

BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO COMO
ATENUANTES DO ESTRESSE HÍDRICO NO MILHO

THIAGO CARVALHO FIGUEIRA

Rio Verde, GO
2024

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CÂMPUS RIO VERDE
BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÔNOMICA**

**BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO COMO
ATENUANTES DO ESTRESSE HÍDRICO NO MILHO**

THIAGO CARVALHO FIGUEIRA

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira

Rio Verde - GO

Fevereiro, 2024

RESUMO

FIGUEIRA; T. C. **Bactérias promotoras de crescimento como atenuantes do estresse hídrico no milho**. 2024. 34 p. Trabalho de conclusão de curso (Agronomia) - Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, Rio Verde, 2024.

O déficit hídrico é um dos fatores abióticos que tem maior impacto no crescimento e na produtividade do milho. Entre uma das estratégias para mitigar o estresse hídrico no milho inclui o uso de Bactérias Promotoras de Crescimento Vegetal (BPCV). Diante do exposto, objetivou-se fazer um levantamento na literatura sobre a utilização de BPCV como atenuação a seca na cultura do milho. Foram realizadas buscas em sites de periódicos e comunidades científicas, principalmente o Portal de Periódicos Capes, o Google Acadêmico e o SciELO, considerando artigos científicos, páginas eletrônicas, relatórios técnicos, dissertações de mestrado, teses de doutorado e livros, como fonte de informações. Os dados foram coletados dos últimos dez anos de 2013 a 2023. A aplicação de inoculantes contendo isolados bacterianos pode aumentar as taxas de fixação de nitrogênio e alterar a atividade das enzimas de assimilação de nitrogênio. Essas BPCVs melhoram o desenvolvimento das plantas de diversas maneiras, induzindo a planta criar mais raízes secundárias, produzindo compostos bioativos como aminoácidos, hormônios e enzimas, e conseqüentemente absorver água e nutrientes e com isso a planta consegue sobressair a um evento climático que é o déficit hídrico. As interações mais representativas entre as BPCV e as plantas são aquelas dos gêneros *Rhizobium*, *Bacillus* e *Bradyrhizobium* com plantas leguminosas. Nessa interação, as raízes formam estruturas diferenciadas denominadas nódulos, cuja principal função é proporcionar um ambiente favorável à fixação biológica de nitrogênio. A seca às vezes altera completamente a morfologia de uma planta, com as BPCV a tolerância das plantas à seca pode ser melhorada em grande medida, podendo impactar não apenas uma parte da planta, mas ajudam a mitigar os efeitos da seca na planta como um todo. Gradativamente a aplicação das BPCV é um passo em direção à agricultura sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: bioinoculantes, déficit hídrico, produtividade de milho.

ABSTRACT

Water stress is one of the abiotic factors that has the greatest impact on corn growth and productivity. One of the strategies to mitigate water stress in corn includes the use of Plant Growth Promoting Bacteria (BPCV). In view of the above, the objective was to survey the literature on the use of BPCV to mitigate drought in corn crops. Searches were carried out on journal websites and scientific communities, mainly the Capes Periodical Portal, Google Scholar and SciELO, considering scientific articles, electronic pages, technical reports, master's dissertations, doctoral theses and books, as sources of information. Data was collected from the last ten years from 2013 to 2023. Application of inoculants containing bacterial isolates can increase nitrogen fixation rates and alter the activity of nitrogen assimilation enzymes. The most representative interactions between BPCV and plants are those of the genera *Rhizobium*, *Bacillus* and *Bradyrhizobium* with leguminous plants. In this interaction, the roots form differentiated structures called nodules, whose main function is to provide a favorable environment for biological nitrogen fixation. Drought sometimes completely changes the morphology of a plant, with BPCV the tolerance of plants to drought can be improved to a great extent, which can impact not just one part of the plant, but help to mitigate the effects of drought on the plant as a whole. Gradually, the application of BPCV is a step towards sustainable agriculture.

KEYWORDS: bioinoculants, water deficit, corn productivity.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Mecanismos empregados por BPCV e seus principais efeitos nas plantas	14
Tabela 2. Linhagens bacterianas recomendadas para espécies de cereais para uso em inoculantes comerciais no Brasil	17
Tabela 3. Espécies de <i>Pseudomonas</i> utilizadas atualmente na fabricação de inoculantes pelo mundo	19
Tabela 4. Linhagens recomendadas para principais espécies de leguminosas para uso em inoculantes comerciais no Brasil	21

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	06
2 METODOLOGIA	07
3 REVISÃO DE LITERATURA	07
3.1 Aspectos gerais do milho	07
3.2 Exigências hídricas e déficit hídrico no milho	08
3.3 Bactérias Promotoras de Crescimento Vegetal (BPCV)	10
3.3.1 Gênero <i>Azospirillum</i>	14
3.3.2 Gênero <i>Pseudomonas</i>	17
3.3.3 Gênero <i>Rhizobium</i>	19
3.4 Influência das Bactérias Promotoras de Crescimento na Fisiologia e Morfologia das Plantas de Milho sob Estresse Hídrico	21
3.5 Desafios e Perspectivas futuras na Utilização de Bactérias Promotoras de Crescimento para Atenuar o Estresse Hídrico em Cultivos de Milho	23
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays L.*) possui notoriedade econômica e social no Brasil, e sua importância para o homem está relacionada principalmente ao seu potencial produtivo, valor nutricional e diferentes formas de utilização, seja como alimento seco ou espigas verdes (RIBEIRO, 2017).

Nas regiões semiáridas do Brasil, os sistemas agrícolas enfrentam dificuldades para atingir seu potencial máximo de produção, causados por fatores climáticos típicos da região, principalmente altas temperaturas e baixa precipitação, levando a secas prolongadas, o que pode ocasionar perdas significativas ao produtor. Além disso, muitos agricultores da região vivem à beira da pobreza, com terras insuficientes, falta de capital e insuficiente apoio técnico (MARENGO et al., 2016).

O estresse hídrico é um dos fatores abióticos que tem maior impacto no crescimento e na produtividade do milho (FALOYE et al., 2019). Além das perdas de produtividade, a deficiência hídrica encurta o período de formação dos grãos e interfere no desenvolvimento das sementes, aumentando o número de grãos abortados (MARWEIN et al., 2017). O déficit hídrico reduz a absorção e o acúmulo de nutrientes visto que, o crescimento das raízes é reduzido e a água é o meio pelo qual os nutrientes minerais são transferidos da solução do solo para as raízes das plantas (GESSLER et al., 2017).

Entre as estratégias para mitigar o estresse hídrico nas culturas, o uso de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP), às vezes chamadas de biofertilizantes, tem recebido atenção dos pesquisadores (RAMAKRISHNA et al., 2019). Os produtos biofertilizantes são geralmente baseados em BPCP e podem melhorar a produtividade das culturas e a fertilidade do solo sem qualquer impacto negativo no ambiente. Ademais, podem reduzir a disponibilidade de substâncias tóxicas, metais pesados, e aumentar a disponibilidade de nutrientes pelas plantas, como fósforo (P) e nitrogênio (N) (LU et al., 2021).

As BPCV são microrganismos que promovem uma melhoria no desempenho das plantas de diversas formas como por exemplo na produção de compostos bioativos como aminoácidos, hormônios e enzimas, essas bactérias promovem de forma direta e indireta o crescimento das plantas, com isso as plantas conseguem passar por adversidades climáticas como o déficit hídrico sem prejudicar sua produção e até mesmo levando a obterem altos índices produtivos.

Essas bactérias têm sido amplamente utilizadas para inocular sementes ou biofertilizantes com o objetivo de reduzir custos, promover o desenvolvimento e crescimento de espécies e reduzir o impacto ambiental dos fertilizantes minerais (MARIANO et al., 2013).

A Organização das Nações Unidas (ONU) tem como objetivo o desenvolvimento sustentável no Brasil, tendo em vista que até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo. Pesquisas recentes indicam que essas bactérias podem regular as plantas para resistir ao estresse, permitindo-lhes manter o crescimento e aumentar a produtividade mesmo diante da escassez de água (CHANDRA et al., 2018).

Diante do exposto, objetivou-se fazer um levantamento na literatura sobre a utilização de bactérias promotoras de crescimento vegetal como atenuação a seca na cultura do milho.

2 METODOLOGIA

Para a obtenção dos dados necessários para a elaboração do presente trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica narrativa, a qual não esgota as fontes de informações sobre o tema. Foram feitas buscas em sites de periódicos e comunidades científicas, principalmente o Portal de Periódicos Capes, o Google Acadêmico e o SciELO (Scientific Electronic Library Online – Portal Regional). Foram utilizados, portanto, artigos científicos, páginas eletrônicas, relatórios técnicos, dissertações de mestrado, teses de doutorado e livros, como fonte de informações. Os dados foram coletados dos últimos dez anos de 2013 a 2023.

Os descritores utilizados na busca foram: bactérias promotoras de crescimento vegetal, cultura do milho, gêneros de bactérias promotoras de crescimento e estresse hídrico na cultura do milho. Após a compilação dos trabalhos foi realizada a leitura e análise para a elaboração da revisão bibliográfica.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Aspectos gerais do milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura gramínea cujo centro de origem está nas regiões de várzea do sudoeste do México, onde seu ancestral selvagem é *Balsas teosinte* (*Z. mays* subsp. *Parviglumis*) (MORRISON, 2016). Quando verde, pode ser conservado ou vendido em latas (processamento industrial), desidratado ou consumido in natura, congelado em forma de

espigas ou grãos, como mudas de milho ou milho jovem colhido antes da polinização (SANTOS, 2020), e os grãos podem ser vendidos como farelo e consumidos secos na forma de casca, farinha e amido.

As plantas de milho têm estrutura semelhante a uma folha, sistema radicular fibroso com raízes em forma de cacho e raízes adventícias que surgem de um único botão com muitas folhas lanceoladas e ramos laterais terminando em uma inflorescência feminina. Na parte superior da planta desenvolvem-se inflorescências masculinas que contêm grãos de pólen. Os grãos de milho são compostos por três partes: pericarpo, endosperma e germe (GARCÍA-LARA; SERNA-SALDIVAR, 2019).

O milho destaca-se entre os cereais produzidos mundialmente como importante fonte de alimentação e nutrição para as mais diversas populações mundiais, sendo responsável por 58% da produção global de cereais (FAO, 2023).

