

DESVENDANDO A INFLUÊNCIA DE *Bacillus cereus* NA MITIGAÇÃO
COMPARADA DOS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO ENTRE
GENITORES E HÍBRIDO DE MILHO-PIPOCA

MONIQUE DE SOUZA SANTOS

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JULHO – 2024

DESVENDANDO A INFLUÊNCIA DE *Bacillus cereus* NA
MITIGAÇÃO COMPARADA DOS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO
ENTRE GENITORES E HÍBRIDO DE MILHO-PIPOCA

MONIQUE DE SOUZA SANTOS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO – UENF

“Dissertação apresentada ao Centro de
Biociências e Biotecnologia da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Mestre em Biotecnologia Vegetal.”

Orientador: Prof. Dr. Antônio Teixeira do Amaral Junior
Co-orientador: Dr. Valter Jário de Lima

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JULHO – 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

S23

Santos, Monique de Souza.

"Desvendando a influência de *Bacillus cereus* na mitigação comparada dos efeitos do déficit hídrico entre genitores e híbrido de milho-pipoca". / Monique de Souza Santos. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2024.

52 f. : il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Biociências e Biotecnologia, 2024.

Orientador: Antonio Teixeira do Amaral Junior. Coorientador:
Valter Jário de Lima.

1. Déficit hídrico. 2. rizobactérias. 3. *Zea mays* L. var. *everta*. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD -

DESVENDANDO A INFLUÊNCIA DE *Bacillus cereus* NA MITIGAÇÃO
COMPARADA DOS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO ENTRE
GENITORES E HÍBRIDO DE MILHO-PIPOCA

Monique de Souza Santos

“Dissertação apresentada ao Centro de
Biociências e Biotecnologia da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Mestre em Biotecnologia Vegetal.”

Aprovado em 19 de julho de 2024.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Fábio Lopes Olivares (D.Sc., Agronomia) – UENF

Prof. Dr. Samuel Henrique Kamphorst (D.Sc., Genética e melhoramento de Plantas)
- UNILA

Prof^a. Dra. Aline Chaves Intorne (D.Sc., Biociências e Biotecnologia) - UENF

Dr. Valter Jário de Lima (D.Sc., Genética e Melhoramento de Plantas) – UENF
(Co-orientador)

Prof. Dr. Antônio Teixeira do Amaral Junior (D.Sc., Genética e Melhoramento) –
UENF (Orientador)

A Deus e a minha família.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre estar comigo em todos os momentos da minha vida, me apoiando e iluminando para tudo sair bem, me dando força, saúde, coragem e sabedoria do início ao fim dessa trajetória. Por colocar pessoas em minha vida acadêmica que me ajudaram quando eu mais precisei.

Aos meus pais Márcia e Marcio e a meu namorado Raphael, por todo o apoio prestado do início ao fim deste mestrado.

Ao Uéliton, por ser meu companheiro de Laboratório, pesquisa e de boas risadas, um amigo sempre solícito a ajudar e que trouxe alegria com seu jeito de ser para esta caminhada.

Ao meu coorientador Dr. Valter Jário de Lima e ao Dr. Samuel Henrique Kamphorst, por todos os ensinamentos.

À Geovana e ao Talles por todo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

À Daniele por todo o apoio dado durante o meu mestrado.

À toda equipe do Laboratório de Melhoramento Genético Vegetal, a Flávia, o Divino, a Bruna, a Carol, o Jardel, a Rosimeire, e os demais por todas as tardes que passamos juntos.

Ao meu orientador, professor Dr. Antônio Teixeira do Amaral Junior, por ter me dado um voto de confiança e me deixar fazer parte da equipe, apesar da diferença da base acadêmica.

A todos os meus colegas acadêmicos.

As colaborações do Prof. Fábio Olivares e do Prof. Eliemar Campostrini, nesta pesquisa.

À UENF, por ser uma universidade que apoia a pesquisa e os alunos. Ao programa de Pós-Graduação de Biotecnologia Vegetal da UENF, que mesmo sendo um programa em desenvolvimento, está contribuindo com a sociedade e com a ciência.

À CAPES por todo o auxílio financeiro e estudantil, que muda a vida de diversas pessoas.

A todos, meu MUITO OBRIGADA!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico de temperatura, umidade relativa do ar e radiação solar.....	21
Figura 2. Médias e desvio-padrão de características morfológicas de genótipos contrastantes de milho-pipoca no déficit hídrico.....	25
Figura 3. Médias e desvio-padrão da massa seca da raiz de genótipos contrastantes de milho-pipoca no déficit hídrico.....	26
Figura 4. Médias e desvio-padrão de pigmentos fotossintéticos e densidades estomáticas de genótipos contrastantes de milho-pipoca no déficit hídrico.....	28
Figura 5. Médias e desvio-padrão de trocas gasosas, <i>quenching</i> não-fotoquímico e rendimento quântico do PSII de genótipos contrastantes de milho-pipoca no déficit hídrico.....	30

RESUMO

SANTOS, Monique, Souza; MSc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Julho, 2024. Desvendando a influência de *Bacillus cereus* na mitigação comparada dos efeitos do déficit hídrico entre genitores e híbrido de milho-pipoca. Orientador: Antônio Teixeira do Amaral Júnior. Coorientador: Valter Jário de Lima.

A seca ocasiona perdas na produtividade agrícola e o milho-pipoca é sensível à limitação hídrica. A associação com bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV) pode promover uma melhor adaptação em ambientes com estresse hídrico. Diante disso, o objetivo da pesquisa foi analisar a resposta morfofisiológica de genótipos de milho-pipoca em interação com a rizobactéria *Bacillus cereus*, sob condição de déficit hídrico. Duas linhagens (L61, sensível e L76, tolerante) e seu híbrido (WS01) foram avaliados em um delineamento de blocos completos casualizados em fatorial simples (considerando-se como fatores as fontes de variação genótipos e tipo de inoculação) com três repetições. Os substratos em tubos de PVC foram constituídos por 70% de basaplant e 30% de perlita. Em casa de vegetação, com a suspensão da irrigação 24 dias após a emergência das plantas, o potencial hídrico do solo foi baixando gradativamente conforme o consumo das plantas. Os tratamentos inoculados no plantio receberam 1 mL da suspensão de *Bacillus cereus* estirpe UENF LMS 71 com $1,8 \times 10^9$ unidades formadoras de colônia (UFC) e os tratamentos não inoculados receberam 1 mL de meio sem bactérias. Os resultados mostraram que o efeito de genótipo foi significativo para todas as características morfológicas (altura, área foliar, diâmetro do colmo, massa seca da folha e massa seca do colmo) enquanto a inoculação teve efeito significativo em algumas características específicas de L61 e L76. Na massa seca das raízes, a inoculação resultou em aumentos em L76 e reduções em L61. A inoculação aumentou os teores de clorofila e o índice de balanço de nitrogênio, e reduziu os teores de flavonoides e antocianinas. L61 e L76 responderam de maneira distinta, com L76 mostrando melhores médias na densidade estomática sob inoculação. No híbrido WS01, a inoculação aumentou o teor de clorofila, o índice de balanço de nitrogênio, a taxa de transpiração, a concentração interna de CO₂, a condutância estomática e a densidade estomática abaxial. As linhagens genitoras mostraram respostas variáveis, especialmente em *quenching* não-fotoquímico e na massa seca da raiz nas secções de 0-30cm, 90-120cm e 120-150cm. A conclusão foi que a inoculação com *Bacillus cereus* tem potencial para promover o crescimento de milho-pipoca em estresse hídrico por seca, com variações dependentes do genótipo. O híbrido WS01 mostrou melhorias significativas na taxa de transpiração, na condutância estomática e na concentração interna de CO₂, enquanto as linhagens L61 e L76 mostraram respostas diferenciadas na morfofisiologia. Os resultados indicam que a seleção de genótipos deve considerar a interação benéfica com microrganismos.

Palavras-chave: Déficit hídrico, rizobactérias, *Zea mays* L. var. *everta*

ABSTRACT

SANTOS, Monique, Souza; MSc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Julho, 2024. Unveiling the Influence of *Bacillus cereus* in the Comparative Mitigation of Water Deficit Effects Between Parents and Hybrid Popcorn Maize. Orientador: Antônio Teixeira do Amaral Júnior. Coorientador: Valter Jário de Lima.

Drought causes losses in agricultural productivity and popcorn is sensitive to water limitation, the association with plant growth-promoting bacteria (BPCV) can promote better adaptation in environments with water stress. Therefore, the objective of the research was to analyze the morphophysiological response of popcorn genotypes in interaction with the rhizobacteria *Bacillus cereus*, under water deficit conditions. Two lines (L61, sensitive and L76, tolerant) and their hybrid (WS01) were evaluated in a randomized complete block design in simple factorial (genotypes and type of inoculation) with three replications. The substrates in PVC pipes were made up of 70% basaplant and 30% perlite. In a greenhouse, with the suspension of irrigation 24 days after the emergence of the plants, the water potential of the soil gradually decreased according to the plants' consumption. The treatments inoculated at planting received 1 mL of the suspension of *Bacillus cereus* strain UENF LMS 71 with 1.8×10^9 colony forming units (CFU) and the non-inoculated treatments received 1 mL of medium without bacteria. The results showed that the genotype effect was significant for all morphological characteristics (height, leaf area, stem diameter, leaf dry mass and stem dry mass) while inoculation had a significant effect on some specific characteristics of L61 and L76. In root dry mass, inoculation resulted in increases in L76 and decreases in L61. Inoculation increased chlorophyll levels and the nitrogen balance index, and reduced flavonoid and anthocyanin levels. L61 and L76 responded differently, with L76 showing better averages in stomatal density under inoculation. In hybrid WS01, inoculation increased chlorophyll content, nitrogen balance index, transpiration rate, internal CO₂ concentration, stomatal conductance and abaxial stomatal density. The parental lines showed variable responses, especially in non-photochemical *quenching* and in root dry mass section 0-30cm, 90-120 and 120-150cm. The conclusion was that inoculation with *Bacillus cereus* has the potential to promote the growth of popcorn under drought stress, with variations depending on the genotype. The WS01 hybrid showed significant improvements in transpiration rate, stomatal conductance and internal CO₂ concentration, while the L61 and L76 lines showed different responses in morphophysiology. The results indicate that genotype selection must consider beneficial interactions with microorganisms.

Keywords: Water deficit, rhizobacteria, *Zea mays* L. var. *everta*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	6
2 OBJETIVOS.....	8
2.1 Objetivo Geral	8
2.2 Objetivos Específicos.....	8
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	9
3.1 A cultura do milho-pipoca e o déficit hídrico.....	9
3.2 Uso de híbridos em milho para mitigar o efeito do estresse hídrico.....	10
3.3 Efeito e tolerância do déficit hídrico nas plantas	11
3.4 Uso de bactérias promotoras do crescimento vegetal (BPCVs) na mitigação do déficit hídrico.....	13
3.5 O gênero <i>Bacillus</i> como promotoras do crescimento vegetal	15
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
4.1 Material vegetal.....	16
4.2 Seleção da bactéria e preparação do inóculo	17
4.3 Preparo das sementes	17
4.4 Condições de crescimento e experimentais.....	18
4.5 Características avaliadas	19
4.5.1 Avaliações de crescimento e massa seca dos órgãos vegetais	19
4.5.2 Características radiculares.....	20
4.5.3 Avaliações de pigmentos foliares e densidade estomática	20
4.5.4 Trocas gasosas foliares, <i>quenching</i> não-fotoquímico e rendimento quântico do PSII.....	21
4.6 Cálculos das diferenças percentuais entre condições	21
4.7 Análises estatísticas.....	21
5 RESULTADOS.....	22
5.1 Impacto de <i>B. cereus</i> sobre a morfologia vegetal	22
5.2 Impactos da inoculação sobre o conteúdo de pigmentos foliares e Densidade estomática.....	25
5.3 Modificações causadas por <i>B. cereus</i> sobre as trocas gasosas foliares, <i>quenching</i> não-fotoquímico e no rendimento quântico do PSII.....	27
6 DISCUSSÃO	29
6.1 A inoculação com <i>B. cereus</i> provoca mudanças no crescimento de plantas de milho-pipoca em condição de seca?	29
6.2 Alterações no teor relativo de pigmentos foliares e na densidade estomática como resposta à inoculação com <i>B. cereus</i>	32

6.3 Alterações estomáticas e nas medidas de trocas gasosas foliares subjacentes à inoculação com <i>B. cereus</i>	34
6.4 Potencial de Uso de <i>B. cereus</i> como Promotor de Crescimento	36
6.5 Implicações para o Melhoramento de Plantas	37
7 CONCLUSÃO	38
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

Os efeitos das mudanças climáticas são uma preocupação mundial, pois impactam a segurança alimentar e a agricultura, bem como a capacidade de vida no planeta. Por alterar o ciclo da água, podem trazer prejuízos às áreas agrícolas, como secas e alagamentos, o que deve limitar a capacidade de produção de alimentos nestes locais (MALHI *et al.*, 2021). A ocorrência de secas nas áreas, tem sido responsável pela maioria das perdas na agricultura nas últimas décadas (LUNDUKA *et al.*, 2019) e têm se tornando cada vez mais frequentes (ESMAEILI, SHEN e ZHANG, 2022).

Quando a planta é submetida ao estresse hídrico ocorrem alterações no metabolismo, na fotossíntese e na nutrição (CAMPOS, SANTOS e NACARATH, 2021) que modificam sua capacidade produtiva (SABAGH *et al.*, 2018). O potencial produtivo do milho-pipoca não tolerante à seca torna-se diminuído, pois a espécie *Zea mays* é altamente vulnerável a condições de deficiência hídrica (HAMAN, GUL e AHMAD, 2004), podendo ocorrer malformações das espigas e dos grãos, atingindo até o nível de incapacidade produtiva (SILVA *et al.*, 2021).

Devido ao efeito severo causado pelo déficit hídrico no crescimento e no desenvolvimento vegetal, o melhoramento genético apresenta-se como uma ferramenta eficaz para reduzir a vulnerabilidade das culturas agrícolas (CHALLINOR *et al.*, 2016). Melhoristas têm desenvolvido pesquisas para compreender as respostas morfológicas, fisiológicas e agronômicas das plantas sob deficiência hídrica, e assim, desenvolver genótipos mais adaptados a esse estresse ambiental (PEREIRA *et al.*, 2019). No entanto, esta não é uma tarefa fácil, uma vez que tolerância ou eficiência no uso da água são características de herança complexas que interagem fortemente com o ambiente (DIAS *et al.*, 2018).

No milho, assim como em seus tipos especiais, a exploração do vigor híbrido é a forma mais eficaz de se obter genótipos superiores e mitigar os efeitos do estresse hídrico (DURÃES *et al.*, 2001; KAMPHORST *et al.*, 2019). O vigor híbrido ou heterose é a superioridade dos híbridos em relação aos genitores (HALLAUER, CARENA e MIRANDA FILHO, 2010). A complementaridade alélica é um fator crucial para o potencial produtivo dos híbridos.

Uma alternativa complementar para melhorar a tolerância do milho a

estresses abióticos é a associação com bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV) (GOMES *et al.*, 2022). As BPCV são indicadas por ofertar benefícios à planta, como produzir hormônios de crescimento como a auxina (RAMAKRISHNA *et al.*, 2020; RAMAKRISHNA, YADAV e LI, 2019), giberelinas e citocininas (KIM *et al.*, 2021), participar da solubilização de nutrientes, melhorar a performance do sistema oxidante (BACKER *et al.*, 2018) promovendo o crescimento vegetal (BATISTA *et al.*, 2018), podendo atuar como biofertilizantes, bioprotetores e bioestimulantes (LOPES, 2021).

Diversas estirpes bacterianas têm sido exploradas em estudos relacionados ao déficit hídrico, incluindo *Agrobacterium*, *Achromobacter*, *Azospirillum*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Ralstonia* e *Bacillus*, especificamente *B. cereus* (BRESSION *et al.*, 2014; POLONCA, 2020). Esses microrganismos podem apresentar mecanismos distintos de promoção do crescimento vegetal, além de especificidade com determinadas espécies ou genótipos hospedeiros (GOMES *et al.*, 2022). A bactéria *B. cereus* foi escolhida devido a sua capacidade de promover o crescimento vegetal em milho-pipoca em condições de estresse hídrico.

Diante disso, é importante avaliar a capacidade de interação entre BPCV e genótipos de milho-pipoca. Ainda há uma carência de estudos sobre se linhagens genitoras e híbridos apresentam diferentes capacidades de interação. Além disso, é fundamental para o desenvolvimento de inoculantes eficientes em milho-pipoca para aumentar a tolerância ao déficit hídrico. Apesar do potencial dos microrganismos em aumentar a tolerância ao déficit hídrico nas plantas, a utilização destes permanece um campo de pesquisa relativamente pouco explorado para a cultura do milho-pipoca.

Neste contexto, este estudo buscou investigar a capacidade da rizobactéria *B. cereus* em promover o crescimento vegetal em duas linhagens genitoras contrastantes (sensível e tolerante ao déficit hídrico) e seu híbrido de milho-pipoca, aumentando a tolerância ao déficit hídrico através da análise da resposta morfofisiológica de genótipos de milho-pipoca decorrente da interação com a rizobactéria *B. cereus*.

69 2 OBJETIVOS

70 2.1 Objetivo Geral

71 Avaliar o efeito da inoculação com *B. cereus* na mitigação do estresse de duas
72 linhagens de milho-pipoca e seu híbrido por meio de inferências de características
73 morfofisiológicas.

74

75 2.2 Objetivos Específicos

76 I. Aquilatar o efeito da inoculação com *B. cereus* sobre a massa seca das raízes
77 de milho-pipoca e sua distribuição ao longo do perfil do solo.

78 II. Analisar as mudanças nos conteúdos de pigmentos foliares e na densidade
79 estomática em resposta à inoculação com *B. cereus*.

80 III. Examinar os efeitos da inoculação sobre as trocas gasosas foliares, o
81 *quenching* não-fotoquímico e a eficiência fotossintética das plantas de milho-
82 pipoca.

83 IV. Estimar e analisar as médias das características morfofisiológicas das
84 linhagens e híbrido de milho-pipoca cultivados sob condições de déficit
85 hídrico, com e sem a presença de *B. cereus*.

86 V. Obter estimativas precisas das características morfofisiológicas de linhagens
87 e híbrido de milho-pipoca cultivados em casa de vegetação sob estresse
88 hídrico, com foco na comparação entre tratamentos com e sem inoculação
89 com *B. cereus*.

