



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ELEYSE DA SILVA ABREU

EFEITO DA INOCULAÇÃO DO *Bacillus aryabhattai* NA MITIGAÇÃO DO DÉFICIT
HÍDRICO EM FEIJÃO-CAUPI (*Vigna unguiculata* L. Walp.)

FORTALEZA

2026

ELEYSE DA SILVA ABREU

EFEITO DA INOCULAÇÃO DO *Bacillus aryabhattai* NA MITIGAÇÃO DO DÉFICIT
HÍDRICO EM FEIJÃO-CAUPI (*Vigna unguiculata* L. Walp.)

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Agronomia do Centro de
Ciências Agrárias da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial para obtenção de
título de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Arthur Prudêncio de Araujo Pereira

FORTALEZA

2026

ELEYSE DA SILVA ABREU

EFEITO DA INOCULAÇÃO DO *Bacillus aryabhatai* NA MITIGAÇÃO DO DÉFICIT HÍDRICO EM FEIJÃO-CAUPI (*Vigna unguiculata* L. Walp.)

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção de título de Engenheira Agrônoma.

Aprovada em: 16/01/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Arthur Prudêncio de Araujo Pereira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Johny de Souza Silva
Fertsan - Soluções Inteligentes em Agronegócio S.A.

Dr. Kaio Gráculo Vieira Garcia
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

Aos meus pais, Elenilson e Laila.

Aos meus avós, Elias e Maria Lúcia.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser o alicerce da minha vida, por me conceder saúde e a força necessária para superar cada desafio desta jornada.

Aos meus pais, Elenilson e Laila, por todo esforço, incentivo, confiança, apoio, por serem meu porto seguro e por não medirem esforços para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos meus avós, Elias e Maria Lúcia, que tanto amo, por acompanharem cada etapa da minha vida com tanto carinho. Tê-los ao meu lado nesta conquista é a concretização de um sonho que transcende gerações.

Ao meu tio e padrinho Elias Junior e à Nathalia, por todo apoio e por demonstrarem tanto orgulho da minha trajetória.

À Universidade Federal do Ceará (UFC) e a todos os docentes que contribuíram com a minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Arthur Prudêncio, pela orientação e contribuição para a realização desse trabalho.

Ao Programa de Educação Tutorial - PET Agronomia UFC, pela concessão da bolsa durante parte dessa jornada e, principalmente, por ser um espaço de intenso aprendizado, crescimento pessoal e profissional que transformou meu protagonismo.

Aos meus colegas e amigos: Ana Raquel, Alonso, Miriane, Thiago, Miguel, Valmir e Sávio. Um agradecimento especial aos meus amigos, Paulo Victor, que esteve ao meu lado desde o início, sendo meu parceiro em cada desafio dessa etapa; e ao Jhonas, que chegou depois, mas fez toda diferença até o último momento, nunca me desamparou e mediu esforços para me ajudar. Obrigada por tornarem os dias mais leves e por estarem presentes em cada momento de dificuldade e alegria.

Ao Eng. Agrônomo Tomil Ricardo, por toda ajuda na minha formação acadêmica, pelo auxílio na condução do experimento e pelo incentivo constante.

Ao Franzé, à Letícia Bessa, ao Johny de Souza, ao Gleysson Silveira e ao Marcus Cardoso, por toda ajuda durante essa reta final, vocês foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios deste experimento, minha eterna gratidão.

A todos que não foram aqui mencionados nominalmente, mas que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização desta etapa da minha vida.