O crescimento e desenvolvimento do milho é dividido em duas fases: nutricional e reprodutiva. Cada uma das fases vegetativas é caracterizada pela formação de um colar quando a bainha da folha é inserida no caule, e as fases reprodutivas são divididas em seis, nas quais ocorre a formação e o desenvolvimento da panícula (MAGALHÃES, 2006). O padrão de desenvolvimento da planta de milho, os intervalos de tempo específicos entre os estágios de desenvolvimento e o número total de folhas e espigas desenvolvidas podem variar dependendo do ano de cultivo, diferentes híbridos, data de plantio, localização e variáveis climáticas (GARCÍA-LARA; SERNA-SALDIVAR 2019).

3.2 Exigências hídricas e déficit hídrico no milho

O milho é uma das culturas que mais demandam água, principalmente por ser uma planta C4 com maiores taxas de fotossíntese e transpiração em comparação às plantas C3 (MARAMBE; MILAS, 2020). No entanto, a cultura é muito eficiente em termos de água, o que significa que produz mais matéria seca do que outras culturas menos eficientes que utilizam a mesma quantidade de água.

A necessidade total de água de uma cultura de milho depende de vários fatores, como a capacidade de retenção de água do solo, a duração do ciclo genotípico e o uso da cultura (milho em grão ou milho para forragem), a época de cultivo, a evapotranspiração, e precipitação ao longo do ciclo da cultura (WU et al., 2011).

As plantas C4 possuem mecanismos fotossintéticos que reduzem a fotorrespiração e conservam água, e são mais fotossinteticamente ativas que as plantas C3 (YERRAMSETTY et

al., 2017). Lundgren e Christin (2016) conduziram um estudo mostrando como as mudanças anatômicas em plantas C4 também exibem uma absorção mais eficiente de dióxido de carbono.

O milho pode ser cultivado em áreas com precipitação anual variando de 250 mm a 500 mm, embora a planta consuma aproximadamente 600 mm de água durante o seu ciclo de crescimento. Nas fases iniciais do crescimento do milho, o clima é quente e seco e a necessidade de água raramente excede 2,5 mm/dia. Durante a germinação e amadurecimento, o consumo diário pode aumentar para 5 a 7,5 mm. Porém, se a temperatura for alta e a umidade do ar baixa, o consumo pode chegar a 10 mm/dia (ANDRADE et al., 2006).

Santos et al. (2014) observaram que em condições semiáridas, mas precisamente nas condições edafoclimáticas do Nordeste, a evapotranspiração total da cultura de milho verde (Etc) foi de 300,54 mm, o período foi de 77 dias, o valor médio diário foi de 3,90 mm, o valor mínimo foi de 1,94 mm e o valor máximo foi de 1,94 mm. O valor de floração está próximo de 5,68 mm. Os mesmos autores verificaram que os coeficientes de cultivo (Kc) das variedades de milho verde foram 0,50, 0,64, 1,12 e 1,11 em diferentes estádios fenológicos com duração de 16, 20, 27 e 14 dias, respectivamente.

O estresse hídrico é definido como uma situação de fornecimento insuficiente de água à planta devido à disponibilidade limitada de água, afetando negativamente a planta e, portanto, afetando negativamente os processos fisiológicos e bioquímicos, levando à diminuição do turgor celular, o que é importante para se ter um metabolismo adequado, sendo capaz de afetar a fotossíntese, a atividade enzimática e a absorção de nutrientes (FLORES, et al., 2020).

A deficiência hídrica leva à desidratação celular e subsequente redução do potencial hídrico e da resistência hidráulica nos vasos do xilema. No entanto, o fechamento estomático e a perda de turgor que ocorrem sob estresse hídrico são devidos ao fornecimento esporádico de água do xilema para as células alongadas circundantes (TAIZ et al., 2017). Por consequência, o estresse hídrico severo prejudica as relações hídricas das plantas, a fotossíntese, a absorção de íons, o metabolismo de nutrientes e a distribuição de assimilados (SAUD et al., 2016).

No milho, o estresse hídrico causa atraso no aparecimento do estigma, aumento do intervalo entre a floração masculina e feminina e alta proporção de zigotos abortados após a fertilização (BERNINI et al., 2016). Os efeitos secundários decorrem em comprometimento da expansão foliar, atividade celular e metabólica, fechamento estomático, inibição da fotossíntese e abscisão foliar e cessação do crescimento das plantas (TAIZ et al., 2017).

Durante o desenvolvimento das plantas, evento em que a escassez hídrica tem maior impacto na produtividade de grãos, incluem a fase inicial de floração e desenvolvimento da inflorescência, pois, é nesta fase que o número potencial de grãos e o período de fertilização,

ou seja, o tempo de produção, são determinados (BARROS; CALADO, 2014). A presença de água nesta fase é crucial para evitar a desidratação dos grãos de pólen e, posteriormente, o aumento da deposição de matéria seca durante a fase de enchimento dos grãos.

O estresse hídrico geralmente reduz o fornecimento de dióxido de carbono (CO_2) para a fotossíntese, fechando os estômatos e reduzindo a transpiração, aumentando assim a resistência à difusão do vapor d'água (TAIZ et al., 2017). Esses eventos são devidos à redução da consistência das células-guarda estomáticas, ao subsequente fechamento estomático e à redução da difusão de CO_2 da atmosfera para os locais de carboxilação. Esta é considerada a principal razão para a redução da fotossíntese em condições de deficiência hídrica (PINHEIRO et al., 2011).

O milho submetido a estresse hídrico durante o período de cultivo apresenta ligeira diminuição do índice de área foliar (IAF), reduzindo assim a interceptação de luz e o acúmulo de carboidratos durante o crescimento vegetativo (COMAS et al., 2019). As plantas são altamente sensíveis à seca em qualquer momento do seu ciclo de crescimento, resultando em perdas significativas de produtividade (RUFINO et al., 2018).

Durante a fase de floração (VT), que determina o potencial produtivo de grãos, a seca pode reduzir a abundância de grãos e causar dessecação do pólen, aumentando assim os intervalos de silêncio de floração e a senescência precoce das folhas (ARAUS et al., 2012). Finalmente, durante a fase de enchimento dos grãos (R3), o déficit hídrico reduz a oferta dos fotoassimilados na fonte, ocasionando perda de massa dos grãos (KHODARAHPOUR et al., 2011).

3.3 Bactérias Promotoras de Crescimento Vegetal (BPCV)

O uso de bactérias em inoculantes ou formulações de biofertilizantes está sendo estudado e utilizado em todo o mundo (PANIGRAHI et al., 2019; DILNASHIN et al., 2020; MONTILLET et al., 2021). Existe informações de que essas tecnologias podem reduzir custos de produção e impactos ambientais e aumentar a produtividade das culturas devido ao uso de fertilizantes minerais (EMAMI et al., 2020). Lima et al. (2019) observaram que estes produtos têm o potencial de mitigar os impactos negativos do estresse hídrico nas culturas de milho.

As Bactérias Promotoras de Crescimento Vegetal (BPCV) são microrganismos que podem melhorar o desempenho das plantas de diversas maneiras, na produção de compostos bioativos como aminoácidos, hormônios e enzimas, por exemplo (AFZAL et al., 2019). Incluídas no BPCV estão as rizobactérias, que são bactérias que habitam a rizosfera e

promovem uma variedade de efeitos benéficos no crescimento de espécies vegetais. Essas bactérias promovem direta ou indiretamente o crescimento das plantas, secretando hormônios e enzimas ou promovendo a absorção e acúmulo de N e P (AHEMAD; KIBRET, 2014).

A aplicação de inoculantes contendo isolados bacterianos pode aumentar as taxas de fixação de nitrogênio e alterar a atividade das enzimas de assimilação de nitrogênio (PEREIRA et al., 2019), reduzindo assim as necessidades de fertilizantes nitrogenados e os custos de produção. Além de fixarem nitrogênio, as bactérias associadas ao solo podem melhorar o crescimento das plantas no campo, proporcionando melhor desenvolvimento das plantas através de diferentes mecanismos, liberação de nutrientes insolúveis (principalmente fósforo e ferro) ou inibição no desenvolvimento de pragas e patógenos vegetais, além de produzir fungicidas, antifúngicos, hormônios vegetais como auxinas, citocininas, giberelinas, etileno e ácido abscísico, e também pode sintetizar hormônios vegetais como o ácido indolacético (TURATTO et al., 2018).

Essas bactérias tem como objetivo mitigar o déficit hídrico na cultura do milho, e com isso permitindo uma produção significativa e até mesmo altos índices produtivos da cultura. Para que isso ocorra essas bactérias mesmo com falta de água facilita a absorção de nutrientes para a planta proporcionando fixação de N, liberação de nutrientes insolúveis, e além de tudo protegendo-as de pragas e patógenos vegetais.

As BPCV estão associadas à maioria das espécies de plantas e são capazes de estabelecer populações endofíticas em diferentes tecidos e órgãos vegetais sem causar quaisquer sintomas evidentes. No entanto, Panigrahi et al. (2020), estudaram as propriedades da bactéria endofítica *Enterobacter cloacae* MG00145 isolada do manjeriço, que tem a capacidade de produzir ácido indol acético (IAA) e promover o crescimento das plantas, e descobriram que o isolado tinha múltiplas propriedades promotoras de crescimento (produção de IAA, dissolução de fosfato, produção de sideróforos e amônia).

Portanto, o uso de biofertilizantes auxilia na redução da poluição ambiental, do consumo de uréia e da perda de solo, proporcionando melhor desempenho das plantas em condições adversas, aumentando assim a produtividade das culturas (DILNASHIN et al., 2020).

Dentre os tipos de bactérias fixadoras de nitrogênio mais estudados, *Azospirillum* tem chamado a atenção devido aos seus efeitos positivos no desenvolvimento radicular, na absorção de água e nutrientes e na fixação biológica de nitrogênio (FBN) quando associada a gramíneas (QUATRIN et al., 2019). Aquino et al. (2019) estudaram bactérias endofíticas que promovem o crescimento de plantas em milho e sorgo e descobriram que as cepas isoladas (IPACC26) e

(IPACC30) foram ambas identificadas como *Bacillus subtilis* e tiveram um bom efeito no acúmulo de nitrogênio no milho.

Os mecanismos de ação das BPCP são claramente diversos e nem todas as bactérias possuem o mesmo mecanismo (MONDANI et al., 2019). Esses mecanismos incluem alterações no conteúdo hormonal, produção de compostos voláteis, aumento da disponibilidade de nutrientes e redução dos níveis de etileno nas raízes das plantas em desenvolvimento através da hidrólise do ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) para expandir a resposta ao estresse induzido pelo déficit hídrico (DIMKPA et al., 2009).

