganismos benéficos tem se consolidado como uma estratégia para mitigar os efeitos adversos da seca. As mudanças climáticas globais têm intensificado esses impactos negativos sobre a produção agrícola, tornando essencial o desenvolvimento de abordagens inovadoras e sustentáveis para enfrentar tais desafios (Santoyo *et al.*, 2021; Fadji *et al.*, 2022).

Dentre essas estratégias, destacam-se os microrganismos promotores de crescimento vegetal (PGPR), que atuam em diferentes níveis fisiológicos e bioquímicos, aumentando a tolerância das plantas ao déficit hídrico (Santos *et al.*, 2023; Oliveira & Souza, 2022). A inoculação com PGPR pode estimular o crescimento mesmo sob condições de escassez de água, por meio da produção de fitormônios, como auxinas e citocininas, e da redução dos níveis de etileno, que, em excesso, compromete o desenvolvimento vegetal. Além disso, esses microrganismos aumentam a disponibilidade de nutrientes essenciais, como fósforo e ferro, promovendo uma nutrição mais equilibrada e maior tolerância ao estresse hídrico. Essa ação conjunta auxilia na manutenção da integridade celular, melhora a capacidade de absorção de água e retarda os efeitos negativos do déficit hídrico (Fernandes *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2022).

Os mecanismos de ação das bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) podem ser diretos ou indiretos. Entre os mecanismos diretos destacam-se a síntese de metabólitos, a disponibilização de nutrientes, a produção de fitormônios, a oxidação de compostos de enxofre e a formação de biofilmes. Já os mecanismos indiretos envolvem a competição com fitopatógenos e a produção de substâncias antimicrobianas, contribuindo para a proteção e o fortalecimento das plantas.

Outro grupo relevante são os fungos micorrízicos arbusculares (AMF), que estabelecem associações simbióticas com as raízes, aumentando a área de

absorção de água e nutrientes por meio de suas extensas redes de hifas. Essa interação não apenas melhora a eficiência de absorção, mas também contribui para a manutenção da estrutura do solo e a retenção hídrica. Além disso, plantas micorrizadas apresentam maiores níveis de compostos osmoprotetores, como poliaminas e solutos orgânicos, que preservam a estabilidade celular durante períodos de seca (Costa & Pereira, 2020; Martins *et al.*, 2023).

Além dos PGPR e AMF, outros microrganismos, como endófitos e actinobactérias, também exercem papel importante na resposta das plantas ao estresse hídrico. Esses microrganismos modulam a expressão gênica associada ao estresse, induzem a produção de enzimas antioxidantes e reduzem os danos causados pelo estresse oxidativo. Tais mecanismos favorecem a manutenção da homeostase hídrica e a adaptação a ambientes com baixa disponibilidade de água (Souza *et al.*, 2022; Almeida & Ribeiro, 2021).

No caso da bananeira, espécie particularmente sensível ao déficit hídrico, a inoculação com isolados bacterianos tem apresentado resultados promissores. Esses microrganismos contribuem para a mitigação dos impactos da seca, estimulando o crescimento e a saúde do sistema radicular, aspecto crucial para a sobrevivência e o desempenho produtivo em condições adversas (Berg, 2009; Vurukonda *et al.*, 2016). Entretanto, a eficácia dessas interações depende de fatores ambientais, da espécie vegetal e das cepas microbianas empregadas. A complexidade dessas relações ainda representa um desafio para sua aplicação em larga escala, o que reforça a necessidade de pesquisas integradas que considerem aspectos ecológicos, fisiológicos e agronômicos. Nesse sentido, a formulação de consórcios microbianos adaptados a condições específicas surge como alternativa para potencializar a tolerância das plantas ao estresse hídrico, contribuindo para a sustentabilidade agrícola (Nascimento *et al.*, 2023; Ferreira *et al.*, 2021).

O uso de microrganismos na agricultura tem ganhado destaque como alternativa sustentável às práticas convencionais, especialmente no enfrentamento de desafios como a degradação do solo, a dependência de insumos químicos e os efeitos das mudanças climáticas. A biotecnologia agrícola possibilita a utilização de microrganismos benéficos, como bactérias e fungos, capazes de promover o crescimento vegetal, melhorar a eficiência no uso de

nutrientes e aumentar a tolerância das plantas a estresses abióticos e bióticos (Fadiji & Babalola, 2022).

Entre os microrganismos mais utilizados destacam-se as bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPB), como espécies dos gêneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Rhizobium* e *Enterobacter*. Essas bactérias atuam por meio de mecanismos como a solubilização de fósforo e potássio, a produção de fitormônios, a fixação biológica de nitrogênio e a síntese de sideróforos, que favorecem a absorção de ferro (Vurukonda *et al.*, 2016; Lugtenberg & Kamilova, 2009). Além de estimular o crescimento, desempenham papel fundamental na indução da tolerância ao estresse hídrico, salino e térmico, promovendo a produção de osmólitos compatíveis (prolina, trealose, glicina-betaína), a ativação do sistema antioxidante e a modulação hormonal, especialmente do ácido abscísico (ABA), essencial para o fechamento estomático em condições de déficit hídrico (Ngumbi & Kloepper, 2016; Chieb & Gachomo, 2023).

No solo, os microrganismos também contribuem para a melhoria da estrutura e da fertilidade, favorecendo a agregação de partículas, a ciclagem de nutrientes e a supressão de fitopatógenos. Estudos apontam que a aplicação de bioinoculantes com PGPB pode reduzir o uso de fertilizantes químicos e pesticidas, ao mesmo tempo em que melhora o desempenho agrônômico de culturas como milho, soja, arroz e banana (Gomes *et al.*, 2023; Embrapa, 2022).

No contexto do semiárido brasileiro, o uso de microrganismos adaptados às condições locais tem se mostrado especialmente relevante. Microrganismos isolados de solos com histórico de seca ou baixa fertilidade tendem a apresentar maior eficiência em promover crescimento sob condições adversas. Assim, microrganismos endêmicos aplicados a culturas sensíveis ao déficit hídrico, como a bananeira, podem conferir vantagens adaptativas e contribuir para a resiliência dos sistemas agrícolas (Araújo *et al.*, 2022).

Nesse cenário, o desenvolvimento de bioinsumos a partir de microrganismos nativos representa uma estratégia eficaz e de baixo impacto ambiental. Políticas públicas, como o Programa Nacional de Bioinsumos (MAPA, 2020), têm incentivado pesquisas e a produção de inoculantes microbiológicos, promovendo o uso de recursos biológicos na agricultura. A integração entre microbiologia do solo, fisiologia vegetal e práticas de manejo agrícola é, portanto,

essencial para consolidar a transição para sistemas produtivos mais sustentáveis e resilientes (Vidal et al. 2021).

2.6 Bioinsumos na Agricultura Brasileira

Os bioinsumos agrícolas representam uma alternativa sustentável para a agricultura brasileira, oferecendo soluções que combinam eficiência produtiva e preservação ambiental. Esses produtos incluem microrganismos benéficos, extratos naturais e compostos bioativos, capazes de promover o crescimento vegetal, aumentar a tolerância a pragas e doenças e melhorar a fertilidade do solo. O avanço na utilização de bioinsumos tem sido impulsionado pelo Programa Nacional de Bioinsumos, implementado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que visa fomentar a pesquisa, desenvolvimento, regulamentação, comercialização e uso desses produtos no país (Silva *et al.*, 2022; Costa & Oliveira, 2023; MAPA, 2020).

A regulamentação dos bioinsumos no Brasil evoluiu para garantir segurança, qualidade e eficácia, estabelecendo critérios específicos para registro, rotulagem e utilização, alinhando-se às normas internacionais e promovendo maior confiança entre agricultores e consumidores (Fernandes *et al.*, 2021). Apesar dos avanços, desafios persistem, incluindo a necessidade de maior capacitação técnica, investimentos em pesquisa aplicada e a superação de barreiras burocráticas que dificultam a entrada de novos produtos no mercado (Pereira & Santos, 2023).

Do ponto de vista ecológico, os bioinsumos contribuem para a conservação da biodiversidade do solo e dos agroecossistemas, promovendo a saúde do solo e a ciclagem de nutrientes. Eles estimulam a atividade microbiana benéfica, favorecendo a formação de estruturas do solo e a retenção hídrica, aspectos cruciais em sistemas agrícolas sob estresse ambiental (Moura *et al.*, 2023). Além disso, bioquimicamente, os bioinsumos influenciam a produção de metabólitos secundários, incluindo fitoalexinas, enzimas antioxidantes e hormônios vegetais, que atuam na defesa das plantas contra estresses bióticos e abióticos (Lima & Almeida, 2022).

A nível molecular, a aplicação de bioinsumos pode modular a expressão gênica das plantas, ativando vias de sinalização relacionadas ao estresse e à

defesa imunológica. Essa modulação resulta na indução sistêmica de resistência, conferindo às plantas respostas mais rápidas e eficientes frente a adversidades ambientais. Os microrganismos presentes nos bioinsumos também interagem com o microbioma natural do solo, promovendo diversidade e funcionalidade microbiana, reforçando a resiliência dos sistemas agrícolas (Ribeiro *et al.*, 2023; Santana & Melo, 2022).

O Brasil destaca-se globalmente na utilização de inoculantes, especialmente em soja, onde mais de 80% da área cultivada utiliza bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, reduzindo significativamente a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos (Hungria *et al.*, 2016). Além disso, a Política Nacional de Bioinsumos tem incentivado a produção e o uso direto de bioinsumos nas propriedades rurais, beneficiando pequenos e médios produtores (MAPA, 2020). A adoção de microrganismos promotores de crescimento e biodefensivos também contribui para a redução de custos de produção e minimiza os impactos ambientais de insumos químicos (Silva *et al.*, 2021). Atualmente, mais de 100 produtos microbianos já estão registrados no Brasil, abrangendo funções como fertilização, controle biológico e indução de resistência (MAPA, 2023).

O banco de microrganismos da Embrapa reúne mais de 12 mil microrganismos catalogados, constituindo uma das maiores coleções da América Latina e servindo como fonte de inovação para novos bioinsumos (Embrapa, 2022). O uso de bioinsumos também tem se expandido em culturas frutíferas, como banana, uva, mamão e citros, promovendo maior enraizamento, controle biológico e melhor aproveitamento de nutrientes (Ribeiro *et al.*, 2022). Além disso, favorece a agricultura de baixo carbono, com menor emissão de gases de efeito estufa e maior resiliência das culturas frente às mudanças climáticas (Abreu *et al.*, 2021).

Entre os tipos mais utilizados de bioinsumos destacam-se os inoculantes microbiológicos, como rizobactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPB), fungos micorrízicos e agentes de controle biológico. Esses produtos atuam por diferentes mecanismos, incluindo fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo e potássio, produção de fitormônios e compostos antimicrobianos, além de aumentar a tolerância a estresses abióticos, como o déficit hídrico (Silva *et al.*, 2023; Fadiji & Babalola, 2022).

A agricultura tropical brasileira possui grande potencial para o desenvolvimento de bioinsumos, devido à diversidade microbiana dos solos e à variedade de biomas. Isso facilita a identificação de microrganismos nativos adaptados a condições adversas, que podem ser aplicados com maior eficiência em culturas como milho, soja, feijão e banana (Ferreira *et al.*, 2023). Estudos na bananicultura mostram que a aplicação de microrganismos benéficos melhora significativamente o desempenho fisiológico das plantas em ambientes semiáridos, promovendo produtividade e sustentabilidade do sistema (Gomes *et al.*, 2023).

Além dos benefícios agronômicos e ambientais, o uso de bioinsumos apresenta vantagens econômicas, ao reduzir a dependência de insumos industriais, fortalecer a agricultura familiar e valorizar o conhecimento técnico-científico nacional (Embrapa, 2022). No entanto, a utilização ampla e segura desses produtos exige avanços em regulamentação, capacitação técnica e comprovação de eficácia em campo.

Segundo Vidal *et al.* (2021), os bioinsumos têm se mostrado uma ferramenta estratégica para a agricultura, promovendo sistemas produtivos mais sustentáveis e resilientes. O avanço da pesquisa científica, aliado à regulamentação adequada, é essencial para ampliar o uso desses insumos, contribuindo para a segurança alimentar, a preservação ambiental e a adaptação das culturas às mudanças climáticas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Condução do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Embrapa Mandioca e Fruticultura, localizada em Cruz das Almas, Bahia, Brasil (latitude 12.686944° S e longitude 39.072222° W), durante o período de novembro de 2024 a fevereiro de 2025, totalizando 74 dias de avaliação. O estudo visou avaliar, de forma *in vivo*, o impacto de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) no desenvolvimento da bananeira (*Musa spp.*, cv. Grand Naine), cultivada sob diferentes níveis de estresse hídrico. A escolha da cultivar Grand Naine (subgrupo Cavendish, genoma AAA) justifica-se por sua importância

econômica e ampla utilização em sistemas produtivos comerciais no Brasil e no mundo.

Mudas micropropagadas, com aproximadamente 15 cm de altura, foram obtidas de biofábricas parceiras certificadas, garantindo alta qualidade fitossanitária e uniformidade genética do material vegetal. Antes da implementação dos tratamentos, as mudas passaram por um período de aclimação de 14 dias em estufa com irrigação controlada para assegurar o estabelecimento adequado das plantas.

Foram utilizados vasos plásticos com capacidade de 3 kg, preenchidos com solo. Os vasos foram dispostos sobre bancadas, permitindo o adequado desenvolvimento das mesmas e facilitando as operações de manejo e avaliação.

3.2 Isolados bacterianos e tratamentos

Seis isolados bacterianos, denotados como BAC 1, BAC 5, BAC 7, BAC 9, BAC 10 e BAC 11, foram selecionados para este estudo devido ao seu potencial previamente identificado como promotores de crescimento vegetal. Estes isolados foram utilizados para constituir os tratamentos T1, T2, T3, T4, T5 e T6, respectivamente. Um grupo controle (C1) consistiu em plantas não microbiolizadas, ou seja, sem a aplicação de qualquer isolado bacteriano.

Esses isolados se destacaram por apresentar múltiplos mecanismos benéficos: produção de sideróforos, produção de exopolissacarídeos (EPS), fixação de nitrogênio, solubilização de potássio e fosfato, tolerância a estresse hídrico e térmico e formação de biofilmes.

Quadro 1. Potenciais dos Isolados Bacterianos Selecionados

Isolado	Potencial
BAC01	Produção de exopolissacarídeo
BAC05	Produção de AIA (fraca)
BAC07	Controle biológico (alta)
BAC09	Produção de AIA (forte)
BAC10	Controle biológico (moderada)
BAC11	Solubilização de fosfato

Fonte: Elaboração própria

3.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados (DBC), estruturado para avaliar sistematicamente o efeito da inoculação bacteriana e do estresse hídrico no desenvolvimento da bananeira. O esquema fatorial 6 x 4 x 5 compreendeu 6 isolados bacterianos (BAC01, BAC05, BAC07, BAC09, BAC10 E BAC11), 4 níveis de estresse hídrico (100%, 75%, 50% e 25% da capacidade de campo) e 4 controles (um para cada nível de estresse, sem inoculação bacteriana).

Foram utilizadas 5 repetições por tratamento, resultando em um total de 140 plantas, distribuídas da seguinte forma: 120 plantas destinadas aos tratamentos com isolados bacterianos (6 isolados x 4 níveis de estresse x 5 repetições) e 20 plantas para os tratamentos controle (1 controle por nível de estresse x 4 níveis x 5 repetições).

Cada vaso contendo uma muda de bananeira constituiu uma unidade experimental independente. Os vasos foram distribuídos aleatoriamente dentro da casa de vegetação, respeitando-se o delineamento em blocos para minimizar possíveis efeitos de microvariações ambientais dentro da estrutura (como diferenças de luminosidade, temperatura e ventilação).

Os vasos foram identificados com placas codificadas e resistentes às condições ambientais, contendo informações sobre o bloco, tratamento bacteriano e nível de irrigação.

3.4 Preparação do solo e calibração das sondas de TDR

A preparação do solo para o experimento envolveu uma série de procedimentos para garantir a precisão das medições de umidade ao longo do tempo.

Inicialmente, amostras representativas do solo foram coletadas e enviadas para análises físicas e químicas completas no Laboratório de Solos da Embrapa, cujos resultados estão sendo apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo

Atributos físicos

PROF (m)	Areias Total	Silte	Argila	D _s (kg/dm ³)	A _D (%)								
0,00 - 0,20	462	140	398	1,39	3,22								
Atributos químicos													
PROF (m)	pH (água)	² P (mg dm ⁻³)	² K	³ Ca	³ Mg	³ Al	² Na	H ⁺ Al	SB	CTC	V (%)	MO (g kg ⁻¹)	
			(cmol _c dm ⁻³)										
0,00-0,20	5,4	10	0,22	1,44	1,22	0,1	0,03	2,30	2,91	5,21	56	29,7	

PROF = Profundidade; SB = soma de bases trocáveis; CTC = capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases e MO = matéria orgânica. ²Extração por Mehlich⁻¹; ³Extração com KCl 1M; ⁴Método de Walkley e Black modificado. D_s = densidade do solo, A_D = água disponível.