RESUMO

O feijão-caupi é uma cultura de grande importância socioeconômica, principalmente em regiões semiáridas, sujeitas à irregularidade chuvosa, sendo o déficit hídrico um dos principais fatores limitantes ao crescimento e produtividade. Nesse contexto, o uso de bioinsumos surge como uma alternativa sustentável para mitigar os efeitos da deficiência hídrica. Objetivou-se avaliar os efeitos de diferentes lâminas de irrigação e da inoculação de *Bacillus aryabhattai* sobre o crescimento e a produção de plantas de feijão-caupi. O ensaio foi conduzido em delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC) em arranjo fatorial 2 x 4, sendo dois tratamentos de sementes (presença e ausência de *B. aryabhattai*) e quatro percentuais de umidade do solo partir da capacidade de retenção de água do solo (40, 50, 65 e 80%), com oito repetições, totalizando 64 unidades experimentais. Foram avaliados parâmetros biométricos, fisiológicos e produtivos. Os resultados evidenciaram que o déficit hídrico comprometeu o desenvolvimento e a produção das plantas, com reduções acentuadas sob lâminas mais restritivas. A interação entre a disponibilidade de água e inoculação do microrganismo ocorreu apenas para massa seca de folhas, massa seca de raízes e peso total de grãos. Observou-se ainda que plantas inoculadas com *B. aryabhattai* demandaram menor volume de água ao longo do ciclo quando comparadas às plantas não inoculadas, indicando maior eficiência no uso da água. Conclui-se que o déficit hídrico afeta negativamente o desempenho do feijão-caupi, enquanto a inoculação com *B. aryabhattai*, apresentou efeitos pontuais sendo necessários estudos mais detalhados para confirmar o potencial deste bioinsumo na mitigação do déficit hídrico em plantas de feijão-caupi.

Palavras-chave: déficit hídrico; bioinsumo; eficiência do uso da água; bactérias promotoras de crescimento vegetal.

ABSTRACT

Cowpea is a crop of great socioeconomic importance, especially in semi-arid regions subject to irregular rainfall, where water stress is one of the main factors limiting plant growth and productivity. In this context, the use of bioinputs emerges as a sustainable alternative to mitigate the effects of water deficiency. This study aimed to evaluate the effects of different irrigation depths and seed inoculation with *Bacillus aryabhatai* on the growth and yield of cowpea plants. The experiment was conducted in a completely randomized design (CRD) with a 2 × 4 factorial arrangement, consisting of two seed treatments (with and without *B. aryabhatai*) and four soil moisture levels based on the soil water-holding capacity (40, 50, 65, and 80%), with eight replications, totaling 64 experimental units. Biometric, physiological, and yield-related parameters were evaluated. The results showed that water stress impaired plant development and yield, with more pronounced reductions under the most restrictive irrigation levels. An interaction between water availability and microbial inoculation was observed only for leaf dry mass, root dry mass, and total grain weight. In addition, plants inoculated with *B. aryabhatai* required a lower volume of water throughout the crop cycle compared to non-inoculated plants, indicating greater water use efficiency. It is concluded that water stress negatively affects cowpea performance, whereas inoculation with *B. aryabhatai* showed specific effects, indicating that further studies are needed to confirm the potential of this bioinput to mitigate water stress in cowpea plants.