90 VI. Determinar a significância estatística das diferenças nos quadrados médios
91 das características morfológicas de raiz e fisiológicas, avaliando a variação
92 genotípica entre linhagens genitoras e o híbrido em condições de casa de
93 vegetação, com e sem inoculação, sob déficit hídrico.

94 VII. Avaliar se a resposta das plantas à inoculação com *B. cereus* é dependente
95 do genótipo.

96

97

98

99

100

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A cultura do milho-pipoca e o déficit hídrico

O milho-pipoca é uma planta herbácea anual que pertence à família Poaceae, subfamília Panicoideae, tribo Maydeae, gênero *Zea* e espécie *Zea mays* L. var. *everta* (PARTENIANI e CAMPOS, 2005). Esta cultura é originária da América do Sul e América Antilhas, com histórico de utilização pelos povos nativos (THOMAS, 1989). Assim como o milho comum, seu ciclo vida total varia entre quatro e cinco meses (PARTENIANI e CAMPOS, 2005).

No entanto, o milho-pipoca apresenta algumas distinções em relação ao milho comum, como grãos menores, maior número de espigas por planta, porte menor, colmo mais frágil, menor número de folhas e maior suscetibilidade a estresses. Todavia, a principal diferença entre esses dois tipos de milho é a capacidade do milho-pipoca de expandir seus grãos (LINARES, 1987; LARISH e BREWBACKER, 1999). A expansão ocorre quando os grãos são submetidos a temperaturas superiores a 180 °C. Devido esse fenômeno, o milho-pipoca é amplamente apreciado em momentos de recreação e possui significativo valor econômico adicional (KAMPHORST *et al.*, 2018b); (AMARAL JÚNIOR *et al.*, 2013).

No Brasil, a região Centro-Oeste se destaca como a maior produtora de milho-pipoca, com destaque para o Estado de Mato Grosso (CHAVES *et al.*, 2022). Essa notável produção está intrinsecamente associada à presença de grandes empresas de empacotamento estabelecidas no local (CARVALHO *et al.*, 2013). A estimativa da área de milho em Mato Grosso para a safra 2023/24 foi mantida em 6,94 milhões de hectares, registrando uma redução de 7,31% quando comparada com a da safra anterior (MACHADO, 2024). Na safra 2023/24, a produção foi de 119,4 milhões de toneladas, representando uma queda em relação à colheita anterior, que ultrapassou 130 milhões de toneladas (CONAB, 2023).

Apesar de significativa, a produção nacional de milho-pipoca enfrenta desafios consideráveis. O desenvolvimento da cultura depende de condições ideais de temperatura e umidade no solo desde o plantio até o final da floração. A faixa ideal situa-se entre 24 e 30 °C (CRUZ *et al.*, 2006). Além disso, são necessários 600 mm de água (MACHADO, 2016). Mas, em muitas regiões tropicais, as temperaturas podem frequentemente exceder esses valores, o que,

junto com a escassez de água, impacta negativamente o crescimento e o rendimento das plantas (FIEP, 2022).

A disponibilidade inadequada de água durante períodos críticos pode severamente afetar o crescimento e a produtividade do milho-pipoca que depende de uma quantidade adequada para desenvolver suas espigas e grãos de maneira satisfatória. A escassez de água durante esses estágios pode comprometer o enchimento de grãos e reduzir o volume da pipoca expandida (KAMPHORST *et al.*, 2018b).

A falta de irrigação durante períodos de estresse hídrico pode resultar em uma diminuição significativa na produção de milho-pipoca. Logo, a adaptação dessa cultura às condições climáticas, especialmente em relação à disponibilidade de água, é crucial para otimizar o rendimento e garantir a qualidade dos grãos. Estratégias de manejo agrícola que visem melhorar a eficiência no uso da água e o desenvolvimento de cultivares mais tolerantes ao déficit hídrico são essenciais para enfrentar tais desafios em regiões onde as condições climáticas são menos previsíveis.

Apesar do apelo global por tecnologias que atendam as demandas das mudanças climáticas atuais e futuras, das 204 cultivares de milho-pipoca registras no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil (MAPA), o híbrido simples denominado WS01, desenvolvido pela UENF, é a única cultivar desenvolvendo para tolerância ao déficit hídrico. Diante disso, é notória a importância do Programa de Melhoramento de Milho-pipoca da UENF, em gerar tecnologia para o desenvolvimento da agricultura do nosso país.

3.2 Uso de híbridos em milho para mitigar o efeito do estresse hídrico

O uso de híbridos no melhoramento de milho é uma prática amplamente adotada, que visa aprimorar diversas características agronômicas e aumentar a resiliência das plantas em condições adversas (ZHANG *et al.*, 2016). A utilização de híbridos permite o desenvolvimento de plantas com maior produtividade, ganho de biomassa, elevação da velocidade de desenvolvimento e maior fertilidade (ARAUS, SÁNCHEZ e CABRERA-BOSQUET, 2010). A obtenção de híbridos envolve o cruzamento de genitores com características distintas, que se complementam geneticamente, resultando em plantas mais vigorosas e adaptáveis (HALLAUER, CARENA e MIRANDA, 2010).

Os híbridos de milho têm se mostrado uma solução genética promissora

para mitigar os efeitos dos estresses ambientais nas plantas (ARAUS, SÁNCHEZ e CABRERA-BOSQUET, 2010; CHAIRI *et al.*, 2016). Em particular, esses híbridos demonstram melhor capacidade de crescimento e desenvolvimento em condições de seca, evidenciando a sua superioridade em situações de déficit hídrico (LEITE *et al.*, 2021).

Desde o crescimento inicial, os benefícios dos híbridos de milho são notáveis, proporcionando vantagens durante todos os estádios de desenvolvimento da planta (ROCKENBACH *et al.*, 2018). A superioridade metabólica dos híbridos é uma das hipóteses sugeridas para explicar seu desempenho aprimorado em condições adversas (TOLLENAAR e LEE, 2006).

Assim, o desenvolvimento e a utilização de híbridos de milho são fundamentais para a agricultura moderna, permitindo a obtenção de plantas mais produtivas e resilientes, capazes de enfrentar e mitigar os efeitos do estresse hídrico e outras adversidades ambientais.

3.3 Efeito e tolerância do déficit hídrico nas plantas

A interação solo-planta-atmosfera é crucial para entender os efeitos do déficit hídrico na cultura do milho-pipoca. Quando o solo se desidrata, a absorção de água pelas plantas torna-se desafiadora devido à redução da disponibilidade hídrica. Esse desafio se intensifica com o aumento da demanda evaporativa da atmosfera, resultando em um fluxo hídrico crítico no sistema. A diminuição do potencial hídrico atmosférico, influenciado pelo aumento da temperatura, amplia o gradiente entre o potencial hídrico foliar e atmosférico, impactando profundamente o crescimento e desenvolvimento das plantas (SILVA *et al.*, 2016).

O déficit hídrico é resultado da inadequação no suprimento de água disponível para as necessidades fisiológicas normais das plantas. Este problema pode ser causado por diversos fatores, como baixa precipitação, alta taxa de evaporação atmosférica, compactação do solo ou práticas inadequadas de irrigação. Quando as plantas enfrentam estresse hídrico, uma série de adaptações fisiológicas e bioquímicas são desencadeadas para mitigar seus efeitos negativos (CAMPOS, SANTOS e NACARATH, 2021).

De acordo com Begg e Turner (1976), os mecanismos de resposta ao déficit hídrico, podem ser classificados em três categorias: "prevenir", "suportar" e "evadir". Na estratégia de "prevenir", as plantas fecham os estômatos e

apofundam o sistema radicular para explorar um maior volume de solo, reduzindo o tamanho das células e aumentando o espessamento das paredes celulares, assim como a cerosidade da cutícula. O mecanismo de "suportar" está relacionado à capacidade da planta em manter o equilíbrio de suas funções fisiológicas sob condições de deficiência hídrica, enquanto o "evadir" ocorre quando a planta antecipa o ciclo de desenvolvimento. Em condições extremas de estresse, as plantas, ingressam em senescência precoce com o propósito de assegurar a perpetuação da espécie.

A senescência das folhas, processo em que o órgão vegetal é rapidamente degradado, é uma das causas da redução da fotossíntese, que causa a limitação do enchimento completo dos grãos. Esse impacto negativo no peso dos grãos e, conseqüentemente, na produtividade, é observado sob estresse hídrico (DANGL *et al.*, 2000; CHEN *et al.*, 2015 e CHACON *et al.*, 2017). Além disso, em solos com escassez hídrica severa, as raízes apresentam um crescimento mais lento, influenciado pela combinação de carência de água e obstáculos mecânicos (BENGOUGH *et al.*, 2011).

Como mecanismo de defesa, as plantas reduzem a perda de água, pois elas diminuem a expansão celular, resultando na redução do tamanho das folhas (CHOUDHARY *et al.*, 2020). Isso, por sua vez, diminui a taxa de fotossíntese. Algumas espécies adotam a estratégia de acumular substâncias osmoticamente ativas e leves chamadas de osmólitos, como a prolina no citoplasma, para preservar o potencial hídrico e a turgescência celular (RAMOS *et al.*, 2003). Essa abordagem permite manter a abertura dos estômatos e a absorção de dióxido de carbono, mesmo em condições de baixa disponibilidade de água no solo (NEPOMUCENO *et al.*, 2001). Portanto, esses mecanismos de defesa estão interligados, contribuindo para a adaptação das plantas a condições adversas de crescimento.

Com relação à produtividade final da cultura, o estágio reprodutivo, relativo ao florescimento e ao enchimento dos grãos, são os mais sensíveis ao estresse hídrico (MAGALHÃES *et al.*, 2002). A ocorrência do estresse durante o período de polinização diminui a fecundação e também aumenta o abortamento de sementes de milho. Por isso, a ocorrência da limitação hídrica imediatamente antes e/ou durante esta etapa fenológica pode causar grande prejuízo no rendimento dos grãos (CÂMARA *et al.*, 2007; TEIXEIRA *et al.*, 2010). No

enchimento dos grãos, a falta de água afetará principalmente o tamanho do grão e, portanto, reduzirá a produtividade (CAIRNS *et al.*, 2012).

A tolerância à seca é caracterizada quando as plantas possuem adaptações morfológicas e fisiológicas integradas que minimizam a perda de água e otimizam sua absorção. E pode ser subdividido em duas estratégias: tolerância com a manutenção do turgor e tolerância à desidratação (PEIXOTO, 2020). Esses mecanismos demonstram a complexidade e a adaptabilidade das plantas do milho-pipoca às condições adversas de crescimento.

O ajuste osmótico constitui um dos mecanismos fisiológicos mais eficazes para a manutenção da turgescência celular em condições de baixo potencial hídrico no solo (MARINDELAROSA *et al.*, 2019). Outra estratégia é manter o turgor através do aumento da elasticidade da parede celular (RUI *et al.*, 2019). Diante de situações de estresse hídrico, as plantas evitam a redução do potencial hídrico reduzindo o volume celular por meio do encolhimento, devido ao ajuste elástico de suas paredes celulares (YASI *et al.*, 2020).

Uma estratégia eficaz para enfrentar os desafios das mudanças climáticas e reduzir o consumo de água na agricultura é a seleção de espécies/cultivares tolerantes em condições de déficit hídrico (YASI *et al.*, 2020). Genótipos tolerantes não apenas demonstram melhor crescimento e desenvolvimento, mas também podem exibir o efeito stay green, retardando a senescência foliar, além de apresentar maior desenvolvimento radicular e manutenção do status hídrico (QIANG *et al.*, 2019; SADRAS, MAHADEVAN e ZWER, 2019).

3.4 Uso de bactérias promotoras do crescimento vegetal (BPCVs) na mitigação do déficit hídrico

A utilização de microrganismos benéficos para o desenvolvimento vegetal é uma prática consagrada pelos pesquisadores e agricultores ao longo do tempo (ROMEIRO, 2007). A aplicação de bactérias, cianobactérias e fungos vem ganhando cada vez mais destaque na agricultura, por proporcionar aumentos na produtividade, na qualidade dos produtos e na mitigação de estresses (BERG, 2009; SINGH *et al.*, 2011).

As BPCV, habitantes da rizosfera ou do interior das plantas, possuem diversos mecanismos que conferem tolerância ao estresse hídrico. Estes incluem a produção de fitohormônios, compostos orgânicos voláteis, enzima

ACC deaminase, osmólitos, exopolissacarídeos, sideróforos, formação de biofilme, metabolismo antioxidante e desenvolvimento radicular (REZENDE *et al.*, 2021; GOMES *et al.*, 2022).

Os fitohormônios, como citocinina (CK), giberelina (GA), ácido abscísico (ABA), ácido indol-3-acético (AIA), etileno e ácido jasmônico, desempenham papéis importantes na regulação do crescimento, metabolismo e tolerância a estresses abióticos (ANKATI e PODILE, 2018). Os dois primeiros, por exemplo, estão associados à promoção de divisões e aumento celulares, e expansão tecidual (COHEN *et al.*, 2009). O ABA, por sua vez, atua nas respostas antioxidantes, contribuindo para a acumulação de osmólitos compatíveis e maior conteúdo relativo de água (GOMES *et al.*, 2022), além de estar envolvido no controle estomático (NETO *et al.*, 2017).

Os exopolissacarídeos (EPS), polímeros de carboidratos encontrados em uma ampla variedade de bactérias, formam biofilmes que melhoram a estrutura do solo, aumentam a densidade dos poros na rizosfera e evitam o ressecamento radicular, protegendo contra dessecação e altas temperaturas (GOMES *et al.*, 2022). Os biofilmes, constituídos por diversas populações microbianas, atuam como uma camada adicional, proporcionando hidratação à raiz e protegendo contra estresses ambientais (SINGH *et al.*, 2006; FLEMMING e WINGENDER, 2010).

Compostos orgânicos voláteis (VOCs) produzidos por bactérias promotoras de crescimento também desempenham papéis diversos, incluindo a promoção da tolerância ao déficit hídrico (TIMMUSK *et al.*, 2014; POUDEL *et al.*, 2021). Através de incrementos no crescimento da planta através da modulação da expressão de genes associados à expansão e relaxamento da parede celular (DIMPKA *et al.*, 2009; ZHANG *et al.*, 2007).

No metabolismo oxidante, o déficit hídrico aumenta a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), os microrganismos desenvolveram sistemas antioxidantes para mitigar o estresse oxidativo (VURUKONDA *et al.*, 2016). O aumento da produção de osmólitos, como açúcares solúveis, prolina e outros, é uma estratégia adaptativa para manter o equilíbrio hídrico e preservar a integridade celular (ASHAF *et al.*, 2011).

As BPCPs impactam positivamente o crescimento e arquitetura das raízes, promovendo uma maior tolerância ao déficit hídrico (NGUMBI e

KLOEPPER, 2016). Alterações na fluidez das membranas celulares radiculares são passos iniciais para aumentar a tolerância ao estresse hídrico (DIMPKA *et al.*, 2009; GUSAIN *et al.*, 2015). Sistemas radiculares facilitam a absorção de nutrientes e água (COHEN *et al.*, 2008; SALOMON *et al.*, 2014).

Além disso, as BPCV contribuem para a disponibilização de nutrientes, como a fixação biológica de nitrogênio, quelação de ferro e absorção de micronutrientes como zinco, cobre e manganês, proporcionando vantagens nutricionais às plantas na rizosfera (HATHURUSINGHE, AZIZOGLU e SHIN 2024). Rizobactérias do gênero *Bacillus*, como *B. priestia*, podem solubilizar fosfatos, melhorando o crescimento do sistema radicular e aumentando a eficiência de absorção de fósforo pelas plantas (KALAYU, 2019; OLIVEIRA-PAIVA *et al.*, 2020). Essas bactérias também são especialmente essenciais para plantas que contam com a fixação biológica de nitrogênio, ajudando a impulsionar o crescimento das plantas em locais onde há escassez de nitrogênio (ARAÚJO, SAMPAIO e SCHAEFER, 2017).

Entender esses mecanismos é crucial para desenvolver estratégias de gestão que promovam a produtividade em ecossistemas agrícolas, onde plantas, solo e microrganismos interagem (GOMES *et al.*, 2022).

3.5 O gênero *Bacillus* como promotoras do crescimento vegetal

O gênero *Bacillus*, pertencente à família Bacillaceae, é reconhecido como possivelmente o gênero mais antigo e diversificado entre as bactérias (CONTESIANI *et al.*, 2017). Elas podem ser categorizadas com base na morfologia do esporo e do esporângio em três grupos distintos (GOMES, 2013): Grupo 1, composto por bacilos Gram-positivos com esporo central ou terminal, forma esférica ou ovoide, sem deformação da célula; Grupo 2, constituído por espécies Gram-variáveis apresentando esporo oval, central ou terminal, resultando na deformação da parede celular; Grupo 3, caracterizado por bacilos Gram-variáveis exibindo um esporo esférico terminal ou subterminal, causando deformação na parede celular. Destacam-se como grupos mais representativos, *B. cereus* e o grupo *Bacillus subtilis*, com relevância nos âmbitos médico, biotecnológico e industrial (VILARREAL-DELGADO *et al.*, 2018).

O gênero *Bacillus* é reconhecido como produtor de fitormônios (SRINIVASAN *et al.*, 1996; BUCHENAUER, 1998). *B. cereus* comprovadamente é capaz de sintetizar ácido giberélico, AIA, zeatina e giberelinas (KARADENIZ *et*

al., 2006; JOO *et al.*, 2005). As espécies de *Bacillus* desempenham um papel crucial no desenvolvimento de bioinsumos, atuando como agentes de biocontrole e biofertilizantes em sistemas agrícolas. Cepas não patogênicas de *B. cereus* apresentam várias aplicações (ZHANG *et al.*, 2022), incluindo ação de biofertilizantes e biorremediação de solos contaminados com metais pesados. Estudos ressaltam o impacto positivo dessas bactérias, aplicadas via tratamento de sementes de milho ou diretamente no solo, resultando em eficiência superior na absorção de nutrientes e substancial aumento na biomassa das plantas (LIZÁRRAGA-SÁNCHEZ *et al.*, 2015; NGUYEN *et al.*, 2017; HUSSAIN *et al.*, 2020; LIN *et al.*, 2020). Outros estudos demonstram que as plantas de milho, ao interagirem com bactérias do gênero *Bacillus* em condições limitadas de água, obtêm benefícios significativos no crescimento e desenvolvimento, levando a uma melhor área foliar, tamanho da planta e massa seca da planta inteira (KAVAMURA *et al.*, 2013; AKIRINLOLA *et al.*, 2018; GOMES *et al.*, 2020; LOPES *et al.*, 2021).