Fonte: Elaboração própria

Os resultados das análises (Tabela 1) revelaram um solo de textura franco-argilosa, com 462 g kg⁻¹ de areia total, 140 g kg⁻¹ de silte e 398 g kg⁻¹ de argila, densidade de 1,39 kg dm⁻³ e água disponível de 3,22%. Os atributos químicos incluíram pH 5,4 (em água), teores adequados de fósforo (10 mg dm⁻³), potássio (0,22 cmol_c dm⁻³), cálcio (1,44 cmol_c dm⁻³), magnésio (1,22 cmol_c dm⁻³), baixo teor de alumínio (0,1 cmol_c dm⁻³) e matéria orgânica de 29,7 g kg⁻¹. A soma de bases trocáveis (SB) foi de 2,91 cmol_c dm⁻³, a capacidade de troca catiônica (CTC) de 5,21 cmol_c dm⁻³ e a saturação por bases (V) de 56%.

Para a bananeira, recomenda-se solo com pH próximo da neutralidade (6,0 a 6,5), saturação por bases acima de 60% e teores adequados de cálcio, magnésio e potássio, fundamentais para o desenvolvimento do sistema radicular e a sustentação da planta (EMBRAPA, 2009; Matos et al., 2010; Alves et al., 2017). Assim, a análise revelou a necessidade de calagem para correção da acidez e elevação da saturação por bases, realizada pela aplicação de 1,1 g de calcário por vaso, conforme recomendação técnica.

A adubação complementar foi feita com SS 260, fertilizante solúvel contendo fósforo, cálcio e micronutrientes, diluído em água (10 mL em 10 L) e aplicado à dose de 10 mL por vaso, visando suprir nutrientes essenciais ao desenvolvimento inicial da bananeira.

Para determinar com precisão a capacidade de campo do solo, foram coletadas amostras de solo em cilindros de 100 cm³ enviadas ao Laboratório de Física do Solo da Embrapa, onde foi determinada a curva de retenção de água. Foram obtidos os valores de umidade do solo para os potenciais de 0,1, 0,33, 1, 3 e 15 atm (Tabela 2). A curva de retenção foi ajustada pelo modelo matemático

de van Genuchten (1980), determinando-se que a capacidade de campo correspondia a $0,1424 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Tabela 2. Curva de retenção de água no solo

Ψ_m (atm)	0,1	0,33	1	3	15
θ_m ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	0,1426	0,1323	0,1083	0,1030	0,0979

Ψ_m é o potencial da água no solo, em atm; θ_m é a umidade do solo, em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$

Fonte: Elaboração própria

O manejo de irrigação das plantas foi feito com base na umidade do solo. Foram utilizadas sondas de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) para monitoramento da umidade do solo. O processo de calibração das sondas seguiu metodologia rigorosa: foram coletadas duas amostras do solo em tubos de PVC (diâmetro de 50 mm, altura de 15 cm). As amostras foram preparadas removendo-se 2 cm de solo na parte superior e colocando tecido poroso na parte inferior para permitir drenagem controlada. Uma sonda de TDR foi inserida centralmente em cada amostra. As amostras foram então saturadas por elevação capilar durante 24 horas em bandeja com água.

Após a saturação, iniciou-se o processo gradual de secagem e monitoramento simultâneo do peso das amostras (em balança com precisão de 0,01 g) e das leituras da constante dielétrica (K_a) registrada pelas sondas de TDR, conectadas a um testador de cabos TDR-100 (Campbell Scientific). No primeiro dia, as leituras foram realizadas a cada 10 minutos. Posteriormente, o intervalo entre leituras foi aumentando conforme diminuía a taxa de variação de umidade, passando para leituras horárias no segundo dia e três vezes ao dia nos dias subsequentes.

O processo de calibração estendeu-se por 16 dias, até que o peso e as leituras das sondas se estabilizassem. Ao final, as amostras foram secas em estufa a 105°C por 48 horas para determinação da massa de solo seco. Com os dados coletados, foi estabelecida a relação entre a constante dielétrica (K_a) e o conteúdo volumétrico de água no solo, gerando a equação de calibração (Equação 1):

$$\theta = 0,00001K_a^3 - 0,0007K_a^2 + 0,0272K_a - 0,1092 \text{ (Eq. 1)}$$

Onde: θ é o teor de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); e K_a é a constante dielétrica aparente da água no solo.

Esta equação permitiu correlacionar precisamente os valores lidos na TDR com a umidade real do solo durante todo o experimento. O valor de 0,2271 lido na TDR foi determinado como correspondente à capacidade de campo do solo ($0,1424 \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

3.5 Manejo de irrigação e condições de déficit hídrico

O manejo da irrigação foi realizado com precisão para garantir a implementação adequada dos diferentes níveis de estresse hídrico previstos no delineamento experimental. Inicialmente, todas as plantas foram mantidas em condições ótimas de umidade (100% da capacidade de campo) por 14 dias após o transplante, para assegurar o estabelecimento uniforme das mudas.

A partir do 15º dia, foram implementados os tratamentos de estresse hídrico, com quatro níveis, baseados na capacidade de campo (CC) do solo ($0,1424 \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$): 100% CC (sem estresse), 75% CC (estresse leve), 50% CC (estresse moderado) e 25% CC (estresse severo), que corresponde a diferentes intensidades de déficit hídrico: 0% (sem estresse), 25% (estresse leve), 50% (estresse moderado) e 74% (estresse severo). Os valores correspondentes de leitura na TDR para cada nível foram: 0,2271 (100% CC), 0,1703 (75% CC), 0,1135 (50% CC) e 0,0568 (25% CC), conforme detalhado na Tabela 3.

Tabela 3. Níveis de irrigação e os valores correspondentes, lidos na TDR

Nível de Irrigação	Cálculo	Leitura TDR
100% CC	$0,2271 \times 1$	0,2271
75% CC	$0,2271 \times 0,75$	0,1703
50% CC	$0,2271 \times 0,50$	0,1135
25% CC	$0,2271 \times 0,25$	0,0568

Fonte: Elaboração própria

O monitoramento da umidade do solo foi realizado diariamente, sempre no período da manhã (7:00-8:00 horas), antes e 1 hora após a irrigação, através de leituras das sondas de TDR instaladas em cada vaso a uma profundidade de

10 cm. A quantidade de água a ser irrigada, por nível de irrigação, foi determinada com base na equação 2:

$$L = (\theta_a - \theta) \times V \text{ (Eq. 2)}$$

Onde: L é o volume de água a ser aplicado (cm^3 ou mL); θ_a é a umidade alvo do tratamento ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ é a umidade atual do solo antes da irrigação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e V é o volume de solo no vaso (cm^3).

A aplicação da água foi realizada manualmente utilizando provetas graduadas com precisão de 1L, adicionando-se a água lentamente na superfície do solo para evitar escoamento superficial. Após cada irrigação, uma segunda leitura da umidade era realizada para confirmar que a umidade alvo havia sido atingida.

3.6 Preparação e aplicação do inóculo bacteriano

O processo de preparação do inóculo bacteriano seguiu um protocolo rigoroso desenvolvido no Laboratório de Fitopatologia e Microbiologia da Embrapa Mandioca e Fruticultura. As cepas bacterianas armazenadas foram reativadas individualmente, seguindo procedimentos assépticos para evitar contaminações.

As cepas bacterianas foram inicialmente retiradas do armazenamento a 80°C e reativadas individualmente em placas de Petri contendo meio ágar nutriente. Estas placas foram incubadas a $28 \pm 2^\circ\text{C}$ por 48 horas. Após este período inicial de crescimento, realizou-se uma repicagem para novas placas com o mesmo meio de cultura, mantendo as mesmas condições de incubação ($28 \pm 2^\circ\text{C}$ por 48 horas).

Para obtenção do inóculo em quantidade adequada ao experimento, procedeu-se com a raspagem das culturas bacterianas das placas. Uma porção desta cultura inicial foi transferida para frascos Erlenmeyer de 3L contendo 1200 mL de caldo nutriente. Os frascos foram mantidos sob incubação a $25 \pm 2^\circ\text{C}$ com agitação constante de 100 rpm durante 48 horas, permitindo que as bactérias atingissem a fase logarítmica de crescimento.

A densidade bacteriana foi ajustada utilizando espectrofotometria, com leituras de absorvância a 540 nm em espectrofotômetro previamente calibrado. A cultura foi diluída com solução salina conforme necessário até atingir o valor de OD (densidade óptica) de 0,5, o que corresponde aproximadamente a 10^8 UFC (unidades formadoras de colônia) por mL. Esta concentração foi estabelecida com base em estudos prévios que demonstraram ser eficiente para promover colonização radicular sem causar efeitos fitotóxicos.

Para a aplicação do inóculo, cada vaso com mudas da cultivar Grand Naine recebeu 50 mL da suspensão bacteriana, aplicada diretamente ao solo na região próxima a raiz da planta, utilizando um becker para garantir precisão volumétrica. Esse volume foi baseado em protocolos previamente estabelecidos na literatura, demonstrando ser suficiente para promover a colonização eficiente das raízes sem causar fitotoxicidade ou lixiviação excessiva das bactérias.

A reaplicação do inóculo foi realizada a cada 15 dias, visando manter a população bacteriana ativa nas raízes das plantas e garantir a continuidade da interação benéfica entre as bactérias e a planta. Durante cada reaplicação, foi garantido que o volume de 50 ml por vaso fosse distribuído de forma homogênea ao redor das raízes, promovendo uma boa colonização bacteriana no sistema radicular.

3.7 Avaliações experimentais

As avaliações experimentais foram realizadas a cada 10 dias, durante um período de 74 dias, para mensurar diversos parâmetros indicativos do desenvolvimento das plantas e sua resposta aos tratamentos. Entre os parâmetros de crescimento avaliados estavam: Alt (Altura da planta (cm)): medida da base do pseudocaule até a inserção da primeira folha, utilizando fita métrica com precisão de 0,1 cm; Diam (Diâmetro do pseudocaule (mm)): medido a 5 cm da superfície do solo, com auxílio de paquímetro digital com precisão de 0,01 mm; Nfol (Número de folhas): contagem das folhas vivas completamente expandidas, considerando folha viva aquela com pelo menos 50% de sua área foliar funcional (verde); Afol (Área foliar (cm²)): calculada com base nas dimensões da terceira folha completamente expandida a partir do ápice (considerada a folha mais representativa do status fisiológico da planta). O

comprimento foi medido da base da folha até seu ápice, ao longo da nervura central, e a largura foi medida na parte mais larga do limbo foliar. A área foi calculada pela fórmula: Área Foliar = Comprimento \times Largura \times 0,80, conforme metodologia proposta por Zucoloto *et al.* (2008) e validada para bananeiras; Acop (Área estimada da copa): Estimada como sendo; $Acop = Afol \times Nfol$ e ICA (Índice Composto de Crescimento): Representa um índice sintético abrangente do crescimento da parte aérea, calculado pela multiplicação do Diâmetro pela Área Estimada da Copa Estimado como sendo $ICA = Diam \times Acop$

Parâmetros fisiológicos também foram analisados, incluindo: Condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$): medida na face abaxial da terceira folha completamente expandida, utilizando porômetro portátil (modelo SC-1, Decagon Devices) entre 9:00 e 11:00 horas da manhã; Índice de clorofila: mensurado com clorofilômetro portátil (SPAD-502, Minolta); Temperatura da folha ($^{\circ}\text{C}$): medida com termômetro infravermelho digital (precisão $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$), posicionado a 10 cm da superfície foliar, na terceira folha completamente expandida.

Ao final do período experimental (74 dias), as plantas foram cuidadosamente retiradas dos vasos para avaliação do sistema radicular. O solo foi removido por lavagem com água corrente sobre peneira de malha 2 mm para minimizar a perda de raízes; Comprimento de raízes (cm): medido com régua milimetrada, considerando a distância da base do rizoma até a extremidade da raiz mais longa; Volume de raízes (cm^3): determinado pelo método de deslocamento de água em proveta graduada; Biomassa radicular fresca (g): pesagem imediata após secagem superficial com papel absorvente, em balança analítica com precisão de 0,01 g; Biomassa radicular seca (g): após secagem em estufa a 65°C até peso constante (aproximadamente 72 horas); Biomassa aérea fresca (g): pesagem da parte aérea (pseudocaule e folhas) imediatamente após a coleta; Biomassa aérea seca (g): após secagem em estufa com circulação forçada de ar a 65°C até peso constante (aproximadamente 72 horas).

3.8 Análise estatística

Para avaliar a tendência de crescimento ou alteração dos parâmetros ao longo do tempo, ajustou-se um modelo de regressão linear simples para cada tratamento e parâmetro, com o valor relativo (%) como variável dependente e o

tempo como variável independente: Valor Relativo (%) = $b_0 + b_1 \times \text{Tempo}$. O coeficiente angular (b_1) desta regressão indica a inclinação da curva de resposta do parâmetro ao longo do tempo, sendo que valores mais elevados sugerem maior tolerância ao estresse hídrico ou aumento mais pronunciado do crescimento sob as condições testadas. Para cada regressão, foram geradas bandas de confiança de 95% por bootstrap de resíduos (≥ 2.000 reamostragens), exibidas como “sombra” nas figuras. A comparação entre tratamentos considerou a diferença de inclinações $\Delta b_1 = b_1_{\text{trat}} - b_1_{\text{C1}}$, sendo considerada significativa quando o IC95% de Δb_1 não incluía 0, indicando que o tratamento difere do controle quanto à tendência temporal sob aquele déficit.

Um tratamento foi considerado “melhor que C1” se sua inclinação (b_1) fosse significativamente maior que a do controle, permitindo identificar isolados bacterianos que efetivamente promoveram desempenho superior das plantas sob estresse hídrico. Além disso, a Área Abaixo da Curva de Progresso (AACP) foi determinada para os parâmetros AFOL, DIAM, ICA, ACOP e NFOL em todos os tratamentos e níveis de déficit (0%, 25%, 50% e 75%), refletindo o acúmulo total ou o desenvolvimento do parâmetro ao longo do tempo e fornecendo uma visão mais abrangente da resposta das plantas. O cálculo da AACP foi realizado pela regra do trapézio, a partir das medições seriadas de cada unidade experimental, conforme a fórmula:

Onde:

$$\text{AACP} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{y_i + y_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i)$$

Para avaliar a variação do desempenho integrado ao longo do gradiente de déficit hídrico, ajustou-se, para cada tratamento e parâmetro, o modelo $\text{AACP} = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Déficit} (\%)$. Bandas de confiança de 95% foram obtidas por bootstrap de resíduos (≥ 2.000 reamostragens). A comparação com o controle foi realizada a partir da diferença $\Delta \beta_1 = \beta_1_{\text{trat}} - \beta_1_{\text{C1}}$, sendo significativa quando o IC95% de $\Delta \beta_1$ não incluía zero. Valores de β_1 mais elevados ou menos negativos indicam menor sensibilidade ao aumento do déficit hídrico.

Para cada parâmetro, realizou-se ANOVA fatorial 4×7 com fatores Déficit e Tratamento, incluindo o termo de interação, adotando-se $\alpha = 0,05$. Quando pertinente, inspeções de pressupostos (normalidade e homogeneidade de resíduos) orientaram a interpretação dos resultados. Os dados da AACP foram submetidos ao teste de agrupamento Scott-Knott ($\alpha = 5\%$) para identificar grupos de tratamentos com médias estatisticamente semelhantes, representadas por letras (A = maiores médias). Comparações adicionais da AACP de cada tratamento com o controle foram realizadas calculando $\Delta AACP = AACP_{TRAT} - AACP_{C1}$, considerando valores positivos como superioridade e negativos como inferioridade em relação ao controle. Um tratamento pôde ser considerado “melhor que C1” quando apresentou evidência estatística em pelo menos uma das seguintes frentes: inclinação temporal (b_1) significativamente maior que a de C1, inclinação AACP \times déficit (β_1) significativamente maior que a de C1, ou média de AACP significativamente superior ao C1.

Além disso, a análise estatística também foi conduzida considerando as variáveis morfológicas do sistema radicular e aéreo das plantas, em delineamento em blocos casualizado, em esquema fatorial 4×7 , sendo quatro níveis de estresse hídrico (100%, 75%, 50% e 25% da capacidade de campo) e sete tratamentos (seis isolados bacterianos e uma testemunha), com cinco repetições. Os dados foram submetidos à ANOVA bifatorial, conduzida para verificar os efeitos principais de níveis de irrigação e tratamentos bacterianos, bem como a interação entre esses fatores. Em caso de significância pelo teste F ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Quando a interação não foi significativa, analisaram-se apenas os efeitos simples.