Kasim et al. (2013) afirma que a presença de BPCV pode aumentar a produção de genes relacionados ao estresse hídrico, melhorando assim a tolerância às condições de estresse. De acordo com Santos et al. (2020), a presença de BPCV melhora a capacidade das plantas sob limitação hídrica de osmorregular através de maior acúmulo de solutos orgânicos em comparação com plantas não inoculadas sob estresse hídrico.

Na pesquisa de Kavamura (2012), com a avaliação de uma estirpe de *Bacillus* (6.2 RZS 3) obteve respostas de proteção ao milho sob stress hídrico e redução na inibição do crescimento induzida pela seca. Essa proteção pode ser conferida pela produção de exopolissacarídeos, biofilmes e ACC desaminase. No entanto, Mundani et al. (2019) avaliaram o efeito do BPCP na eficiência do uso da radiação e na produtividade da soja (*Glycine max*) sob condições de estresse por déficit hídrico, e apontaram que a BPCV pode aumentar a produtividade de soja sob estresse hídrico, melhorar a eficiência da fotossíntese e a utilização da radiação solar.

De acordo com Dimkpa et al. (2009), além de produzir polissacarídeos e biofilmes extracelulares, o milho também pode ser protegido do estresse hídrico pela produção de AIA e óxido nítrico, promovendo assim a proliferação radicular e aumentando sua capacidade de absorção de água; alterando a elasticidade da membrana celular altera a tolerância a escassez de água.

Quando as plantas estão sob estresse, algumas BPCVs biossintetizam ACCA – ácido aminociclopropano-1-carboxílico desaminase, que também é uma característica relevante na promoção do crescimento das plantas, visto que esta enzima atua reduzindo os níveis de etileno no solo. Pois o excesso desse hormônio pode prejudicar o desenvolvimento das plantas e até levando a morte (GLICK et al., 2014).

A rizosfera consiste na área do solo ligada às raízes e alguns milímetros fora da superfície radicular, onde ocorre a maior parte dos processos de interação entre microrganismos e plantas (DE SOUZA; AMBROSINI; PASSAGLIA, 2015). As bactérias que estão inseridas nesta área podem ser divididas em bactérias benéficas, prejudiciais e neutras com base em seus

efeitos no crescimento das plantas (DOBBELAERE et al., 2010). As bactérias benéficas que envolvem esta área são também conhecidas como bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV), representando um grupo de bactérias que ajudam a melhorar o crescimento e desenvolvimento de plantas de significativo interesse económico, incluindo cereais, oleaginosas, leguminosas e vegetais (VERMA; MISHRA; ARORA, 2019).

Esses microrganismos são empregados como aditivos em fertilizantes químicos, visando aumentar o rendimento das culturas e desenvolver sistemas de produção agrícola mais sustentáveis (QIU et al., 2019). Vários gêneros de BPCV têm sido utilizados em formulações de inoculantes para plantas. Ao longo dos anos de 1998 e 2014, pelo menos 30 gêneros foram utilizados nessas preparações, sendo os mais proeminentes: *Azospirillum*, *Azorhizobium*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Bradyrhizobium*, *Burkholderia Deletteella spp.*, *Enterobacter spp.*, *Gluconacetobacter spp.*, *Herbaspirillum spp.*, *Klebsiella spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Mesorhizobium spp.*, *Rhizobium spp.*, *Serratia spp.* e *Sinensis spp. rhizobia* (BASHAN et al., 2014).

Diferentes mecanismos estão envolvidos na estimulação do crescimento vegetal pelas BPCV, as quais podem atuar direta ou indiretamente no seu metabolismo. Os mecanismos diretos incluem o aumento da disponibilidade de nutrientes através da fixação biológica do nitrogênio atmosférico, solubilização de compostos minerais como o fósforo, produção de sideróforos e regulação dos níveis hormonais através da produção de auxinas, giberelinas, citocininas e etileno. Mecanismos indiretos envolvem atividade de biocontrole e antagonismo contra diversos fitopatógenos, induzindo sistemas vegetais contra doenças além de induzir tolerância e resistência das plantas a diferentes estresses abióticos como salinidade, seca e temperaturas extremas (DE SOUZA; AMBROSINI; PASSAGLIA, 2015; ALOLA, 2016). Os efeitos das BPCV no crescimento das plantas podem ser devidos a uma combinação de diferentes mecanismos, uma vez que cada tipo tem efeitos diferentes nas plantas (Tabela 1). Comumente, pesquisas mostram que a combinação com essas bactérias aumenta a germinação, o vigor das mudas, o crescimento de raízes e parte aérea, a biomassa total e a produtividade das plantas (VERMA; MISHRA; ARORA, 2019).

A influência das BPCV nas plantas varia dependendo do nicho colonizador. Pois as bactérias, denominadas endófitas, colonizam os espaços intercelulares dos tecidos vegetais, enquanto outras induzem a formação de estruturas diferenciadas nas raízes ou acumulam-se na superfície radicular (DE SOUZA; AMBROSINI; PASSAGLIA, 2015). As interações mais representativas entre a BPCV e as plantas são aquelas dos gêneros *Rhizobium* e *Bradyrhizobium* com plantas leguminosas. Nessa interação, as raízes formam estruturas diferenciadas

denominadas nódulos, cuja principal função é proporcionar um ambiente favorável à fixação biológica de nitrogênio (POOLE; RAMACHANDRAN; TERPOLILLI, 2018). Uma outra relação é caracterizada pela colonização de superfícies radiculares e formação de biofilmes, que podem ser representados principalmente por bactérias dos gêneros *Pseudomonas* e *Azospirillum*. Inclui-se também interações em que ocorre a colonização dos tecidos internos das raízes sem formação de nódulos, representadas por *Lybispirillum spp.* *Azospirillum* e *Lycospirillum* que são vistas por bactérias e sua associação com gramíneas, ao passo que *Pseudomonas* está associada a vegetais de grande importância econômica (DORJEY et al., 2017).

Tabela 1. Mecanismos empregados por BPCV e seus principais efeitos nas plantas

Mecanismo	Efeito no crescimento da planta	Exemplos de gêneros de BPCV
Fixação de nitrogênio	Aumento na quantidade de nitrogênio e biomassa	<i>Acetobacter, Azospirillum Azotobacter, Bradyrhizobium, Burkholderia, Frankia, Herbaspirillum, Rhizobium</i>
Produção de fitormônios	Aumento da ramificação e comprimento da raiz, da parte aérea e da biomassa	<i>Azospirillum, Bacillus, Bradyrhizobium, Herbaspirillum, Pseudomonas, Rhizobium</i>
Solubilização de fosfatos	Aumento da quantidade de fósforo e da biomassa	<i>Azospirillum, Azotobacter, Bacillus, Burkholderia, Enterobacter, Herbaspirillum, Pseudomonas, Rhizobium</i>
Indução de resistência a doenças e estresse	Aumento da sobrevivência de plântulas e da biomassa	<i>Azospirillum, Pseudomonas, Rhizobium</i>

Fonte: Adaptado de VERMA; MISHRA; ARORA, 2019.

3.3.1 Gênero *Azospirillum*

De acordo com a Lista de Nomes Procarióticos na Nomenclatura - Banco de Dados LPSN (LPSN, 2023), o gênero *Azospirillum* faz parte da classe *Alphaproteobacteria* da ordem *Rhodospirillales*, família *Rhodospirillidae*, e é composto por 33 espécies até o momento. Este gênero é caracterizado por bactérias de vida livre no solo na maioria dos ambientes terrestres (HUERGO et al., 2008) e foi encontrado na rizosfera de gramíneas, incluindo arroz, trigo, milho e cana-de-açúcar (MEHNAZ, 2015).

A espécie *Spirillum lipoferum* foi originalmente descrita em 1925 e 1978, com sua reclassificação como *Azospirillum* em 1978 e a descrição das duas primeiras espécies do gênero: *Azospirillum lipoferum* e *Azospirillum brasilense* (TARRAND; KRIEG; DÖBEREINER, 1978), que primeiro ganhou mundialmente atenção devido à descoberta das capacidades biológicas de fixação de nitrogênio associadas às gramíneas (DÖBEREINER; DAY, 1976). As espécies que incluem este gênero são bactérias Gram-negativas, não formadoras de esporos, caracterizadas por um padrão flagelar misto em forma de bastonete com movimentos corporais vibratórios característicos (CUNHA, 2023), possuindo diâmetro de 1 microm (µm) e comprimento de 2,1 a 3,8 µm (PRIMAVESI et al., 2005). Inclusive são conhecidos pela capacidade de colonizar a rizosfera das plantas, porém, podem haver diferenças específicas na forma de colonização entre linhagens e espécies do gênero. A maioria das espécies coloniza principalmente a superfície radicular, enquanto certas cepas de algumas espécies são capazes de infectar os tecidos internos da planta (BASHAN; HOLGUIN; DE-BASHAN, 2004). Espécies de *Azospirillum* apresentam quimiotaxia em relação a diversas secreções secretadas pelas raízes dessas plantas, como aminoácidos, ácidos orgânicos, açúcares e compostos aromáticos (RODRÍGUEZ-NAVARRO; DARDANELLI; RUÍZ-SAÍNIZ, 2007).

As bactérias deste gênero possuem vários genes relacionados à fixação, assimilação e regulação de nitrogênio (N). Segundo relatos da literatura, através do FBN, essas bactérias podem contribuir com 5% a 18% do incremento total de nitrogênio das gramíneas, ou seja, apenas uma pequena parte do nitrogênio fixado é efetivamente transferida para a planta. Portanto, a estimulação hormonal é a maior contribuição do *Azospirillum spp*, além de ser notório o crescimento de plantas (BASHAN; DE-BASHAN, 2010; MEHNAZ, 2015).

Em diversas pesquisas são relatadas a capacidade do *Azospirillum spp*. Serem capazes de promover o crescimento através da produção própria de fitohormônios (principalmente auxinas, giberelinas e citocininas, além de óxido nítrico e ácido abscísico) (BASHAN; DE-BASHAN, 2010). Além disso, agem como moléculas efetoras para estimular cascatas de sinalização celular nas plantas, induzindo sua produção endógena (COHEN et al., 2015; DUCA et al., 2014). Dentre os fitohormônios produzidos por *Azospirillum spp*, o mais comumente usado é o ácido indol-3-acético (IAA), considerado a auxina mais importante e produzido principalmente por bactérias (GLICK, 2014; MEHNAZ, 2015). Assim como outras auxinas, a AIA parece induzir mudanças diretas na estrutura da raiz da planta, como alongamento da raiz, raiz lateral e desenvolvimento de pêlos radiculares, e aumento da capacidade da planta de absorver água e minerais (CHAMAM et al., 2013; COHEN et al., 2015; DUCA et al., 2014). As giberelinas (GA) e o ácido abscísico (ABA) são outros importantes fitohormônios

produzidos por bactérias desse gênero que estão envolvidos nas respostas das plantas a fontes de estresse abiótico e estimulam os mecanismos de defesa das plantas (VACHERON et al., 2013).