Em culturas como o tomate, a inoculação de *B. cereus* resultou em um aumento na biomassa, ao mesmo tempo em que limitou a proliferação de patógenos, evidenciando a ativação da Indução Sistêmica de Resistência (ISR) (NIU *et al.*, 2012). Na cultura de feijão-guandu e soja também foi observado o potencial na promoção do crescimento (TILAK *et al.*, 2006; BULLIED *et al.*, 2002). Além disso, as bactérias presentes na rizosfera possuem notável capacidade de produzir esporos resilientes, contribuindo para a sobrevivência das plantas em ambientes sujeitos a estresses abióticos (REZENDE *et al.*, 2022; POLANCA, 2020). Além disso, essa característica facilita a aplicação do bioinsumo e a persistência desses agentes no solo por extensos períodos sem a necessidade de condições especiais de armazenamento (TORDIN, 2023).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Material vegetal

Duas linhagens (S₇) de milho-pipoca L61 e L76 e seu respectivo híbrido simples WS01 foram cultivados em casa de vegetação. As linhagens foram previamente avaliadas por Kamphorst *et al.* (2018) e classificadas como susceptível e tolerante ao déficit hídrico, respectivamente. Já o híbrido simples

provém do estudo de Lima *et al.* (2019) e é classificado como tolerante ao déficit hídrico, tendo sido registrado no Ministério de Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), nº de registro 46965, com denominação de “UENF WS01” (LIMA *et al.*, 2021).

4.2 Seleção da bactéria e preparação do inóculo

Previamente, 22 cepas bacterianas foram inoculadas previamente em plântulas de milho-pipoca e avaliadas em condições de déficit hídrico e de irrigação adequada. Entre essas, a cepa de bactéria *B. cereus* (UENF LMS 71) foi identificada como a mais eficaz em melhorar as características morfológicas e fisiológicas das plantas submetidas ao estresse hídrico (SANTOS, no prelo). A cepa bacteriana UENF LMS 71 foi isolada de uma cultivar de milho (SHS 5050) por Santos *et al.* (2021) e pertence a coleção do Laboratório de Biologia Celular e Tecidual da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

Para a obtenção do inóculo da bactéria *B. cereus*, a cepa bacteriana foi inoculada por meio de plaqueamento, em placas de Petri, contendo meio sólido DYGS (Dextrose Yeast Glucose Sucrose), utilizando uma alça de platina calibrada (RODRIGUES NETO, 1986). Posteriormente, as placas foram incubadas por três dias na estufa a uma temperatura de 30 °C, conforme metodologia descrita por Dobereiner *et al.* (1995) e Amaral *et al.* (2022).

O pré-inóculo foi obtido em meio líquido DYGS, utilizando uma alça bacteriológica para transferir a bactéria de uma colônia em Placa de Petri para um tubo de ensaio. A bactéria foi agitada por 24 horas a 30 °C em 180 rpm em um agitador orbital. O inóculo foi preparado com 150 µL do pré-inóculo em 100 mL de DYGS, mantido nas mesmas condições. Após 24 horas, a leitura de densidade óptica foi realizada a 600 nm, em espectrofotômetro, visando alcançar uma concentração de $1,8 \times 10^9$ unidades formadoras de colônia (UFC mL⁻¹).

4.3 Preparo das sementes

As sementes das linhagens L76, L61 e do híbrido WS01 foram submetidas a um processo de desinfestação com hipoclorito de sódio (NaOCl) a 3% durante 3 minutos, seguido por uma imersão em álcool 70% durante 2 minutos. Após lavagem com água destilada e desinfestação, as sementes foram

embebidas em água destilada por 5 horas. Na pré-germinação, as sementes foram dispostas em papéis *germitest* (CIENLAB, Campinas, Brasil) umedecidos e levadas à câmara de germinação BOD a 30 °C por 24 horas. Após a germinação, as sementes foram semeadas, e 1 mL da bactéria UENF LMS 71 foi aplicado em cada semente por tubo a ser inoculado.

4.4 Condições de crescimento e experimentais

O experimento foi realizado em casa de vegetação na UENF, situada na Unidade de Apoio Experimental, em Campos dos Goytacazes – RJ (Latitude: 21° 45' 16" S, Longitude: 41° 19' 28" O, 17 m acima do nível do mar). O delineamento experimental foi em blocos completos casualizados em fatorial simples, combinando genótipos (L61, L76 e WS01) e tipo de inoculação (com e sem), com três repetições. Para tanto, foram utilizados tubos de PVC com 10 cm de diâmetro e 1,50 m com substrato contendo 70% de substrato comercial Basaplant e 30% de perlita. Foi aplicado 1 mL do inóculo contendo a bactéria LMS 71 sobre as sementes dos tubos com bactéria (tratamento), enquanto os tubos sem bactérias (controle) receberam 1 mL do meio branco (não inoculado). Foi utilizada solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), meia força, ofertada via irrigação, todos os dias até o final do experimento (69 dias após semeadura), de acordo com a demanda da planta e a capacidade de água no substrato do tubo.

Os genótipos inoculados e não inoculados foram expostos a condição de déficit hídrico do solo (WS) que foi imposta por meio da suspensão da irrigação, aos 24 dias após o plantio (DAP). Após 15 dias da suspensão da irrigação, os tubos gradativamente foram baixando o potencial hídrico e chegaram a 40% da sua capacidade de retenção de água no substrato, e permaneceram nessa condição por mais 29 dias.

Para estimar a capacidade de campo, o substrato de cada tubo foi regado com água em abundância e deixado por 72 horas sob percolação para que fosse drenado o excesso. Paralelamente, amostras do substrato foram secas em estufa a 70 °C por 72 horas. A capacidade de cada tubo foi estimada pela diferença entre o peso molhado (após drenagem do excesso) e o substrato seco (antes da saturação). Os tubos foram pesados e irrigados em intervalos de 2 dias para manter a respectiva capacidade. O peso das plantas foi

desconsiderado do cálculo da capacidade de água dos tubos.

Ao longo do experimento, foram medidos a temperatura, a umidade relativa do ambiente e a radiação fotossintética ativa (Figura 1), com o auxílio da miniestação experimental WatchDog (A-Series Loggers, Spectrum Technologies Inc., Aurora, EUA).

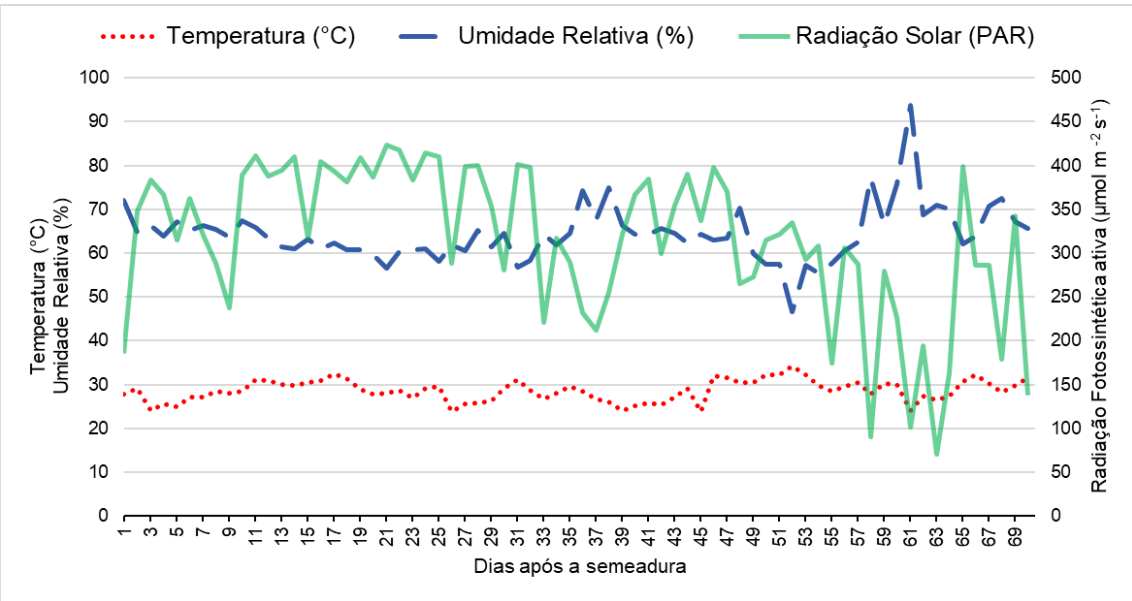


Figura 1. Gráfico de temperatura, umidade relativa do ar e radiação solar. Condições experimentais entre 1 e 69 dias após a semeadura de três genótipos de milho-pipoca contrastantes para tolerância à seca (L61 e L76), e seu híbrido (WS01) submetidos à duas condições de inoculação da bactéria *B. cereus* (controle e inoculado). No gráfico médias de temperaturas (°C), umidade relativa (%) e radiação fotossintética ativa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) são mostradas ao longo dos dias após semeadura.

Durante o experimento, a temperatura (°C) média por dia variou de 23,76 a 31,97 e a umidade relativa do ar (%) de 46,60 a 93,80 e radiação fotossintética ativa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) teve uma máxima de 423,08 e mínima de 71 (Figura 1).

Durante as avaliações, a radiação fotossinteticamente ativa foi fixada em 1.500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a umidade relativa esteve entre 55% e 60% e a temperatura foi de 25 °C, a concentração de CO₂ foi de 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$.

4.5 Características avaliadas

4.5.1 Avaliações de crescimento e massa seca dos órgãos vegetais

Com o auxílio de uma régua foi medida a altura da planta (AP, cm) da superfície do substrato no tubo até a base da última folha completamente expandida. O diâmetro do colmo (DC – cm), foi medido com auxílio de um

paquímetro digital. Após obtidos a largura (cm) e o comprimento da folha (cm), foi obtida a área foliar (cm²) de acordo índice proposto por Ferreira, Mello e Junior (2021).

Ao final do experimento, para calcular a matéria seca e fresca, foi feito o desbaste da folha e do colmo, para posterior estudo da biomassa de cada parte. As folhas e os colmos frescos foram pesados, envelopados e colocados em estufa de circulação forçada de ar a 70 °C, até atingirem o peso constante. Em seguida, à pesagem foi feita em balança analítica de precisão.

4.5.2 Características radiculares

O material radicular foi separado em 5 partes iguais (RB) desde a superfície, na inserção do colmo, até a base dos tubos, com porções de 0 a 30 cm, 30 a 60 cm, 60 a 90 cm, 90 a 120 cm e 120 a 150 cm. Após a remoção dos substratos de seus respectivos tubos, as raízes foram lavadas com água, levemente secas e armazenadas em geladeira (4 °C) para subsequente processamento.

As secções radiculares foram armazenadas em envelopes de papel e levadas à estufa de circulação (modelo MA037, Marconi, Piracicaba, SP, Brasil) a 70 °C até atingirem o peso constante. A massa seca radicular foi quantificada separadamente para cada uma das cinco seções.

4.5.3 Avaliações de pigmentos foliares e densidade estomática

Os pigmentos foliares foram quantificados no terço médio da última folha desenvolvida por completo, uma vez por semana durante todo o experimento. Em se tratando dos pigmentos foliares, o teor relativo de clorofila (Chl), antocianinas (Anth), e de flavonoides (Flv) bem como o índice do balanço de nitrogênio (NBI) foram por meio do medidor portátil Dualex® (modelo FORCE-A, Orsay, France).

Em se tratando da contagem dos estômatos, cerca de 1 cm² a face epidérmica adaxial e abaxial do terço-médio da última folha desenvolvida, especificamente entre a nervura central e a extremidade, foi coberta com esmalte de unha transparente e, após secagem por 10 min, a camada de esmalte seca foi removida com fita adesiva e transferida para uma lâmina de vidro. A contagem

do número de estômatos (e) foi realizada em câmera microscópica digital (Moticam A5, 5MP Live Resolution, Motic, Barcelona, Catalunha, Espanha), com lente objetiva de 40 X. Cada réplica foliar (adaxial e abaxial) foi contada em três campos do microscópio. A metodologia foi de acordo com Radaglou e Jarvis (1990). As densidades dos estômatos abaxial e adaxial (DSAB e DSAD, estômatos em mm^{-2}) foram calculadas pelas equações em que: $DS = \frac{e}{0,63}$, de modo que, $0,63 \text{ mm}^{-2}$ é a área de superfície do microscópio, e o raio é 0,22 mm.

4.5.4 Trocas gasosas foliares, *quenching* não-fotoquímico e rendimento quântico do PSII

Aos 69 dias após a emergência, antes da colheita do experimento foram realizadas as medidas das trocas gasosas foliares, da transpiração cumulativa bem como a densidade estomática das plantas. A taxa fotossintética líquida (A), taxa de transpiração (E), a condutância estomática (g_s) e concentração interna de CO_2 (C_i) foram obtidas utilizando um analisador de gás infravermelho de sistema aberto (IRGA, *Infrared Gas Analyser*, LI-6400, LI-COR, Lincoln, NE, USA), equipado com uma fonte de luz (6400-40 LCF, LI-COR) entre as 10h00min e 14h00min, no terço médio da última folha completamente desenvolvida. O *quenching* não-fotoquímico (NPQt) foi medido com auxílio do MultispeQ v1.0 (Fotosynq Inc., East Lansing, Michigan, EUA) e o rendimento quântico do PSII (F_v/F_m) foi medido com o FluorPen FP 110 (FluorPen, Drasóv, Republica Checa).

4.6 Cálculos das diferenças percentuais entre condições

As diferenças percentuais (%) de cada característica, considerando a comparação entre os tipos de inoculação (tratamento e controle) foram determinadas utilizando a seguinte fórmula: $100 - \left[\left(\frac{Y_{in}}{Y_{con}} \right) \cdot 100 \right]$ em que: Y_{in} representa a média geral da característica na condição de inoculação com *B. cereus*; e Y_{con} a média geral da característica na condição de controle (sem inoculação).

4.7 Análises estatísticas

Foram realizadas análises de variância de fatorial simples e testes de

médias Tukey 5%. As fontes de variação de genótipo (G) e tipo de inoculação (com ou sem bactéria) (T) e suas interações foram analisadas por meio de análise de variância fatorial, com o suporte do programa computacional Prism GraphPad (versão 9.0.0, Insightful Science, Califórnia, EUA).

As análises de variância fatorial foram calculadas pela seguinte fórmula: $Y_{ijk} = \mu + G_i + B/A_{jk} + A_j + GA_{ij} + \varepsilon_{ijk}$. Sendo: Y_{ijk} = à observação do i-ésimo genótipo, no j-ésimo tipo de inoculação e no k-ésimo bloco; μ = constante geral; G_i : efeito fixo do i-ésimo genótipo; B/A_{jk} = é o efeito do k-ésimo bloco no j-ésimo ambiente; A_j = o efeito fixo do j-ésimo ambiente; GA_{ij} = o efeito fixo da interação entre o i-ésimo genótipo com o j-ésimo ambiente; e ε_{ijk} = erro aleatório experimental médio associado à observação Y_{ijk} , sendo NID (0, σ^2).

As significâncias utilizadas foram: <0,0001% (****), 0,0002% (***), 0,002% (**), 0,05% (*) e não significativo (^{ns}). O teste de média Tukey 5% foi realizado para cada uma das características dos genótipos de milho-pipoca.

5 RESULTADOS

5.1 Impacto de *B. cereus* sobre a morfologia vegetal

Para análise de variância conjunta, o efeito de genótipo apresentou diferenças significativas para todas as características (Figura 2). O efeito da inoculação (WC) não foi significativo para nenhuma característica. No entanto, a interação entre genótipos x inoculação (G*WC) mostrou diferença significativa para massa seca da folha e massa seca do colmo.

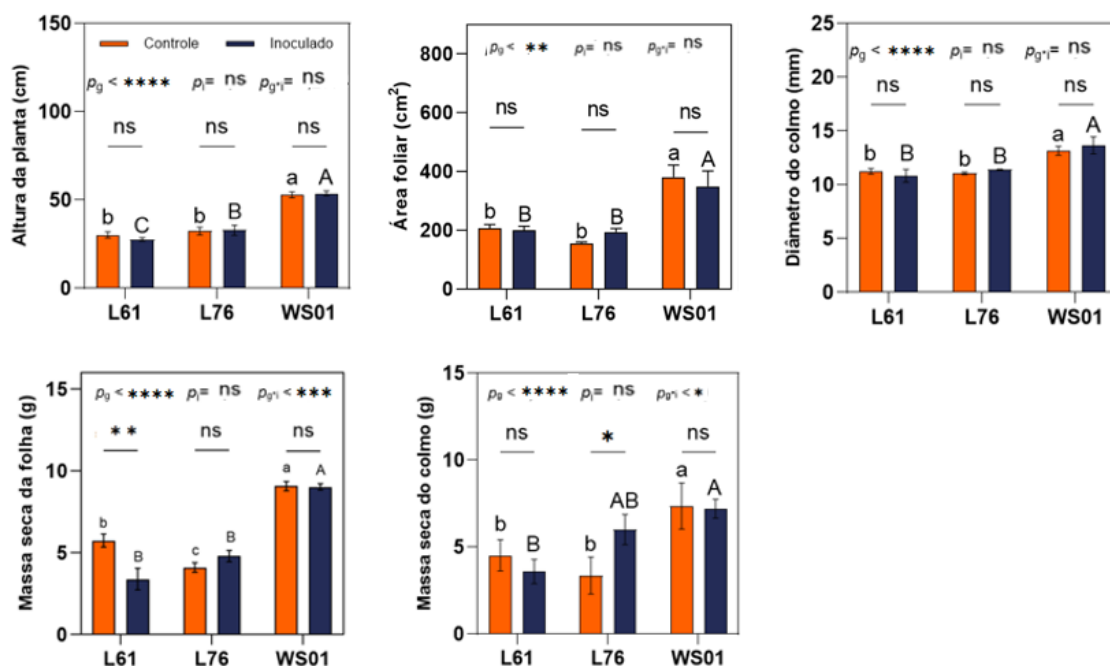


Figura 2. Médias e desvio-padrão de características morfológicas de genótipos contrastantes de milho-pipoca no déficit hídrico. Estimativas de médias e desvios-padrão de características morfológicas da parte aérea de duas linhagens de milho-pipoca contrastantes para tolerância à seca (sendo L61 sensível e L76, tolerante) e seu híbrido (WS01), submetidas ao estresse hídrico e em condições sem (controle) e com (inoculado) inoculação com bactéria *B. cereus*, no estágio de florescimento (R1), em casa de vegetação. Os p valores são referentes a análise de variância conjunta, considerando os fatores genótipos (p_g), inoculação (p_i) e sua interação (p_{gi}). Significância a $<0,0001\%$ (****), $0,0002\%$ (***), $0,002\%$ (**), $0,05\%$ (*) e não significativo (ns) correspondem a significância de cada genótipo na comparação entre as duas condições de inoculação avaliadas. As letras são referentes ao teste de média para genótipos dentro de cada condição de inóculo, genótipos seguidos de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na análise de variância individual, tanto a condição controle quanto a condição inoculada apresentaram diferença significativa para o efeito de genótipo. Comparando os genótipos dentro das condições avaliadas, em ambas, o híbrido apresentou as melhores médias para todas as características morfológicas. Apenas para a característica massa seca do colmo na condição inoculado o híbrido não diferiu estatisticamente da L76 (Figura 2). Além disso, a linhagem L76 apresentou melhor média que a linhagem L61 para altura de planta, enquanto a linhagem L61 apresentou melhor média que a linhagem L76 para massa seca de folha.