3.9 Experimento complementar in vitro: Avaliação da tolerância térmica dos isolados bacterianos selecionados

Para complementar os resultados obtidos no experimento em casa de vegetação, foi realizado um experimento in vitro com o objetivo de avaliar a tolerância térmica de três isolados bacterianos: BAC09 (melhor desempenho), BAC01 (desempenho intermediário) e BAC07 (pior desempenho). O

experimento foi conduzido em laboratório, utilizando para repicagem dos isolados meio de cultura TSA (10%) suplementado com sorbitol (405 g L⁻¹), ajustando a atividade de água (aW) para 0,919, valor mínimo considerado adequado para o desenvolvimento da maioria das bactérias.

Os isolados foram incubados simultaneamente na mesma placa de Petri de 9 cm de diâmetro, utilizando discos de papel filtro estéreis com aproximadamente 5–6 mm de diâmetro, previamente embebidos na suspensão bacteriana. Os três isolados foram distribuídos em posições equidistantes, formando um triângulo, com cada ponto localizado a 2,5 cm do centro da placa e mantendo distância aproximada de 4,3 cm entre os pontos de inoculação. O experimento foi conduzido em quatro temperaturas de incubação: 30 °C, 40 °C, 50 °C e 55 °C, com oito repetições para cada condição. As placas foram vedadas e incubadas nas respectivas temperaturas.

A avaliação do crescimento bacteriano foi realizada após três dias de incubação, medindo-se a distância do centro do disco até a extremidade do halo de crescimento com paquímetro. Os resultados foram classificados em uma escala de notas de 1 a 3, sendo nota 1 para crescimento ≤ 2 mm (restrito ao ponto de inoculação), nota 2 para crescimento entre 2 e 5 mm, e nota 3 para crescimento > 5 mm.

Os dados obtidos foram primeiramente verificados quanto aos pressupostos da ANOVA. Para atender à normalidade dos resíduos, aplicou-se transformação logarítmica, confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk ($p = 0,9186$). A homogeneidade de variâncias foi avaliada pelo teste de Levene ($p = 0,2115$), indicando variâncias homogêneas. Atendidos os pressupostos, os dados foram submetidos à ANOVA fatorial, considerando temperatura de incubação e isolado bacteriano como fatores. Quando o teste F indicou significância ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As comparações foram representadas por letras maiúsculas para os tratamentos e letras minúsculas para as temperaturas, permitindo a interpretação clara das diferenças entre os isolados e as condições de incubação.

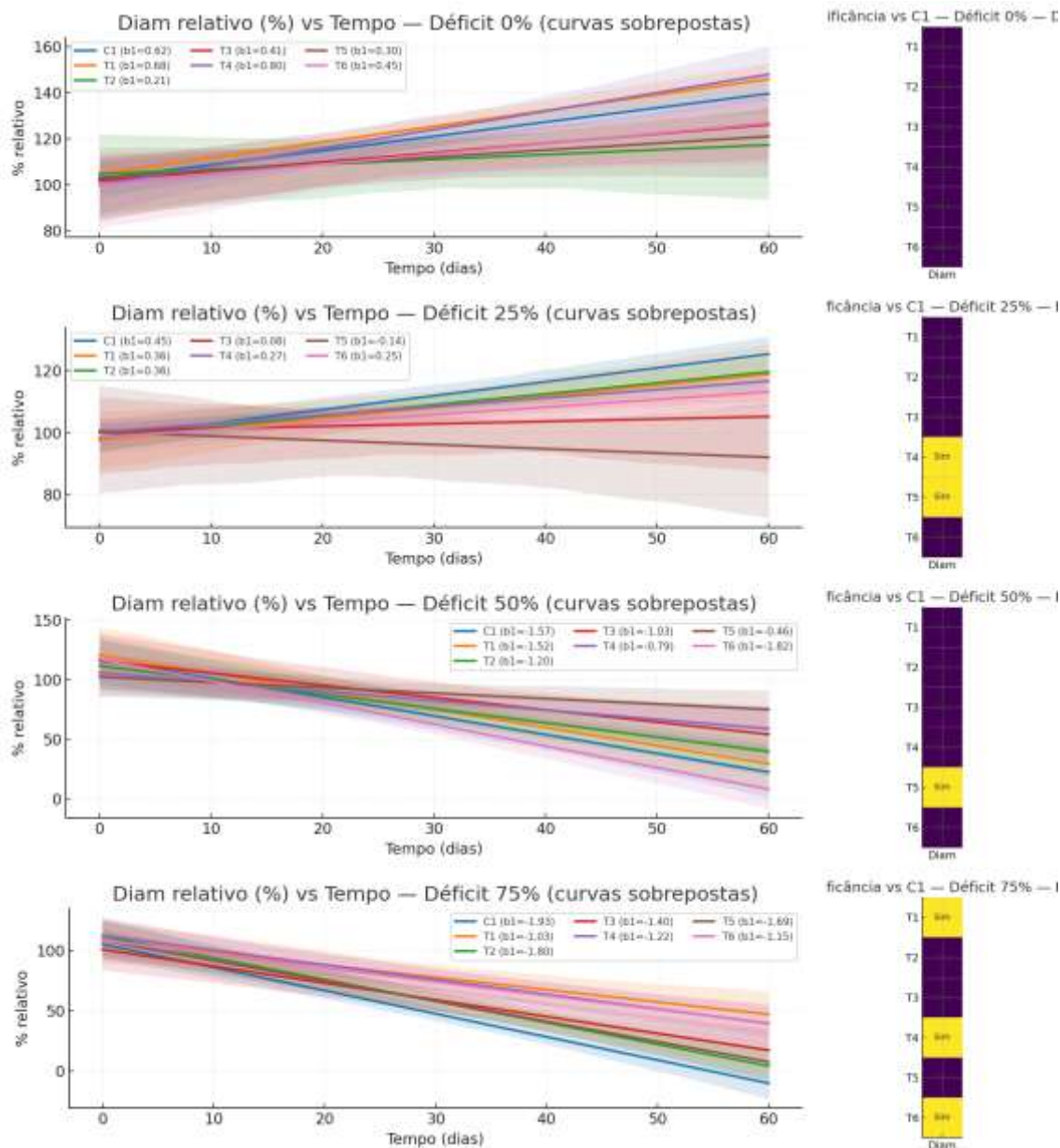
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Crescimento das plantas em função do tempo e regime hídrico

Os resultados relativos ao crescimento das mudas de bananeira foram analisados considerando a inclinação temporal (b1) dos parâmetros de crescimento em relação ao controle e a Área Abaixo da Curva de Progresso (AACP) sob diferentes níveis de déficit hídrico.

Com relação a variável do diâmetro (Diam), em 0% de déficit não foram observadas diferenças entre os tratamentos; em 25%, T4 (BAC9) e T5 (BAC10) apresentaram inclinações inferiores ao controle; em 50%, T5 (BAC10) destacou-se com inclinação superior; e em 75%, T1 (BAC1), T4 (BAC9) e T6 (BAC11) exibiram melhor manutenção do diâmetro, indicando maior robustez sob estresse severo.

Figura 1. Curvas sobrepostas das regressões lineares do valor relativo de DIAM (diâmetro do caule) em função do tempo dentro de cada déficit (0%, 25%, 50% e 75%).

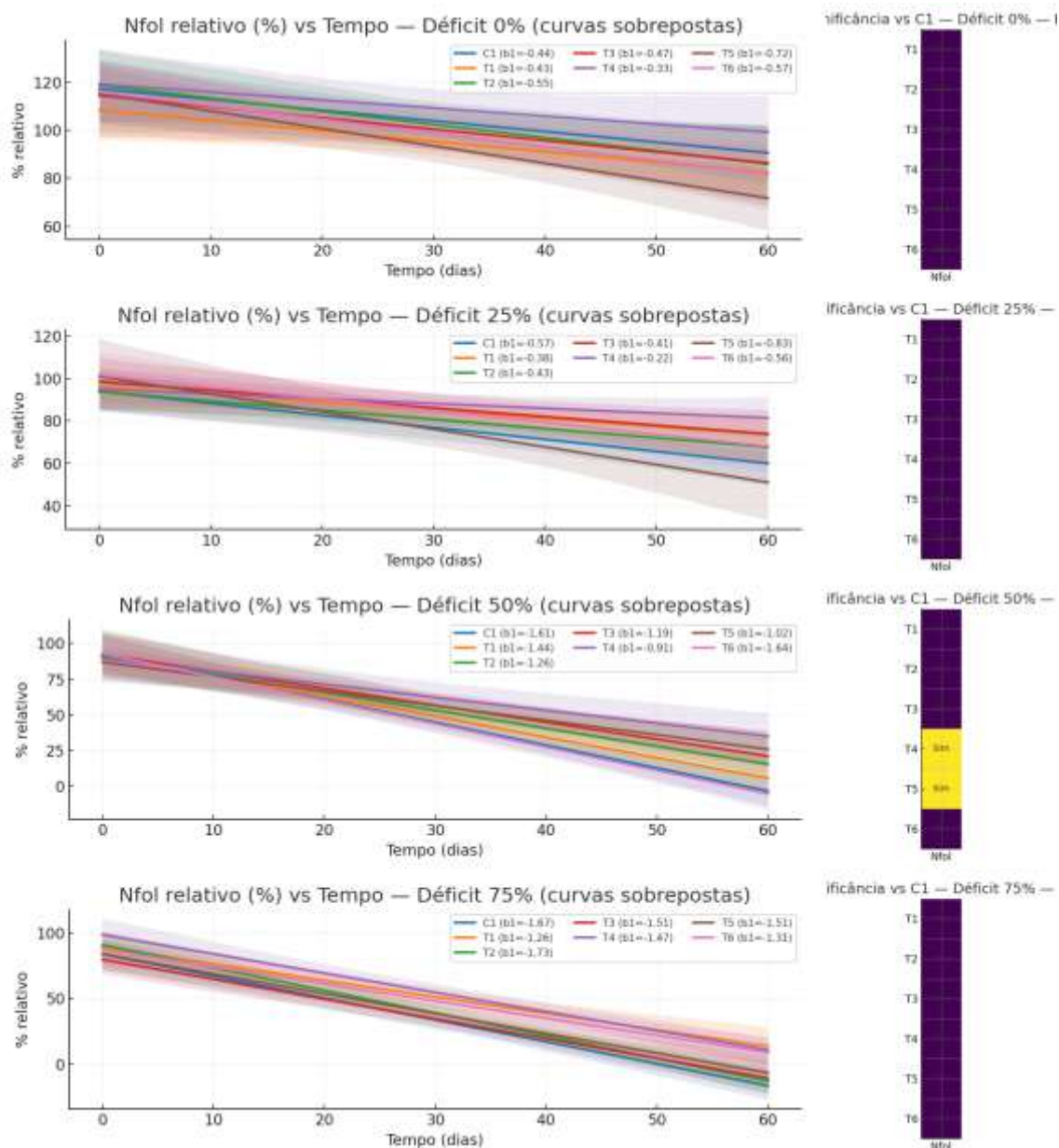


O painel esquerdo mostra, para cada tratamento, a reta ajustada (sombra = IC95% via bootstrap de resíduos); o painel direito resume, por tratamento e déficit, se a inclinação temporal (b_1) do tratamento difere significativamente da inclinação do controle (C1) (Sim/Não, com base no IC95% de Δb_1).

Fonte: Elaboração própria.

Para Número de folhas (Nfo) em 0%, 25% e 75% não foram detectadas diferenças. Apenas em 50%, T4 (BAC9) e T5 (BAC10) exibiram inclinações superiores, sugerindo emissão/manutenção de folhas mais favorável ao longo dos dias.

Figura 2. Curvas sobrepostas das regressões do valor relativo de NFO (Número de folhas) em função do tempo por déficit (0%, 25%, 50% e 75%).



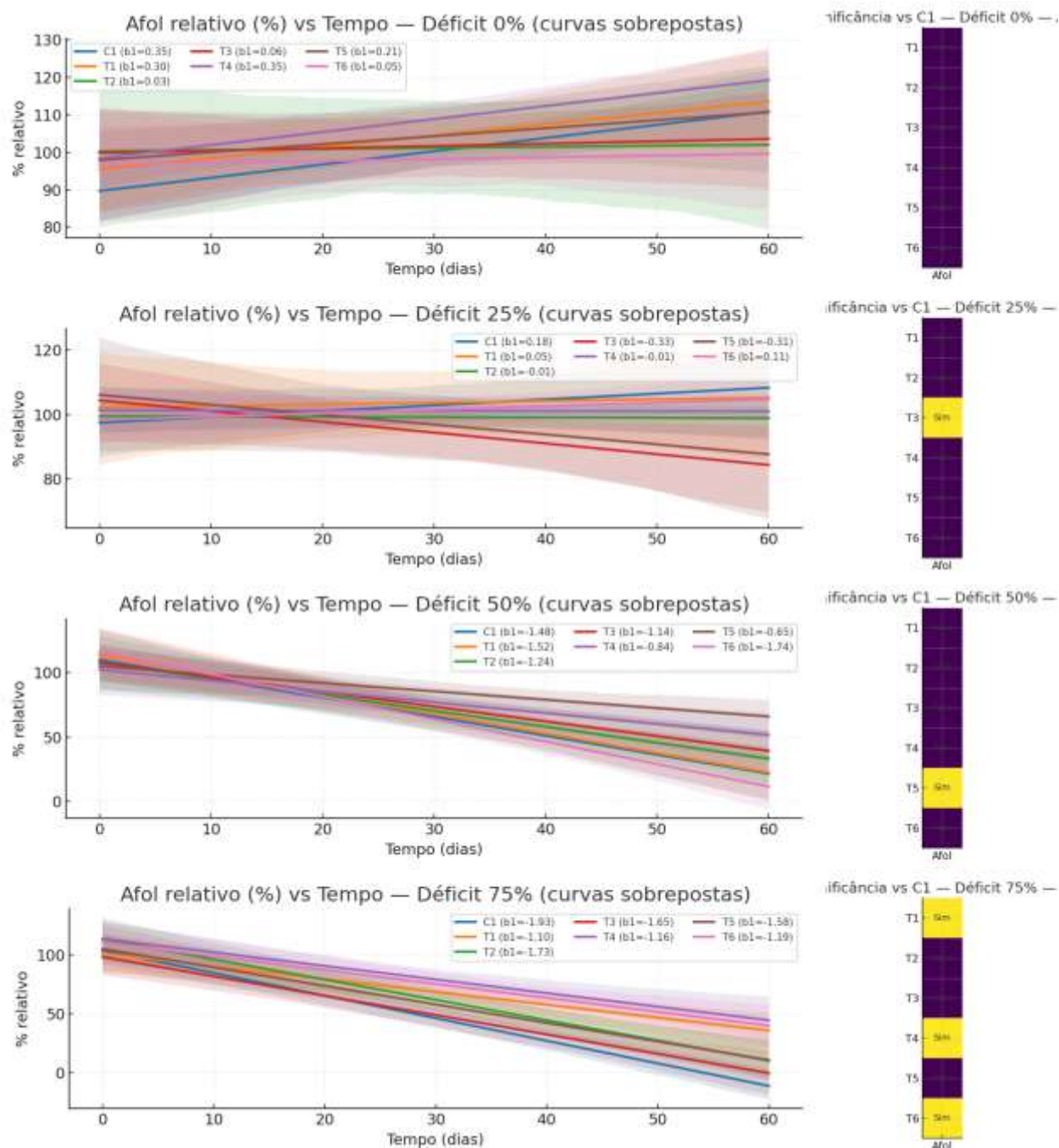
Sombreamento = IC95%. Painel à direita: “Sim/Não” para diferença de inclinação vs. C1 (IC95% de Δb_1).

Fonte: Elaboração própria

Para a área foliar (Afol) em 0% não houve diferenças. Em 25%, T3 (BAC7) apresentou inclinação inferior ao controle. Em 50%, T5 (BAC10) mostrou inclinação superior. Em 75%, T1 (BAC1), T4 (BAC9) e T6 (BAC11) exibiram

inclinações superiores, denotando robustez temporal da área foliar sob alta restrição hídrica.

Figura 3. Curvas sobrepostas das regressões do valor relativo de AFOL (Área foliar em função do tempo por déficit (0%, 25%, 50% e 75%).