Além dos fitohormônios, as bactérias deste gênero também podem estimular a biossíntese de bacteriocinas, sideróforos e metabólitos secundários com atividade antibacteriana, contribuindo para o controle biológico de fitopatógenos (VACHERON et al., 2013; WALKER et al., 2011). Devido aos diversos efeitos positivos proporcionados pelo *Azospirillum* durante sua interação com as plantas, seu uso na agricultura tem se mostrado uma estratégia importante e tem sido comercializado em diversos países, incluindo Brasil, Argentina, México, Itália, França, Austrália, Alemanha, Estados Unidos, Bélgica, Índia e Uruguai, seja em formulações puras ou em formulações misturadas com outros microrganismos (SANTOS; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2021). Porém, deve-se ressaltar que o sucesso das interações com bactérias deste gênero depende das espécies e cepas das plantas envolvidas, bem como das condições ambientais onde ocorre a colonização (SANTI; BOGUSZ; FRANCHE, 2013).

Um projeto de pesquisa de um grupo da Embrapa Soja em colaboração com o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) testou extensivamente a eficiência agrônômica do *Azospirillum* em testes de laboratório e de campo. Cepas brasileiras de *Azospirillum* foram selecionadas de acordo com as normas legislativas para inoculantes do MAPA, que apresentam maior taxa de sobrevivência no solo, promovem o crescimento e estão adaptadas à tecnologia utilizada nas culturas de milho e trigo. Os resultados obtidos mostraram que estas culturas aumentaram o rendimento de grãos em 24 a 30% em comparação com os controles não inoculados. Com base nesses e em outros estudos, o MAPA passou a recomendar diversas cepas de *A. brasiliensis* para uso em formulações de inoculantes para culturas de cereais (Tabela 2), conforme publicado na Portaria Normativa nº 13, de 24 de março de 2011 (MAPA, 2011). Além disso, como resultado dessa pesquisa, a Embrapa Soja, em colaboração com a empresa Total Biotecnologia, desenvolveu o primeiro inoculante líquido contendo as cepas Ab-V5 e Ab-V6, lançado em 2010 e atualmente utilizado no cultivo de milho e trigo (SANTOS; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2021).

Tabela 2. Linhagens bacterianas recomendadas para espécies de cereais para uso em inoculantes comerciais no Brasil

Cultura	Espécie Bacteriana	Linhagem
<i>Triticum</i> spp.	<i>Azospirillum brasilense</i>	Ab-V1
<i>Zea mays</i>	<i>Azospirillum brasilense</i>	Ab-V4
<i>Zea mays</i> e <i>Triticum</i> spp.	<i>Azospirillum brasilense</i>	Ab-V5
<i>Zea mays</i> e <i>Triticum</i> spp.	<i>Azospirillum brasilense</i>	Ab-V6
<i>Zea mays</i>	<i>Azospirillum brasilense</i>	Ab-V7
<i>Triticum</i> spp.	<i>Azospirillum brasilense</i>	Ab-V8
<i>Oryza sativa</i>	<i>Azospirillum brasilense</i>	Ab-V5
<i>O. sativa</i>	<i>Azospirillum brasilense</i>	Ab-V6

Fonte: Adaptado de MAPA, 2011.

Os genomas das cepas Ab-V5 e Ab-V6 da soja brasileira foram sequenciados e anotados pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Biotecnologia de Solos da Embrapa Soja e estão disponíveis no GenBank sob os números de acesso POQV00000000.1 e POTD00000000.1, respectivamente. O genoma da cepa Ab-V5 de *A. brasilense* foi estimado em 6.934.595 pb e o da cepa Ab-V6 de *A. brasilense* foi estimado em 7.197.196 pb, ambos montados a partir de 63 contigs. Constatou-se que as cepas Ab-V5 e Ab-V6 tinham dois plasmídeos em comum e um gene de fixação de nitrogênio semelhante (*nif*), o que lhes conferia a capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico. Embora essas cepas difiram na capacidade de sintetizar fitohormônios, todas possuem os mesmos genes relacionados à síntese de auxinas (FUKAMI; CERZINI; HUNGRIA, 2018; HUNGRIA; RIBEIRO; NOGUEIRA, 2018).

3.3.2 Gênero *Pseudomonas*

De acordo com LPSN (2023), o gênero *Pseudomonas* faz parte da família Pseudomonadaceae, ordem Pseudomonas, classe Gammaproteobacteria e é composto por 532 espécies até o momento. Dentre as BPCVs, o gênero *Pseudomonas* é considerado o maior e mais promissor porque as espécies deste gênero apresentam características únicas, entre elas: rápido crescimento, exigências nutricionais simples e capacidade de utilizar diferentes substratos inorgânicos, conferindo assim diversidade nutricional, alta mobilidade e diversidade de metabólitos produzidos. As espécies básicas deste gênero compreendem *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas syringae*, *Pseudomonas chlororaphis* e *Pseudomonas aureus* (DORJEY; DOLKAR; SHARMA, 2017).

As espécies deste gênero são bactérias Gram-negativas, quimioheterotróficas, aeróbicas da rizosfera, com flagelos polares, sendo a grande maioria de vida livre ou endofítica (CUNHA, 2023). Essas espécies são abundantes em diversos nichos ecológicos, incluindo ambientes terrestres e marinhos, e apresentam grande potencial para uso como biofertilizantes (PANPATTE et al., 2016). As espécies de *Pseudomonas* exibem múltiplos mecanismos de promoção de crescimento, como produção de enzimas e metabólitos, como antibióticos, sideróforos, biosurfactantes, osmólitos e fitohormônios, solubilização de nutrientes, além de atuarem como organismos causadores de doenças. Os agentes de controle exercem efeitos poderosos e mostram competição microbiana ativa com outros organismos (ANDREOLLI et al., 2021; PANPATTE et al., 2016; SANTOS; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2019).

As espécies de *Pseudomonas* mais comumente utilizadas em formulações inoculantes incluem *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida* e *Pseudomonas aeruginosa*, que têm o potencial de colonizar uma variedade de espécies de plantas, incluindo gramíneas, vegetais, legumes e leguminosas (NADEEM et al., 2016). *Pseudomonas fluorescens* é considerada a espécie mais estudada do gênero e é reconhecida por sua capacidade de se adaptar rapidamente à rizosfera vegetal, de exibir múltiplos mecanismos de promoção de crescimento e de produzir pigmentos solúveis em água, diferentemente de outras espécies (BOTELHO; Mendonça-Hagler, 2006). Cepas de *Pseudomonas fluorescens* são amplamente utilizadas em mais de 50 espécies de plantas e sua principal função é proteger as plantas de patógenos durante o desenvolvimento (PANPATTE et al., 2016).

O gênero *Pseudomonas* é considerado uma das BPCVs mais promissoras e é amplamente utilizado em diversos inoculantes por empresas estrangeiras devido à sua versatilidade e potencial, mostrando seu principal uso no cultivo de hortaliças e como outras espécies vegetais eficácia de agentes de controle biológico (NAIK et. al., 2008). Atualmente, foi introduzido no Brasil um inoculante desenvolvido pela Embrapa Soja que combina espécies de *Azospirillum brasiliensis* e *Pseudomonas fluorescens*. Este inoculante versátil já está disponível para produtores agrícolas. A Tabela 3 resume as principais espécies utilizadas em formulações comerciais e seus atuais países de produção.

Tabela 3. Espécies de *Pseudomonas* utilizadas atualmente na fabricação de inoculantes pelo mundo

Espécie Bacteriana	País do Fabricante
<i>P. fluorescens</i>	Brasil, Vietnã, Cuba, Sri Lanka, Alemanha e Índia
<i>P. striata</i>	Índia
<i>P. azotoformans</i>	Suécia
<i>P. chlororaphis</i>	Suécia
<i>P. aurantiaca</i>	Argentina
<i>Pseudomonas spp.</i>	África do Sul e Reino Unido

Fonte: Adaptado de SINGH et al., 2022.

3.3.3 Gênero *Rhizobium*

O gênero *Rhizobium* foi descrito pela primeira vez como o único representante de bactérias fixadoras de nitrogênio que estabelecem interações simbióticas com plantas leguminosas. O gênero é composto por seis espécies principais: *Rhizobium leguminosarum*, *Rhizobium meliloti*, *Rhizobium trilobata*, *Rhizobium leguminosarum*, *Rhizobium tremoço* e *Rhizobium japonicum* (CUNHA, 2023). Tendo em conta os padrões de crescimento, a taxonomia foi alterada em 1982 e reclassificada em duas categorias: *Rhizobium spp.* e *Bradyrhizobium spp.*, sendo o primeiro caracterizado por reprodução rápida e o segundo caracterizado por reprodução lenta (DELAMUTA et al., 2013).

O termo Rhizobia ou Rizóbios foi anteriormente criado para designar espécies do gênero *Rhizobium*, entretanto, é amplamente utilizado para designar bactérias capazes de formar nódulos e FBN em leguminosas (WILLEMS, 2006). Presentemente, os rizóbios são divididos em seis gêneros principais: *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Nitrogenus*, *Heterorhizobium* e *Sinorhizobium*, que são os gêneros bacterianos mais comuns na cultura de leguminosas usualmente utilizados como inoculantes (SANTOS; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2019; VELÁZQUEZ e outros, 2010).

O gênero *Rhizobium* faz parte da classe das Alphaproteobactérias, ordem Rhizobiales, família Rhizobiaceae. De acordo com a LPSN (2023), o gênero *Rhizobium* é composto por 177 espécies até o momento. *Rhizobium* são bactérias Gram-negativas, não formadoras de esporos, em forma de bastonete, com tamanho de 0,5-0,9 x 1,2-3,0 µm, cuja motilidade é determinada por um flagelo polar e dois ou mais flagelos laterais. São principalmente aeróbios e quimioorganotróficos (CUNHA, 2023). Esse grupo é composto por gêneros de bactérias presentes no solo que são capazes de simbiose com as raízes das leguminosas, formando

estruturas diferenciadas denominadas nódulos. As simbioses leguminosas-rizóbios são o tipo de associação entre plantas e bactérias mais estudado porque os FBNs são importantes para essas plantas (HAYAT et al., 2010; RAJWAR; SAHGAL; JOHRI, 2013).