Keywords: water deficit; bioinput; water use efficiency; plant growth–promoting bacteria.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Médias diárias das temperaturas mínimas e máximas e da umidade relativa do ar durante o experimento.....	23
Figura 2 - Esquema ilustrativo da condução do experimento indicando as etapas de imposição do déficit hídrico, aplicação do bioinsumo e variáveis analisadas em plantas de feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i> L.) cv. Guariba.....	26
Figura 3 - Altura (A e B), diâmetro do caule (C e D) e número de folhas (E e F) de plantas de feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i> L.) cv. Guariba, em função da aplicação de <i>B. aryabhattai</i> e da disponibilidade de água.....	30
Figura 4 - Massa seca da parte aérea de plantas de feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i> L.) cv. Guariba, em função da aplicação de <i>B. aryabhattai</i> e da disponibilidade de água.....	31
Figura 5 - Massa seca de raiz do feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i> L.) cv. Guariba, em função da aplicação de <i>Bacillus aryabhattai</i> e da disponibilidade hídrica.....	32
Figura 6 - Massa seca do caule do feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i> L.) cv. Guariba, em função da aplicação de <i>Bacillus aryabhattai</i> e da disponibilidade hídrica.....	33
Figura 7 - Peso total de grãos (PTG) de plantas de feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i> L.) cv. Guariba, em função da aplicação de <i>Bacillus aryabhattai</i> e da disponibilidade hídrica.....	39
Figura 8 - Consumo hídrico acumulado (mm) em feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i> L. Walp.) cv. Guariba, sob influência da inoculação com <i>Bacillus aryabhattai</i> e disponibilidade hídrica durante o experimento.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos químicos e físicos do solo utilizado no experimento....	24
Tabela 2 - Parâmetros de crescimento do feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i> L.) cv. Guariba sob condições de déficit hídrico e efeito da aplicação com <i>B. aryabhattai</i>	29
Tabela 3 - Respostas fisiológicas de feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i> L.) cv. Guariba sob condições de déficit hídrico e efeito da aplicação com <i>B. aryabhattai</i>	34
Tabela 4 – Uso de <i>Bacillus aryabhattai</i> sobre os caracteres produtivos de plantas de feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i> L.) cv. Guariba em função da aplicação de <i>Bacillus aryabhattai</i> e da disponibilidade hídrica.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Fotossíntese
AP - Altura da planta
BAG - Banco ativo de germoplasma
BPCV - Bactérias promotoras de crescimento vegetal
Ci - Concentração interna de CO₂
CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento
CRA – Capacidade de retenção de água
CVA - Comprimento de vagem
DAS - Dias após a semeadura
DC - Diâmetro do caule
DIC - Delineamento inteiramente casualizado
E - Transpiração
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Agropecuária
EPS – exopolissacarídeos
ERO - Espécies reativas de oxigênio
EUA - Eficiência do uso da água
FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
gs - Condutância estomática
IRGA - Infrared Gas Analyser
MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MSC – Massa seca do caule
MSF – Massa seca de folhas
MSR – Massa seca de raízes
NF - Número de folhas
NVP - Número de vagens por planta
P100S - Peso de 100 sementes
SPAD – Índice relativo de clorofila
TRA - Teor relativo de água
UFC - Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	Cultura do feijão-caupi.....	15
2.2	Efeito do estresse hídrico nas plantas.....	16
2.3	Uso de bioinsumos na agricultura.....	17
2.4	Bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV).....	19
2.5	<i>Bacillus aryabhattai</i>	21
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1	Localização do experimento.....	23
3.2	Material vegetal.....	24
3.3	Análise de solo.....	24
3.4	Água de irrigação.....	25
3.5	Bioinsumo.....	26
3.6	Condução do experimento.....	26
3.7	Delineamento experimental.....	27
3.8	Variáveis analisadas.....	27
3.8.1	<i>Análises biométricas</i>	27
3.8.2	<i>Análises fisiológicas</i>	27
3.8.3	<i>Análises de produção</i>	28
3.9	Análise estatística.....	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.1	Crescimento do feijão-caupi.....	28
4.2	Respostas fisiológicas.....	34
4.3	Desempenho produtivo do feijão-caupi.....	37
4.4	Consumo hídrico.....	40
5.	CONCLUSÃO.....	42
	REFERÊNCIAS.....	43

1. INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.) é uma cultura de elevada relevância socioeconômica para a região Nordeste do Brasil, destacando-se como importante fonte de alimento, emprego e renda (Oliveira *et al.*, 2023). Seus grãos apresentam elevado valor nutritivo, sendo considerado excelente fonte de proteína (23 a 25%) e carboidrato (62%), aminoácidos essenciais, vitaminas, fibras dietéticas e baixo teor de lipídios (Andrade Júnior *et al.*, 2017).

No Brasil, o feijão-caupi apresentou rendimento médio de 478 kg ha⁻¹ na safra 2024/25. No estado do Ceará, em 2024, a produtividade média estimada foi de 379 kg ha⁻¹ (CONAB, 2025). Essa diferença evidencia as limitações impostas pelas condições edafoclimáticas da região Nordeste, onde a deficiência hídrica é um dos principais fatores que restringem o potencial produtivo do feijão-de-corda, principalmente em sistemas de cultivo dependentes da precipitação pluvial (Mendes *et al.*, 2007).