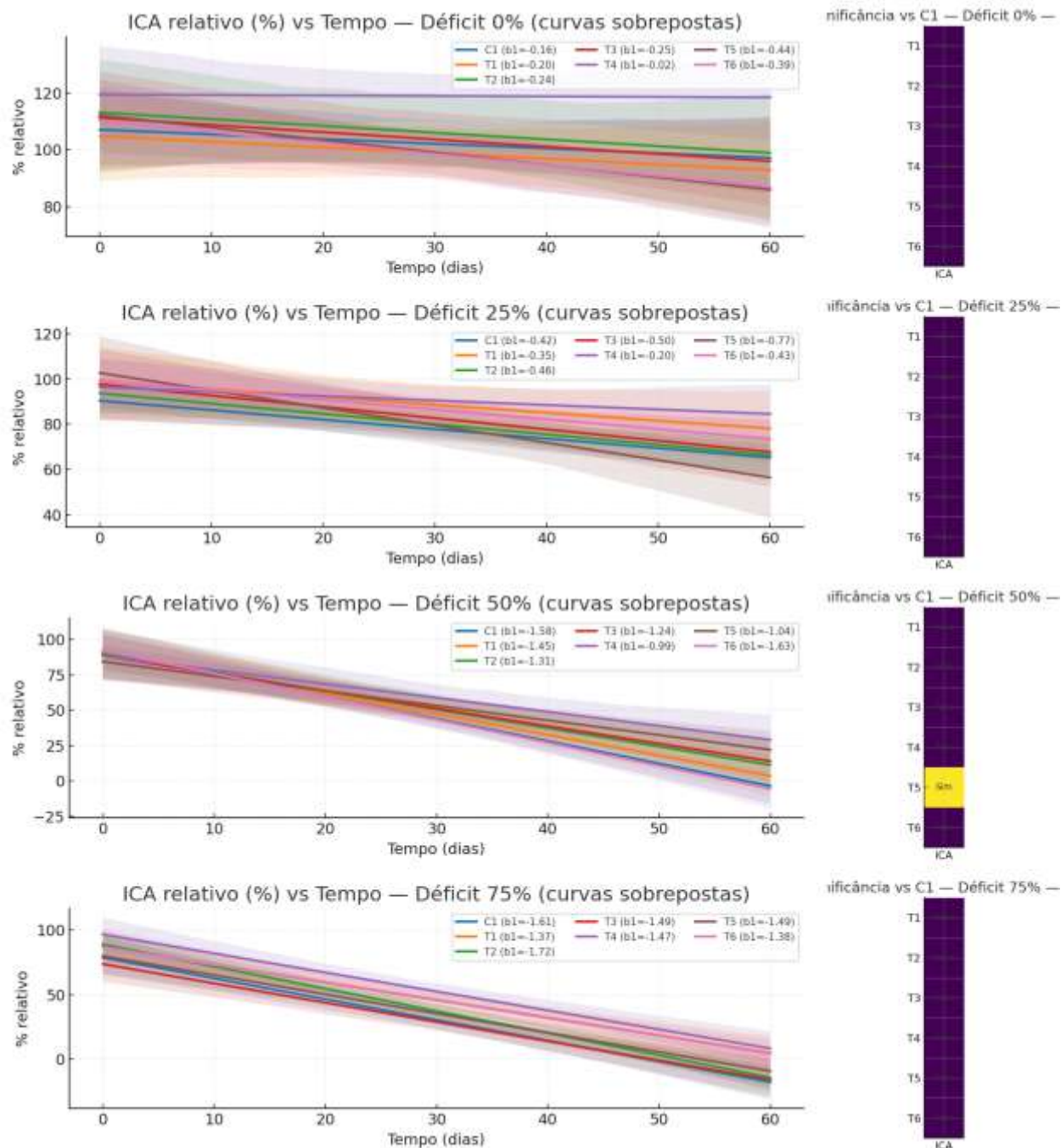


Sombreamento = IC95%. Painel à direita: "Sim/Não" para a diferença de inclinação vs. C1 (IC95% de $\Delta b1$).

Fonte: Elaboração própria

Para o índice composto de crescimento (ICA) em 0% e 25% não houve diferenças. Em 50%, T5 (BAC10) apresentou inclinação superior; em 75% também não foram observadas diferenças.

Figura 4. Curvas sobrepostas das regressões do valor relativo do ICA (Índice composto de crescimento) em função do tempo por déficit (0%, 25%, 50% e 75%).



Sombreamento = IC95%. Painel à direita: “Sim/Não” vs. C1 (IC95% de Δb_1).

Fonte: Elaboração própria

4.1.1 AACP - Comparações gerais em função dos déficits

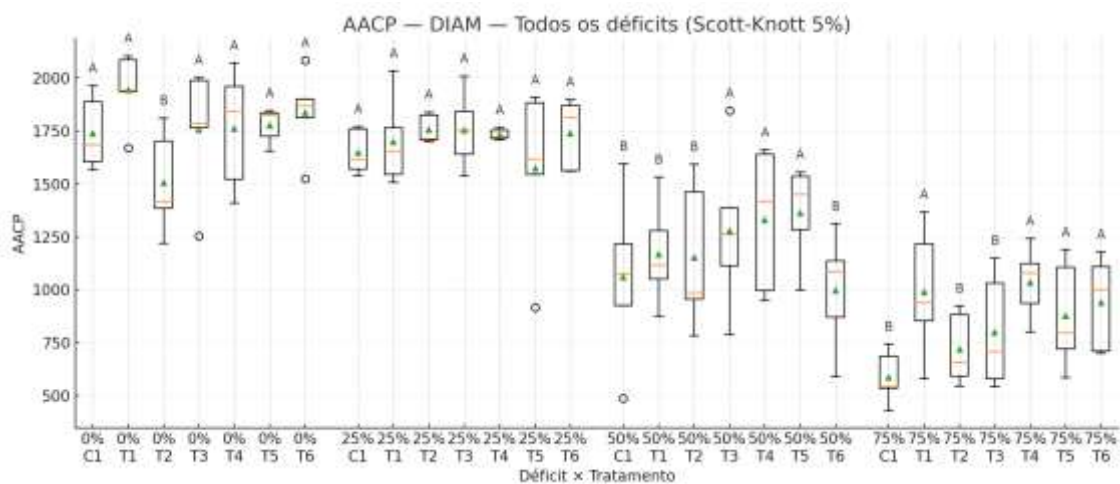
A comparação por AACP evidenciou, para cada parâmetro, diferenças entre tratamentos dentro de cada nível de déficit. Os box-plots sintetizam a distribuição das repetições e as letras de Scott-Knott ($\alpha = 5\%$) indicam grupos de médias estatisticamente semelhantes. Em geral, os gráficos permitem

identificar quais tratamentos ocuparam grupos superiores (A) em cada déficit, bem como situações de empate (mesma letra) e separações nítidas (letras distintas).

Os box-plots mostram variação entre tratamentos condicionada ao nível de déficit: em alguns déficits, observam-se grupos superiores (letra A) indicando maior acúmulo da variável ao longo do tempo (AACP mais alta), enquanto outros tratamentos permanecem em grupos inferiores (letras posteriores). Essa estratificação por letras confirma que a diferença de desempenho acumulado se dá dentro de cada déficit (e não entre déficits), e auxilia a identificar os candidatos mais promissores para manutenção/ganho de diâmetro sob restrição hídrica.

Para o diâmetro (AACP_DIAM), em 0% de déficit todos os tratamentos mantiveram desempenho semelhante (grupo A), exceto T2 (BAC5), que apresentou valor inferior (grupo B). Em 25%, todos os tratamentos permaneceram no grupo superior (A). Em 50%, destacaram-se T3 (BAC7), T4 (BAC9), T5 (BAC10) (grupo A), enquanto os demais tratamentos ficaram no grupo B. Já em 75%, apenas T1 (BAC1) e T4 (BAC9) T5 (BAC10) e T6 (BAC11) conseguiram manter-se no grupo superior (A), indicando maior robustez frente ao estresse hídrico.

Figura 5. Distribuição da AACP_DIAM (Área Aérea de Crescimento de Plantas – Diâmetro) por tratamento em cada nível de déficit hídrico (0%, 25%, 50% e 75%), apresentada em box-plots.

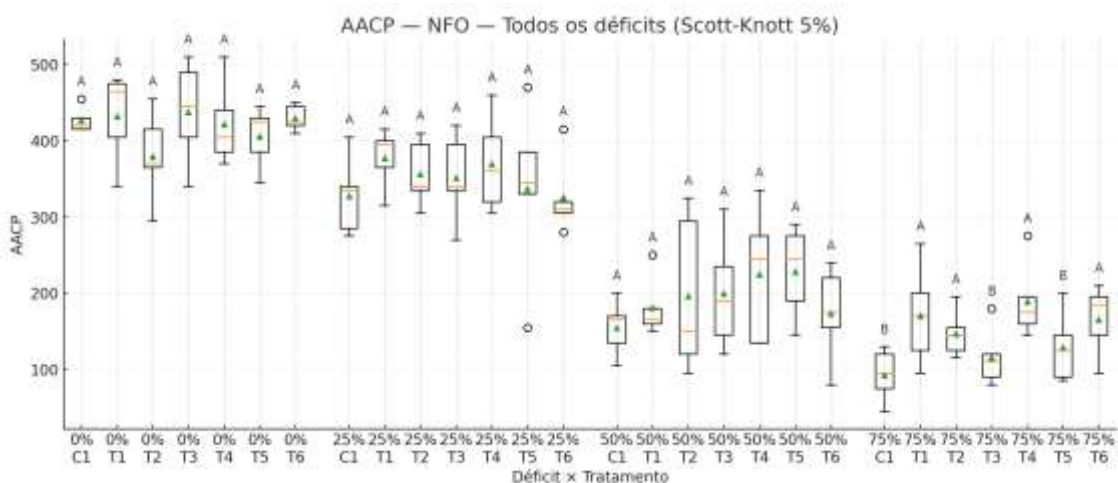


A linha central representa a mediana, a caixa o IQR (Q1–Q3), e os “bigodes” a extensão dos dados sem outliers. As letras de Scott–Knott ($\alpha = 5\%$) rotulam grupos de médias dentro de cada déficit (letra A = maiores médias no respectivo déficit).

Fonte: Elaboração própria

Para o número de folhas (NFO), a análise da AACP demonstrou que em 0% e 25% de déficit hídrico não houve diferenças entre os tratamentos, todos permanecendo no grupo superior (A). Da mesma forma, em 50% de déficit, os tratamentos apresentaram comportamento semelhante, sem distinção estatística. Apenas sob estresse mais severo, em 75% de déficit, verificaram-se diferenças significativas, com T1 (BAC1), T2 (BAC5), T4 (BAC9) e T6 (BAC11) mantendo-se no grupo A, enquanto C1 (Controle), T3 (BAC7) e T5 (BAC10) apresentaram desempenho inferior (grupo B). Esses resultados indicam que a emissão e manutenção de folhas só foram comprometidas de forma diferenciada entre os tratamentos em condição de maior restrição hídrica.

Figura 6. Distribuição da AACP_NFO (Área Aérea de Crescimento de Plantas – Número de Folhas Observadas) por tratamento em cada nível de déficit hídrico, apresentada por meio de box-plots.



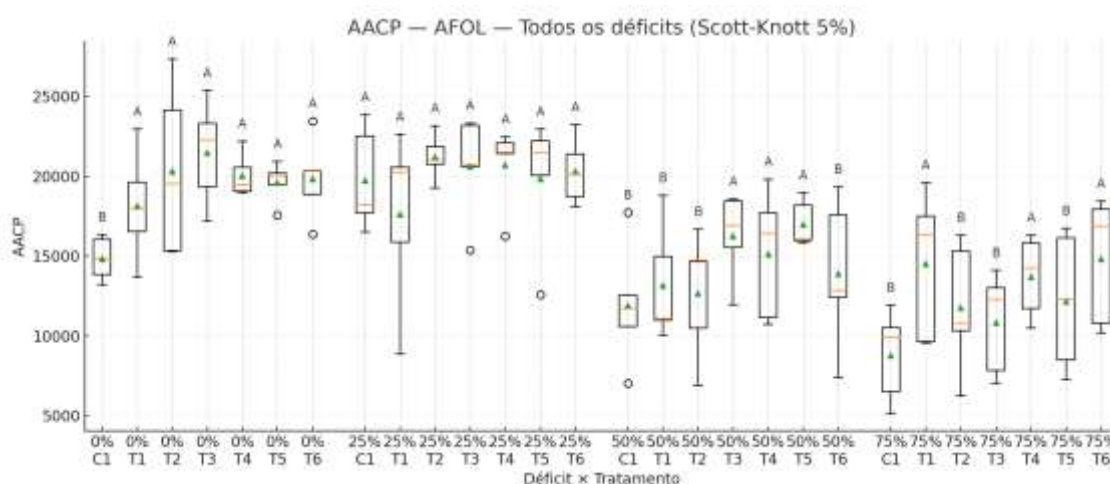
Cada box-plot representa a mediana (linha central), os quartis (caixa) e os valores extremos (bigodes) das observações em cada tratamento. As letras sobre os box-plots indicam os agrupamentos estatísticos obtidos pelo teste de Scott–Knott ($\alpha = 5\%$), sendo que tratamentos com letras diferentes dentro do mesmo déficit apresentam médias significativamente distintas. O símbolo A indica os tratamentos com as maiores médias para aquele nível de déficit hídrico.

Fonte: Elaboração própria

Para a área foliar (AFOL), a análise da AACP mostrou que em 0% de déficit os tratamentos T1 (BAC1) a T6 (BAC11) apresentaram melhor desempenho (grupo A), enquanto o controle (C1) permaneceu no grupo inferior (B). Em 25% de déficit não foram observadas diferenças entre tratamentos, todos agrupados em A. Já em 50% de déficit destacou-se o desempenho superior de T3 (BAC7), T4 (BAC9) e T5 (BAC10), que permaneceram no grupo A, em contraste com C1 (Controle), T1 (BAC1), T2 (BAC5) e T6 (BAC11), classificados em B.

Sob déficit mais severo (75%), verificou-se nova separação estatística, com T1 (BAC1), T4 (BAC9) e T6 (BAC11) no grupo A e os demais C1 (Controle), T2 (BAC1), T3 (BAC7) e T5 (BAC10) apresentando desempenho reduzido (B). Esses resultados evidenciam que a área foliar acumulada apresenta maior poder discriminatório em condições de déficit moderado e severo, destacando especialmente T1 (BAC1), T4 (BAC9) e T6 (BAC11) como tratamentos mais eficientes na preservação da área foliar sob estresse hídrico.

Figura 7. Distribuição da AACP_AFOL (Área Aérea de Crescimento de Plantas – Área Foliar Observada) por tratamento e nível de déficit hídrico, apresentada por meio de box-plots.



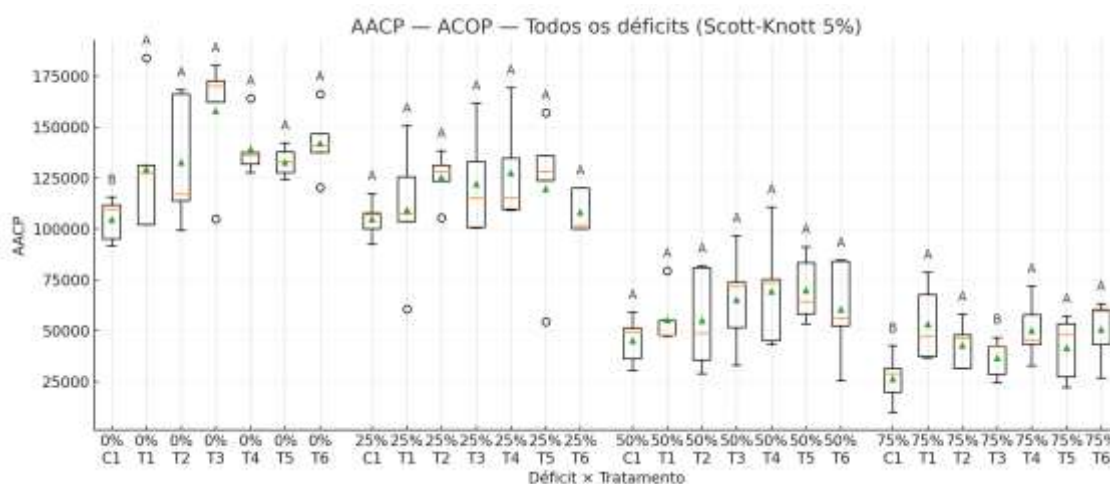
Cada box-plot mostra a mediana (linha central), os quartis (caixa) e os valores extremos (bigodes) das observações para cada tratamento. As letras acima dos box-plots indicam os grupos estatísticos formados pelo teste de Scott-Knott ($\alpha = 5\%$) dentro de cada déficit hídrico, sendo que tratamentos com letras diferentes possuem médias significativamente distintas. O símbolo A identifica os tratamentos com as maiores médias naquele nível de déficit.

Fonte: Elaboração própria

Para a área da copa (ACOP), a análise da AACP mostrou que em 0% de déficit todos os tratamentos (T1 a T6) apresentaram desempenho superior, enquanto o Controle (C1) permaneceu no grupo inferior. Em 25% e 50% de déficit não houve diferenças estatísticas, todos permanecendo no mesmo grupo.

Sob déficit mais severo (75%), apenas o Controle (C1) e T3 (BAC7) mantiveram-se no grupo inferior, demonstrando menor capacidade de preservação da área da copa, enquanto os demais tratamentos apresentaram desempenho superior.