Avaliando as diferenças entre condições de inoculação, não foram identificadas variações significativas no híbrido WS01 para as características morfológicas da parte aérea (Figura 2). No entanto, o genótipo L61 apresentou diferença significativa na massa seca da folha, exibindo uma diminuição de 47,7% na condição inoculada. A linhagem L76, por sua vez, apresentou diferença

significativa na massa seca do colmo, exibindo um aumento de 43,8% na condição inoculada (Figura 2).

No que concerne à massa seca das raízes, na análise de variância conjunta, houve efeito significativo de genótipo e da interação genótipos x inoculação ($G \times WC$) em todas as cinco secções avaliadas. O efeito de inoculação apresentou diferenças significativas para massa seca das secções (0-30cm), (30-60cm) e (90-120cm) (Figura 3).

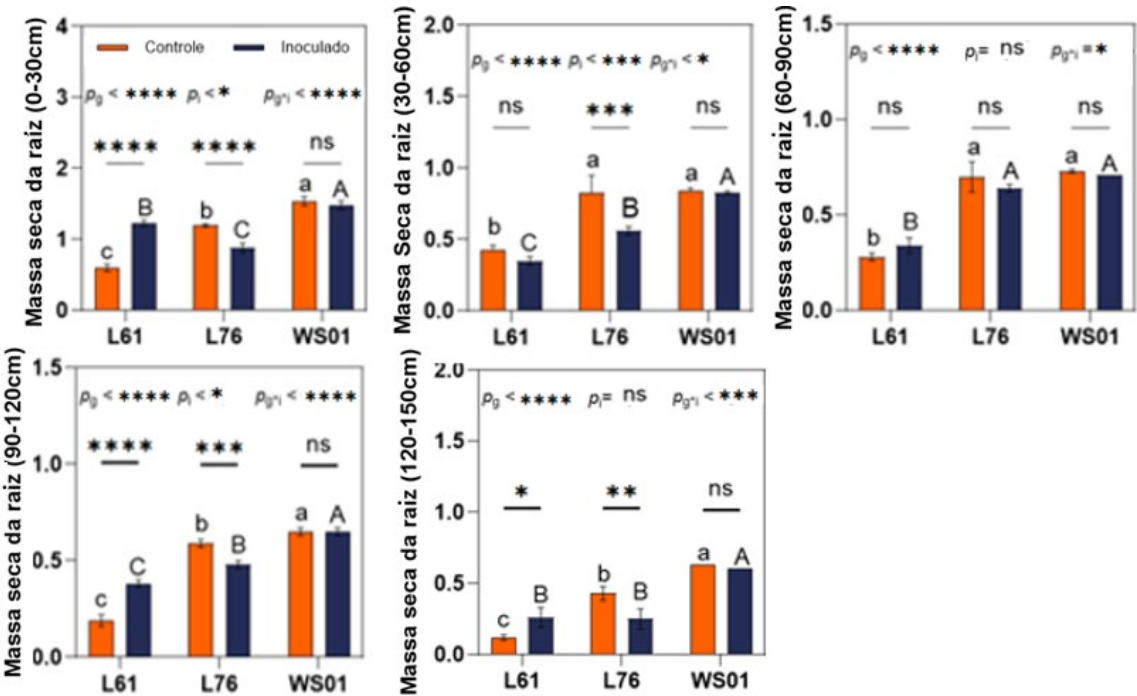


Figura 3. Médias e desvio-padrão da massa seca da raiz de genótipos contrastantes de milho-pipoca no déficit hídrico. Características relacionadas à massa seca da raiz em diferentes secções de substrato avaliadas em duas linhagens de milho-pipoca contrastantes para tolerância à seca (sendo L61 sensível e L76, tolerante) e seu híbrido (WS01), submetidas ao estresse hídrico em duas condições de inoculação da bactéria *B. cereus*, no estágio de R1 folhas completamente expandidas (R1), em casa de vegetação. Secção: 0-30cm; secção: 30-60cm; secção: 60-90cm; secção: 90-120cm; secção: 120-150cm. Genótipos seguidos de letra maiúscula correspondem aos tratamentos inoculados, e genótipos seguidos de letras minúsculas correspondem aos tratamentos controle. Genótipos seguidos por letras iguais não diferem para as condições e genótipos seguidos por letras diferentes diferem para as condições. Os p valores são referentes a análise de variância conjunta, considerando os fatores genótipos (p_g), inoculação (p_i) e sua interação ($p_{g \times i}$). Significância a $<0,0001\%$ (****), $0,0002\%$ (***), $0,002\%$ (**), $0,05\%$ (*) e não significativo (ns) correspondem a significância de cada genótipo na comparação entre as duas condições de inoculação avaliadas. As letras são referentes ao teste de média para genótipos dentro de cada condição de inóculo, genótipos seguidos de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na análise de variância individual, tanto a condição controle quanto a condição inoculada apresentaram diferenças significativas para massa seca da raiz das cinco secções (Figura 3). Ao comparar os genótipos dentro das condições avaliadas, em ambas, o híbrido apresentou as melhores médias em

todas as secções da raiz. Todavia, na massa seca da raiz na secção 30-60cm no controle e na secção 60-90cm em ambas as condições, o híbrido não diferiu estatisticamente da linhagem L76 (Figura 3). Além disso, a linhagem L76 apresentou melhor média que a linhagem L61 na massa seca da raiz na secção 0-30 cm, 90-120 cm e 120-150cm no controle e nas secções 0-30cm, 30-60cm e 60-90 cm no inoculado. Por outro lado, a linhagem L61 apresentou melhor média que a linhagem L76 na massa seca da raiz na secção 0-30cm do inoculado.

Avaliando as diferenças entre condições de inoculação, não foram detectadas alterações significativas na massa seca da raiz em nenhuma seção no híbrido WS01. O genótipo L61 apresentou diferenças significativas entre as condições para massa seca nas seções 0-30 cm, 90-120 cm e 120-150cm, com aumentos de 51,3%, 50,4% e 52,1%, respectivamente, na condição inoculada. Por outro lado, o genótipo L76 apresentou diferenças significativas para as seções 0-30 cm, 30-60 cm, 90-120 cm e 120-150 cm, apresentando reduções na condição inoculada de 35,9%, 49,1%, 23,6% e 76%, respectivamente.

5.2 Impactos da inoculação sobre o conteúdo de pigmentos foliares e Densidade estomática

Para a análise de variância conjunta, os efeitos de genótipo e da inoculação apresentaram diferenças significativas para todas as características de conteúdo de pigmentos foliares e densidades estomáticas. A interação genótipos x inoculação (L*WC) foi significativa para os teores de antocianinas e flavonoides, além da densidade estomática abaxial e adaxial (Figura 4).

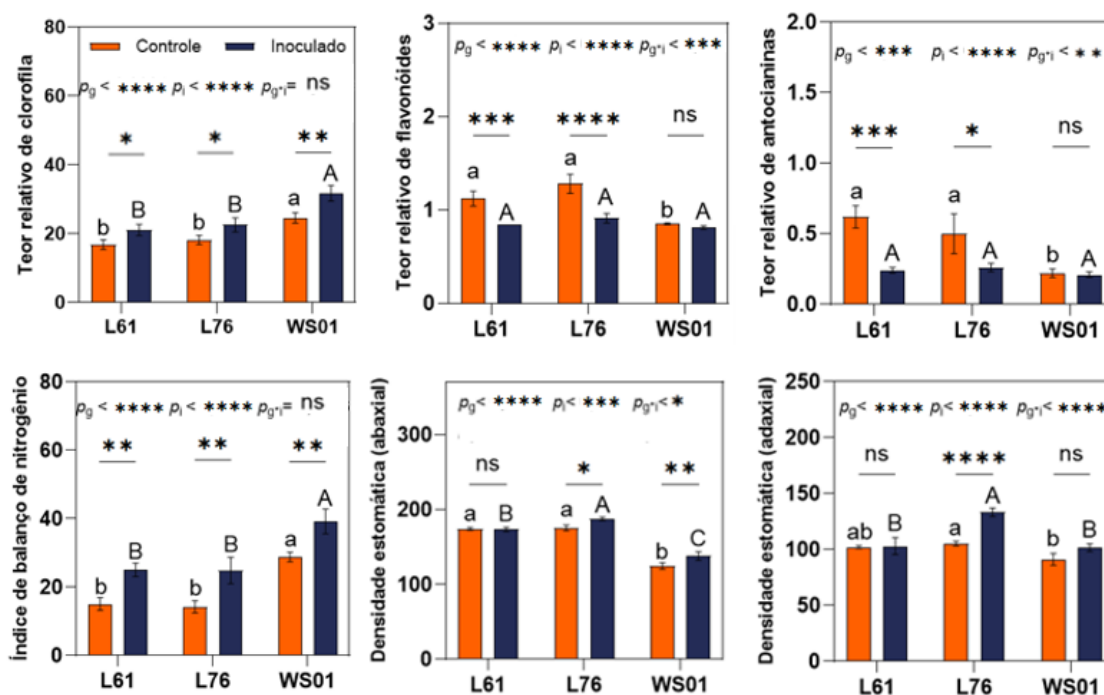


Figura 4. Médias e desvio-padrão de pigmentos fotossintéticos e densidade estomática de genótipos contrastantes de milho-pipoca no déficit hídrico. Características relacionadas ao conteúdo de pigmentos fotossintéticos e densidade estomática avaliados nas folhas de duas linhagens de milho-pipoca contrastantes para tolerância à seca (sendo L61 sensível e L76, tolerante) e seu híbrido (WS01), submetidas ao estresse hídrico em duas condições de inoculação da bactéria *B. cereus*, no estágio de florescimento (R1), em casa de vegetação. Genótipos seguidos de letra maiúscula correspondem aos tratamentos inoculados, e genótipos seguidos de letras minúsculas correspondem aos tratamentos controle. Genótipos seguidos por letras iguais não diferem para as condições e genótipos seguidos por letras diferentes diferem para as condições. Os p valores são referentes a análise de variância conjunta, considerando os fatores genótipos (p_g), inoculação (p_i) e sua interação ($p_{g \times i}$). Significância a $<0,0001\%$ (****), $0,0002\%$ (***), $0,002\%$ (**), $0,05\%$ (*) e não significativo (ns) correspondem a significância de cada genótipo na comparação entre as duas condições de inoculação avaliadas. As letras são referentes ao teste de média para genótipos dentro de cada condição de inóculo, genótipos seguidos de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na análise de variância individual, todas as características apresentaram diferença significativa na condição controle. Todavia, na condição inoculada todas as características apresentaram diferenças significativas, exceto teores de antocianinas e flavonoides (Figura 4). Ao comparar os genótipos dentro das condições avaliadas, o híbrido WS01 apresentou a melhor média para teor de clorofila e índice de balanço de nitrogênio em ambas as condições. Por outro lado, as linhagens L61 e L76 apresentaram valores estatisticamente superiores ao híbrido para teor de flavonoides, antocianinas, densidade estomática abaxial e densidade estomática adaxial na condição controle. Na condição inoculada, a linhagem L76 apresentou melhores médias que os demais genótipos para a densidade estomática abaxial e adaxial (Figura 4). Além disso, a linhagem L61

apresentou melhor média que o híbrido WS01 para a densidade estomática abaxial.

Avaliando as diferenças entre condições de inoculação, foram identificadas variações significativas no híbrido WS01 para as características teor clorofila, índice de balanço de nitrogênio e densidade estomática abaxial, com aumentos de 22,5%, 26,5% e 9,5%, respectivamente, devido à inoculação (Figura 4). A linhagem L61 apresentou diferenças significativas entre as condições para todos os pigmentos foliares, sendo que a inoculação com *B. cereus* proporcionou aumento de 20,2% no teor clorofila e 39,8% no índice de balanço de nitrogênio, além de redução de 33,4% no teor de flavonoides e 159,8% no teor de antocianina (Figura 4). A linhagem L76 apresentou diferenças significativas para todas as características. Nesta linhagem, a inoculação com *B. cereus* proporcionou aumento de 19,5% no teor clorofila, de 42,5% no índice de balanço de nitrogênio, de 6,5% na densidade dos estômatos abaxial e de 21% densidade dos estômatos adaxial, além de redução de 39,9% no teor de flavonoides e 91,6% no teor de antocianina (Figura 4).

5.3 Modificações causadas por *B. cereus* sobre as trocas gasosas foliares, *quenching* não-fotoquímico e no rendimento quântico do PSII

Na análise de variância conjunta, observou-se um efeito de genótipo com diferenças significativas para todas as características. O efeito da inoculação foi significativo apenas para rendimento quântico do PSII (F_v/F_m). A interação genótipos x inoculação (L^*WC) apresentou significância para taxa de transpiração, concentração interna de CO_2 , condutância estomática e *quenching* não-fotoquímico nas características avaliadas (Figura 5).

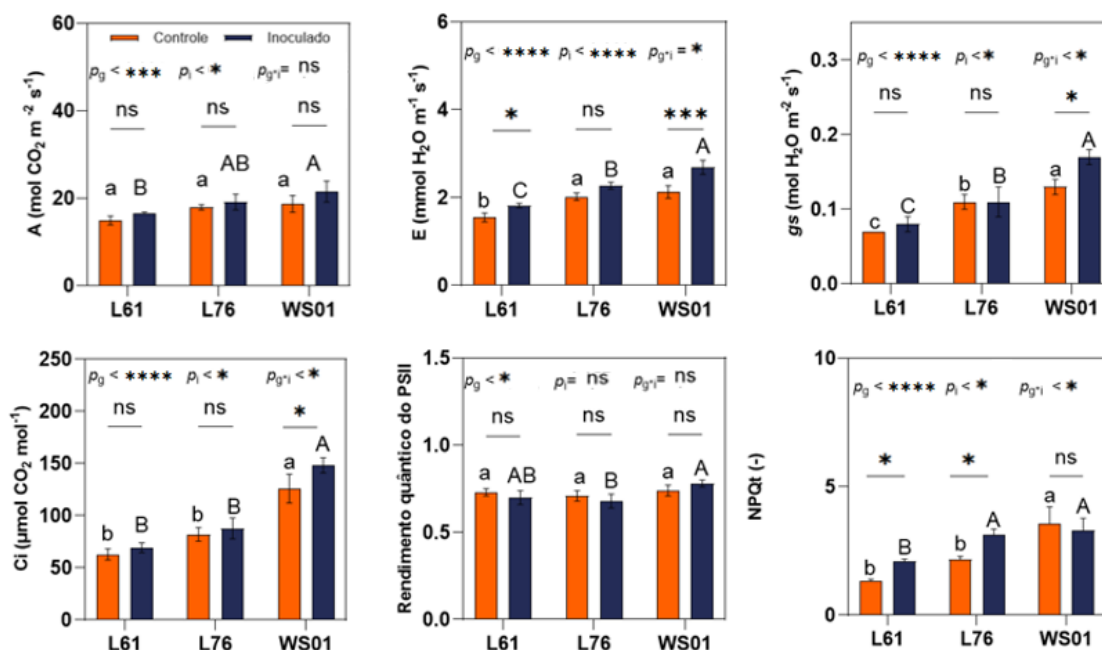


Figura 5. Médias e desvio-padrão de trocas gasosas, *quenching* não-fotoquímico e rendimento quântico do PSII de genótipos contrastantes de milho-pipoca no déficit hídrico. Características relacionadas às medidas de trocas gasosas foliares, *quenching* não-fotoquímico e rendimento quântico do PSII avaliados nas folhas de duas linhagens de milho-pipoca contrastantes para tolerância à seca (sendo L61 sensível e L76, tolerante) e seu híbrido (WS01), submetidas ao estresse hídrico em duas condições de inoculação da bactéria *B. cereus*, no estágio de florescimento (R1), em casa de vegetação. Genótipos seguidos de letra maiúscula correspondem aos tratamentos inoculados, e genótipos seguidos de letras minúsculas correspondem aos tratamentos controle. Genótipos seguidos por letras iguais não diferem para as condições e genótipos seguidos por letras diferentes diferem para as condições. A: taxa fotossintética líquida, E: taxa de transpiração, gs: condutância estomática, Ci: Concentração interna de CO₂, Fv/Fm: rendimento quântico do PSII e NPQt: *quenching* não-fotoquímico. Os *p* valores são referentes a análise de variância conjunta, considerando os fatores genótipos (*p_g*), inoculação (*p_i*) e sua interação (*p_{g*i*}*). Significância a <0,0001% (****), 0,0002% (***), 0,002% (**), 0,03% (*) e não significativo (ns) correspondem a significância de cada genótipo na comparação entre as duas condições de inoculação avaliadas. As letras são referentes ao teste de média para genótipos dentro de cada condição de inóculo, genótipos seguidos de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na análise de variância individual, todas as características apresentaram diferenças significativas em ambas as condições, exceto a taxa fotossintética líquida (A) e o rendimento quântico do PSII (Fv/Fm) na condição controle (Figura 5). Ao comparar os genótipos dentro das condições avaliadas, o híbrido apresentou as melhores médias para todas as características. Além disso, o híbrido não diferiu estatisticamente da linhagem L76 na taxa fotossintética líquida (A) em ambas condições, da taxa de transpiração (E) e rendimento quântico do PSII (Fv/Fm) na condição controle e do *quenching* não-fotoquímico (NPQt) na condição inoculada (Figura 5). Também não diferiu estatisticamente da L61 no rendimento quântico do PSII (Fv/Fm) em ambas condições, e da taxa

fotossintética líquida (A) na condição controle (Figura 5).