O mecanismo básico de promoção do crescimento exercido pelas bactérias do gênero *Rhizobium*, bem como por outras bactérias rizóbias, é o FBN. Embora este seja o mecanismo mais estudado e caracterizado, estes e outros gêneros de *Rhizobium* demonstraram a capacidade de produzir fitohormônios que, além de aumentarem o nitrogênio na planta, proporcionam outros benefícios às leguminosas (SINDHU et al., 2019; WANG et al., 2019). Algumas pesquisas relatam que o AIA é o principal fitohormônio produzido pelos rizóbios. Os rizóbios produtores de AIA apresentam nodulação mais intensa associada às leguminosas, pois a auxina pode influenciar esse processo de nodulação (PERRIG et al., 2007). O AIA também atua alterando a morfologia radicular, resultando em uma estrutura radicular mais ampla que aumenta a absorção de nutrientes pelas plantas (DAZZO; YANNI, 2006). Algumas cepas de *Bradyrhizobium* também podem proporcionar tolerância a estresses abióticos devido à produção e acúmulo de ácido abscísico (ABA) e níveis reduzidos de etileno (SINDHU et al., 2019).

A utilização de rizóbios na agricultura é uma prática muito importante devido o FBN promovido por essas bactérias reduzirem a necessidade de aplicação de fertilizantes nitrogenados. Inoculantes à base de rizóbio são frequentemente usados para melhorar o crescimento e o rendimento final de culturas leguminosas como a soja (PRAKAMHANG et al., 2015; SINDHU et al., 2019). Das aproximadamente 13 mil espécies de leguminosas, apenas 20% foram examinadas quanto à sua capacidade de nodulação, apoiando a possibilidade de que a fixação de nitrogênio ocorra através da associação com rizóbios (RAJWAR; SAHGAL; JOHRI, 2013). Em 1950, pesquisadores da Seção de Microbiologia Agrícola (SEMIA) da Fundação Nacional de Pesquisas Agropecuárias do Rio Grande do Sul (FEPAGRO - RS) estabeleceram um banco bacteriano conjunto com o objetivo de garantir a manutenção e distribuição de cepas recomendadas para uso comercial em culturas leguminosas. Diversas instituições de pesquisa passaram a depositar isolados nesta coleção e atualmente ela é considerada pelo MAPA (Coleção Nacional de Referência em *Rhizobium*), tendo como base em múltiplos estudos que avaliaram a interação dessas bactérias com leguminosas, foram selecionadas diversas cepas que hoje são recomendadas pelo MAPA para uso em formulações de inoculantes de leguminosas (Tabela 4), conforme publicado na Portaria Normativa nº 13 de 24 de março de 2011 (MAPA, 2011).

Tabela 4. Linhagens recomendadas para principais espécies de leguminosas para uso em inoculantes comerciais no Brasil

Cultura	Espécie Bacteriana	Linhagem
<i>Glycine max</i>	<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	SEMIA 5079
<i>Glycine max</i>	<i>Bradyrhizobium diazoefficiens</i>	SEMIA 5080
<i>Glycine max</i>	<i>Bradyrhizobium elkanii</i>	SEMIA 587 e 5019
<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Rhizobium tropici</i>	SEMIA 4077, 4080 e 4088
<i>Vigna unguiculata</i>	<i>Bradyrhizobium</i> spp.	SEMIA 6461, 6462, 6463 e 6464
<i>Lens esculenta</i>	<i>Rhizobium leguminosarum</i>	SEMIA 344, 3025 e 3026
<i>Pisum sativum</i>	<i>Rhizobium leguminosarum</i>	SEMIA 3007 e 3033

Fonte: Adaptado de MAPA, 2011.

As cepas de *Rhizobium tropicalis* SEMIA 4077 e 4088 são atualmente cepas recomendadas pelo MAPA e são as mais comumente utilizadas comercialmente para produção de inoculantes de leguminosas. Essas cepas são mais adequadas e recomendadas para uso em solos tropicais ácidos devido à sua forte capacidade de nodulação e alta tolerância a estresses ambientais como alta temperatura, acidez e salinidade (DEL CERRO et al., 2017). Várias cepas de *Rhizobium leguminosarum* também foram sugeridas para o preparo de inoculantes para lentilhas e ervilhas, bem como outras leguminosas.

3.4 Influência das Bactérias Promotoras de Crescimento na Fisiologia e Morfologia das Plantas de Milho sob Estresse Hídrico

O aumento das alterações climáticas, a má gestão dos recursos hídricos, a indisponibilidade de água em fases críticas de crescimento e as condições inadequadas do solo estão entre os principais fatores responsáveis pelo fraco desempenho do setor agrícola nas últimas décadas (TIGCHELAAR et al., 2018). É provável que a variabilidade do rendimento das culturas aumente no futuro devido à disponibilidade reduzida de água para a agricultura, o que comprometeria gravemente o acesso aos alimentos e afetaria negativamente a segurança alimentar das pessoas que vivem nos países em desenvolvimento (LUHUNGA, 2017). Estima-se que o stress do déficit hídrico tenha causado uma perda de mais de 1.820 milhões de Mg na produção de cereais (trigo, arroz e milho) durante as últimas quatro décadas (LESK et al., 2016).

Em múltiplas avaliações do impacto das alterações climáticas nas culturas, o milho é considerado o mais afetado negativamente (ZAMPIERI et al., 2019). Durante o ciclo de crescimento do milho, a escassez hídrica pode levar à inibição da fotossíntese e também reduzir

a utilização de nutrientes dos órgãos reprodutivos (ZIPPER et al., 2016). A diminuição da atividade do sistema fotossintético, principalmente devido ao fechamento estomático, degradação da clorofila e alterações na função das principais enzimas metabólicas, é o principal resultado da seca no milho (USMANI et al., 2020). Como a maioria das plantas que enfrentam estresse hídrico, as plantas de milho são capazes de manter o crescimento em condições de seca, aumentando a absorção de água e nutrientes e regulando os metabólitos do estresse, como as enzimas antioxidantes (NAEEM et al., 2018). Contudo, a exposição sustentada ou de longo prazo à seca pode causar danos irreversíveis ao crescimento, afetando em última análise a produtividade do milho (KARIM; RAHMAN, 2015). Assim sendo, o uso de inoculantes microbianos oferece uma solução alternativa e economicamente viável para apoiar o crescimento do milho em condições de déficit hídrico.

As Bactérias Promotoras do Crescimento Vegetal (BPCV) ocupam a rizosfera e possuem a capacidade de sobrevivência em condições extremamente secas. A aplicação de BPCV modifica a arquitetura radicular e aumenta a absorção de nutrientes e a capacidade de captação de água das plantas (KASIM et al., 2013). Os inoculantes bacterianos atuam inclusive na produção de fitohormônios (incluindo auxinas, giberelinas, ácido abscísico, etileno), solubilização de fosfatos minerais e catabolismo de moléculas sinalizadoras de estresse, como 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) desaminase bacteriana, que pode afetar a função fisiológica, mecanismos relacionados ao crescimento e à tolerância à seca (ULRICH et al., 2019). Ademais, a BPCV também estimula a capacidade de tolerância à seca das plantas hospedeiras, regulando a síntese de osmólitos, exopolissacarídeos (EPS) e proteínas de estresse (NIU et al., 2018). Foi constatado que a aplicação combinada de inoculantes microbianos pode ser mais útil do que cepas individuais para melhorar a tolerância à seca nas plantas (KAVADIA et al., 2020). Menciona-se que o uso de consórcios microbianos, em vez de inoculantes de semente única, pode fornecer uma vantagem significativa na exploração das propriedades complementares de várias cepas microbianas que diferem na tolerância ao estresse (WOO; PEPE, 2018).

Radhakrishnan et al. (2017), que, ao estudar os mecanismos fisiológicos das BPCV para conferir tolerância à seca no milho, descobriram que *Bacillus sp.* apresentou o maior crescimento, demonstrando ainda que *Bacillus spp.* são ferramentas biológicas importantes para a sobrevivência em condições ambientais adversas. Esta cepa tem sido amplamente utilizada em estudos recentes para melhorar o desempenho das culturas sob condições climáticas adversas, principalmente devido às suas propriedades promotoras de crescimento, incluindo a modulação da atividade da ACC desaminase e a síntese de fitohormônios nas plantas (AFZAL

et al., 2020). Ringwe; Joshi (2014) apontaram que os metabólitos e as propriedades de esporulação das espécies de *Bacillus* são mais eficientes, levando a afirmação que esse grupo de bactérias possivelmente pode-se o tornar um dos biofertilizantes mais eficazes na agricultura. Os resultados mostraram ainda que *Enterobacter spp.* também foram capazes de manter alto crescimento sob estresse osmótico na cultura do milho (RADHAKRISHNAN et al., 2017). Em seu estudo, Naveed et al. (2014) mostraram que *Enterobacter spp.* pode colonizar eficazmente a cultura do milho em solos secos e, portanto, é classificado como uma espécie tolerante à seca.

García et al. (2017) observaram que a inoculação de mudas de milho com bactérias tolerantes ao estresse osmótico melhora o crescimento das plantas sob limitações hídricas. Joshi et al. (2020) sugeriram que os impactos negativos da seca no crescimento das plantas poderiam ser aliviados pela inoculação de sementes com *Bacillus spp.* que pode colonizar solos áridos e melhorar o potencial hídrico do solo, aumentando a estabilidade agregada. Tais efeitos positivos também foram evidentes no estudo de Radhakrishnan et al. (2017), onde observou-se incremento na biomassa da parte aérea e da raiz pela inoculação bacteriana, que pode estar relacionado ao aumento do comprimento da raiz e à melhor formação de raízes posteriores e pêlos radiculares que facilitam a absorção de água e nutrientes em plantas expostas ao estresse hídrico (NIU et al., 2017).

3.5 Desafios e Perspectivas futuras na Utilização de Bactérias Promotoras de Crescimento para Atenuar o Estresse Hídrico em Cultivos de Milho

A seca às vezes altera completamente a morfologia de uma planta. Com a ajuda das Bactérias Promotoras de Crescimento Vegetal, a tolerância das plantas à seca pode ser melhorada em grande medida. As BPCV impactam não apenas uma parte da planta, mas ajudam a mitigar os efeitos da seca na planta como um todo. Elas melhoram a morfologia das raízes e dos brotos, empregam mecanismos antioxidantes, aumentam a sustentabilidade da água, produzem biofilmes para melhorar a disponibilidade de água para a planta e produzem metabólitos secundários para beneficiar as plantas (LI et al., 2020).