Figura 8. Box-plots da AACP_ACOP por tratamento em cada déficit. Elementos gráficos como acima



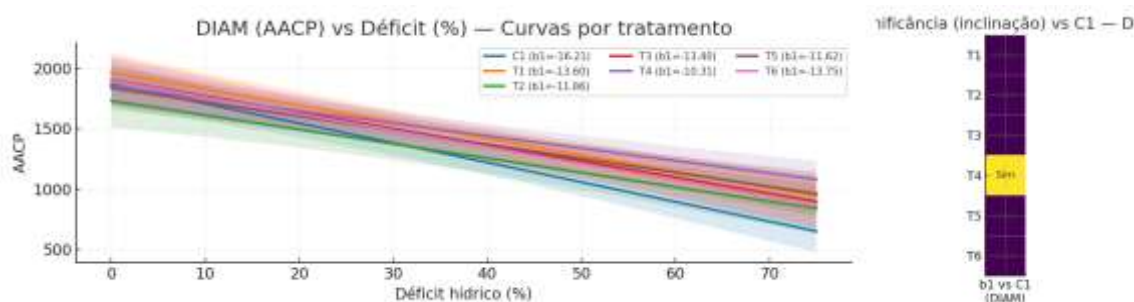
Cada box-plot mostra a mediana (linha central), os quartis (caixa) e os valores extremos (bigodes) das observações para cada tratamento. As letras acima dos box-plots indicam os grupos estatísticos formados pelo teste de Scott–Knott ($\alpha = 5\%$) dentro de cada déficit hídrico, sendo que tratamentos com letras diferentes possuem médias significativamente distintas. O símbolo A identifica os tratamentos com as maiores médias naquele nível de déficit.

Fonte: Elaboração própria

4.1.2 AACP - Comparações Significativas vs. C1 (Direção da Diferença)

Para área abaixo da curva do crescimento do diâmetro (AACP_DIMA) ao longo de 0–75%, T4 (BAC9) apresentou inclinação β_1 superior à do controle, sugerindo menor sensibilidade integrada do desempenho de DIAM ao aumento do déficit.

Figura 9. Regressões lineares entre a área abaixo da curva de progresso do diâmetro (AACP_DIAM) e o déficit hídrico (0%, 25%, 50% e 75%) em diferentes tratamentos, com comparação das inclinações em relação ao controle (C1)

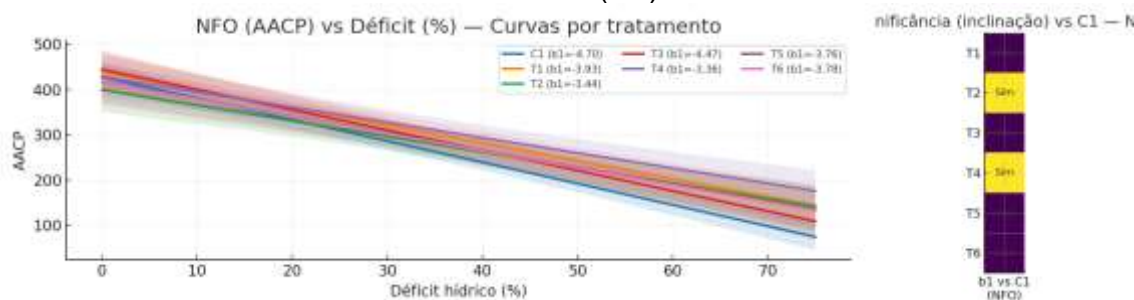


Linhas ajustadas com IC95% (sombra) e quadro “Sim/Não” para diferença de inclinação β_1 vs. C1, com decisão por IC95% de $\Delta\beta_1$.

Fonte: Elaboração própria

Já para AACP do número de folhas (AACP_NFO), T2 (BAC5) e T4 (BAC9) exibiram β_1 superiores em relação ao controle, evidenciando resposta integrada mais favorável do número de folhas ao intensificar o déficit.

Figura 10. Regressões lineares entre a área abaixo da curva de progresso do número de folha (AACP_NFO) e o déficit hídrico (0%, 25%, 50% e 75%) em diferentes tratamentos, com comparação das inclinações em relação ao controle (C1)

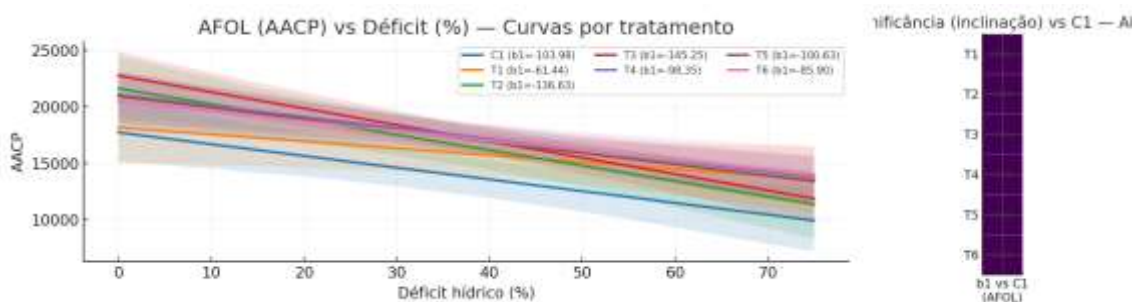


Linhas com IC95%, e quadro “Sim/Não” para $\Delta\beta_1$ vs. C1 (IC95%).

Fonte: Elaboração própria

Para AACP da área foliar (AACP_AFOL), não foram detectadas diferenças significativas de β_1 entre tratamentos e controle ao longo de 0–75%, sugerindo comportamentos integrados sem distinção de inclinação em AFOL.

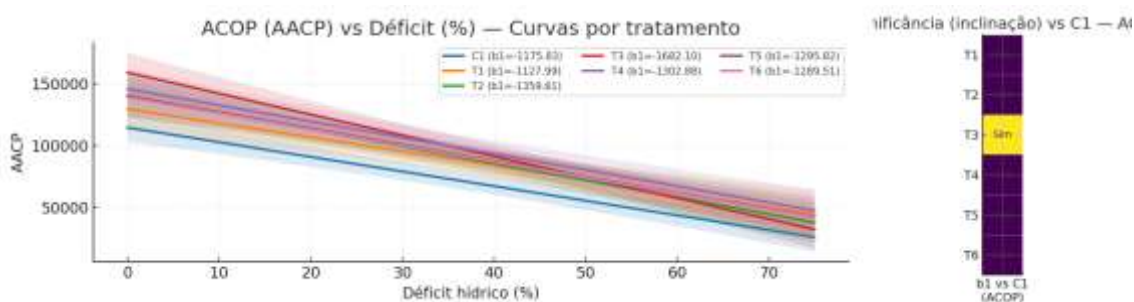
Figura 11. Regressões lineares entre a área abaixo da curva de progresso da área foliar (AACP_AFOL) e o déficit hídrico (0%, 25%, 50% e 75%) em diferentes tratamentos, com comparação das inclinações em relação ao controle (C1)



Sombreamento = IC95% e quadro "Sim/Não" para $\Delta\beta_1$ vs. C1 (IC95%).
Fonte: Elaboração própria

Já para a AACP da área estimada para a copa (AACP_ACOP), T3 (BAC7) apresentou β_1 inferior ao controle, indicando maior sensibilidade integrada do índice composto à intensificação do déficit.

Figura 12. Regressões lineares entre a área abaixo da curva de progresso da área da copa (AACP_ACOL) e o déficit hídrico (0%, 25%, 50% e 75%) em diferentes tratamentos, com comparação das inclinações em relação ao controle (C1)



Sombreamento = IC95% e quadro "Sim/Não" para $\Delta\beta_1$ vs. C1 (IC95%).
Fonte: Elaboração própria

Sendo assim, as análises indicaram efeitos dependentes do nível de déficit e do parâmetro avaliado. Nos modelos temporais (valor relativo x tempo,

por déficit), quase não houve diferenças em 0%, emergindo sinais em 25–50% e se consolidando em 50–75%.

Para área foliar (AFOL), o tratamento T3 (BAC7) apresentou inclinação inferior ao controle em 25%, ao passo que T5 (BAC10) foi superior em 50%. Já em condições mais severas, correspondentes a 75% de déficit, os tratamentos T1 (BAC1), T4 (BAC9) e T6 (BAC11) exibiram inclinações superiores, sugerindo maior robustez sob estresse acentuado. Para o diâmetro (DIAM), observou-se que, em 25%, T4 (BAC9) e T5 (BAC10) apresentaram desempenho inferior ao controle; em 50%, T5 (BAC10) se destacou positivamente; e em 75%, T1 (BAC1), T4 (BAC9) e T6 (BAC11) revelaram superioridade.

Em relação ao número de folhas (NFO), diferenças significativas ocorreram em 50%, quando T4 (BAC9) e T5 (BAC10) apresentaram resultados superiores, enquanto nos demais níveis de déficit não se verificaram diferenças expressivas. Para área de copa (ACOP) e índice de cobertura (ICA), T5 (BAC10) demonstrou superioridade em 50%, não havendo diferenças relevantes nos demais níveis de déficit.

Nas regressões envolvendo a área acumulada de crescimento no período (AACP) em função do déficit (0–75%), as quais capturam a sensibilidade integrada das plantas ao aumento da restrição hídrica, observou-se que, para o diâmetro (DIAM), T4 (BAC9) apresentou inclinação superior ao controle, indicando menor sensibilidade. No número de folhas (NFO), os tratamentos T2 (BAC5) e T4 (BAC9) apresentaram inclinações superiores, enquanto para área foliar (AFOL) não foram detectadas diferenças significativas em relação ao controle. Em contrapartida, para ACOP/ICA, T3 (BAC7) apresentou inclinação inferior, o que sugere maior sensibilidade integrada ao déficit.

Os box-plots de AACP com Scott–Knott ($\alpha=5\%$) corroboraram que, dentro de cada déficit, há tratamentos em grupos superiores (letra A) para determinados parâmetros e níveis de estresse, enquanto em outros cenários há empates (mesmas letras) ou separações claras (letras distintas). Em conjunto, os resultados apontam T4 (BAC9) e T5 (BAC10) como candidatos consistentes (com vantagens temporais e/ou integradas), T2 (BAC5) com bom desempenho para NFO no gradiente de déficit e T1 (BAC1) e T6 (BAC11) com robustez temporal em 75% para AFOL/DIAM. O T3 (BAC7) apresentou alertas: piora temporal em AFOL (25%) e inclinação integrada inferior em ACOP.

Os resultados indicaram que os efeitos da microbiolização dependeram tanto da intensidade do déficit hídrico quanto do parâmetro de crescimento avaliado. O tratamento T4 (BAC9) emergiu como o isolado mais consistente, apresentando vantagens integradas, manifestadas por inclinações β_1 superiores na AACP de DIAM e NFO, sugerem uma menor sensibilidade geral ao estresse hídrico. Além disso, os desempenhos temporais favoráveis em 75% de déficit (para AFOL e DIAM) reforçam sua capacidade de manutenção do crescimento mesmo sob condições de restrição hídrica severa. Isso indica que BAC9 pode auxiliar a planta a sustentar suas estruturas vitais e sua capacidade fotossintética em cenários de alta escassez hídrica.

Outro isolado de destaque foi o T5 (BAC10) que demonstrou ganhos temporais consistentes em 50% de déficit (para AFOL, DIAM, NFO e ACOP). Essa observação sugere que este isolado confere resiliência e aprimora a resposta das plantas em um estágio moderado de estresse hídrico, potencialmente mediando mecanismos que permitem à planta superar um ponto crítico de restrição.

Em estresse severo, os isolados T1 (BAC1) e T6 (BAC11) mostraram-se relevantes pela manutenção de diâmetro e área foliar, características essenciais para a resiliência estrutural. O T2 (BAC5) apresentou efeito localizado na emissão foliar (NFO), contribuindo para a manutenção do dossel, embora sem ganhos consistentes nos demais parâmetros. Já o T3 (BAC7) mostrou limitações, com indícios de piora em área foliar e área de copa, recomendando cautela em sua aplicação.

Em termos biológicos, os padrões observados são coerentes com mecanismos atribuídos à microbiolização por isolados bacterianos, como a

modulação hormonal, o ajuste osmótico, a melhoria na exploração hídrica e a otimização do estado nutricional. Essas ações combinadas podem amortecer a queda do crescimento e do funcionamento vegetal sob estresse.

4.2 Análise fisiológica das plantas em função do regime hídrico

Referente à análise fisiológica realizada, pôde-se constatar variações nos parâmetros analisados, apresentadas na Tabela 4, que sumariza as estatísticas gerais das plantas submetidas aos diferentes níveis de estresse hídrico (100%, 75%, 50% e 25%).

Tabela 4. Resumo descritivo das variáveis analisadas

Variável	N	Omisso	Média	Mediana	Desvio-Padrão	Mínimo	Máximo
ÍNDICE CLOROFILA A	22	72	36.8	38.45	5.75	15.7	42.9
ÍNDICE CLOROFILA B	22	72	16.9	17.15	4.75	4.3	23.8
C ESTOMÁTICA	22	72	40.7	41.4	12.9	23	72.2
TEMPERATURA	22	72	35.1	35.25	11.2	33	36.5

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados fisiológicos obtidos demonstram variações relevantes entre os parâmetros analisados. O índice de clorofila A apresentou média de 36,8, com valores variando de 15,7 a 42,9, indicando boa atividade fotossintética nas plantas avaliadas, apesar das condições de estresse hídrico impostas. A mediana (38,5) próxima à média sugere distribuição relativamente simétrica dos dados. O desvio-padrão (5,75) revela uma variabilidade moderada entre os tratamentos, o que pode estar relacionado às respostas diferenciais dos isolados bacterianos.

O índice de clorofila B teve média inferior (16,9), com menor amplitude de variação (4,3 a 23,8) e desvio-padrão de 4,75. Isso é esperado, já que a clorofila B geralmente ocorre em menor concentração e atua de forma complementar à clorofila A na captação de luz. A manutenção desses níveis, mesmo sob estresse, indica que as plantas conseguiram conservar parcialmente sua funcionalidade fotossintética.

A condutância estomática, com média de 40,7 e amplitude de 23,0 a 72,2, apresentou o maior desvio-padrão entre os parâmetros (12,9), evidenciando ampla variação nas respostas entre os tratamentos. A elevada condutância em algumas plantas indica que certos isolados bacterianos podem ter contribuído para a manutenção da abertura estomática, favorecendo trocas gasosas mesmo sob estresse. Esse comportamento é crucial para a manutenção da taxa de fotossíntese e do equilíbrio hídrico em condições adversas. Os índices de condutância estomática também variaram a depender do nível de estresse, tendendo a reduzir com o aumento da temperatura e em função da baixa disponibilidade de água no solo (SANTANA JUNIOR, 2015).

A temperatura foliar manteve-se relativamente constante, com média de 35,1 °C e pequena variação entre os extremos (33,0 a 36,5 °C). Esses valores indicam que as plantas não apresentaram elevação térmica crítica, sugerindo uma boa capacidade de regulação térmica, possivelmente favorecida pela atividade dos isolados bacterianos mesmo sob condições de estresse hídrico.

4.3 Desenvolvimento radicular das plantas em função do regime hídrico

A análise estatística da avaliação radicular observou-se que o fator nível de estresse hídrico exerceu influência predominante e altamente significativa ($p < 0,01$) sobre todas as variáveis de crescimento analisadas (Tabela 1). Em contraste, os tratamentos bacterianos mostraram-se menos impactantes, apresentando efeito significativo apenas para a biomassa fresca da parte aérea. Em nenhum dos casos a interação entre nível de estresse hídrico e tratamento bacteriano foi significativa, indicando que o efeito da inoculação não dependeu do regime hídrico imposto.

Tabela 5. Análise de variância para variáveis radiculares e aéreas de mudas de bananeira submetidas a diferentes níveis de estresse hídrico e tratamentos bacterianos.

Variável	Níveis de estresse	Tratamentos bacterianos	Interação (Níveis × Tratamentos)
Comprimento de raiz	$p < 0,01$	Ns	Ns
Volume de raiz	$p < 0,01$	Ns	Ns

Biomassa radicular fresca	p < 0,01	Ns	Ns
Biomassa radicular seca	p < 0,01	Ns	Ns
Biomassa aérea fresca	p < 0,01	p < 0,01	Ns
Biomassa aérea seca	p < 0,01	Ns	Ns

Valores de *p* indicam a significância estatística dos efeitos principais e da interação. ns = não significativo.