Avaliando as diferenças entre condições de inoculação, foram identificadas alterações significativas no híbrido WS01 para a taxa de transpiração (E), a concentração intercelular de CO₂ (Ci) e a condutância estomática (gs), com aumentos de 20,8%, 15,1% e 27,9%, respectivamente, devido à inoculação. A linhagem L61 apresentou diferenças significativas entre as condições na taxa de transpiração (E) e no NPQt, com aumento de 14,7% e 36,5%, respectivamente, devido a inoculação com *B. cereus*. Já a linhagem L76 apresentou diferenças significativas apenas no *quenching* não-fotoquímico (NPQt), com aumento de 30,6% na condição inoculação com *B. cereus* (Figura 5).

6 DISCUSSÃO

6.1 A inoculação com *B. cereus* provoca mudanças no crescimento de plantas de milho-pipoca em condição de seca?

Os resultados deste estudo demonstram que o efeito de genótipos de milho-pipoca apresentou diferenças significativas em todas as características morfológicas avaliadas, incluindo altura de plantas, área foliar, diâmetro de colmo, massa seca da folha e massa seca do colmo. A variação genética é um fator crucial que influencia a capacidade das plantas de responderem a diferentes condições ambientais e tratamentos (SANTOS *et al.*, 2023), incluindo a inoculação com microrganismos benéficos como *B. cereus* (WALTERS *et al.*, 2018).

Embora o efeito da inoculação com *B. cereus* não tenha sido significativo para nenhuma das características morfológicas na análise de variância conjunta, a tendência de valores superiores nas condições inoculadas, sugerindo que a bactéria pode ter um papel positivo, nas condições experimentais testadas. Isso pode ser atribuído à capacidade de *B. cereus* de promover o crescimento das plantas através de vários mecanismos, como a produção de fitohormônios, a solubilização de nutrientes (PICAZEVICZ, KUSDRA e MORENO, 2019; GOMES *et al.*, 2022; HATHURUSINGHE, AZIZOGLU e SHIN, 2024) e a indução de resistência sistêmica (KINSINGER *et al.*, 2003; NIE *et al.*, 2017; SINGH *et al.*, 2019; HANAKA *et al.*, 2021).

A interação entre genótipos e inoculação (G*WC) mostrou-se

significativa para a massa seca da folha e a massa seca do colmo. Este resultado indica que a resposta dos genótipos à inoculação não é uniforme, e que alguns genótipos podem se beneficiar mais da presença de *B. cereus* do que outros. Especificamente, a linhagem L61 exibiu uma diminuição significativa de 47,7% na massa seca da folha sob a condição inoculada. Esta redução pode ser um indicativo de uma possível alocação de recursos para outras partes da planta (OSAKABE, SHINOZAKI e TRAN, 2014; BIELACH e TOGNETTI *et al.*, 2017). Por outro lado, a linhagem L76 mostrou um aumento significativo de 43,8% na massa seca do colmo na condição inoculada, sugerindo uma resposta positiva à inoculação com *B. cereus*. Este aumento pode ser resultado da capacidade de *B. cereus* melhorar a absorção de água e nutrientes, especialmente sob condições de déficit hídrico, permitindo que a planta mantenha ou até aumente seu crescimento vegetativo (LOPES *et al.*, 2021).

Embora *B. cereus* não tenha mostrado efeitos significativos no híbrido e de forma isolada, a interação com determinados genótipos, como L76, pode ser explorada para melhorar a resiliência e produtividade das plantas em condições de déficit hídrico. A diminuição da biomassa é uma das características agrônômicas afetadas pelo estresse e que influencia no rendimento das plantas (HANAKA *et al.*, 2021). Como a L76 teve um aumento na massa seca do colmo, essa linhagem pode ser utilizada para seleção de genótipos superiores.

O híbrido WS01 apresentou as melhores médias para todas as características morfológicas em ambas as condições avaliadas, refletindo sua maior vigorosidade em comparação com as linhagens genitoras. Este resultado corrobora com a hipótese de que híbridos tendem a apresentar vigor híbrido (heterose), manifestando características superiores devido à combinação genética das linhagens genitoras (BIRCHLER *et al.*, 2010; KAMPHORST *et al.*, 2022).

A raiz é um dos primeiros órgãos a perceber a seca no solo e se adapta em escala morfoanatômica, fisiológica e molecular, permitindo que plantas desenvolvam mecanismos para resposta de tolerância ao ambiente estressante (AMTMANN *et al.*, 2022). A arquitetura do sistema radicular tem sido objeto de diversos estudos que buscam compreender as adaptações que favorecem a eficiência no uso da água ou tolerância à seca de diversas culturas (THORUP-KRISTENSEN *et al.*, 2020; LINCHY *et al.*, 2021; LINCHY *et al.*, 2021a).

A distribuição espacial das raízes no solo é moldada principalmente pelo comprimento, ramificação, ângulo e espessura das raízes e é caracterizado por uma série de características que vem sendo utilizadas na seleção de genótipos superiores para a condição de seca, quais sejam: profundidade das raízes, ângulo de crescimento, relação raiz e parte aérea, diâmetro das raízes, densidade de peso radicular, área de superfície, volume das raízes, dentre outros (SIDDIQUI *et al.*, 2021).

Os resultados deste estudo revelam insights importantes sobre o impacto de *B. cereus* na massa seca das raízes de diferentes genótipos de milho-pipoca sob condições de déficit hídrico. A análise de variância conjunta mostrou que o genótipo e a interação genótipos x inoculação (G*WC) influenciaram significativamente a massa seca das raízes em todas as seções avaliadas, enquanto o efeito de inoculação foi significativo em algumas seções específicas (0-30cm, 30-60cm e 90-120cm).

Esses achados estão alinhados com a literatura que descreve os efeitos promotores de crescimento de *Bacillus spp.* em várias culturas, especialmente em condições de estresse. Sati *et al.* (2023) destacam que *Bacillus spp.* são conhecidos por melhorar a resiliência das plantas ao estresse hídrico, provavelmente através da produção de fitohormônios e antioxidantes que auxiliam na adaptação ao estresse.

A variação na massa seca das raízes entre os genótipos e condições de inoculação sugere que *B. cereus* pode influenciar de maneira diferencial a distribuição da biomassa nas raízes. A redução significativa na massa seca das raízes de L76 em várias seções sob a condição inoculada pode indicar uma resposta adaptativa à presença de *B. cereus*. Enquanto *B. cereus* interagiu com o genótipo L76 aumentando a parte aérea, no genótipo L61 *B. cereus* provocou o aumento da massa seca radicular.

Esta resposta adaptativa pode estar relacionada com a produção de hormônios do crescimento como auxinas, citocinas, giberelinas, favorecerem o crescimento da parte aérea (ANKATI e PODILE, 2018) ou as bactérias podem estar ajudando as plantas a usarem a água e os nutrientes de forma mais eficiente, reduzindo a massa radicular, já que a planta pode obter o que precisa com um sistema radicular menor. Menores diâmetros radiculares, por exemplo, contribuem para maior condutância hidráulica, diminuindo a barreira hidráulica

apoplástica da água que entra no xilema (EISSENSTAT e ACHOR, 1999; COMAS *et al.*, 2012; ALAGOZ *et al.*, 2023; LI *et al.*, 2024).

Por outro lado, o aumento na massa seca das raízes de L61 nas seções de 0-30cm, 90-120cm e 120-150cm na condição inoculada pode indicar uma melhoria na absorção de nutrientes e água proporcionada pela interação com *B. cereus*. Esses resultados são suportados por estudos que mostram que microrganismos como *Bacillus spp.* podem melhorar a estrutura e função do sistema radicular, facilitando uma melhor absorção de água e nutrientes, mesmo em condições de baixa disponibilidade hídrica (ORTIZ-CASTRO *et al.*, 2020).

A análise de variância individual revelou que o híbrido WS01 apresentou as melhores médias de massa seca em todas as seções das raízes, destacando sua superioridade em relação às linhagens L61 e L76 em termos de desenvolvimento radicular sob as condições testadas. Isso pode ser atribuído à combinação de características favoráveis herdadas dos genótipos genitores (MUKRI *et al.*, 2022), resultando em uma maior eficiência na utilização dos recursos e maior resiliência ao estresse hídrico.

No entanto, a falta de diferenças significativas na massa seca das raízes do híbrido entre as condições de controle e inoculada, sugere que a resposta à inoculação com *B. cereus* pode ser mais pronunciada em genótipos específicos, como L61 e L76. Isso é consistente com o conhecimento de que a eficácia de microrganismos promotores de crescimento pode variar amplamente entre diferentes genótipos de plantas devido a alteração de genes responsivos ao estresse (RADHAKRISHNAM, HASHEM e ABD-ALLAH, 2017); (ZONG *et al.*, 2020).

As linhagens genitoras podem possuir genes específicos que permitem uma melhor interação com *B. cereus*, mas esses genes podem não se expressar de forma tão eficaz no híbrido devido à segregação genética e à recombinação durante a formação do híbrido (MACKAY *et al.*, 2020).

6.2 Alterações no teor relativo de pigmentos foliares e na densidade estomática como resposta à inoculação com *B. cereus*

Estresses abióticos, como a limitação hídrica, provocam um desbalanço químico nas plantas, resultando na degradação de pigmentos foliares como a clorofila e na produção de pigmentos fotoprotetores acessórios, como

flavonoides e antocianinas (FAROOQ *et al.*, 2024). Em condições de limitação de água, ocorre o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), que causam desequilíbrio na quantidade de pigmentos fotossintéticos nos tecidos foliares (HUSSAIN *et al.*, 2018; NOCTOR, REICHELDT e FOYER, 2018).

As clorofilas são pigmentos essenciais no processo de fotossíntese, pois desempenham o papel de absorver e converter a luz solar em energia (ATP e NADPH) para as plantas (SARWAR *et al.*, 2020). Já os pigmentos acessórios atuam em diversos processos bioquímicos nas plantas como na sinalização de estresses bióticos e abióticos, além de atuarem na redução de danos oxidativos, sendo bem documentada sua importância no processo de eliminação de EROs (JAN *et al.*, 2023; AGLAVE e BARUAH, 2023; ALTAF *et al.*, 2024) e atuação na resposta subjacente a tolerância à seca (HASANUZAMMAN *et al.*, 2019; LAXA *et al.*, 2019; CERQUEIRA *et al.*, 2023).

A análise de variância conjunta mostrou que tanto o genótipo quanto a inoculação com *B. cereus* apresentaram diferenças significativas para todas as características de conteúdo de pigmentos foliares. A interação genótipos x inoculação foi significativa para os teores de antocianinas e flavonoides. Esses resultados estão em conformidade com estudos anteriores que demonstram a capacidade de microrganismos promotores de crescimento, como *Bacillus spp.*, de alterar os níveis de pigmentos foliares e melhorar a eficiência fotossintética sob estresse hídrico. Por exemplo, Aswhaty *et al.* (2017) e Rashid *et al.* (2022) relataram que a inoculação com *Bacillus* pode aumentar o teor de clorofila e a atividade fotossintética em várias culturas melhorando assim a tolerância ao estresse hídrico.

Observou-se que a inoculação com *B. cereus* provocou um aumento substancial no conteúdo relativo de clorofila em todos os genótipos. A redução na produção de pigmentos fotoprotetores, como flavonoides e antocianinas pode indicar maiores danos oxidativos causado pelo excesso de luz. Notou-se uma redução no teor de flavonoides e antocianinas nas linhagens sensível (L61) e tolerante (L76) quando inoculadas com *B. cereus*, enquanto o híbrido aumentou a clorofila e manteve os níveis de pigmentos fotoprotetores mais estáveis.

Desta forma, o híbrido apresentou menores danos à maquinaria fotossintética em comparação com as linhagens quando inoculado com *B. cereus*, uma vez que os pigmentos acessórios contribuem para a capacidade de

eliminação de EROs, protegendo a maquinaria celular contra danos oxidativos. Por consequência, há uma melhor preservação do sistema fotossintético e dos componentes celulares, o que resulta em uma maior capacidade de se reduzir os efeitos nocivos do déficit hídrico em comparação com as linhagens (DABRAVOLKI *et al.*, 2023).

A densidade estomática é um parâmetro fisiológico importante que influencia diretamente a transpiração e a troca gasosa nas plantas (HASANUZZAMAN, ZHOU e SHABALA, 2023). A análise mostrou que a inoculação com *B. cereus* afetou significativamente a densidade estomática abaxial e adaxial, especialmente na linhagem L76, que apresentou aumentos significativos na densidade estomática sob condição inoculada. Esses achados sugerem que *B. cereus* pode influenciar a abertura e a densidade dos estômatos, possivelmente modulando a resposta das plantas ao déficit hídrico.

A densidade estomática e a abertura e o fechamento dos estômatos podem ajudar as plantas a equilibrarem a perda de água com a necessidade de CO₂ para a fotossíntese, contribuindo para uma melhor adaptação ao estresse hídrico (HASANUZZAMAN *et al.*, 2019). Os fatores estomáticos não parecem ter contribuído substancialmente para a fotossíntese, mas sem dúvidas, foram cruciais para o aumento da transpiração, concentração interna de CO₂ e condutância estomática após a inoculação com *B. cereus* no híbrido WS01.

6.3 Alterações estomáticas e nas medidas de trocas gasosas foliares subjacentes à inoculação com *B. cereus*

Os resultados indicam que a inoculação com *B. cereus* pode influenciar de forma diferenciada as trocas gasosas foliares e o *quenching* não-fotoquímico em genótipos de milho-pipoca sob estresse hídrico. A análise de variância conjunta revelou que o genótipo teve um efeito significativo sobre todas as características avaliadas, sugerindo que as diferenças intrínsecas entre os genótipos desempenham um papel crucial na resposta ao estresse hídrico e a inoculação com *B. cereus*.

Embora o efeito da inoculação tenha sido significativo apenas para o rendimento quântico do PSII (Fv/Fm), a interação entre genótipos e inoculação (G*WC) mostrou significância para a taxa de transpiração (E), concentração intercelular de CO₂ (Ci), condutância estomática (gs) e *quenching* não-

fotoquímico (NPQt). Esses resultados sugerem que a resposta dos genótipos à inoculação com *B. cereus* é complexa e dependente da interação específica entre o genótipo e o tratamento.

Na análise individual, o híbrido WS01 destacou-se com as melhores médias para todas as características, exceto em alguns casos específicos, onde não diferiu estatisticamente de uma ou outra linhagem. Este resultado pode ser atribuído à maior capacidade do híbrido em lidar com condições adversas, possivelmente devido a uma combinação de vigor híbrido e melhor eficiência no uso de recursos, como evidenciado por Araus *et al.* (2010).

As linhagens L61 e L76 também mostraram respostas diferenciadas à inoculação. A linhagem L61 apresentou aumentos significativos na taxa de transpiração (E) e no *quenching* não-fotoquímico (NPQt) devido à inoculação, indicando uma possível melhoria na eficiência do uso da água e na proteção contra danos foto-oxidativos. Já a linhagem L76 apresentou aumento significativo no *quenching* não-fotoquímico (NPQt), sugerindo uma capacidade aprimorada de dissipar o excesso de energia sob estresse hídrico.

Estudos anteriores têm mostrado que a inoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCV), como *B. cereus*, pode melhorar a tolerância ao estresse hídrico ao influenciar as trocas gasosas e a eficiência do uso da água (FONSECA *et al.*, 2022). Os aumentos observados nas taxas de transpiração (E), concentração intercelular de CO₂ (Ci) e condutância estomática (gs) no híbrido WS01 devido à inoculação sugerem que *B. cereus* pode ajudar a manter a atividade fotossintética e a eficiência do uso da água sob estresse hídrico.

Além disso, a capacidade das linhagens L61 e L76 de responderem à inoculação com aumentos no *quenching* não-fotoquímico (NPQt) pode ser um mecanismo crucial para a dissociação de energia excessiva, prevenindo danos ao aparato fotossintético. Este efeito protetor das BPCV sob estresse hídrico tem sido documentado em várias culturas e pode representar uma estratégia promissora para o manejo do estresse hídrico em sistemas agrícolas (BATOOL *et al.*, 2020); (LUCAS *et al.*, 2023).

Em resumo, os resultados deste estudo ressaltam a importância das interações genótipo x ambiente x microorganismo na modulação da resposta ao estresse hídrico. A inoculação com *B. cereus* mostrou potencial para melhorar a

959 eficiência do uso da água e a proteção contra danos foto-oxidativos em genótipos
960 de milho-pipoca, com variações significativas entre os genótipos. Estes achados
961 podem contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes de
962 manejo do estresse hídrico, integrando o uso de BPCV em programas de
963 melhoramento de plantas, particularmente para a seleção de genótipos de milho-
964 pipoca mais resilientes ao estresse hídrico. A utilização de *B. cereus* como
965 inoculante pode ser uma estratégia eficaz para melhorar o desempenho de
966 cultivares de milho-pipoca sob condições de déficit hídrico, contribuindo para a
967 sustentabilidade e produtividade agrícola.

968 969 **6.4 Potencial de Uso de *B. cereus* como Promotor de Crescimento**

970 Os resultados deste estudo revelaram um potencial promissor do uso de
971 *B. cereus* como agente promotor de crescimento em milho-pipoca sob condições
972 de estresse hídrico. Observamos que a inoculação com *B. cereus* impactou
973 positivamente várias características morfológicas, fisiológicas e bioquímicas das
974 plantas.

975 Os dados indicaram que a inoculação com *B. cereus* não teve um efeito
976 significativo nas características morfológicas das plantas de milho-pipoca em
977 geral. No entanto, observamos um aumento significativo na massa seca do
978 colmo na linhagem L76 e uma redução significativa na massa seca das folhas na
979 linhagem L61 sob condições de inoculação. Esses resultados sugerem que *B.*
980 *cereus* pode modular o crescimento de diferentes partes da planta,
981 possivelmente ajustando a alocação de recursos sob estresse hídrico
982 (OJUEDRIE e BABALOLA, 2023).

983 Os impactos da inoculação foram particularmente notáveis nas
984 características radiculares. A inoculação com *B. cereus* resultou em um aumento
985 significativo na massa seca das raízes em várias seções, especialmente na
986 linhagem L61, que apresentou aumentos em quatro das cinco seções
987 avaliadas. Estes resultados indicam que *B. cereus* pode promover o
988 desenvolvimento radicular, o que é crucial para a absorção de água e nutrientes,
989 especialmente em condições de déficit hídrico (KULKOVA *et al.*, 2023).