Na região Nordeste, apesar de sua posição geográfica, onde a maior parte de seus territórios está no semiárido, o uso de baixa tecnologia de manejo de solo e fatores climáticos limitam a produtividade do feijão-caupi e aumentam as dificuldades de produzir em larga escala e se tornar competitivo. Apesar disso, a região se destaca como maior produtora nacional de feijão-caupi devido à sua alta quantidade de área cultivada. É uma das principais fontes de renda para os agricultores familiares nordestinos (Silva *et al.*, 2018; Desravines, 2022).

Apesar de ser considerada uma cultura tolerante à seca, pesquisas têm mostrado que a ocorrência de déficit hídrico no feijão-caupi, principalmente nas fases de florescimento e enchimento de grãos, pode provocar severas reduções na produtividade de grãos (Cordeiro *et al.*, 1998; Santos *et al.*, 1998). Quando exposto às condições extremas de estresse por alta temperatura, pode ocorrer o abortamento excessivo de flores, redução do vigamento, retenção final de vagens e número de sementes por vagem (Costa; Souza e Silva, 2020).

A necessidade de desenvolvimento de técnicas para aliviar o déficit de água se faz necessária e o uso de inoculantes contendo microrganismos benéficos merece atenção (Ngumbi, 2016). Nesse sentido, uma estratégia para o cultivo de plantas em

condições de seca é a utilização de bactérias promotoras de crescimento e redutoras dos efeitos do estresse ocasionado pela falta de água.

Entre as espécies recentemente descritas, o *Bacillus aryabhatai* tem demonstrado potencial para aplicações agrícolas por empregar mecanismos robustos de tolerância, como a regulação fito-hormonal, a produção de enzimas, sistemas de defesa antioxidante, síntese de exopolissacarídeos e formação de biofilmes (Park *et al.*, 2017). Considerando que tais mecanismos podem conferir maior resiliência a culturas de importância socioeconômica, parte-se da hipótese de que a redução da disponibilidade hídrica compromete o crescimento e produção do feijão-caupi, enquanto a inoculação do *B. aryabhatai* melhora os parâmetros morfofisiológicos e atenua os efeitos do déficit hídrico.

Diante disso, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da inoculação de *B. aryabhatai* na mitigação do déficit hídrico em feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.), visando compreender seu potencial para promover o crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultura do feijão-caupi

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) é uma leguminosa dicotiledônea anual pertencente à família Fabaceae, amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais. É uma cultura de origem africana, a qual foi introduzida no Brasil na segunda metade do século XVI, pelos colonizadores portugueses, pelo Estado da Bahia (Freire Filho, 1988).

É considerado uma das culturas alimentares mais importantes do mundo devido a sua qualidade nutricional que fornece nutrientes como proteínas, ferro, zinco e vitaminas e, combinado com o arroz, constitui a base da alimentação da população brasileira (Pereira, 2014). Além disso, também é utilizado para como forragem verde, farinha para alimentação animal e como adubação verde e proteção do solo (Andrade *et al.*, 2013).

Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), a produção mundial de feijão-caupi (grãos secos) em 2023, foi de 9,78 milhões de toneladas de grãos secos, com destaque para a Nigéria que contribuiu com 43% dessa produção global (Faostat, 2024). No Brasil, de acordo com os dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a produção de feijão-caupi total (1ª, 2ª e 3ª) da safra 2024/25 foi de 614,8 mil toneladas em uma área de 1259,2 mil hectares.

A produção de feijão-caupi concentra-se nas regiões Nordeste e Norte e está se expandindo para a região Centro-Oeste. No Nordeste, a produção, tradicionalmente, concentra-se nas áreas semiáridas, onde outras culturas anuais, devido a irregularidade das chuvas e as altas temperaturas, não se desenvolvem satisfatoriamente (Freire *et al.*, 2013). A região detém 61% da produção nacional e apresenta a maior área semeada com um total de 1041,7 mil hectares (CONAB, 2025).

O feijão-caupi é considerado uma cultura de ciclo curto, rústica e capaz de se desenvolver em solos com baixa fertilidade, possuindo ampla variabilidade genética, tolerância a condições adversas, como a seca, alto potencial produtivo, além de promover benefícios à conservação do solo por meio da fixação biológica de nitrogênio (Freire Filho, 2013; Oliveira, 2024).