Contudo, a consistência no desempenho das BPCV em condições de campo ainda é questionável. A base desta preocupação é a qualidade inferior dos inóculos e a incapacidade das bactérias de lutar contra as populações endógenas em condições desvantajosas. As cepas BPCV inoculadas devem ser adeptas da rizosfera para competir com as populações endógenas pela aquisição de recursos limitados, sobreviver e colonizar áreas específicas de raízes. Portanto, altas concentrações de cepas bacterianas benéficas devem ser alimentadas no

solo para utilidade agronômica (KUMAR et al., 2019). Nos casos em que uma única cepa bacteriana não é eficaz em fornecer tolerância ao estresse, o consórcio bacteriano de múltiplas cepas pode ser benéfico. O método de inoculação também é importante, pois a aplicação inadequada pode levar a resultados inconsistentes e errados. Algumas técnicas de inoculação precisas incluem o uso de inoculantes à base de turfa, inoculação líquida e revestimento de sementes (KATIVAR et al., 2016).

A viabilidade comercial da BPCV depende da seleção e desempenho de cepas robustas em solos deficientes em nutrientes e em mudanças nas condições climáticas. Resulta-se também da vida útil da BPCV, da viabilidade celular, da proteção do ambiente do solo, da conveniência de uso e da relação custo-benefício. Estas cepas também devem ser não patogênicas e não toxigênicas (TABASSUM et al., 2017). A microencapsulação da BPCV é uma boa forma de melhorar o desempenho, reduzir custos, aumentar a viabilidade e a vida útil (MUTTURI et al., 2016). Comumente, a aplicação da BPCV é uma abordagem promissora para combater as tensões bióticas e abióticas e promover a agricultura sustentável. O êxito da sua comercialização dependerá da colaboração entre agricultores, microbiologistas, biotecnólogos, industriais e agricultores. Gradativamente a aplicação das BPCV é um passo em direção à agricultura sustentável.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As interações mais representativas entre as Bactérias Promotoras de Crescimento Vegetal (BPCV) e as plantas são aquelas dos gêneros *Rhizobium* e *Bradyrhizobium* com plantas leguminosas. Nessa interação, as raízes formam estruturas diferenciadas denominadas nódulos, cuja principal função é proporcionar um ambiente favorável à fixação biológica de nitrogênio.

A seca às vezes altera completamente a morfologia de uma planta. Com a ajuda das Bactérias Promotoras de Crescimento Vegetal, a tolerância das plantas à seca pode ser melhorada em grande medida, com isso a mitigação a déficit hídrico começa desde o plantio, a inoculação da semente no sulco justamente para as bactérias começarem agir desde a germinação, essas bactérias tem como objetivo trazer para o produtor um manejo que ajuda a planta atingir seu potencial produtivo mesmo com adversidades do clima que são os déficits hídricos, essas bactérias promovem a mitigação da seca nas plantas de diversas maneiras, como na produção de compostos bioativos como aminoácidos, hormônios e enzimas e também ajudando a planta na absorção de nutrientes. As BPCV impactam não apenas uma parte da planta, mas ajudam a mitigar os efeitos da seca na planta como um todo.

A viabilidade comercial da BPCV depende da seleção e desempenho de cepas robustas em solos deficientes em nutrientes e em mudanças nas condições climáticas. Resulta-se também da vida útil da BPCV, da viabilidade celular, da proteção do ambiente do solo, da conveniência de uso e da relação custo-benefício.

O êxito da sua comercialização dependerá da colaboração entre agricultores, microbiologistas, biotecnólogos, industriais e agricultores. Gradativamente a aplicação das BPCV é um passo em direção à agricultura sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFZAL, I. et al. Plant beneficial endophytic bacteria: Mechanisms, diversity, host range and genetic determinants. **Microbiological Research**, v.221, p.3649, 2019.

AFZAL, M. J; KHAN, M. I; CHEEMA, S. A; HUSSAIN, S; ANWAR-UL-HAQ, M; ALI, M. H; NAVEED, M. Combined application of *Bacillus* sp. MN-54 and phosphorus improved growth and reduced lead uptake by maize in the lead-contaminated soil. **Environ Sci Pollut Res** 27:44528-44539. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10372-4>

AHEMAD, M. et al. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. **Journal of King Saud University Science**, v.26, n.1, p.120, 2014.

ANDRADE, C.L.T. et al. **Viabilidade e Manejo da Irrigação da Cultura do Milho**. Sete Lagoas MG, 2006. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/490417/1/Circ85.pdf>. Acesso em: 22 janeiro de 2024.

ANDREOLLI, M; ZAPPAROLI, G; LAMPIS, S; SANTI, C; ANGELINI, E; BERTAZZON, N. In vivo endophytic, rhizospheric and epiphytic colonization of vitis vinifera by the plant-growth promoting and antifungal strain pseudomonas protegens MP12. **Microorganisms**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 1–14, 2021. DOI: 10.3390/microorganisms9020234.

ARAUS, J.L. et al. Phenotyping maize for adaptation to drought. **Frontiers in Physiology**, v.3, n.305, p.120, 2012.

ARORA, N. K; FATIMA, T; MISHRA, I; VERMA, M; MISHRA, J; MISHRA, V. **Environmental sustainability: challenges and viable solutions**. [s.l.]: Springer Singapore, 2018. v. 1 DOI: 10.1007/s42398-018-00038-w. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42398-018-00038-w>.

BARROS, J. F. C.; CALADO, J. G. **A cultura do milho**. Évora: Universidade de Évora, 2014. 52 p.

BASHAN, Y; HOLGUIN, G; DE-BASHAN, L. E. Azospirillum-plant relationships: Physiological, molecular, agricultural, and environmental advances (1997-2003). **Canadian Journal of Microbiology**, [S. l.], v. 50, n. 8, p. 521–577, 2004. DOI: 10.1139/w04-035.

BASHAN, Y; DE-BASHAN, L. E. **How the plant growth-promoting bacterium azospirillum promotes plant growth-a critical assessment**. 1. ed. [s.l.]: Elsevier Inc., 2010. v. 108 DOI: 10.1016/S0065-2113(10)08002-8. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08002-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08002-8).

BASHAN, Y; DE-BASHAN, L. E.; PRABHU, S. R.; HERNANDEZ, J. P. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: Formulations and practical perspectives (1998-2013). **Plant and Soil**, [S. l.], v. 378, n. 1–2, p. 1–33, 2014. DOI: 10.1007/s11104-013-1956-x.

BERNINI, C. S. et al. Caracteres fisiológicos e agronômicos em progênies interpopulacionais de milho selecionados sob condições de déficit hídrico. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.15, p.3952, 2016.

BOTELHO, G. R.; MENDONÇA-HAGLER, L. C. Fluorescent Pseudomonads associated with the rhizosphere of crops: an overview. **Brazilian Journal of Microbiology**, [S. l.], v. 37, p. 401–416, 2006.

CHAMAM, A; SANGUIN, H; BELLVERT, F; MEIFFREN, G; COMTE, G; WISNIEWSKI-DYÉ, F; BERTRAND, C; PRIGENT-COMBARET, C. Plant secondary metabolite profiling evidences strain-dependent effect in the Azospirillum–Oryza sativa association. **Phytochemistry**, [S. l.], v. 87, p. 65–77, 2013.

CHANDRA, D. et al. Drought-tolerant Pseudomonas spp. improve the growth performance of finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.) under non-stressed and drought-stressed conditions. **Pedosphere**, v. 28, n. 2, p. 227-240, 2018.

COHEN, A. C.; BOTTINI, R; PONTIN, M; BERLI, F. J.; MORENO, D; BOCCANLANDRO, H; TRAVAGLIA, C. N.; PICCOLI, P. N. Azospirillum brasilense ameliorates the response of Arabidopsis thaliana to drought mainly via enhancement of ABA levels. **Physiologia plantarum**, [S. l.], v. 153, n. 1, p. 79–90, 2015.

COMAS, L. H. et al. Water productivity under strategic growth stagebased deficit irrigation in maize. **Agricultural Water Management**, v.212, p.433440, 2019.

CUNHA, E. T. da. **Efeitos do estresse subletal em bactérias promotoras de crescimento vegetal: revisão sistemática e aplicação em inoculantes de Azospirillum brasilense para milho**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, Florianópolis, 2023.

DAZZO, F. B.; YANNI, Y. G. The natural Rhizobium-cereal crop association as an example of plant-bacteria interaction. **Biological approaches to sustainable soil systems**. CRC Press, Boca Raton, [S. l.], p. 109–127, 2006.

DELAMUTA, J. R. M; RIBEIRO, R. A; ORMEÑO-ORRILLO, E; MELO, I. S; MARTÍNEZ-ROMERO, E; HUNGRIA, M. Polyphasic evidence supporting the reclassification of Bradyrhizobium japonicum group Ia strains as Bradyrhizobium diazoefficiens sp. nov. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, [S. l.], v. 63, n. PART9, p. 3342–3351, 2013. DOI: 10.1099/ij.s.0.049130-0.

DEL CERRO, P; PÉREZ-MONTAÑO, F; GIL-SERRANO, A; LÓPEZ-BAENA, F. J; MEGÍAS, M; HUNGRIA, M; OLLERO, F. J. The *Rhizobium tropici* CIAT 899 NodD2 protein regulates the production of Nod factors under salt stress in a flavonoid-independent manner. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 7, n. May, p. 1–10, 2017. DOI: 10.1038/srep46712.

DE SOUZA, R; AMBROSINI, A; PASSAGLIA, L. M. P. Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. **Genetics and Molecular Biology**, [S. l.], v. 38, n. 4, p. 401–419, 2015. DOI: 10.1590/S1415-475738420150053.

DILNASHIN, H. et al. **Applications of agriculturally important microorganisms for sustainable crop production**. In: Sharma, V.; Salwan, R.; Khalil, L.; AlAni, T. (Eds.). *Molecular Aspects of Plant Beneficial Microbes in Agriculture*, Índia: Academic PressElsevier, 2020. p.403415.

DIMKPA, C. et al. Plantrhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions. **Plant, Cell and Environment, Germany**, v.32, n.1, p.1682-1694, 2009.

DOBBELAERE, S; VANDERLEYDEN, J; OKON, Y; DOBBELAERE, S; VANDERLEYDEN, J; OKON, Y. **Plant Growth-Promoting Effects of Diazotrophs in the Rhizosphere**. [S. l.], v. 2689, 2010. DOI: 10.1080/713610853.