Fonte: Elaboração própria

Para o comprimento de raiz, a análise de variância revelou efeito altamente significativo dos níveis de estresse hídrico ($p = 0,002$), enquanto os tratamentos bacterianos e a interação entre os fatores não foram significativos. A comparação de médias pelo teste de Scott-Knott agrupou os níveis de estresse hídrico em dois grupos: 100% (33,00 cm), 75% (33,06 cm) e 50% (37,38 cm), estatisticamente iguais e superiores (grupo "a"), e 25% (17,36 cm), que formou isoladamente o grupo "b". Essa evidência ressalta que a restrição hídrica severa (25% da CC) foi um fator limitante crítico para a expansão do sistema radicular, inibindo significativamente o alongamento das raízes. Embora em algumas espécies seja comum observar maior alocação de biomassa nas raízes sob estresse hídrico, neste estudo a limitação severa reduziu o potencial de crescimento como um todo, restringindo tanto a parte aérea quanto a subterrânea, fenômeno também descrito por Taiz *et al.* (2017).

Padrão semelhante foi verificado para o volume de raiz, com efeito muito significativo apenas para os níveis de estresse ($p < 0,001$). O teste de Scott-Knott formou três grupos: 100% (60,10 cm³) e 75% (56,81 cm³), agrupados em "a"; 50% (40,17 cm³), em "b"; e 25% (18,67 cm³), em "c". A redução progressiva do volume radicular com a diminuição da lâmina d'água aplicada confirma que a disponibilidade de água é determinante não apenas para o comprimento, mas também para o acúmulo de biomassa radicular. Resultados semelhantes foram relatados por Amorim *et al.* (2019), que observaram reduções expressivas no crescimento radicular de bananeiras sob déficit moderado a severo.

A análise da biomassa fresca de raiz reforçou essa tendência, com efeito extremamente significativo dos níveis de estresse ($p < 0,001$). As médias se agruparam em três classes: 100% (80,20 g) e 75% (72,88 g) no grupo "a"; 50% (56,44 g) no grupo "b"; e 25% (26,27 g) no grupo "c". Tal achado confirma que a restrição hídrica comprometeu severamente a produção de biomassa radicular,

com decréscimo superior a 60% no nível de 25%. A produção de biomassa está diretamente ligada ao status hídrico da planta, já que a turgescência celular é fundamental para crescimento e expansão dos tecidos (Silva *et al.*, 2020).

No caso da biomassa seca de raiz, observou-se que os níveis de 100% (10,249 g), 75% (9,982 g) e 50% (9,973 g) não diferiram entre si, compondo o grupo "a", enquanto 25% (7,421 g) foi significativamente inferior, formando o grupo "b". Este resultado sugere que, para a biomassa seca radicular, o nível de 50% foi tão eficiente quanto a irrigação plena (100%) no acúmulo de matéria orgânica, demonstrando uma notável eficiência na alocação de recursos sob disponibilidade moderada de água.

A análise da biomassa fresca da parte aérea apresentou resultados distintos, com ambos os fatores principais, nível de estresse hídrico e tratamento bacteriano, mostrando efeitos altamente significativos ($p < 0,001$). Para o fator nível de estresse, o teste de Scott-Knott separou as médias em quatro grupos: 100% (148,74 g), "a"; 75% (125,17 g), "b"; 50% (78,45 g), "c"; e 25% (35,88 g), "d".

Tabela 6. Médias por tratamento e letras de agrupamento para as variáveis com efeito significativo de tratamento

Tratamento	Média (Biomassa Aérea PF)	Grupo
BAC05	130,0	A
BAC07	126,5	A
BAC11	121,8	A
BAC09	117,5	B
BAC10	113,9	B
BAC01	112,1	B
Controle	102,6	B

Fonte: Elaboração própria

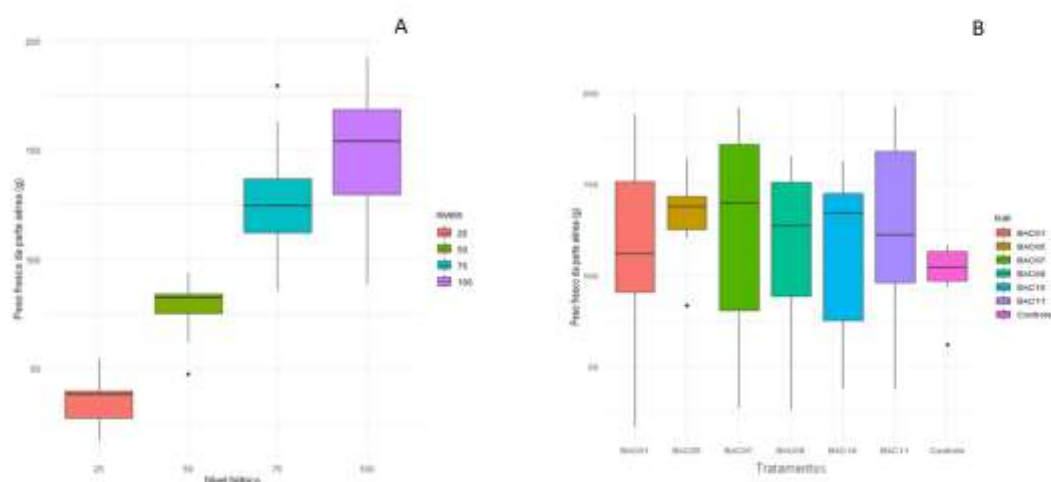
Para os tratamentos bacterianos, destacou-se um grupo de maior desempenho formado por BAC05 (130,0 g), BAC07 (126,5 g) e BAC11 (121,8 g), e outro de desempenho inferior, composto por BAC09 (117,5 g), BAC10 (113,9 g), BAC01 (112,1 g) e o controle não inoculado (102,6 g).

Na Figura 13A, observa-se claramente um gradiente decrescente da biomassa fresca da parte aérea à medida que se intensifica o estresse hídrico. As plantas mantidas a 100% da capacidade de campo apresentaram valores superiores, com mediana próxima a 150 g, enquanto aquelas sob 25% de

irrigação apresentaram reduções drásticas, com valores médios inferiores a 40 g. Esse padrão gráfico evidencia a forte dependência da bananeira pela disponibilidade hídrica, refletida no crescimento vegetativo. Além disso, nota-se que a dispersão dos dados é maior nos níveis intermediários (75% e 100%), sugerindo que, embora a irrigação adequada favoreça o crescimento, há variação entre as respostas individuais das mudas.

Na Figura 13B, fica evidente a diferenciação entre os tratamentos bacterianos. As cepas BAC05, BAC07 e BAC11 apresentam caixas deslocadas para valores mais altos, com medianas acima de 120 g, evidenciando maior promoção do crescimento aéreo. Já os tratamentos BAC01, BAC09, BAC10 e o controle concentram-se em valores mais baixos, próximos ou abaixo de 115 g, reforçando a análise estatística que os agrupou em um mesmo grupo inferior. A presença de outliers, sobretudo no controle e em BAC10, sugere que alguns indivíduos isolados conseguiram desempenho acima da média, mas de modo inconsistente.

Figura 13. Biomassa fresca da parte aérea de bananeiras



Biomassa fresca aérea submetidas a diferentes níveis hídricos (A) e a distintos tratamentos bacterianos (B). As caixas representam a variação dos dados (quartis), a linha central indica a mediana e os pontos representam valores discrepantes (outliers)

Fonte: Elaboração própria

Esse efeito é crucial, pois demonstra que algumas cepas bacterianas promoveram crescimento significativo da parte aérea, superando o controle. Esse resultado pode estar associado à síntese de fitormônios como auxinas, ao aumento da absorção de nutrientes ou à indução de mecanismos fisiológicos relacionados à maior turgescência celular (Bashan & de-Bashan, 2010).

Por outro lado, a biomassa seca da parte aérea foi significativamente influenciada apenas pelos níveis de estresse ($p < 0,001$), sem efeito dos tratamentos bacterianos. Os grupos formados foram: 100% (21,428 g) e 75% (19,403 g) em "a"; 50% (14,263 g) em "b"; e 25% (9,887 g) em "c".

A discrepância entre os resultados de biomassa fresca e seca da parte aérea sugere que os ganhos promovidos pelas cepas BAC05, BAC07 e BAC11 podem estar relacionados a um maior acúmulo de água nos tecidos, refletindo em incremento de biomassa fresca, mas não necessariamente em aumento consolidado de matéria seca.

Ao integrar os resultados obtidos para as variáveis radiculares e da parte aérea, torna-se evidente que o regime hídrico foi o fator determinante para o crescimento das mudas de bananeira cv. Grand Naine. Tanto comprimento, volume e biomassa de raiz quanto biomassa aérea foram diretamente influenciados pela disponibilidade hídrica, com reduções progressivas em condições de déficit e maior desenvolvimento sob irrigação plena. Essa tendência reforça a premissa de que a bananeira é uma cultura altamente sensível ao estresse hídrico, necessitando de condições adequadas de suprimento de água para expressar seu potencial de crescimento (Amorim *et al.*, 2019).

A resposta semelhante entre raízes e parte aérea indica que a restrição hídrica afetou o metabolismo global da planta, limitando tanto a capacidade de absorção de água e nutrientes quanto a fotossíntese e o acúmulo de biomassa. O decréscimo expressivo no nível de 25% confirma que a deficiência severa de água comprometeu irreversivelmente a turgescência celular e a expansão dos

tecidos, resultando em menor produção de massa fresca e seca. Em contrapartida, os níveis intermediários (50% e 75%) mostraram-se capazes de sustentar parte do crescimento, sugerindo que a bananeira pode apresentar alguma plasticidade fisiológica sob déficit moderado, ajustando sua alocação de recursos para manter o desenvolvimento radicular e aéreo em equilíbrio.

Os resultados aqui obtidos estão de acordo com o que é amplamente relatado na literatura sobre a alta sensibilidade da bananeira ao estresse hídrico. A redução acentuada no crescimento radicular e na biomassa aérea em condições de lâmina de 25% confirma que a cultura depende de elevado suprimento hídrico para manter sua capacidade fotossintética e produtiva. De acordo com Robinson e Galán Saúco (2010), o consumo de água da bananeira pode ultrapassar 1.500 mm anuais, refletindo sua natureza de espécie mesofítica com metabolismo altamente dependente de disponibilidade hídrica contínua.

Em síntese, verificou-se que a disponibilidade hídrica foi o fator determinante para o crescimento das mudas de bananeira, com a restrição severa (25% da lâmina) resultando em reduções expressivas no desenvolvimento radicular e aéreo. A inoculação com cepas bacterianas apresentou efeito limitado, mas BAC05, BAC07 e BAC11 se destacaram por promover incremento na biomassa fresca da parte aérea, evidenciando potencial biotecnológico. A ausência de interação entre os fatores indica que a ação dessas bactérias ocorreu de forma independente do regime hídrico, reforçando a necessidade de estudos em condições de campo para validar seu uso na promoção do crescimento e mitigação do estresse hídrico.

4.4 Resultados complementares do experimento in vitro

A análise de variância (ANOVA), realizada com os dados transformados em logaritmo para atender à pressuposição de normalidade (p -valor = 0,9186), indicou que os tratamentos com diferentes isolados bacterianos (BAC01, BAC09 e BAC7) não apresentaram efeito significativo sobre o crescimento das colônias ($p = 0,357$), enquanto o fator temperatura teve efeito altamente significativo ($p < 0,0001$) (Tabela ANOVA). O teste de homogeneidade de variâncias de Levene ($p = 0,2115$) confirmou a adequação dos dados para a ANOVA.

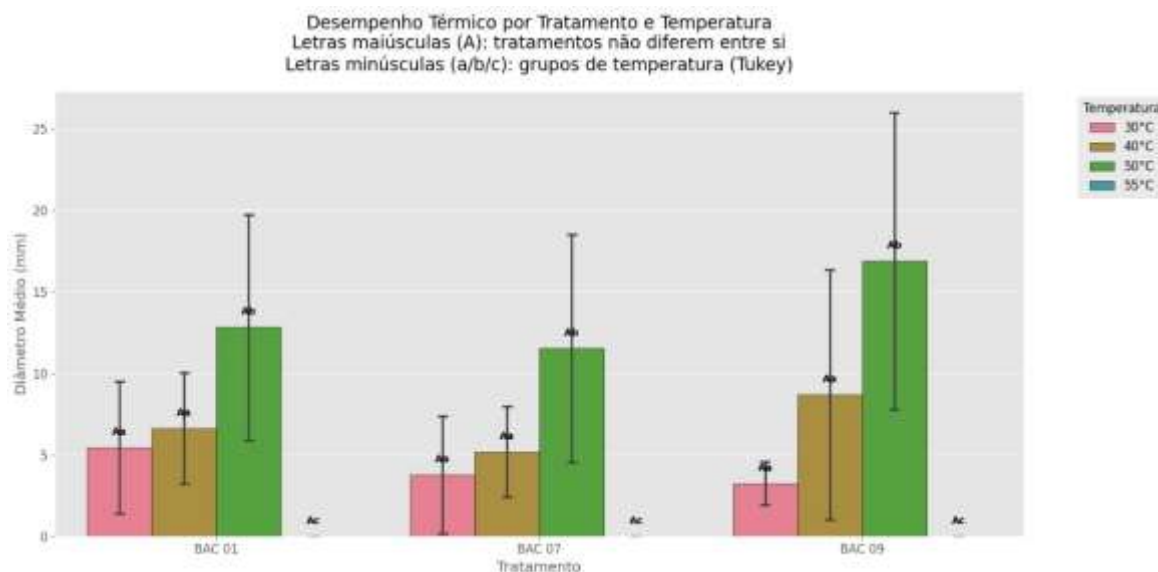
Tabela 7. Resultados da análise de variância (ANOVA) para o diâmetro das colônias bacterianas

Fonte de variação	Soma dos Quadrados (SS)	Graus de Liberdade (GL)	F	Valor de p (p > F)
Tratamento (TRAT)	0,148532	2	1,041049	0,3573
Temperatura	14,221147	3	66,449747	9,566941e-23 (p < 0,001)
Resíduo	6,420407	90	–	–
Total	–	95		

Fonte: Elaboração própria

No teste de comparações múltiplas de Tukey, os tratamentos bacterianos não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si ($p\text{-adj} > 0,97$), reforçando que os isolados apresentam comportamento semelhante sob as condições testadas. Em contrapartida, o fator temperatura apresentou diferenças estatísticas altamente significativas. A temperatura de 55 °C foi distintamente inferior a todas as demais, com a maior diferença observada entre 50 °C e 55 °C (meandiff = -4,0645; $p < 0,0001$), indicando forte inibição do crescimento bacteriano (Gráfico 11). As temperaturas de 30 °C e 40 °C apresentaram crescimento moderado, enquanto a 50 °C foi observado o maior diâmetro médio das colônias, especialmente no isolado BAC09. Apenas a comparação entre 30 °C e 40 °C não foi estatisticamente significativa ($p = 0,0625$), embora tenha havido tendência de aumento no crescimento.

Figura 14. Médias do diâmetro das colônias bacterianas dos isolados BAC01, BAC09 e BAC7 sob diferentes temperaturas (30, 40, 50 e 55 °C)



Letras maiúsculas (A) comparam tratamentos (sem diferenças); minúsculas (a, b, c) comparam temperaturas (letras diferentes = diferenças significativas)

Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 11 mostra as médias do diâmetro das colônias, com os respectivos erros-padrão, permitindo visualizar a interação entre os isolados e as temperaturas. As letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas entre as temperaturas para cada isolado, enquanto as letras maiúsculas comparam os tratamentos, que não apresentaram diferenças significativas entre si.

Para melhor visualização dos dados apresentados no gráfico, a Tabela 8 resume as médias de diâmetro das colônias e os respectivos desvios-padrão para cada tratamento em função da temperatura. Nota-se que a maior média foi observada no isolado BAC09 a 50 °C ($17,1 \pm 7,5$ mm), enquanto em 55 °C o crescimento foi completamente inibido para todos os isolados.

Tabela 8. Médias e desvios-padrão do diâmetro das colônias bacterianas sob diferentes temperaturas

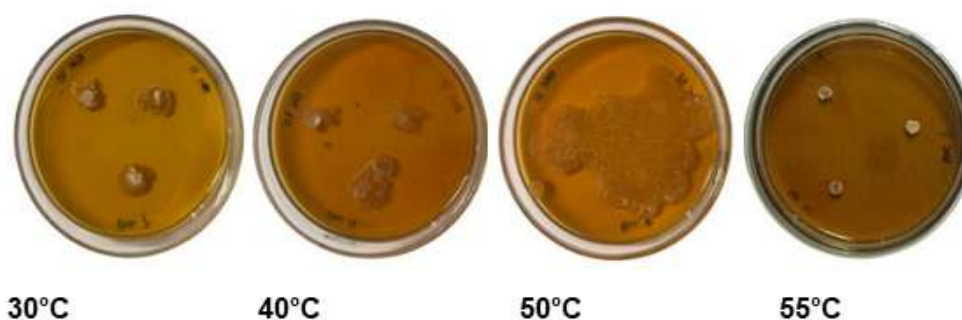
Tratamento	30 °C (± DP)	40 °C (± DP)	50 °C (± DP)	55 °C (± DP)
BAC01	5,4 ± 3,9	6,8 ± 3,6	12,8 ± 6,7	0,0 ± 0,0
BAC09	3,6 ± 1,1	8,7 ± 4,3	17,1 ± 7,5	0,0 ± 0,0
BAC07	3,8 ± 2,4	5,4 ± 2,5	11,5 ± 6,5	0,0 ± 0,0

Médias expressas em milímetros (mm), acompanhadas dos respectivos desvios-padrão (DP). A temperatura de 55 °C resultou em crescimento nulo dos isolados. As maiores médias foram observadas a 50 °C, com destaque para o isolado BAC09.