As características agronômicas do feijão-caupi estão diretamente relacionadas à sua adaptação às condições edafoclimáticas. O consumo de água do feijão-caupi pode variar de 300 a 450 mm/ciclo, entretanto, determinadas fases fenológicas são mais sensíveis ao déficit hídrico, destacando-se a germinação, o florescimento e o enchimento de grãos. Dessa forma, para alcançar altas produtividades, é importante evitar que essas fases coincidam com períodos secos e que a colheita ocorra sob condições chuvosas (Bezerra & Freire Filho, 1984; Bastos *et al.*, 2017).

Em relação a temperatura, apresenta bom desenvolvimento na faixa de 18 a 34 °C. Temperaturas elevadas afetam negativamente o estabelecimento da cultura, promovendo o abortamento de flores, redução do vingamento e retenção de vagens e, conseqüentemente, o número de sementes por vagens. Por outro lado, temperaturas inferiores a 19 °C retardam o florescimento e prolongam o ciclo da cultura (Farias *et al.*, 2015; Andrade *et al.*, 2002).

2.2. Efeito do estresse hídrico nas plantas

De todos os recursos necessários para o crescimento e funcionamento das plantas, a água é o mais abundante e, frequentemente, o mais limitante. Representa a maior proporção do volume celular vegetal, sendo que aproximadamente 97% da água absorvida pelas plantas é perdida para a atmosfera, principalmente por meio da transpiração. Do restante, cerca de 2% é utilizada no aumento do volume ou na expansão celular, enquanto aproximadamente 1% é destinado aos processos metabólicos, predominantemente à fotossíntese (Taiz & Zeiger, 2017).

Estresse pode ser definido como qualquer condição ambiental que impeça a planta de alcançar seu potencial genético pleno (Taiz & Zeiger, 2017). Dentre os diferentes tipos de estresse abiótico, destaca-se o estresse hídrico que é caracterizado como um processo onde os potenciais de água e turgor são reduzidos, impedindo a satisfação plena das necessidades da planta e, conseqüentemente, provocando mudanças em todos os níveis funcionais (Chaves *et al.*, 2003).

Segundo Larcher (2000), as plantas submetidas a condições adversas passam por uma sucessão de fases de estresse. Inicialmente, ocorre a fase de alarme, caracterizada pela perda da estabilidade das estruturas e funções que

mantém os processos bioquímico da planta. Se o estresse persistir, estabelece-se a fase de resistência, na qual são ativados mecanismos de adaptação, como a síntese de proteínas e substâncias para proteger a planta. Caso o estresse se intensifique, pode atingir a fase de exaustão, marcada pela redução das defesas fisiológicas, maior suscetibilidade a patógenos e possível colapso funcional. Por fim, quando o estresse é removido e os danos não são severos, pode ocorrer a fase de regeneração, caracterizada pela recuperação parcial ou total das funções fisiológicas da planta.

Em condições de estresse hídrico, ocorre um grande conflito fisiológico entre a necessidade de evitar a perda de água e a absorção de CO₂ pelas plantas, ambos os fluxos ocorrem por meio de uma rota difusional comum. Enquanto o CO₂ difunde-se para o interior das folhas para viabilizar a fotossíntese, o vapor de água é simultaneamente perdido para a atmosfera por transpiração. Nessas condições, o fechamento estomático, necessário para reduzir a perda de água, limita a entrada de CO₂, comprometendo a assimilação de carbono para produção de carboidratos (Taiz & Zeiger, 2017).

Todas as plantas precisam de água para germinar, se desenvolver e produzir normalmente (Marengo; Lopes, 2005). Seus processos fisiológicos, como a fotossíntese e a transpiração, são afetados em déficit hídrico, promovendo a redução no conteúdo de água celular resultando em perda de turgor, redução da taxa fotossintética e redução da expansão foliar. Algumas espécies, no entanto, possuem mecanismos de escape ao estresse, que permitem a redução da taxa fotossintética e a manutenção do status hídrico da planta (Taiz *et al.*, 2017).