DÖBEREINER, J.; DAY, J. M. Associative symbioses in tropical grasses: characterization of microorganisms and dinitrogen-fixing sites. In: proceedings of the 1st international symposium on nitrogen fixation 1976, **Anais [...]**: Washington State University Press Pullman, 1976. p. 518–538.

DORJEY, S; DOLKAR, D; SHARMA, R. Plant Growth Promoting Rhizobacteria Pseudomonas: A Review. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 882–886, 2017. DOI: 10.20546/ijcmas.2021.1004.093.

DUCA, D; LORV, J; PATTEN, C. L.; ROSE, D; GLICK, B. R. Indole-3-acetic acid in plant–microbe interactions. **Antonie Van Leeuwenhoek**, [S. l.], v. 106, n. 1, p. 85–125, 2014.

EMAMI, S. et al. Consortium of endophyte and rhizosphere phosphate solubilizing bacteria improve phosphorous use efficiency in wheat cultivars in phosphorus deficient soils. **Rhizosphere**, v.14, e100196, 2020.

FALOYE, O. T. et al. Effects of biochar and inorganic fertiliser applications on growth, yield and water use efficiency of maize under deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v.217, p.165178, 2019.

FAO, F. A. A. O. **FAOSTAT, FAO Statistical Databases**. 2023.

FLORES, C. et al. Salinity and water deficit. The Genus Citrus, In: MANUEL, T.; MARCO, C.; FRED, G. (Eds.). *The genus citrus*. Amsterdam: **Elsevier**, 2020. p.291309.

FUKAMI, J; CEREZINI, P; HUNGRIA, M. Azospirillum: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. **AMB Express**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 1–12, 2018. DOI: 10.1186/s13568-018-0608-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0608-1>.

GARCIA, J. E; MARONICHE, G; CREUS, C; SUAREZ-RODRIGUEZ, R; RAMIREZ-TRUJILLO, J. A; GROPPA, M. D. *In vitro* PGPR properties and osmotic tolerance of different Azospirillum native strains and their effects on growth of maize under drought stress. **Microbiol Res** 202:21-29. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.04.007>

GARCÍA-LARA, S.; SERNA-SALDIVAR, S. O. Chapter 1 - **Corn History and Culture**. In: SERNA-SALDIVAR, S. O. (Ed.). *Corn (Third Edition)*. Oxford: AACC International Press, 2019. p.1-18.

GESSLER, A. et al. The role of nutrients in drought-induced tree mortality and recovery. **New Phytologist**, v.214, n.2, p.513520, 2017.

GLICK, B. R. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. **Microbiological research**, [S. l.], v. 169, n. 1, p. 30–39, 2014.

HAYAT, R; ALI, S; AMARA, U; KHALID, R; AHMED, I. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: A review. **Annals of Microbiology**, [S. l.], v. 60, n. 4, p. 579–598, 2010. DOI: 10.1007/s13213-010-0117-1.

HUERGO, L. F.; MONTEIRO, R. A.; BONATTO, A. C.; RIGO, L. U.; STEFFENS, M. B. R.; CRUZ, L. M.; CHUBATSU, L. S.; SOUZA, E. M.; PEDROSA, F. O. Regulation of nitrogen fixation in Azospirillum brasilense. **Azospirillum sp.: cell physiology, plant interactions and agronomic research in Argentina**. Buenos Aires: Asociación Argentina de Microbiología, [S. l.], p. 17–35, 2008.

HUNGRIA, M; RIBEIRO, A; NOGUEIRA, A. Draft Genome Sequences of Azospirillum brasilense Strains Ab- V5 and Ab-V6, Commercially Used in Inoculants for Grasses and Legumes in Brazil. **Genome Announc** 6: e00393-18, [S. l.], p. 5–6, 2018.

JOSHI, B; CHAUDHARY, A; SINGH, H; KUMAR, P. A. Prospective evaluation of individual and consortia plant growth promoting rhizobacteria for drought stress amelioration in rice (*Oryza sativa* L.). **Plant Soil** 457:225-240. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04730-x>

KARIM, M. R; RAHMAN, M. A. Drought risk management for increased cereal production in Asian least developed countries. **Weather Climate Extrem** 7:24–35. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.10.004>

KASIM, W.A. et al. Control of Drought Stress in Wheat Using PlantGrowthPromoting Bacteria. **Journal of Plant Growth Regulation**, v.32, n.1, p.122130, 2013.

KATIYAR, D; HEMANTARANJAN, A; et al. Plant growth promoting rhizobacteria-na efficient tool for agriculture promotion. **Adv. Plants Agric. Res.** 2016. 4, 426–434.

KAVADIA, A; OMIROU, M; FASOULA, D; IOANNIDES, I. M. The importance of microbial inoculants in a climate-changing agriculture in Eastern Mediterranean region. **Atmosphere** 11:1136. 2020. <https://doi.org/10.3390/atmos11101136>

KAVAMURA, V.N. **Bactérias Associadas às Cactáceas da Caatinga: Promoção de crescimento de plantas sob estresse hídrico**, ESALQ, 2012. 246p. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, SP.

KHODARAHMPOUR, Z. et al. Evaluation of drought tolerance in different growth stages of maize (*Zea mays* L.) inbred lines using tolerance indices. **African Journal of Biotechnology**, v.10, p.1348213490, 2011.

KUMAR, A; PATEL, J. S. et al. Recent advances of PGPR based approaches for stress tolerance in plants for sustainable agriculture. **Biocatal. Agric. Biotechnol.** 2019. 20, 101271.

LESK, C; ROWHANI, P; RAMANKUTTY, N. Influence of extreme Weather disasters on global crop production. **Nature** 529:84–87. 2016. <https://doi.org/10.1038/nature16467>

LI, H; GUO, Q; et al. Application of streptomyces pactum Act12 enhances drought resistance in wheat. **J. Plant Growth Regul.** 2020. 39, 122–132.

LIMA, B. C. et al. *Bacillus subtilis* ameliorates water stress tolerance in maize and common bean. **Journal of Plant Interactions**, v.14, n.1, p.432439, 2019.

LU, H. et al. Physiological response with *Bacillus subtilis* and *saccharomyces cerevisiae* inoculation into soil under reclaimed water–fresh water combined irrigation. **Water**, v.13, p. e773, 2021.<https://doi.org/10.3390/w13060773>

LUHUNGA, P. M. Assessment of the impacts of climate change on maize production in the Southern and Western Highlands Sub-agro Ecological Zones of Tanzania. **Front Environ Sci** 5:51. 2017. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00051>

LUNDGREN, M. R. et al. Despite Phylogenetic Effects, C3C4 Lineages Bridge the Ecological Gap to C4 Photosynthesis. **Journal of Experimental Botany**, v.68, n.2, p. 241254, 2016.

LYNGWI, N. A; JOSHI, S. R. Economically important *Bacillus* and related genera: a mini review. **Bio Useful Plants Microbes** 3:33-43. 2014. <https://doi.org/10.12691/jaem-8-2-1>

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da Produção de Milho**. Circular Técnica - Embrapa, p. 1-10, 2006.

MARAMBE, Y. et al. **Modeling evapotranspiration for C3 and C4 crops in the western lake erie basin using remote sensing data**. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v.3, n.11, p.7377, 2020.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil - past, present and future. **Theoretical and Applied Climatology**. 20: 1-12, 2016.

MARIANO, R. L. R. et al. **Importância de bactérias promotoras de crescimento e de biocontrole de doenças de plantas para uma agricultura sustentável.** Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica, v. 1, p. 89-111, 2013.

MARWEIN, M. A. et al. Response of water deficit regime and soil amelioration on evapotranspiration loss and water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) in subtropical northeastern Himalayas. **International Journal of Biometeorology**, v.61, n.5, p.845855, 2017.

MAPA. **Instrução Normativa SDA No 13 de 24 de março de 20/11/2011.**

MEHNAZ, S. Azospirillum: A biofertilizer for Every Crop. *In: Plant Microbes Symbiosis: Applied Facets.* [s.l: s.n.]. p. 297–314. DOI: 10.1007/978-81-322-2068-8.

MONDANI, F. et al. Evaluating effects of plant growthpromoting rhizobacteria on the radiation use efficiency and yield of soybean (*Glycine max*) under water deficit stress condition. **Agricultural Water Management**, v.213, p.707713, 2019.

MONTILLET, J. L. et al. Plastidial and cytosolic thiol reductases participate in the control of stomatal functioning. **Plant, Cell & Environment**, v. 44, n.5, p.14171435, 2021.

MORRISON, L. A. **Cereals: Domestication of the Cereal Grains.** p. 86-98, 2016.

MUTTURI, S; SAHAI, V. et al. Strategies for high-density cultivation of bioinoculants in submerged culture with special reference to pseudomonads. *In: Singh, D.P., Singh, H.B., R., Prabha (Eds.), Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity: 1: Research Perspectives.* **Springer India**, New Delhi, pp.181–196. 2016.

NADEEM, S. M.; NAVEED, M.; AYYUB, M.; KHAN, M. Y.; AHMAD, M.; ZAHIR, Z. A. Potential, limitations and future prospects of *Pseudomonas* spp. for sustainable agriculture and environment: A Review. **SOIL & ENVIRONMENT**, [S. l.], v. 35, n. 2, p. 106–145, 2016.

NAEEM, M; NAEEM, M. S; AHMAD, R; IHSAN, M. Z; ASHRAF, M. Y; HUSSAIN, Y; FAHAD, S. Foliar calcium spray confers drought stress tolerance in maize via modulation of plant growth, water relations, proline content and hydrogen peroxide activity. **Arch Agron Soil Sci** 64:116-131. 2018. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1327713>

NAIK, P. R; RAMAN, G; NARAYANAN, K. B; SAKTHIVEL, N. Assessment of genetic and functional diversity of phosphate solubilizing fluorescent pseudomonads isolated from rhizospheric soil. **BMC Microbiology**, [S. l.], v. 8, p. 1–14, 2008. DOI: 10.1186/1471-2180-8-230.

NAVEED, M; MITTER, B; REICHENAUER, T. G; WIECZOREK, K; SESSITSCH, A. Increased drought stress resilience of maize through endophytic colonization by *Burkholderia phytofirmans* PsJN and *Enterobacter* sp. FD17. **Environ Exp Bot** 97:30-39. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.09.014>

NIU, X; SONG, L; XIAO, Y; GE, W. Drought-tolerant plant growthpromoting rhizobacteria associated with foxtail millet in a semiarid agroecosystem and their potential in alleviating drought stress. **Front Microbiol** 8:2580. 2018. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02580>

PANIGRAHI, S. et al. Characterization of endophytic bacteria *Enterobacter cloacae* MG00145 isolated from *Ocimum sanctum* with Indole Acetic Acid (IAA) production and plant growth promoting capabilities against selected crops. **South African Journal of Botany**, v.134, p.1726, 2020.