990 A inoculação com *B. cereus* também influenciou o conteúdo de
991 pigmentos foliares e a densidade estomática. Observamos aumentos
992 significativos nos teores de clorofila e no índice de balanço de nitrogênio tanto

no híbrido WS01 quanto nas linhagens L61 e L76, além de um aumento na densidade estomática abaxial no híbrido e na L76, e na densidade estomática adaxial na L76. Além disso, houve uma redução nos teores de antocianinas e flavonoides, especialmente nas linhagens L61 e L76. Estas mudanças indicam uma melhoria na eficiência fotossintética e na saúde geral das plantas sob estresse hídrico (KHAN, BANO e BABAR, 2019); (HAN et al., 2021); (HASANUZZAMAN et al., 2019).

A análise das trocas gasosas e do *quenching* não-fotoquímico revelou que a inoculação com *B. cereus* aumentou significativamente a taxa de transpiração, a concentração interna de CO₂ e a condutância estomática no híbrido WS01, e o *quenching* não-fotoquímico nas linhagens. Além disso, o aumento no *quenching* não-fotoquímico em todas as linhagens indica uma melhoria na eficiência do uso da luz, sugerindo que *B. cereus* pode ajudar as plantas na proteção contra danos oxidativos mesmo sob condições de estresse (BATOOL et al., 2020; LUCAS et al., 2023).

6.5 Implicações para o Melhoramento de Plantas

Os achados deste estudo têm implicações significativas para o melhoramento de plantas, particularmente para a seleção de genótipos de milho-pipoca mais resilientes ao estresse hídrico. A utilização de *B. cereus* como inoculante pode ser uma estratégia eficaz para melhorar o desempenho de cultivares de milho-pipoca sob condições de déficit hídrico, contribuindo para a sustentabilidade e produtividade agrícola.

Estudos futuros devem focar na identificação dos mecanismos moleculares subjacentes aos efeitos observados e na avaliação do desempenho de *B. cereus* em diferentes condições ambientais e em outros cultivares. Além disso, a integração desta abordagem no melhoramento genético pode levar ao desenvolvimento de cultivares de milho-pipoca com maior tolerância ao estresse hídrico, beneficiando agricultores e melhorando a segurança alimentar.

7 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo evidenciam a complexidade das interações entre planta e microrganismo, indicando que o vigor híbrido não garante automaticamente um melhor sinergismo com microrganismos benéficos, como *B. cereus*. Isso ressalta a importância de considerar não apenas o desempenho agrônomo geral, mas também a capacidade específica de interação com esses microrganismos ao selecionar genótipos para melhoria de plantas que ocorrem resistência ao estresse hídrico.

A inoculação com *B. cereus* não provocou alterações significativas no crescimento das plantas no estágio de florescimento. No entanto, observou-se um aumento na massa radicular nas seções de 0-30cm, 90-120cm e de 120-150cm da raiz da linhagem L61, assim como um incremento na massa seca do colmo na linhagem L76. Além disso, foi constatado um aumento na concentração de clorofila e no índice de balanço de nitrogênio em todos os genótipos estudados.

As linhagens analisadas apresentaram incrementos no *quenching* não-fotoquímico, sugerindo a ocorrência de mecanismos de fotoproteção. Outro achado relevante foi o aumento na densidade estomática na face adaxial da folha na linhagem L76, bem como na face abaxial tanto da L76 quanto do híbrido avaliado. Também foi observado um aumento na taxa de transpiração, na concentração interna de CO₂ e na condutância estomática no híbrido.

O híbrido se destacou em todas as características morfológicas avaliadas em comparação com as linhagens genitoras L61 e L76, demonstrando sê-lo mais eficiente na utilização de recursos e com maior capacidade de absorção de água e nutrientes, indicando a geração F₁ como promissora para aumentar a resiliência ao estresse hídrico.

Esses resultados indicam que a inoculação com *B. cereus* tem potencial para melhorar a eficiência no uso da água e contribuir para a proteção contra danos oxidativos, com variações específicas entre os diferentes genótipos testados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGLAVE, R.H.; BARUAH, S. **Advanced Botany: Antioxidants in plants**, Edição.5, India: AkiNik, 2023.

AKINRINLOLA R. J.; YUEN G. Y.; DRIJBER R. A.; ADESEMOYE A. O. "Evaluation of *Bacillus* Strains for Plant Growth Promotion and Predictability of Efficacy by In Vitro Physiological Traits". **International Journal of Microbiology**, v. 2018, p. 11, out. 2018.

ALAGOZ, M.S.; ZAHRA, N.; KAMRANI, H.M.; LAJAYER, A.B.; NOBAHARAN, K.; ASTATKIE, T.; SIDDIQUE, M.H.K.; FAROOQ, M. Role of root hydraulics in plant drought tolerance. **Journal of Plant Growth Regulation**, v.42, p.6228-6243, 2023.

ALI, A.M.; AWAD, M.Y.M.; HEGAB, S.A.; GAWAD, A. M. A. E.; EISSA, M.A. **Effect of Potassium Solubilizing Bacteria (*Bacillus cereus*) on Growth and Yield of Potato**. Journal of Plant Nutrition. v.44, p.411–420, 2021.

ALTAF, M.M.; ASHAF, S.; KHALOFAH, A.; KHAN, N.Q.N.; ANWAR, M. Melatonin foliar application promoted anthocyanin accumulation boosted reactive oxygen scavenging by upregulating the key enzymes activities and genes expression of anthocyanin biosynthesis pathway in green and purple mustard under vanadium stress. **Scientia Horticulturae**, v.331, may. 2024.

AMARAL JÚNIOR, A. T.; GONÇALVES, L. S. A.; FREITAS, S. P.; CANDIDO, L. S.; VITTORAZZI, C.; PENA, G. F.; RIBEIRO, R. M.; SILVA, T. R. C.; PEREIRA, M. G.; SCAPIM, C. A.; VIANA, A. P.; CARVALHO, G. F. UENF 14: A new popcorn cultivar. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.13, n.3. oct. 2013.

AMARAL, M. B.; RIBEIRO, T. G.; ALVES, G. C.; COELHO, M. R. R.; MATTA, F. de P.; BALDANI, J. I.; BALDANI, V. L. D. The occurrence of rhizobacteria from Paspalum genotypes and their effects on plant growth. **Scientia Agricola**, 79. Piracicaba, Braz.v.79, n.2, 2022.

AMTMANN, A.; BENNETT, M. J.; HENRY, A. Root phenotypes for the future. **Plant Cell & Environment**, v.45, n.3, p.595–601, mar. 2022.

ANKATI, S.; PODILE, A. R. **Understanding plant-beneficial microbe interactions for sustainable agriculture**. Journal of Spices & Aromatic Crops, v. 27, n. 2. p. 93-105, 2018.

ARAÚJO, M. D. S. B.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SCHAEFER, C. E. R. **Phosphorus desorption affected by drying and wetting cycles in Ferralsols and Luvisols of Brazilian Northeast**. Archives of Agronomy and Soil Science, United Kingdom, v. 63, n. 2, p. 242-249, 2017.

ARAUS, J. L.; SÁNCHEZ, C.; CABRERA-BOSQUET, L. Is heterosis in maize mediated through better water use? **New Phytologist**, v. 187, n. 2, p. 392–406, jul. 2010.

- 1101 ARTEAGA, S.; YABOR, L.; DIEZ, M.J.; PROHENS, J.; BOSCAIU, M.; VICENTE,
1102 O. The use of proline in Screening for tolerance to drought and salinity in
1103 Common Bean genotypes. **Agronomy**, v.10, 2020.
- 1104 ASWATHY, K.; SRIDAR, R.; SIVAKUMAR, U. Mitigation of drought in rice by a
1105 phyllosphere bacterium *Bacillus altitudinis* FD48. **African Journal of**
1106 **Microbiology Research**, v.11, n.45, p.1614-1625, dec. 2017.
- 1107 BACKER, R.; ROKEM, J.S.; ILANGUMARAN, G.; LAMONT, J.; PRASLICKOVA,
1108 D.; RICCI, E.; SUBRAMANIAN, S.; SMITH, D. Plant Growth-Promoting
1109 Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to
1110 Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture. **Frontiers in**
1111 **Plant Science**, 2018.
- 1112 BALDANI, I.J.; REIS, M.V.; VIDEIRA, S.S.; BODDEY, H.L.; BALDANI, D.L.V. The
1113 art of isolating nitrogen-fixing bacteria from non-leguminous plants using N-free
1114 semi-solid media: a practical guide for microbiologists. **Plant Soil**, 384, p.413–
1115 431, nov. 2014.
- 1116 BATISTA, B. D.; LACAVA, T.P.; FERRARI, A.; SILVA, T.S.N.; BONATELLI, L.M.;
1117 TSUI, S.; MONDIN, M.; KITAJIMA, W.E.; PEREIRA, O.J.; AZEVEDO, L.J.;
1118 QUECINE, C.M. Screening of tropically derived, multi-trait plant growth-
1119 promoting rhizobacteria and evaluation of corn and soybean colonization ability.
1120 **Microbiological Research**, v. 206, p. 33-42, 2018.
- 1121 BATOOL, T.; ALI, S.; SELEIMAN, M.; NAVEED, H.N.; ALI, A.; AHMED, K.; ABID,
1122 M.; RIZWAN, M.; SHAHID, R.M.; ALOTAIBI, M.; AL-ASHKAR.; MUBUSHAR, M.
1123 Plant growth promoting rhizobacteria alleviates drought stress in potato in
1124 response to suppressive oxidative stress and antioxidant enzymes activities,
1125 Scientific reports, out. 2020.
1126
- 1127 BEGG, J. E.; TURNER, N.C. Déficits hídricos nas culturas. **Avanços**
1128 **Agronomia**, San Diego, v.28, p.161-217, 1976.
1129
- 1130 BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE; T. A.
1131 **Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of**
1132 **limiting stresses and beneficial root tip traits**. Journal of Experimental Botany,
1133 v.62, n. 1, p.59–68, 2011.
1134
- 1135 BIELACH, A.; TOGNETTI, V.B. Plants under Stress: Involvement of Auxin and
1136 Cytokinin. **International Journal of Molecular Sciences**, v.18, n.7, p. 427, 2017.
1137
- 1138 BIRCHLER, A.J.; CHUDALAYANDI, S.; VAIMAN, D.; VAITIA, A.R. Heterosis.
1139 **The plant cell**, v.22, n.7, p. 2105-2112, jul. 2010.
1140
- 1141 BRESSON, J.; VASSEUR, F.; DAUZAT, M.; LABADIE, M.; VAROQUAUX, F.;
1142 TOURAINE, B.; VILE, D. Interact to survive: *Phyllobacterium brassicacearum*
1143 improves Arabidopsis tolerance to severe water deficit and growth recovery.
1144 **PLoS ONE**, v. 9, n. 9, e107607, 2014. DOI:
1145 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107607>.

- 1146 BROUWER, R. Functional equilibrium: sense or nonsense?. Wageningen
1147 **Journal of Life Sciences**, v.31, n.4,1983.
1148
- 1149 BUCHENAUER, H. **Biological control of soilborne diseases by rhizobacteria.**
1150 Journal of Plant Disease and Protection, Pflanzenschutz, v.105, n.4, p. 329-348,
1151 1998.
- 1152 BULLIED, W. J.; BUSS, T. J.; VESSEY, J. K. **Bacillus cereus UW85 inoculation**
1153 **effects on growth, nodulation, and N accumulation in grain legumes: field**
1154 **studies.** Canadian Journal of Plant Science, Ottawa, v. 82, n. 2, p. 291-298,
1155 2002.
1156
- 1157 CAIRNS, J.E.; SONDER, K.; ZAIDI, H.P.; VERHULST, N.; MAHUKU, G.; BABU,
1158 R.; NAIR, K.S.; DAS, B.; GOVAERTS, B.; VINAYAN, T.M.; RASHID, Z.; NOOR,
1159 J.J.; DEVI, P.; SAN VICENTE, F.; PRASANNA, M.B. Maize production in a
1160 changing climate: impacts, adaptation, and mitigation strategies. **Advances in**
1161 **agronomy**, v.114, p. 1-58, 2012.
1162
- 1163 CAMPOS, M.J.A.; SANTOS, M.S.; NACARATH, F.F.R.I. Water stress in plants:
1164 a review. **Research, Society and Development**, v.10, n.15, 2021.
- 1165 CARVALHO, C.; VENCATO, A.Z.; KIST, B.B.; SANTOS, C.; REETS, E.R.; POLL,
1166 H.; BELING, R.R. **Anuário brasileiro do milho 2013.** Editora Gazeta Santa
1167 Cruz, Santa Cruz do Sul, p.128, 2013.
1168
- 1169 CERQUEIRA, J.V.A.; ANDRADE, M.T.; RAFAEL, D.D.; ZHU, F.; MARTINS,
1170 S.V.C.M.; NUNES-NESI, A.; BENEDITO, V.; FERNIE, R.A.; ZSOGON, A.
1171 Anthocyanins and reactive oxygen species: a team of rivals regulating plant
1172 development? **Plant Mol Biol**, v. 112, n. 4-5, p.213-223, jun. 2023.
1173
- 1174 CHACON, D.P.; BARAJAS, E.M.; ESTEVA, A.G.; DELGADO, R.L.; SHIBATA,
1175 J.K.; VALDIVIA, C.B.P. **Biomassa remobilization in two common bean**
1176 **(Phaseolus vulgaris) cultivars under water restriction.** South African Journal
1177 of Botany, v. 112, p. 79-88.,2017.
1178
- 1179 CHAIRI, F.; ELAZAB, A.; SANCHEZ-BRAGADO, R.; ARAUS, L.J.; SERRET,
1180 D.M. Heterosis for water status in maize seedlings. Agricultural water
1181 management, v.164, p. 100 - 109, 2016.
1182
- 1183 CHALLINOR, A.J.; KOEHLER, K.A.; VILLEGAS, R.J.; WHITFIELD, S.; DAS, B.
1184 Current warming will reduce yields unless maize breeding and seed systems
1185 adapt immediately. **Nature Climate Change**, v.6, n.10, p.954-958, 2016.
- 1186 CHANDRA, D.; SRIVASTAVA, R.; GLICK, R.B.; SHARMA, K.A. Drought-tolerant
1187 Pseudomonas spp. improve the growth performance of finger millet (*Eleusine*
1188 *coracana* (L.) Gaertn.) under nonstressed and drought-stressed conditions.
1189 **Pedosphere**, v. 28, n. 2, p. 227-240, 2018.
- 1190 CHAVES, G.T.; MASO, D.B.A.; FIGUEIREDO, R.M.A.; DALLEMOLE, D. Indicador
1191 de desempenho competitivo: Análise da produção de milho no estado de mato

grosso como fator determinante do desenvolvimento competitivo territorial. **Desafio Online**, Campo Grande, v.10, n.2, mai. /ago. 2022.

CHEN, D.; WANG, S.; XIONG, B.; CAO, B.; DENG, X. Carbon/nitrogen imbalance associated with drought-induced leaf senescence in *Sorghum bicolor*. **PloS One**, v.10, 2015.

CHOUDHARY, S.; GUHA, A.; KHOLOVA, J.; PANDRAVADA, A.; MESSINA, C.D.; COOPER, M.; VADEZ, V. Maize, sorghum and pearl millet have highly contrasting species strategies to adapt to water stress and climate change-like conditions. **Plant Science**, v. 295, 2020.

COHEN, A. C.; BOTTINI, R.; PICCOLI, P. N. *Azospirillum brasilense* Sp 245 produces ABA in chemically defined culture medium and increases ABA content in *Arabidopsis* plants. **Plant Growth Regulation**, v. 54, p. 97-103, 2008.

COHEN, A. C.; TRAVAGLIA, C. N.; BOTTINI, R.; PICCOLI, P. N. Participation of abscisic acid and gibberellins produced by endophytic *Azospirillum* in the alleviation of drought effects in maize. **Botany**, v. 87, n. 5, p. 455-462, 2009.

COMAS, H.L.; BECKER, R.S.; CRUZ, V.M.O.; BYRNE, F.P.; DIERING, A.D. Root traits contributing to plant productivity under drought. **Frontiers in Plant Science**, Colorado, v.4, nov. 2013.

COMAS, L. H.; MUELLER, K. E.; TAYLOR, L. L.; MIDFORD, P. E.; CALLAHAN, H. S.; BEERLING, D. J. Evolutionary patterns and biogeochemical significance of angiosperm root traits. **International Journal of Plant Sciences**, v.57, n.1, p. 584–595, jul. 2012.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Primeiro acompanhamento da safra 2023/24 traz uma estimativa de produção de 317, 5 milhões de toneladas. Out, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5211-primeiro-levantamento-da-safra-2023-24-traz-uma-estimativa-de-producao-de-317-5-milhoes-de-toneladas>.

DABRAVOLKI, S.A. T. The role of anthocyanins in plant tolerance to drought and salt stresses. **Plants**, v.12, n.13, jul. 2023.

DANGL, J.L.; DIETRICH, R.A.; THOMAS, H. Senescence and programmed cell death. In: BUCHANAN, B.B.; GRUISSEM, W.; JONES, R.L. Biochemistry & molecular biology of plants. Rockville: American Society of Plant physiologists, p. 1044 - 1100, 2000.

DIAS, K.O.D.G.; GEZAN, S.A.; GUIMARÃES, C.T.; PARENTONI, S.N.; GUIMARÃES, P.E. O.; CARNEIRO, N.P.; PORTUGAL, A.F.; BASTOS, E.A.; CARDOSO, M.J.; ANONI, C.O.; MAGALHÃES, J.V.; SOUZA, J.C.; GUIMARÃES, L.J.M.; PASTINA, M.M. Estimating Genotype × Environment Interaction for and Genetic Correlations among Drought Tolerance Traits in Maize via Factor Analytic Multiplicative Mixed Models. **Crop Science**, v.58, n.1, p.72, 2018.

1241 DIAS, P.F.C.K.; SOUZA, S.J.I.; DINAS, E.S.S.; OLIVEIRA, B.C.M.; FERREIRA,
1242 Q.V.; BARROS, C.Y.; SANTOS, J.F.A. Proteção para a cultura de milho contra a
1243 seca mediada por bactérias da Caatinga. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.30,
1244 2022.