Fonte: Elaboração própria

A Figura 8 apresenta registros fotográficos das colônias bacterianas sob diferentes temperaturas, evidenciando visualmente a ausência de crescimento a 55 °C, e crescimento expressivo até 50°C.

Figura 15. Crescimento in vitro dos isolados bacterianos BAC09, BAC01 e BAC07 sob diferentes temperaturas (30, 40, 50 e 55 °C)



Fonte: Acervo da autora

Esses resultados indicam que a temperatura é um fator limitante para o crescimento bacteriano, sendo 50 °C um limite de tolerância e 55 °C um ponto de supressão quase total. A ausência de diferenças entre os isolados pode estar relacionada a perfis metabólicos semelhantes ou à curta exposição às condições de estresse térmico. Embora a análise estatística do crescimento in vitro não tenha indicado diferenças significativas entre os isolados bacterianos ($p = 0,357$), observou-se que o isolado BAC09 apresentou a maior média de diâmetro das colônias, especialmente sob a temperatura limite de 50 °C, sugerindo uma maior tolerância térmica. Essa característica pode estar associada à sua melhor adaptação às condições de estresse térmico. Portanto, a combinação dos dados in vitro e em casa de vegetação reforça o potencial do isolado BAC09 como agente promotor de aumento da tolerância ao estresse em bananeiras.

De fato, a literatura aponta que a temperatura exerce papel fundamental no crescimento bacteriano, influenciando a taxa metabólica e a viabilidade das

colônias, com temperaturas próximas ao limite térmico superior inibindo ou mesmo eliminando o crescimento microbiano, enquanto faixas ótimas promovem o desenvolvimento ideal das bactérias (Madigan *et al.*, 2018).

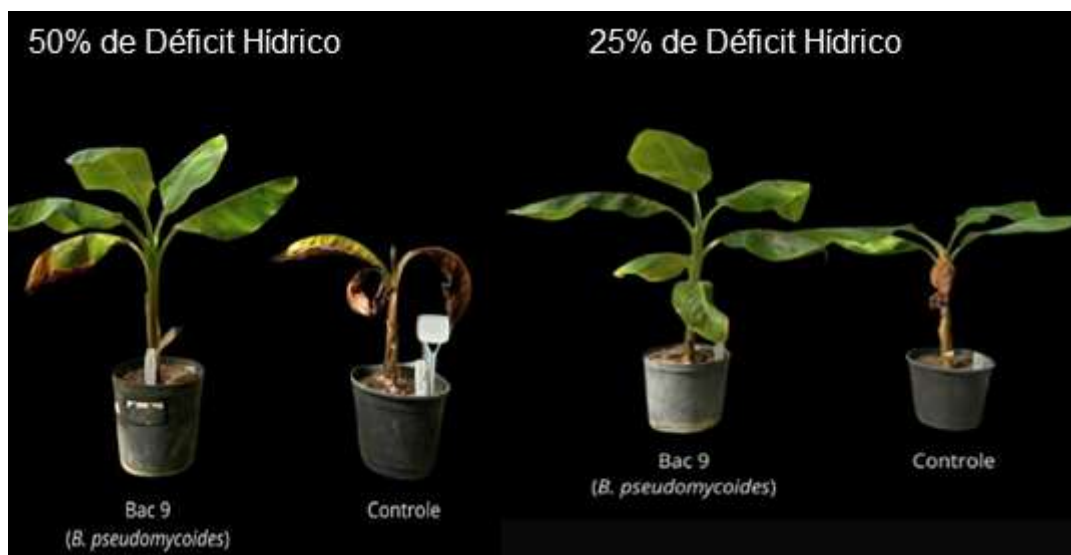
Considerando o conjunto dos aspectos avaliados neste estudo (morfológicos, de crescimento, fisiológicos e radiculares), foi possível identificar padrões consistentes que diferenciam o desempenho dos isolados bacterianos frente ao estresse hídrico. De modo geral, alguns isolados mostraram respostas mais específicas a determinados níveis de restrição, enquanto outros evidenciaram maior estabilidade em diferentes cenários. Nesse contexto, o isolado BAC09 (*B. pseudomycooides*) destacou-se como o candidato mais consistente, com efeitos positivos tanto em variáveis de crescimento (diâmetro, área foliar e número de folhas) quanto na análise da AACP e na manutenção de estruturas radiculares funcionais. Seus resultados foram particularmente relevantes sob estresse moderado (50%), mas também se mantiveram evidentes em níveis severos (75%), sugerindo uma capacidade integrada de mitigar os impactos da restrição hídrica.

Outros isolados também apresentaram desempenhos de destaque em contextos específicos. O BAC10 evidenciou ganhos expressivos sob estresse moderado (50%), especialmente pela manutenção multivariada do crescimento da parte aérea, indicando resiliência em fases críticas de restrição. Já os isolados BAC01 e BAC11 revelaram maior robustez em cenários severos (75%), auxiliando na preservação da área foliar e da estrutura do pseudocaule, características essenciais para a sobrevivência em condições extremas. O BAC05, por sua vez, demonstrou contribuição notável na preservação do dossel foliar ao longo do gradiente de déficit, garantindo a manutenção do número de folhas funcionais. Em contraste, o BAC07 apresentou padrões menos favoráveis, com indícios de limitação em determinadas variáveis, o que sugere necessidade de cautela em sua recomendação.

A Figura 16 ilustra de forma clara os efeitos benéficos do BAC09 em plantas de bananeira submetidas a estresse hídrico, comparadas ao grupo controle. Aos 50% de disponibilidade hídrica, observa-se que a planta inoculada mantém coloração verde intensa, estrutura foliar preservada e sinais mínimos de senescência, em contraste com o controle, que apresenta folhas necrosadas, enroladas e evidente colapso fisiológico. Esse padrão se intensifica aos 25% de

déficit, onde a planta tratada com BAC09 mantém vigor vegetativo, maior número de folhas funcionais e pseudocaule firme, enquanto a planta controle evidencia murcha acentuada, redução de porte e severo comprometimento estrutural.

Figura 16. BAC09 em diferentes níveis de estresse, se comparado ao grupo de controle



Fonte: Acervo da autora

Essas evidências visuais reforçam a análise quantitativa e sugerem que o desempenho superior do BAC09 pode estar associado, em parte, à sua capacidade de produzir AIA (ácido indolacético), favorecendo o crescimento radicular, ampliando a absorção de água e contribuindo para a manutenção da atividade fotossintética em condições adversas. Embora outros isolados tenham revelado relevância em cenários específicos, os resultados obtidos com o BAC09 indicam que este isolado apresenta maior versatilidade e estabilidade em diferentes níveis de déficit, configurando-se como o candidato mais promissor para mitigar os efeitos do estresse hídrico em bananeiras.

Entre as limitações deste estudo, destaca-se o uso de modelos lineares, tanto para o fator tempo quanto para o gradiente de déficit hídrico. Embora tais modelos tenham se mostrado úteis para a interpretação dos dados, eles simplificam a complexa dinâmica do crescimento vegetal e podem não captar adequadamente padrões não lineares, como limiares de resposta ou pontos de saturação. Outro aspecto a ser considerado refere-se ao tamanho amostral

disponível em cada célula experimental, o qual influencia diretamente a precisão das estimativas e a amplitude dos intervalos de confiança.

Diante disso, recomenda-se que investigações futuras explorem a aplicação de modelos não lineares ou segmentados, capazes de refletir de forma mais realista as respostas das plantas ao estresse hídrico. Além disso, a incorporação de marcadores fisiológicos mais detalhados, como variáveis relacionadas às trocas gasosas e ao potencial hídrico foliar, poderá ampliar a compreensão dos mecanismos subjacentes à microbiolização. Finalmente, torna-se imprescindível a validação desses resultados em condições de campo, etapa fundamental para consolidar as recomendações dos isolados bacterianos e viabilizar a translação do conhecimento gerado em ambiente controlado para aplicações efetivas no contexto agrônomo.

5 CONCLUSÃO

Os níveis de estresse hídrico foram o fator predominante, influenciando significativamente o desempenho das plantas. Entre os isolados bacterianos, o BAC09 destacou-se como o mais eficaz na mitigação do estresse e promoção do crescimento em diferentes intensidades de déficit hídrico, enquanto o BAC10 apresentou desempenho notável sob déficit moderado (50% da lâmina) e o BAC01 mostrou melhor desempenho sob estresse severo, correspondendo a um suprimento de apenas 25% da lâmina de irrigação. O BAC07 apresentou resultados próximos ao controle. O experimento *in vitro* reforçou a robustez de BAC09 e BAC01, evidenciando tolerância térmica até 50 °C, o que fortalece seu potencial como bioinoculantes promissores.

REFERÊNCIAS

ABREU, F. A. *et al.* Adoção de bioinsumos e práticas agrícolas sustentáveis: impactos sobre emissões de gases de efeito estufa. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, n. 3, p. 1-12, 2021.

ALMEIDA, R. F.; RIBEIRO, J. S. Modulação gênica e defesa antioxidante em plantas inoculadas com microrganismos promotores de crescimento sob

estresse hídrico. **Revista Brasileira de Biotecnologia**, v. 18, n. 2, p. 45-56, 2021.

ALVES, E. J.; OLIVEIRA, A. M. G.; SOUZA, M. E. Nutrição e manejo do solo na bananicultura. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 39, n. 6, p. 1–13, 2017.

AMORIM, L. F. *et al.* Manejo da irrigação e crescimento da bananeira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 43, n. 2, p. 1-12, 2021.

ANANDHAM, R. *et al.* Thiosulfate oxidation and rhizosphere competence of rhizospheric bacteria. **Journal of Basic Microbiology**, Berlin, v. 47, n. 3, p. 245-251, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/jobm.200610237>.

ANTUNES, G. dos R. *et al.* **Caracterização bioquímica de bactérias isoladas de Coroa de Frade (*Melocactus* sp.) no Semiárido Pernambucano.** Embrapa, 2017.

ANTUNES, G. dos R. *et al.* Produção de fitormônios por rizobactérias promotoras de crescimento de plantas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 3, p. 570–577, 2017.
Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/11962>. Acesso em: 2 jul. 2025.

ARAÚJO, F. F.; LIMA, A. S.; SILVA, G. F. Endemic microorganisms as bioinoculants for semi-arid agriculture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, e0220068, 2022.

BEHERA, B. C. *et al.* Diversity, mechanism and biotechnology of phosphate solubilising microorganism in mangrove – A review. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 3, n. 2, p. 97-110, 2014.

BERG, G. Plant–microbe interactions promoting plant growth and health: perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 84, n. 1, p. 11-18, 2009.

BLUM, A. Plant breeding for water-limited environments. **Springer Science & Business Media**, 2011.

BOGATI, K.; WALCZAK, M. **The Impact of Drought Stress on Soil Microbial Community, Enzyme Activities and Plants.** 2024. Disponível em: <https://www.exampleurl.com>. Acesso em: 12 jan. 2025.

BUAINAIN, A. M.; GARCIA, J. R. Desenvolvimento rural do semiárido brasileiro: transformações recentes, desafios e perspectivas. **Confins**, v. 19, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4000/confins.8633>. Acesso em: 28 fev. 2024.

CAMPOS, A. J. de M.; SANTOS, S. M.; NACARATH, I. R. F. F. Estresse hídrico em plantas: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, e3111101523155, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23155>.

- CHAVES, M. M. *et al.* How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth. **Annals of Botany**, v. 89, n. 7, p. 907-916, 2009.
- CHIEB, A.; GACHOMO, E. W. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): A sustainable solution for enhancing drought tolerance in crops. **Plants**, v. 12, n. 3, p. 567-580, 2023. doi:10.3390/plants12030567.
- COSTA, F. S.; SOUZA, J. L.; MELO, R. F.; SILVA, J. A. Irrigação localizada e eficiência no uso da água em fruteiras tropicais. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 2, p. 3871-3882, 2020. doi:10.7127/rbai.v14n2001224.
- COSTA, L. F.; PEREIRA, J. C. F. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant tolerance to drought. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 43, n. 1, p. 234-241, 2020.
- COSTA, M. L.; PEREIRA, A. R. Papel dos fungos micorrízicos arbusculares na tolerância de plantas ao estresse por seca. **Ciência Agrônômica**, v. 51, n. 3, p. 530-540, 2020.
- COSTA, R. A.; OLIVEIRA, M. A. Bioinsumos: panorama, desafios e perspectivas no Brasil. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 18, n. 2, p. 45-60, 2023.
- COSTA, R. R.; PEREIRA, J. R. Respostas fisiológicas e moleculares de plantas micorrizadas ao estresse hídrico. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 18, n. 4, p. 45-60, 2020.
- COSTA, S.; PEREIRA, L. Efeito de fungos micorrízicos arbusculares na absorção de água e nutrientes em plantas sob estresse hídrico. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 18, n. 1, p. 22-34, 2020.
- COSTA, T. S. *et al.* Proteômica aplicada ao estresse hídrico em bananeira: identificação de proteínas de defesa e metabolismo secundário. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 180, p. 345-356, 2023.
- CRUZ, J. L. *et al.* Estimativa da área foliar de bananeira a partir de medidas lineares de folhas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 21, n. 2, p. 153-156, 1999.
- DANTAS, J. L. L.; FILHO, F. R. F. Recursos genéticos e melhoramento da bananeira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 22, n. 1, p. 16-27, 2000. doi:10.1590/S0100-29452000000100005.
- DENG, J. *et al.* (2015). Roles of exopolysaccharides in the tolerance of plants to drought stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, 89, 101-110.
- DENG, J. *et al.* Synergistic effects of soil microstructure and bacterial EPS on drying rate in emulated soil micromodels. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 83, p. 116-124, 2015. Disponível em:

https://gage.mcb.uconn.edu/downloads/2015_deng_soil-biology-.pdf. Acesso em: 15 jun. 2025.

DÍAZ-RODRÍGUEZ, A. M. *et al.* The Current and Future Role of Microbial Culture Collections in Food Security Worldwide. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.614739>. Acesso em: 1 abr. 2024.

DONATO, S. L. R.; SANTOS, L. A. P.; SILVA, A. P. da. **Estratégias de manejo de irrigação de bananeiras no semiárido brasileiro**. Universidade Federal de Viçosa, 2012. Disponível em: <https://bibliotecasemiarios.ufv.br/bitstream/123456789/2768/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 10 set. 2025.

DONATO, Sérgio Luiz Rodrigues *et al.* **Considerações ecofisiológicas e estratégias de manejo da bananeira**. 2023. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1020352>. Acesso em: 12 jan. 2025.

DUNN, A.; BECERRA-RIVERA, V. Plant growth-promoting rhizobacteria and their potential as biofertilizers for sustainable agriculture: mechanisms, challenges, and future perspectives. **Plants**, Basel, v. 12, n. 14, p. 2671, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12142671>.

EMBRAPA Mandioca e Fruticultura; EMBRAPA Semiárido. **Cultivo da bananeira irrigada no Submédio São Francisco**: dados do sistema de produção. 2. ed. Versão eletrônica, out. 2014. Acesso em: 12 jan. 2025.

EMBRAPA. **Bioinsumos e inovação na agricultura: coleções microbianas e aplicação prática**. Brasília: Embrapa, 2022.

EMBRAPA. **Bioinsumos e sustentabilidade agrícola**. Brasília: Embrapa, 2022.

EMBRAPA. **Sistema de Produção da Bananeira**. 2. ed. Brasília: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2009.

FADIJI, A. E. *et al.* Plant microbiome engineering as a strategy for drought stress tolerance in agriculture. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, 2022.

FADIJI, A. E.; BABALOLA, O. O. Elucidating mechanisms of endophytes used in plant protection and other bioactivities with multifunctional prospects. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 10, 2022.

FADIJI, A. E.; OLUWASEUN, A.; BAME, I. T.; BABALOLA, O. O. Mechanisms of plant growth-promoting rhizobacteria for drought tolerance in plants: recent advances and future directions. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 879366, 2022. doi:10.3389/fmicb.2022.879366.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <https://www.fao.org>. Acesso em: 19 dez. 2024.

FERNANDES, A. P.; PINTO, R. C. Atividade antioxidante em plantas sob déficit hídrico. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 44, n. 3, p. 221–230, 2021.

FERNANDES, J. R. *et al.* Normas de registro e regulamentação de bioinsumos no Brasil. **Revista de Administração Agroindustrial**, v. 17, n. 2, p. 55-68, 2021.

FERNANDES, L. M. *et al.* Ação das bactérias promotoras de crescimento vegetal na resistência ao estresse hídrico. **Journal of Plant Physiology**, v. 285, p. 110133, 2021.