PANPATTE, D. G.; JHALA, Y. K.; SHELAT, H. N.; VYAS, R. V. *Pseudomonas fluorescens* : A Promising Biocontrol Agent and PGPR for Sustainable Agriculture. **Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity: Vol. 1: Research Perspectives**, [S. l.], p. 1–343, 2016. DOI: 10.1007/978-81-322-2647-5.

PEREIRA, L. S. et al. Watermelon yield and efficiency of use of water and nitrogen. **Revista Caatinga**, v. 32, n. 3, p. 769 777, 2019.

PERRIG, D.; BOIERO, M. L.; MASCIARELLI, O. A.; PENNA, C.; RUIZ, O. A.; CASSÁN, F. D.; LUNA, M. V. Plant-growth-promoting compounds produced by two agronomically important strains of *Azospirillum brasilense*, and implications for inoculant formulation. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [S. l.], v. 75, n. 5, p. 1143–1150, 2007. DOI: 10.1007/s00253-007-0909-9.

PINHEIRO, C. et al. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data? **Journal of Experimental Botany**, v.62, p.869882, 2011.

POOLE, P; RAMACHANDRAN, V; TERPOLILLI, J. Rhizobia: From saprophytes to endosymbionts. **Nature Reviews Microbiology**, [S. l.], v. 16, n. 5, p. 291–303, 2018. DOI: 10.1038/nrmicro.2017.171.

PRAKAMHANG, J; TITABUTR, P; BOONKERD, N; TEAMTISONG, K; UCHIUMI, T; ABE, M; TEAUMROONG, N. Proposed some interactions at molecular level of PGPR coinoculated with *Bradyrhizobium diazoefficiens* USDA110 and *B. japonicum* THA6 on soybean symbiosis and its potential of field application. **Applied Soil Ecology**, [S. l.], v. 85, p. 38–49, 2015.

PRIMAVESI, A. C.; PRIMAVESI, O.; CORRÊA, L. de A.; CANTARELLA, H.; DA SILVA, A. G. **Efeito de doses e de fontes de nitrogênio na composição mineral de capim-marandu**. Embrapa Pecuária Sudeste. Comunicado técnico, [S. l.], 2005.

QUATRIN, M. P. et al. Response of dualpurpose wheat to nitrogen fertilization and seed inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.43, e027718, 2019.

QIU, Z; EGIDI, E; LIU, H; KAUR, S; SINGH, K. New frontiers in agriculture productivity: Optimised microbial inoculants and in situ microbiome engineering. **Biotechnology Advances**, [S. l.], v. 37, n. 6, p. 107371, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.03.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975019300461>.

RADHAKRISHNAN, R; HASHEM, A; ABDALLAH, E. F. *Bacillus*: a biological tool for crop improvement through bio-molecular changes in adverse environments. **Front Physiol** 8:667. 2017. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00667>

RAJWAR, A.; SAHGAL, M.; JOHRI, B. N. Legume–Rhizobia Symbiosis and Interactions in Agroecosystems. *In: Plant Microbe Symbiosis: Fundamentals and Advances*. [s.l: s.n.]. p. 233–265. DOI: 10.1007/978-81-322-1287-4.

RAMAKRISHNA, W. et al. Brown Gold of Marginal Soil: Plant Growth Promoting Bacteria to Overcome Plant Abiotic Stress for Agriculture, Biofuels and Carbon Sequestration. **Science of The Total Environment**, v.711, e135062, 2019.

RIBEIRO, E. A. de S. **Produção de Milho-verde Irrigado por Gotejamento em Teresina-PI**. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Agronomia, UFPI-PI, Teresina-PI, 2017.

RODRÍGUEZ-NAVARRO, D. N.; DARDANELLI, M. S.; RUÍZ-SAÍNIZ, J. E. Attachment of bacteria to the roots of higher plants. **FEMS microbiology letters**, [S. l.], v. 272, n. 2, p. 127–136, 2007.

RUFINO, A. C. et al. Water Stress Influence on The Vegetative Period Yield Components of Different Maize Genotypes. **Agronomy**, v.8, n.8, p.19, 2018.

SANTI, C; BOGUSZ, D; FRANCHE, C. Biological nitrogen fixation in non-legume plants. **Annals of botany**, [S. l.], v. 111, n. 5, p. 743–767, 2013.

SANTOS, W.O. et al. Coeficientes de cultivo e necessidades hídricas da cultura do milho verde nas condições do semiárido brasileiro. **Irriga**, Botucatu, Botucatu SP, v.19, n.4, p.559572, 2014.

SANTOS, L. C. **Produção de milho sob influência de produtos atenuantes do estresse hídrico**. 2020. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, Paraíba, Brasil, 2020.

SANTOS, M. S; NOGUEIRA, M. A; HUNGRIA, M. Outstanding impact of azospirillum brasilense strains ab-v5 and ab-v6 on the brazilian agriculture: Lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [S. l.], v. 45, p. 1–31, 2021. DOI: 10.36783/18069657RBCS20200128.

SAUD, S. et al. Silicate application increases the photosynthesis and its associated metabolic activities in Kentucky bluegrass under drought stress and postdrought recovery. **Environmental Science and Pollution Research**, v.23, p.4755, 2016.

SINDHU, S.; SHARMA, R.; SINDHU, S.; SEHRAWAT, A. Soil Fertility Improvement by Symbiotic Rhizobia for Sustainable Agriculture. *In: Soil Fertility Management for Sustainable Development*. [s.l: s.n.]. p. 101–163. DOI: 10.1007/978-981-13-5904-0.

SINGH, S; KAYASTHA, A. M.; ASTHANA, R. K.; SRIVASTAVA, P. K.; SINGH, S. P. Response of Rhizobium leguminosarum to nickel stress. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, [S. l.], v. 17, n. 7, p. 667–672, 2022.

TABASSUM, B; KHAN, A. et al. Bottlenecks in commercialisation and future prospects of PGPR. **Appl. Soil Ecol.** 2017. 121, 102–117.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

TARRANT, J. J.; KRIEG, N. R.; DÖBEREINER, J. A taxonomic study of the *Spirillum lipoferum* group, with descriptions of a new genus, *Azospirillum* gen. nov. and two species, *Azospirillum lipoferum* (Beijerinck) comb. nov. and *Azospirillum brasilense* sp. nov. **Canadian journal of microbiology**, [S. l.], v. 24, n. 8, p. 967–980, 1978.

TIGCHELAAR, M; BATTISTI, D. S; NAYLOR, R. L; RAY, D. K. Future warming increases probability of globally synchronized maize production shocks. **Proc Nat Acad Sci** 115:6644–6649. 2018. <https://doi.org/10.1073/pnas.1718031115>

TURATTO, M. F et al. Potencial de controle de *Meloidogyne javanica* e *Ditylenchus* spp. usando *Pseudomonas fluorescentes* e *Bacillus* spp. **Brazilian Journal of Microbiology**, v.49 n.1, p.5458, 2018.

ULRICH, D. E; SEVANTO, S; RYAN, M; ALBRIGHT, M. B; JOHANSEN, R. B; DUNBAR, J. M. Plant-microbe interactions before drought influence plant physiological responses to subsequent severe drought. **Sci Rep** 9:249. 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36971-3>

USMANI, M. M; NAWAZ, F; MAJEED, S; SHEHZAD, M. A; AHMAD, K. S; AKHTAR, G; AQIB, M; SHABBIR, R. N. Sulfate-mediated drought tolerance in maize involves regulation at physiological and biochemical levels. **Sci Rep** 10:1-3. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58169-2>

VACHERON, J; DESBROSSES, G; BOUFFAUD, M. L; TOURAINE, B; MOËNNE-LOCCOZ, Y; MULLER, D; LEGENDRE, L; WISNIEWSKI-DYÉ, F; PRIGENT-COMBARET, C. Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 4, n. SEP, p. 1–19, 2013. DOI: 10.3389/fpls.2013.00356.

VELÁZQUEZ, E.; GARCÍA-FRAILE, P.; RAMÍREZ-BAHENA, M. H.; PEIX, A.; RIVAS, R. Proteobacteria forming nitrogen fixing symbiosis with higher plants. **Nova Science Publishers, Inc., NY, USA**, [S. l.], p. 37–56, 2010.

VERMA, M; MISHRA, J; ARORA, N. K. **Environmental Biotechnology: For Sustainable Future**. [s.l: s.n.]. DOI: 10.1007/978-981-10-7284-0.

WALKER, V; BERTRAND, C; BELLVERT, F; MOËNNE-LOCCOZ, Y; BALLY, R; COMTE, G. Host plant secondary metabolite profiling shows a complex, strain-dependent response of maize to plant growth-promoting rhizobacteria of the genus *Azospirillum*. **New Phytologist**, [S. l.], v. 189, n. 2, p. 494–506, 2011.

WANG, E. T; TIAN, C. F; CHEN, W. F; YOUNG, J. P. W; CHEN, W. X. **Ecology and Evolution of Rhizobia**. [s.l: s.n.]. DOI: 10.1007/978-981-32-9555-1.

WILLEMS, A. The taxonomy of rhizobia: an overview. **Plant and soil**, [S. l.], v. 287, n. 1–2, p. 3–14, 2006.

WOO, S. L; PEPE, O. Microbial consortia: promising probiotics as plant biostimulants for sustainable agriculture. **Front Plant Sci** 9:1801. 2018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01801>

WU, Y. et al. Growth and transpiration of maize and winter wheat in response to water deficits in pots and plots. **Environmental and Experimental Botany**, Paris, v.71, p.6571. 2011.

YERRAMSETTY, P. et al. An rbcL mRNA binding protein is associated with C3 to C4 evolution and light induced production of Rubisco in Flaveria. **Journal of Experimental Botany**, v.68, n.16, p.4635-4649, 2017.

ZAMPIERI, M; CEGLAR, A; DENTENER, F; DOSIO, A; NAUMANN, G; VAN DEN BERG, M; TORETI, A. When will current climate extremes affecting maize production become the norm? **Earths Future** 7:113-122. 2016. <https://doi.org/10.1029/2018EF000995>

ZIPPER, S. C; QIU, J; KUCHARIK, C. J. Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. **Environ Res Lett** 11:094021. 2016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094021>

<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/2>