1245

1246 DOBEREINER, J.; BALDANI, V.L.D.; BALDANI, J.I. **Como isolar e identificar**
1247 **bactérias diazotróficas de plantas não-leguminosas**. Brasília, DF:
1248 EMBARAPA-SPI; Itaguaí: EMBRAPA-CNPAB, p.60, 1995.

1249 DURÃES, F. O. M.; SANTOS, M. X.; GAMA, E. E. G.; MAGALHÃES, P. C.;
1250 ALBUQUERQUE, P. E. P.; GUIMARÃES, C. T. Fenotipagem associada à
1251 tolerância a seca em milho para uso em melhoramento, estudos genômicos e
1252 seleção assistida por marcadores. Circular Técnica, n. 39, Sete Lagoas:
1253 Embrapa, p.17, 2004.

1254 EISSENSTAT, D.M.; ACHOR, D.S. Anatomical characteristics of roots of citrus
1255 rootstocks that vary in specific root length. **New Phytologist Foundation**, v.141,
1256 p.309–321, 1999.

1257 **TORDIN, C. EMBRAPA**. Ciência identifica *Bacillus* capazes de aumentar o
1258 crescimento do tomateiro. maio. 2023. Disponível em:
1259 [https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/80747455/ciencia-identifica-](https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/80747455/ciencia-identifica-bacilos-capazes-de-aumentar-o-crescimento-do-tomateiro)
1260 [bacilos-capazes-de-aumentar-o-crescimento-do-tomateiro](https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/80747455/ciencia-identifica-bacilos-capazes-de-aumentar-o-crescimento-do-tomateiro). Acesso em: 22 de
1261 maio de 2024.

1262

1263 FAROOQ, M. Tolerance against combined drought and heat stresses in wheat
1264 landraces of Omani origin: morphological, physiological, biochemical, and grain
1265 yield assessment. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.23, p. 6034–
1266 6047, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01462-6>.

1267

1268 FERREIRA, G.E.; MELLO, R.J.A.; JUNIOR, G.D.C. Ecological sanitation: use of
1269 human urine as a source of nitrogen in corn (*zea mays*) cultivation. **Brazilian**
1270 **Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.12, p. 122054-1222080, dec. 2021.

1271

1272 FLEMMING, H.; WINGENDER, J. The biofilm matrix. **Nature Reviews**
1273 **Microbiology**, v. 8, p. 623-633, 2010.

1274 FONSECA, C. M.; BOSSOLANI, W.J.; OLIVEIRA, L.S.; MORETTI, G.L.;
1275 PORTUGAL, R.J.; SCUDELETTY, D.; OLIVEIRA, F.E.; CRUSCIOL, C.A.C.
1276 *Bacillus subtilis* Inoculation Improves Nutrient Uptake and Physiological Activity
1277 in Sugarcane under Drought Stress. **Microorganisms**, v.13, n.10, p.809, apr.
1278 2022.

1279

1280 **GESELLI, O. Agrimídia**, 2021. Milho safrinha sofre com o período de seca.
1281 Disponível em: [https://www.agrimidia.com.br/agronegocio/milho-safrinha-sofre-](https://www.agrimidia.com.br/agronegocio/milho-safrinha-sofre-com-o-periodo-de-seca/)
1282 [com-o-periodo-de-seca/](https://www.agrimidia.com.br/agronegocio/milho-safrinha-sofre-com-o-periodo-de-seca/). Acesso em: 11 de janeiro de 2024.

1283

1284 GOMES, A.E.; LANA, P.G.U.; ALVES, C.M.V.; OLIVEIRA-PAIVA, A.C.;
1285 GODINHO, V.T.B.; SOUSA, M.S. **Mecanismos das bactérias promotoras do**
1286 **crescimento de plantas na mitigação dos efeitos do déficit hídrico**. Embrapa.
1287 Minas Gerais, jun. 2022.

- 1288 GOMES, A.M.A.; MARIANO, R.L.R.; SILVEIRA, E.B.; MESQUITA, J.C.P.
1289 Isolamento, seleção de bactérias e efeito de *Bacillus spp.* na produção de mudas
1290 orgânicas de alface. **Horticultura Brasileira**, v.21, p.699-703, 2003.
1291
- 1292 GOMES, M.J.P. **Gênero *Bacillus spp.***. In: Tópicos em Bacteriologia Veterinária.
1293 Faculdade de Veterinária (UFRGS), Porto Alegre-RS, 2013.
1294
- 1295 GUSAIN, Y. S.; SINGH, U. S.; SHARMA, A. K. **Bacterial mediated amelioration**
1296 **of drought stress in drought tolerant and susceptible cultivars of rice**
1297 **(*Oryza sativa* L.)**. African Journal of Biotechnology, v. 14, n. 9, p. 764-773, 2015.
- 1298 HALLAUER, A.R.; CARENA, M.J.; MIRANDA, F.J.B. **Quantitative genetics in**
1299 **maize breeding**. 3 ed. Springer: Berlin, p. 500, 2010.
- 1300 HAN, L.; LV, Q.; ZHANG, J.; TAN, R.; WANG, Y.; ZHONG, L.; GAO, Y.; CHAO,
1301 Z.; LI, Q.; CHEN, G.; SHI, Z.; LIN, H.; CHAO, D.; LESS, S. Decreasing nitrogen
1302 assimilation drought stress by suppressing DST-mediated activation of Nitrate
1303 Reductase 1.2 in rice. **Molecular Plant**, v.15, n.1, p.167-178, jan, 2022.
1304
- 1305 HANAKA, A.; OZIMEK, E.; RESZCZYNSKA, E.; JAROSZUK-SCISEL, J.;
1306 STOLARZ, M. Plant Tolerance to Drought Stress in the Presence of Supporting
1307 Bacteria and Fungi: An Efficient Strategy in Horticulture. **Horticulturae**, out.
1308 2021.
- 1309 HASANUZZAMAN, M.; ANEE, T.; PARVIN, K.; NAHAR, K.; FUJITA, M.
1310 Regulation of the ascorbate-glutathione pathway in mitigating oxidative damage
1311 in plants under abiotic stress. **Antioxidants**, v.8, p. 384, 2019.
- 1312 HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; KHAN, M.I.R.; MAHAMUD, A.J. Regulation
1313 of Reactive Oxygen Species Metabolism and Glyoxalase Systems by Exogenous
1314 Osmolytes Confers Thermotolerance in *Brassica napus*. **Gesunde Pflanzen**,
1315 v.72, n.1, jul. 2019.
- 1316 HASANUZZAMAN, M.; ZHOU, M.; SHABALA, S. How Does Stomatal Density
1317 and Residual Transpiration Contribute to Osmotic Stress Tolerance? **Plants**,
1318 v.12, n.3, p.494, 2023.
1319
- 1320 HESSINI, K. ISSAOUI, S. FERCHICHI, T. SAIF, C. ABDELLY, K.H. SIDDIQUE,
1321 C. CRUZ. Interactive effects of salinity and nitrogen forms on plant growth,
1322 photosynthesis and osmotic adjustment in maize. **Plant Physiology and**
1323 **Biochemistry**, v.139, p. 171-178, 2019.
1324
- 1325 HATHURUSINGHE, K.H.S.; AZIZOGLU, U.; SHIN, J. Holistic Approaches to
1326 Plant Stress Alleviation: A Comprehensive Review of the Role of Organic
1327 Compounds and Beneficial Bacteria in Promoting Growth and Health. **Plants**,
1328 v.13, n.5, p. 695, 2024.
1329
- 1330 HOAGLAND, D.R.; ARNON, D.L. **The water culture method for growing plants**
1331 **without soils**, 1950.

1332 HUSSAIN, A.; ZAHIR, Z.A.; ASGHAR, H.N.; IMRAN, M.; AHMAD, M.; HUSSAIN,
 1333 S. **Integrating the potential of *Bacillus sp. Az6* and organic waste for zinc**
 1334 **oxide bio-activation to improve growth, yield and zinc content of maize**
 1335 **grains**. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, Faisalabad, v.57, n. 1, p.123-
 1336 130, 2020.

1337

1338 HUSSAIN, H.A. Chilling and drought stresses in crop plants: Implications, cross
 1339 talk and potential managements opportunities. **Frontiers in Plant Science**, v. 9,
 1340 n. 393, 2018.

1341

1342 IBRAHIM, M.S.; LKHAIAGBE, B. **The Growth Response of Rice (*Oryza sativa***
 1343 **L. Var. FARO 44) *in vitro* after Inoculation with Bacterial Isolates from a**
 1344 **Typical Ferruginous Ultisol**. Bulletin of the National Research Centre, v.45,
 1345 n.70, abr. 2021.

1346 JAN, R.; ASIF, S.; ASAF, S.; DU, X.X.; PARK, J.R.; NARI, K.; BHATTA, D.; LEE,
 1347 I.J.; KI, K.M. Melatonin alleviates arsenic (As) toxicity in rice plants via modulating
 1348 antioxidant defense system and secondary metabolites and reducing oxidative
 1349 stress. **Environmental Pollution**, v.318, feb. 2023.

1350 JOO, G.J.; KIN, M.J.; KIM, T.J.; RHEE, K.I.; KIM, H.; LEE, J.I. Gibberellins-
 1351 producing rhizobacteria increase endogenous gibberellins content and promote
 1352 growth of red peppers. **Journal of Microbiology**, Seoul, v. 43, n. 6, p. 510-515,
 1353 dez. 2005.

1354

1355 KALAYU, G. Phosphate Solubilizing Microorganisms: Promising Approach as
 1356 Biofertilizers. **International Journal of Agronomy**, 2019.
 1357 <https://doi.org/10.1155/2019/4917256>

1358

1359 KAMPHORST, S.H.; DE LIMA, V.J.; SHIMITT, K.F.M.; LEITE, J.T.; AZEREDO,
 1360 V.C.; PENA, G.F.; SANTOS, P.H.D.; SANTOS JÚNIOR, D.R.; SOLVA JÚNIOR,
 1361 S.B. DA.; BISPO, R.B.; SANTOS, T.O.; KHAN, S.; AMARAL JÚNIOR, A.T. Water
 1362 stress adaptation of popcorn roots and association with agronomic traits.
 1363 **Genetics Molecular Research**, v.17, n.3, 2018 b.

1364

1365 KAMPHORST, H.S.; JÚNIOR, A.T.A.; VERGARA-DIAZ, O.; GRACIA-ROMERO,
 1366 A.; FERNANDEZ-GALLEGO, A.J.; CHANG-ESPINO, C.M.; BUCHAILLOT, L.M.;
 1367 REZZOUK, Z.F.; LIMA, J.V.; SERRET, D.M.; ORTEGA, A.L.J. Heterosis and
 1368 reciprocal effects for physiological traits of popcorn plants under different water
 1369 conditions. **Agricultural Water Management**, v.261, mar. 2022.

1370

1371 KAMPHORST, S.H.; LIMA, V.J.; LEITE, J.T.; CARVALHO, C.M.; XAVIER, K.B.;
 1372 CAMPOSTRINI, E. Popcorn breeding for water-stress tolerance or for agronomic
 1373 water-use efficiency? **Genetics and Molecular Research**, v.17, n.4, p.1-18, dez.
 1374 2018.

1375 KARADENIZ, A.; TOPCUOGLU, S. F.; INAN, S. **Auxin, gibberellin, cytokinin**
 1376 **and abscisic acid production in some bacteria**. World Journal of Microbiology
 1377 and Biotechnology, New York, v. 22, n. 10, p. 1061-1064, out. 2006.

1378

1379 KAVAMURA, V.N.; SANTOS, S.N.; SILVA, J.L.; PARMA, M.M.; ÁVILA, L.A.;
 1380 VISCONTI, A.; ZUCHI, D.Z.; TAKETANI, R.G.; ANDREOTI, F.D.; MELO, I.S.
 1381 **Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant growth promotion under**
 1382 **drought**. *Microbiological Research*, v.168, n.4, p. 183-191, 2013.

1383 SANTOS, D.K. Traços fisiológicos e tolerância à seca: relações com bactérias
 1384 promotoras de crescimento de plantas em milho-pipoca. No prelo.

1385 KHAN, N.; BANO, A.; BABAR, M.A. The stimulatory effects of plant growth
 1386 promoting rhizobacteria and plant growth regulators on wheat physiology grown
 1387 in sandy soil. **Archives of Microbiology**, v.201, n.6, p.769-785, aug. 2019.
 1388

1389 KISINGER, R.S.; SHIRK, M.C.; FALL, R.A. Rapid surface motility in *Bacillus*
 1390 *subtilis* is dependent on extracellular surfactin and potassium ion. **Journal of**
 1391 **Bacteriology**, v.185, n.18, p-5627-5631, sep. 2003.
 1392

1393 KULKOVA, I.; DOBRZYNSKI, J.; KOWALCZYK, P.; BELZECKI, G.;
 1394 KRAMKOWSKI, K. Plant Growth Promotion Using *Bacillus cereus*. *International*
 1395 **Journal of Molecular Sciences**, v.24, n.11, p.9759, 2023.
 1396

1397 KUMAR P.; PAHAL, V.; GUPTA, A.; VADHAN, R.; CHANDRA, H.; DUBEY, R.C.
 1398 Effect of Silver Nanoparticles and *Bacillus cereus* LPR2 on the Growth of *Zea*
 1399 *Mays*. **Scientific Reports**, v.10, n.20409, 2020.

1400 LARISH, L.B.; BREWBAKER, J.L. Diallel analyses of temperate and tropical
 1401 popcorn. **Maydica**, v.44, p.279-284, 1999.
 1402

1403 LAXA, M.; LIEBTHAL, M.; TELMAN, W.; CHIBANI, K.; DIETZ, K.-J. O papel do
 1404 sistema antioxidante das plantas na tolerância à seca. **Antioxidantes**, v. 8, n.94,
 1405 2019.
 1406

1407 LEITE, J.T.; JUNIOR, A.T.A.; KAMPHORST, S.H.; LIMA, V.J de.; SANTOS,
 1408 JÚNIOR, D.R.; SCHMITT, K.F.M.; SOUZA, Y.P.; SANTOS, T. O.; BISPO, R.B.;
 1409 MAFRA, G.S.; CAMPOSTRINI, E.; RODRIGUES, W.P. Water Use Efficiency in
 1410 Popcorn (*Zea mays* L. var. *everta*): Which Physiological Characteristics Would
 1411 Be Useful for Breeding?. **Plants**, v.10, n.7, p.1450, 2021.

1412 LI, F.P.; MA, L.B.; WEI, F.X.; GUO, S.; MA, Q.Y. Deeper root distribution and
 1413 optimized root anatomy help improve dryland wheat yield and water use efficiency
 1414 under low water conditions. **Plant Soil**, fev. 2024.

1415 **LIMA, E. Embrapa**, 2021. Bactéria encontrada no mandacaru vira bioproduto
 1416 que promove tolerância à seca em plantas. Disponível em:
 1417 [https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-](https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/60941801/bacteriaencontrada-no-mandacaru-vira-bioproduto-que-promove-tolerancia-a-seca-em-plantas/)
 1418 [/noticia/60941801/bacteriaencontrada-no-mandacaru-vira-bioproduto-que-](https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/60941801/bacteriaencontrada-no-mandacaru-vira-bioproduto-que-promove-tolerancia-a-seca-em-plantas/)
 1419 [promove-tolerancia-a-seca-em-plantas/](https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/60941801/bacteriaencontrada-no-mandacaru-vira-bioproduto-que-promove-tolerancia-a-seca-em-plantas/). Acesso em: 07 de maio de 2024.

1420 LIMA, V.J.D.; AMARAL JÚNIOR, A.T.D.; KAMPHORST, S.H.; BISPO, R.B.;
 1421 LEITE, J. T.; SANTOS, T.D.O.; GONÇALVES, G.M.B. Combined Dominance and
 1422 Additive Gene Effects in Trait Inheritance of Drought Stressed and Full Irrigated
 1423 Popcorn. **Agronomy**, v. 9, n. 12, p. 782, 2019.

- 1424 LIMA, V. J.; AMARAL JÚNIOR, A. T.; KAMPHORST, S. H.; PENA, G. F.; LEITE,
1425 J. T.; SCHIMITT, K. F.; VITTORAZZI, C.; DE ALMEIDA FILHO, J. E.; MORA, F.
1426 Combining ability of S3 progenies for key agronomic traits in popcorn: comparison
1427 of testers in top-crosses. **Genetics and Molecular Research**, v.15. n.1, p. 1-16,
1428 2016.
- 1429
1430 LIN, Y.; WATTS, D.B.; KLOEPPER, J.W.; ADESEMOYER, A.O.; FENG, Y. Effect
1431 of plant growth-promoting rhizobacteria at various nitrogen rates on corn growth.
1432 **Agricultural Sciences**, Wuhan, v.10, n.12, p.1542-1565, 2019.
- 1433
1434 LIN, Y.; WATTS, D. B.; KLOEPPER, J. W.; FENG, Y.; TORBERT, H. A. Influence
1435 of plant growthpromoting rhizobacteria on corn growth under drought stress.
1436 **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n. 2, p. 250-264,
1437 2020.
- 1438
1439 LINARES, E. Seleção recorrente recíproca em famílias de meio-irmãos em milho-
1440 pipoca (*Zea mays* L.). Tese (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas)
1441 - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, p.78, 1987.
- 1442
1443 LIZÁRRAGA-SÁNCHEZ, G.J.; LEYVA-MADRIGAL, K.Y.; SÁNCHEZ-PENA, P.;
1444 QUIROZ-FIGUEROA, F.R.; MALDONADO-MENDOZA, I. E. *Bacillus cereus*
1445 sensu lato strain B25 controls maize stalk and ear rot in Sinaloa, Mexico. **Field**
1446 **Crops Research**, Amsterdam, v.176, v.1, p.11-21, 2015.
- 1447
1448 LOPES, M.J.S.; SANTIAGO, S.B.; SILVA, B.N.I.; GURGEL, C.S.E. Microbial
1449 biotechnology: inoculation, mechanisms of action and benefits to plants.
1450 **Research, Society and Development**, v.10, n.12, p. e356101220585, 2021.
- 1451
1452 LUCAS, J.A.; GARCIA-VILLARACO, A.; MONTERO-PALMERO, M.B.;
1453 MONTALBAN, B.; RAMOS, S.B.; GUTIERREZ-MANERO, F.J. Physiological and
1454 Genetic Modifications Induced by Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR)
1455 in Tomato Plants under Moderate Water Stress. **Biology**, v.12, n.7, p.901, jun.
2023.
- 1456
1457 LUNDUKA, R. W.; MATEVA, K. I.; MAGOROKOSHO, C.; MANJERU, P. Impact
1458 of adoption of drought-tolerant maize varieties on total maize production in south
Eastern Zimbabwe. **Climate and development**, v. 11, n. 1, p. 35-46, 2019.
- 1459
1460 LYNCH, J.P.; STROCK, C.F.; SCHNEIDER, H.M.; SIDHU, J.S.; AJMERA, I.;
1461 GALINDO-CASTANEDA, T. Root anatomy and soil resource capture. **Plant &**
1462 **Soil**, v.466, p.21-63, 2021a.
- 1463
1464 MACHADO, L. IMEA: Estimativas das safras de soja e milho em Mato Grosso
1465 são mantidas. **Sociedade Nacional de Agricultura**, 05 de março de 2024.
1466 Disponível em: <https://sna.agr.br/imea-estimativas-das-safras-de-soja-e-milho-em-mato-grosso-sao-mantidas/> e acesso em: 05 de julho de 2024.
- 1467
1468 MACKAY, J.I.; COCKRAM, J.; HOWELL, P.; POWELL, W. Understanding the
1469 classics: the unifying concepts of transgressive segregation, inbreeding
depression and heterosis and their central relevance for crop breeding. **Plant**

1470 **Biotechnology Journal**, set. 2020.