FERNANDES, R. S. *et al.* Plant growth-promoting rhizobacteria enhance drought stress tolerance in crops: physiological and biochemical insights. **Planta Daninha**, v. 39, e021240930, 2021.

FERREIRA, C. F. *et al.* Microbial consortia as biofertilizers: a strategy to improve drought tolerance in crops. **Rhizosphere**, v. 17, 100294, 2021.

FERREIRA, D. S. *et al.* Aplicação de consórcios microbianos para aumentar a tolerância das plantas ao déficit hídrico. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 41, n. 4, p. 34, 2021.

FERREIRA, D. S. *et al.* Efeitos do déficit hídrico na morfologia e crescimento da bananeira Grand Naine. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 44, n. 1, p. 101–115, 2022.

FERREIRA, J. G. Território das secas do semiárido brasileiro: clima, identidade e sociedade. **Revista Verde Grande: Geografia e Interdisciplinaridade**, Montes Claros, v. 6, n. 1, p. 440-465, 2024. DOI: 10.46551/rvg26752395220241440465.

FERREIRA, T. S. *et al.* Uso de microrganismos nativos em consórcios microbianos para mitigação de estresse hídrico em plantas cultivadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, e023012, 2023.

FREITAS, W. da S. *et al.* Demanda de irrigação da cultura da banana na bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 343-349, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000400002>.

GOMES, D. P. *et al.* Bioinoculantes microbianos: avanços e desafios para a agricultura sustentável. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 18, e9754, 2023.

GOMES, E. A. *et al* (2016). Rizobactérias promotoras de crescimento de plantas: isolamento, caracterização e mecanismos de ação. **Embrapa Milho e Sorgo – Documentos**, 168.

GOMES, E. A. *et al*. **Microrganismos promotores do crescimento de plantas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 51 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1063799/1/doc208.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2025.

GOMES, F. R. *et al*. Aplicação de microrganismos benéficos em bananeira: efeitos sobre crescimento e tolerância ao déficit hídrico. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 45, e-2023, 2023.

GOMES, L. M. *et al*. Aplicação de microrganismos benéficos na bananicultura em regiões semiáridas. **Journal of Agricultural Science**, v. 15, n. 4, p. 55–68, 2023.

GUERRA, A. G. *et al*. **Tecnologias para o cultivo da bananeira**. Revisado por BARRETO, M. de F. P. Natal: EMPARN, 2010 p.42 (Circuito de Tecnologias Adaptadas para a Agricultura Familiar; v. 7).

HARITHA, G. *et al*. Characterization and probiotic safety of *Bacillus siamensis*: non-hemolytic and free from virulence genes. **Microbial Pathogenesis**, v. 152, 104599, 2021.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104599>

HUNGRIA, M. *et al*. Inoculação de soja com Bradyrhizobium: situação atual e perspectivas. **Ciência Rural**, v. 46, n. 2, p. 1-9, 2016.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes**, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 17 ago. 2025.

IBGE. Busca | IBGE. [ibge.gov.br](https://www.ibge.gov.br/), 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/busca.html?searchphrase=all&searchword=Banana>. Acesso em: 2 abr. 2024.

IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

KUMAR, S. *et al*. Safety assessment of plant growth promoting *Bacillus* spp. with potential biocontrol activity. **Scientific Reports**, v. 13, 2874, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29673-7>

LEITE, L. G. *et al*. Fotossíntese e resposta estomática da bananeira ao déficit hídrico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, n. 7, p. 456–466, 2019.

LEMOS, J. de J. S. Vulnerabilidades induzidas no Semiárido Brasileiro. **DRd - Desenvolvimento Regional em Debate**, v. 10, p. 245-268, 2020. DOI: 10.24302/drd.v10i0.2728.

LEONEL, S. *et al.* Achievements of Banana (*Musa* sp.)-Based Intercropping Systems in Improving Crop Sustainability. **Horticulturae**, v. 10, n. 9, p. 956, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/horticulturae10090956>. Acesso em: 12 ago. 2025.

LICHTERBERG, E.; LICHTERBERG, J. Uso racional da água na fruticultura irrigada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. 1, p. 289-298, 2011. doi:10.1590/S0100-29452011005000030.

LICHTERBERG, L. A. Avanços na bananicultura brasileira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 33, n. spe1, p. 29-36, dez. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000500005>. Acesso em: 28 fev. 2024.

LIMA, J. P. *et al.* Fitohormônios microbianos e sua influência no crescimento vegetal sob estresse hídrico. **Plant Science Today**, v. 9, n. 1, p. 55-62, 2022.

LIMA, P. R.; OLIVEIRA, F. L.; SILVA, M. A. Plant growth-promoting bacteria enhance drought tolerance in maize. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 2, p. 560-572, 2022.

LIMA, R. A. *et al.* Tolerância ao déficit hídrico em bananeira Grand Naine. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 43, n. 6, p. 1–10, 2021.

LIMA, R. P.; ALMEIDA, M. H. Bioquímica vegetal e bioinsumos: metabólitos secundários na defesa das plantas. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 20, n. 2, p. 101-115, 2022.

LIU, Y. *et al.* Genetic and functional analysis of *Bacillus pseudomycooides* from rhizosphere soil reveals plant growth-promoting traits. **Journal of Applied Microbiology**, v. 123, p. 870–882, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.13536>

LUCAS, S. S.; JOMANGA, K. E. The status of banana production. In: UTINO, S. *et al.* **Crescimento e oxidação de explantes de bananeira Prata (Musa AAB) in vitro**. IV. Concentrações de sais, ácidos ascórbicos e frequência de subcultivos. 2023.

LUGTENBERG, B.; KAMILOVA, F. Plant-growth-promoting rhizobacteria. **Annual Review of Microbiology**, v. 63, p. 541-556, 2009.

MADIGAN, M. T. *et al.* (2018). **Brock Biology of Microorganisms** (15th ed.). Pearson.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Programa Nacional de Bioinsumos: plano de ação e regulamentação.** Brasília: MAPA, 2020.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Registro de produtos microbianos para uso agrícola no Brasil.** Brasília: MAPA, 2023.

MARQUELLI, Waldir Aparecido *et al.* **Manejo da água de irrigação.** Campinas: CDRS, 2020. 178 p. (Manual Técnico, 82).

MARTINS, A. C. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi improve drought tolerance in tropical crops. **Mycorrhiza**, v. 33, p. 121-135, 2023.

MARTINS, E. F. *et al.* Compostos osmoprotetores em plantas micorrizadas: mecanismos de tolerância ao estresse hídrico. **Mycorrhiza**, v. 33, p. 123-131, 2023.

MARULANDA, A. *et al.* Drought tolerance enhancement in plants by inoculation of selected arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobacteria. **Plant Science**, v. 178, n. 6, p. 481-487, 2010.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 7, n. 9, p. 405-410, 2002.

MATA, D. A. da; MATA, D. A. A.; OLIVEIRA, V. S.; SOUSA, I. T.; PORCINO, M. M.; SILVA, J. R. S.; MACENA, R. A.; SILVA, E. P. M. Agronomic perspective: exploring the diversity and potentialities of banana cultivation (*Musa spp.*). **Scientific Electronic Archives**, v. –, p. –, 28 jun. 2024. doi:10.36560/17420241952.

MATOS, A. P.; SILVA, S. de O. e.; ALVES, E. J. Aspectos nutricionais da bananeira. In: ALVES, E. J. (Ed.). **A cultura da banana: aspectos técnicos, socioeconômicos e agroindustriais.** 2. ed. Brasília: Embrapa, 2010. p. 335–365.

MEIRA, J. C. A. *et al.* Avaliação do comportamento de bananeiras (*Musa spp.*) submetidas ao estresse hídrico. **Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical**, 2012. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/937349/avaliacao-do-comportamento-de-bananeiras-musa-spp-submetidas-ao-estresse-hidrico>. Acesso em: 12 ago. 2025.

MOREIRA, J. F. *et al.* Osmólitos compatíveis e regulação hídrica em bananeira sob estresse hídrico. **Acta Botanica Brasilica**, v. 35, n. 2, p. 112–124, 2021.

MUSIKA, J.; KARAMURA, E.; NYOMBA, M.; TURKAGUMA, P.; MWANGI, M.; ORIGI, N. K.; KARAMURA, D. Response of banana (*Musa spp.*) to drought stress based on phenotypic and physiological traits. **Journal of Crop Improvement**, v. 37, n. 6, p. 719-737, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/15427528.2022.2148313>.

NASCIMENTO, R. A. *et al.* Desafios na aplicação prática de microrganismos benéficos em agricultura sob estresse abiótico. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1012671, 2023.

NGUMBI, E.; KLOEPPER, J. B. Bacterial-mediated drought tolerance: current and future prospects. **Applied Soil Ecology**, v. 105, p. 109-125, 2016.

NOCKER, A. *et al.* (2012). Extracellular polymeric substances in microbial tolerance to water stress. **Applied and Environmental Microbiology**, 78(12), 4326–4335.

NOCKER, A. *et al.* Effect of air drying on bacterial viability: a multiparameter viability assessment. **Journal of Microbiological Methods**, v. 90, n. 2, p. 86-95, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167701212001583?via%3Dihub>. Acesso em: 16 jun. 2025.

NOMURA, E. S. *et al.* **Cultivo da Bananeira**. Campinas: CDRS, 2020. 178 p. 23 cm. (Manual Técnico, 82).

OLIVEIRA, A. *et al.* Desafios Agrícolas no Semiárido Brasileiro. **Sustentabilidade em Debate**, v. 4, n. 2, p. 276-298, 2013. DOI: 10.18472/SustDeb.v4n2.2013.10049. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/sust/article/view/15582>. Acesso em: 29 nov. 2023.

OLIVEIRA, F. S.; SOUZA, M. L. Mecanismos microbianos na mitigação do estresse hídrico em plantas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, e02512, 2022.

OLIVEIRA, M. *et al.* Composição nutricional da banana: ênfase em fibras, vitaminas e antioxidantes. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 15, n. 2, p. 123-139, 2024.

OLIVEIRA, R. P.; SOUSA, M. H.; SILVA, R. F. Impactos do estresse hídrico na bananicultura no semiárido. **Revista Agropecuária**, v. 34, p. 45-60, 2020.

OLIVEIRA, R. S.; SOUZA, S. C. Rhizobacteria-mediated growth promotion and drought tolerance in plants. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 53, p. 189-199, 2022.

PELEG, Z.; BLUMWALD, E. Hormone balance and abiotic stress tolerance in crop plants. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 14, n. 3, p. 290-295, 2011.

VAN GENUCHTEN, M.T. van. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

PEREIRA, D.; SANTOS, L. Desafios na capacitação técnica e regulamentação de bioinsumos no Brasil. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 18, n. 1, p. 23-36, 2023.

PEREIRA, M. C. T. *et al.* Crescimento e produção de primeiro ciclo da bananeira 'Prata Anã' (AAB) em sete espaçamentos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 7, p. 1377-1387, 2020. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X200000700012>. Acesso em: 28 fev. 2024.

PEREIRA, M. R. *et al.* Condutância estomática e trocas gasosas em bananeira sob déficit hídrico. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 32, n. 2, p. 99–108, 2020.

PEREIRA, N. R. L. Alternativas potenciais para o reaproveitamento de resíduos da produção de banana: uma revisão sistemática. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB)**, Rio de Janeiro, v. 55, n. 2, p. 268-280, 2020. DOI: [URL inválido removido]. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/645. Acesso em: 29 nov. 2023.

PEREIRA, T. R.; SILVA, D. A. Microorganismos benéficos e sustentabilidade agrícola: enfrentando o estresse hídrico. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 45, n. 3, p. 365-378, 2022.

PLOETZ, R. C. Fusarium wilt of banana. **Phytopathology**, v. 105, n. 12, p. 1512-1521, 2015.

PORTO, E. M. V. *et al.* Microorganismos promotores de crescimento de plantas como mitigadores do estresse hídrico em pastagens: uma revisão narrativa. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 11, e514111134029, 2022. ISSN 2525-3409. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i11.34029>.

RIBEIRO, A. F. *et al.* Bioinsumos em fruticultura: aplicações em banana, mamão e citros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 44, e-2022, 2022.

RIBEIRO, A. F. *et al.* Modulação da expressão gênica em plantas por bioinsumos: mecanismos moleculares de resistência ao estresse. **Journal of Plant Physiology**, v. 278, p. 153–165, 2023.

ROSSI, F. *et al.* The role of the exopolysaccharides in enhancing hydraulic conductivity of biological soil crusts. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 46, p. 33-40, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071711003968?via%3Dihub>. Acesso em: 18 jun. 2025.

ROSSI, F., DE PHILIPPIS, R. (2012). Role of exopolysaccharides produced by cyanobacteria in maintaining soil structure under dry conditions. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 9, 377–382.

SANTANA JUNIOR, E. B. **Sensibilidade de cultivares de bananeira a níveis de salinidade na água de irrigação**. 2015. 124 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, 2015.

SANTANA, L.; MELO, P. Interações entre bioinsumos e microbioma do solo: implicações para a resiliência agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, e021012, 2022.

SANTOS, A. B.; MARTINS, C. A.; FERREIRA, M. F. Estratégias fisiológicas de tolerância ao estresse hídrico em *Musa* spp. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 4, p. 331-338, 2011.

SANTOS, H. A. *et al.* Plant growth-promoting rhizobacteria improve physiological performance of crops under water deficit. **Environmental and Experimental Botany**, v. 204, 105090, 2023.

SANTOS, R. C. *et al.* Estratégias microbianas para promoção do crescimento vegetal em condições de déficit hídrico. **Applied Soil Ecology**, v. 176, p. 104352, 2023.

SANTOYO, G. *et al.* Plant growth-promoting bacterial endophytes. **Microbiological Research**, v. 248, 126794, 2021.

SÁVIO, E.; RODRIGUES MARTINS, M.; ROCHA MAGALHÃES, A. **A seca de 2012-2015 no Nordeste e seus impactos**. 2018. Acesso em: 28 fev. 2024. SEBRAE – SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Panorama da bananicultura no Brasil**, 2023. Disponível

SEBRAE. **Brasil é o 4º produtor mundial de banana**. Sebrae.com.br, 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/brasil-e-o-4-produtor-mundial-debanana,1f00286bf0837810VgnVCM1000001b00320aRCRD>. Acesso em: 2 abr. 2024.

SENAR. **Manual técnico de produção de banana**. Brasília: Serviço Nacional de Aprendizagem Rural, 2011.

SILVA, J. C. *et al.* Estresse hídrico e a agricultura no semiárido brasileiro: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 8, p. 549-557, 2020.

SOUZA, L. F. *et al.* Regulação antioxidante em plantas inoculadas com endófitos sob estresse hídrico. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 168, p. 10-18, 2022.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TURNER, D. W.; FORTESCUE, J. A.; THOMAS, D. S. Environmental physiology of the bananas (*Musa* spp.). **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 4, p. 463-484, 2007.

VOORA, V.; BERMÚDEZ, S.; FARRELL, J.; LARREA, C.; LUNA, E. **Banana Prices and Sustainability: Sustainable Commodities Marketplace Series Market Overview**. International Institute for Sustainable Development (IISD), 2023. 22 p. Recuperado de <https://www.iisd.org/system/files/2023-03/2023-global-market-report-banana.pdf> Acesso em: 12 abr. 2024.

VACHERON, J. *et al.* Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *FEMS Microbiology Ecology*, Oxford, v. 84, n. 3, p. 476–487, 2013. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3775148/>. Acesso em: 18 ago. 2025.

VIDAL, M. C.; AMARAL, D. F. S.; NOGUEIRA, J. D.; MAZZARO, M. A. T.; LIRA, V. M. C. Bioinsumos: a construção de um programa nacional pela sustentabilidade do agro brasileiro. *Economic Analysis of Law Review*, v. 12, n. 3, p. 557-574, set.-dez. 2021. Disponível em: https://www.academia.edu/77269658/Bioinsumos_a_Constru%C3%A7%C3%A3o_de_um_Programa_Nacional_pela_Sustentabilidade_do_Agro_Brasileiro. Acesso em: 10 set. 2025.

VURUKONDA, S. S. K. P. *et al.* Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, v. 184, p. 13-24, 2016.

YANG, J. *et al.* Mechanisms of drought-induced tree mortality: implications for forest management in a changing climate. *Forest Ecology and Management*, v. 259, n. 3, p. 599-709, 2009.

YU, Y. *et al.* Comparative genomic analysis reveals the biosafety and plant growth-promotion potential of *Bacillus pseudomycooides*. *Frontiers in Microbiology*, v. 14, 1172393, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1172393>

ZHANG, J. *et al.* Enhanced wheat growth and nutrient uptake by plant growth-promoting rhizobacteria under low-nitrogen conditions. *BMC Microbiology*, London, v. 20, n. 1, p. 58, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12866-020-1708-z>.