1471

1472 MALHI, G.S.; KAUR, M.; KAUSKI, P. Impact of climate change on agriculture
1473 and its mitigation strategies: A review. **Sustainability**, v.13, n.3, p.1318, 2021.

1474 MUKRI, G.; PATIL, S.M.; MOTAGI, N.B.; BHAT, S.J.; SINGH, C.; KUMAR, J.
1475 P.S.; GADAG, N.R.; GUPTA, C.N.; SIMAL-GANDARA, J. Genetic variability,
1476 combining ability and molecular diversity-based parental line selection for
1477 heterosis breeding in field corn (*Zea mays* L.). **Molecular Biology Reports**, v.49,
1478 p.4517-4524, 2022.

1479

1480 NEPOMUCENO, A.L. Tolerância à seca em plantas: Mecanismos fisiológicos e
1481 moleculares. **Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, v. 04, p. 12-18,
1482 2001.

1483

1484 NETO, D.J.F.; JUNIOR, P.A.; FONTANA, F.L.; CORREIA, S.S.C.E.; TECCHIO,
1485 A.M. Efeitos fisiológicos do ácido abscísico em uvas: Uma revisão. **Revista**
1486 **Mirante**, São Paulo, v.10, n.5, dez. 2017.

1487

1488 NIE, P.; LI, X.; WANG, S.; GUO, J.; ZHAO, H.; NIU, D. Induced Systemic
1489 Resistance against *Botrytis cinerea* by *Bacillus cereus* AR156 through a JA/ET-
1490 and NPR1-dependent signaling pathway and activates PAMP-triggered immunity
1491 in Arabidopsis. **Frontiers in Plant Science**, v.8, 2017.

1492

1493 NGUMBI, E.; KLOEPPER, J. Bacterial-mediated drought tolerance: current and
1494 future prospects. **Applied Soil Ecology**, v. 105, p. 109-125, 2016.

1495

1496 NGUYEN, P.A.; STRUB, C.; FONTANA, A.; SCHORR-GALINDO, S. Crop molds
1497 and mycotoxins: Alternative management using biocontrol. **Biological Control**,
1498 Amsterdam, v.104, n.1, p.10-27, 2017.

1499

1500 NIU, D. D.; WANG, C. J.; GUO, Y. H.; JIANG, C. H.; ZHANG, W. Z.; WANG, Y.
1501 P.; GUO, J. H. The plant growth-promoting rhizobacterium *Bacillus cereus* AR156
1502 induces resistance in tomato with induction and priming of defense response.
1503 **Biocontrol science and technology**, v.22, n.9, p. 991-1004, 2012.

1504

1505 NOCTOR, G.; REICHHELD, J.P.; FOYER, C.H. ROS-related redox regulation
1506 and signaling in plants. **Seminars in Cell & Developmental Biology**, v. 80 , p.
1507 3–12, aug. 2018.

1508

1509 OJUEDERIE, B.O.; BABALOLA, O.O. Growth enhancement and extenuation of
1510 drought stress in maize inoculated with multifaceted ACC deaminase producing
1511 rhizobacteria, **Frontiers in Plant Sciences**, v.6, 2022.

1512

1513 OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; COTA, L. V.; SANTOS,
1514 F. C. dos; SOUSA, S. M. de; LANA, U. G. de P.; OLIVEIRA, M. C.; MATTOS, B.
1515 B.; ALVES, V. M. C.; RIBEIRO, V. P.; VASCO JUNIOR, R. **Recomendação**
1516 **agronômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus***
1517 ***megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho**. Embrapa: Circular Técnica,
1518 260. 2020.

- 1519
1520 ORTIZ-CASTRO, R.; CAMPOS-GARCIA, J.; LÓPEZ-BUCIO, J. **Pseudomonas**
1521 **putida e Pseudomonas fluorescens** influenciam a arquitetura do sistema
1522 **radicular de Arabidopsis por meio de uma resposta de auxina mediada por**
1523 **ciclodipeptídeos bioativos**. *Journal of Plant Growth Regulation*, v.39, p.254–
1524 265, 2020.
- 1525
1526 OSAKABE, Y.; SHINOZAKI, K.; TRAN, L.S.P. Response of plants to water stress.
1527 **Frontiers in Plant Sciences**, v.13, n.5, p. 86, 2014.
- 1528
1529 PEIXOTO, C.P. **Princípios de fisiologia vegetal: teoria e prática**. 1 ed. Rio de
1530 Janeiro: PoD editora, 2020.
- 1531
1532 PICAZEVICZ, A.A.C.; KUSDRA, J.F.; MORENO, A.L. Crescimento do milho em
1533 resposta à rizobactérias, molibdênio e nitrogênio. **Revista Ibero-Americana de**
1534 **Ciências Ambientais**, v.10, n.4, p. 167-174, set. 2019.
- 1535
1536 POLONCA, S. Environment Shapes the Intra-species Diversity of *Bacillus subtilis*
Isolates. **Microbial Ecology**, v.79, p. 853–864, 2020.
- 1537
1538 POUDEL, M.; MENDES, R.; COSTA, L. A. S.; BUENO, C. G.; MENG, Y.;
1539 FOLIMONOVA, S. Y.; GARRETT, K. A.; MARTINS, S. J. The role of plant-
1540 associated bacteria, fungi, and viruses in drought stress mitigation. **Frontiers in**
1541 **Microbiology**, v. 12, 743512, 2021.
- 1542
1543 QIANG, S.; ZHANG, Y.; FAN, J.; ZHANG, F.; XIANG, Y.; YAN, S.; WU, Y. Maize
1544 yield, rainwater and nitrogen use efficiency as affected by maize genotypes and
1545 nitrogen rates on the Loess Plateau of China. **Agricultural Water Management**,
v. 213, p. 996–1003, 2019.
- 1546
1547 RADHAKRISHNAN, R.; HASHEN, A.; ABD-ALLAH, F.E. Bacillus: A Biological
1548 tool for crop Improvement through Bio-Molecular Changes in Adverse
1549 environment, **Frontiers in Physiology**, v.8, set. 2017.
- 1550
1551 RAMAKRISHNA, W.; RATHORE, P.; KUMARI, R.; YADAV, R. Brown Gold of
1552 Marginal Soil: Plant Growth Promoting Bacteria to Overcome Plant Abiotic Stress
1553 for Agriculture, Biofuels and Carbon Sequestration. **Science of The Total**
Environment, v.711, e135062, 2020.
- 1554
1555 RAMAKRISHNA, W.; YADAV, R.; LI, K. Plant growth promoting bacteria in
agriculture: Two sides of a coin. **Applied Soil Ecology**, v.138, p. 10-18, 2019.
- 1556
1557 RAMOS, M. L. G.; PARSONS, R.; SPRENT, J. I.; JAMES, E. K. Effect of water
1558 stress on nitrogen fixation and nodule structure of common bean. **Pesquisa**
1559 **Agropecuária Brasileira**, v.38, n.3, p.339-347, mar. 2003.
- 1560
1561 RASHID, U.; YASMIN, H.; HASSAN, N.M.; NAZ, R.; NOSHEEN, A.; SAJJAD, N.;
1562 IYYAS, N.; KEYANI, R.; JABEEN, Z.; MUMTAZ, S.; ALYEMENI, N.M.; AHMAD,
1563 P. Drought-tolerant *Bacillus megaterium* isolated from semi-arid conditions
induces systemic tolerance of wheat under drought conditions, **Plant cell**

- 1564 **reports**, v.41, n.3, p.549-569, 2022.
- 1565
- 1566 REZENDE, C.C.; SILVA, A.M.; NASCENTE, S.A.; REZENDE, C.C.; FRASCA,
1567 M.L.L.; FILIPPI, C.C.M.; LANNA, C.A.; FERREIRA, B.P.E.; CRUZ, C.R.D.;
1568 LACERDA, C.M.; FERREIRA, S.A.E. Multifunctional rhizobacteria: use in
1569 agriculture. **Research, Society and Development**, v.11, n.4, 2022.
- 1570 ROMEIRO, R.S. **Controle biológico de doenças de plantas: fundamentos**.
1571 Viçosa: Editora UFV, p.269, 2007.
- 1572 RUI, Y.; DINNENY, J.R. A wall with integrity: surveillance and maintenance of the
1573 plant cell wall under stress. **New Phytologist**. 2019.
- 1574 SADRAS, V. O.; MAHADEVAN, M.; ZWER, P. K. Stay-green associates with low
1575 water soluble carbohydrates at flowering in oat. **Field Crops Research**, v. 230,
1576 n. 369, p. 132–138, jan. 2019.
- 1577 SALOMON, M. V.; BOTTINI, R.; SOUZA FILHO, G. A. de; COHEN, A. C.;
1578 MORENO, D.; GIL, M.; PICCOLI, P. Bacteria isolated from roots and rhizosphere
1579 of *Vitis vinifera* retard water losses, induce abscisic acid accumulation and
1580 synthesis of defense-related terpenes in in vitro cultured grapevine. **Physiologia**
1581 **Plantarum**, v. 151, n. 4, p. 359-374, 2014.
- 1582
- 1583 SANTOS, S. J.; DARLENGO, E.F.J.; PENA, F.G.; SANTOS, L.L.; SANTOS, C.R.;
1584 ROSSI, B.A.A. Análise da diversidade genética de milhos crioulo (*Zea mays* L.)
1585 do Norte de Mato Grosso. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.16,
1586 n.2, 2023.
- 1587
- 1588 SANTOS, F.L.; SOUTA, F.J.; SOARES, P.C.; ROCHA, O.L.; SANTOS, C.L.M.;
1589 GRATIVOL, C.; ROESCH, W.F.L.; OLIVARES, L.F. Insights into the structure and
1590 role of seed-borne bacteriome during maize germination. **FEMS**
1591 **MICROBIOLOGY ECOLOGY**, v.97, p. fiab024, 2021.
- 1592 SATI, D.; PANDE, V.; PANDEY, C.S.; SAMANT, M. Recent Advances in PGPR
1593 and Molecular Mechanisms Involved in Drought Stress Resistance. **Journal of**
1594 **soil Science and plant nutrition**, v.23, p.106-124, 2023.
- 1595 SIDDIQUI, M.N.; LEON, J.; NAZ, A. A.; BALLVORA, A. **Genetics and genomics**
1596 **of root system variation in adaptation to water stress in cereal crops**.
1597 *Journal of Experimental Botany*. v.72, n.4, p.1007–1019, fev. 2021.
- 1598 SILVA, S.; COSTA, CÍCERO, T. S.; NASCIMENTO, R.; TEODORO, I.;
1599 CANTARELLI, A. L. D., SOARES M. A. S. Épocas de plantio e dose econômica
1600 de nitrogênio para o milho cultivado nos Tabuleiros Costeiros Alagoanos.
1601 **Revista Agroambiente On-line**, Boa Vista, v. 10, n. 2, p. 114-122, 2016.
- 1602
- 1603 SILVA, S.; SOUSA, P.C.A.; ARAÚJO, R.E.; SOARES, S.A.M.; TEODORO, I.
1604 **Parâmetros produtivos do milho sob déficit hídrico em diferentes fases**
1605 **fenológicas no semiárido brasileiro**. Irriga, Bocatú, Edição Especial –
1606 Nordeste, v.1, n.1, p.30-41, maio, 2021.

1607 SINGH, H.B.; KESWANI, C.; REDDY, M.S.; SANSINENEA, E.; GARCIA-
 1608 ESTRADA, C. Metabólitos secundários de rizomicroorganismos promotores do
 1609 crescimento vegetal: descoberta e aplicações. **The plant cell**, Singapura, 2019.
 1610
 1611 SINGH, J.S.; PANDEY, V.C.; SINGH, D.P. Efficient soil microorganismos: A new
 1612 dimension for sustainable agriculture and environmental development.
 1613 **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.140, p.339-353, 2011.
 1614
 1615 SRINIVASAN, M.; PETERSEN, D.J.; HOLL, F.B. **Influence of indoleacetic-**
 1616 **acid-producing *Bacillus* isolates on the nodulation of *Phaseolus vulgaris***
 1617 **by *Rhizobium etli* under gnotobiotic conditions**. Canadian Journal of
 1618 Microbiology, Ottawa, v.42, n.10, p. 1006-1014, 1996.
 1619
 1620 SWIECICKA, L. Natural occurrence of *Bacillus thuringiensis* and *Bacillus cereus*
 1621 in eukaryotic organisms: a case for symbiosis. **Biocontrol Science and**
 1622 **Technology**, v.18, n.3, p. 221-239, 2008.
 1623
 1624 TEIXEIRA, F.F.; GOMIDE, R.L.; ALBUQUERQUE, P.E.P.; ANDRADE, C.L.T.;
 1625 LEITE, C.E.P.; PARENTONI, S.N.; GUIMARÃES, P.E.O.; GUIMARÃES, L.J.M.;
 1626 SILVA, A.R.; BASTOS, E.A.; CARDOSO, M.J. Evaluation of maize core collection
 1627 for drought tolerance. **Crop Breeding Applied Biotechnology**, v.10, n.4, p.312–
 320, dec. 2010.
 1628
 1629 THOMAS, D.J. White Corn Market: **An Investigation of the Increased Use of**
 1630 **Contracts, Master's thesis**. University of Kentucky, Lexington, KY, 1989.
 1631
 1632 THORUP-KRISTENSEN, K.; HALBERG, N.; NICOLAISEN, M.; OLESEN, J.E.;
 1633 CREWS, T.E.; HINSINGER, P.; KIRKEGAARD, J.; PIERRET, A.; DREBOLL,
 1634 B.D. Digging Deeper for Agricultural Resources, the Value of Deep Rooting.
 1635 **Trends in Plant Science**, v.25, n.4, p.406-417, apr. 2020.
 1636
 1637 TILAK, K. V. B. R.; RANGANAYAKI, N.; MANOHARACHARI, C. **Synergistic**
 1638 **effects of plantgrowth promoting rhizobacteria and *Rhizobium* on**
 1639 **nodulation and nitrogen fixation by pigeonpea (*Cajanus cajan*)**. European
 1640 Journal of Soil Science, Oxford, v. 57, n. 1, p. 67-71, 2006.
 1641
 1642 TIMMUSK, S.; EL-DAIM, I. A. A.; COPOLOVICI, L.; TANILAS, T.; KANNASTE,
 1643 A.; BEHERS, L.; NEVO, E.; SEISENBAEVA, G.; STENSTROM, E.; NIINEMETS,
 1644 U. Drought-tolerance of wheat improved by rhizosphere bacteria from harsh
 1645 environments: enhanced biomass production and reduced emissions of stress
 1646 volatiles. **PLoS ONE**, v. 9, n. 5, e96086, 2014.
 1647
 1648 VURUKONDA, S.S.K.P.; VARDHARAJULA, S.; SHRIVASTAVA, M.; SKZ, A.
 1649 Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting
 1650 rhizobacteria. **Microbiological Research**, v. 184, p. 13-24, 2016.
 1651
 1652 YASI, H; ATTIA, H; ALAMER, K; HASSAN, F; ALI, E; ELSHAZLY, S; SIDDIQUE,
 1653 K.H.M; HESSINI, K. Impact of drought on growth, photosynthesis, osmotic
 1654 adjustment, and cell wall elasticity in Damask rose. **Plant Physiology and**
 1655 **Biochemistry**, v. 150, p. 133-139, 2020. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.038>

1656
 1657 WALTERS, A.W.; JIN, Z.; YOUNGBLUT, N.; WALLACE, G.J.; SUTTER, J.;
 1658 ZHANG, W.; GONZÁLEZ-PENA, A.; PEIFFER, J.; KOREN, O.; SHI, Q.; KNIGHT,
 1659 R.; RIO, G.T.; TRINGE, G.S.; BUCKLER, S.E.; DANGL, L.J.; LEY, E. R. **Large-**
 1660 **scale replicated field study of maize rhizosphere identifies heritable**
 1661 **microbes**, Proceedings of the National Academy of Sciences, v.115, n.28, p.
 1662 7373, 2018.
 1663
 1664 ZHANG, Y.; TIAN, Z.; XI, Y.; WANG, X.; SHEN, S.; GUO, Y. Improvement of Salt
 1665 Tolerance of Arabidopsis Thaliana Seedlings Inoculated with Endophytic Bacillus
 1666 cereus KPI20. **Journal of Plant Interact**, v.17, n.1, p. 884-893, aug. 2022.
 1667
 1668 ZIA, S.; ROMANO, G.; SPREER, W.; SANCHES, C.; CAIRNS, J.; ARAUS, L.J.;
 1669 MULLER, J. **Infrared Thermal Imaging as a Rapid Tool for Identifying Water-**
 1670 **Stress Tolerant Maize Genotypes of Different Phenology**. Journal of
 1671 Agronomy and Crop Science, v. 199, n. 2, p. 75–84, 2013.
 1672
 1673 ZONG, N.; WANG, H.; LI, Z.; MA, L.; XIE, L.; PANG, J.; FAN, Y.; ZHAO, J. Maize
 1674 NCP1 negatively regulates drought and ABA responses through interacting with
 1675 and inhibiting the activity of transcription factor ABP9. **Plant Molecular Biology**,
 1676 v.102, p. 339–357, 2020.
 1677