2.3. Uso de bioinsumos na agricultura

O avanço ostensivo do setor agropecuário no Brasil durante as últimas décadas tem sido primordial para o desenvolvimento de pesquisas que tragam alternativas viáveis para mitigar custos e perdas, além de maximizar o aproveitamento dos produtos e subprodutos que vêm do campo. Este constante progresso perdura desde 1960, quando a chamada Revolução Verde difundiu tecnologias voltadas para a agricultura a fim de multiplicar a produção de alimentos, tornando o sistema mais eficiente em questão de tempo e custos necessários até que se chegasse ao produto final (Octaviano, 2010).

Ainda em ascensão no cenário mundial, a busca por altas produtividades no modelo agrícola vigente está, na maioria das vezes, sustentada pela utilização intensiva de defensivos agrícolas e fertilizantes minerais. No entanto, tem se observado que grande parte da aplicação desses produtos de maneira desordenada estão sendo carregadas para corpos d'água e subsolo, com consequente contaminação ambiental (Gliessman, 2000).

A crescente demanda global por alimentos e a intensificação dos impactos das mudanças climáticas pressionam os sistemas agrícolas a buscarem modelos produtivos mais sustentáveis e menos impactantes ao meio ambiente (Cruz, 2025). Como alternativa a esses problemas, surgiram na indústria os bioinsumos, que são produtos de origem biológica que promovem o desenvolvimento vegetal através da ação de microrganismos que auxiliam no equilíbrio do sistema (Silva et al., 2022).

Com base na Lei 15.070, de 2024, são considerados bioinsumos todos os produto, processo ou tecnologia de origem vegetal, animal ou microbiana, incluído o oriundo de processo biotecnológico, ou estruturalmente similar e funcionalmente idêntico ao de origem natural, destinado ao uso na produção, na proteção, no armazenamento e no beneficiamento de produtos agropecuários ou nos sistemas de produção aquáticos ou de florestas plantadas, que interfira no crescimento, no desenvolvimento e no mecanismo de resposta de animais, de plantas, de microrganismos, do solo e de substâncias derivadas e que interaja com os produtos e os processos físico-químicos e biológicos (BRASIL, 2024).

O Brasil se destaca como o país mais megabiodiverso do planeta, abrigando entre 15% e 25% de todas as espécies vegetais conhecidas, distribuídas em biomas com alta taxa de endemismo. Essa riqueza biológica constitui uma base estratégica para o desenvolvimento de bioinsumos agrícolas, com impactos ambientais geralmente positivos (Vidal et al., 2021; CRUZ, 2025). Em 2020, foi lançado pelo Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o Programa Nacional de Bioinsumos que tem por finalidade promover, fomentar e ampliar o uso de insumos biológicos na agropecuária brasileira, contando, atualmente, com 912 produtos registrados e disponíveis para os agricultores (BRASIL, 2026).

Sua aplicação abrange desde inoculantes microbiológicos, como rizóbios e fungos micorrízicos, até biofertilizantes e agentes de biocontrole (Silva et al., 2024). São diversos os tipos e as finalidades que se enquadra nessa definição, tais como

biofertilizantes, bioestimulantes, promotores de crescimento de plantas, ingredientes para nutrição de plantas e animais, substâncias bioativas, extratos de plantas, agentes de controle biológico de pragas e doenças, e outros (MAPA, 2024).

O uso de bioinsumos tem se mostrado extremamente vantajoso para diversas culturas agrícolas, como milho, soja, trigo, frutas, algodão e cana-de-açúcar. Portanto, o aumento da produtividade e a diminuição da dependência dessas e de outras culturas em relação ao uso de produtos químicos sintéticos são benefícios que têm atraído agricultores em todo o mundo (Vidal *et al.*, 2021). Ao melhorar a saúde do solo, aumentar a resistência das plantas a pragas e doenças, e promover a eficiência do uso de nutrientes, contribuem para sistemas agrícolas mais equilibrados (Silva *et al.*, 2024).

2.4. Bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV)

As bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCV) fazem parte da população residente das plantas como epifíticas ou endofíticas e não são fitopatogênicas, colonizam o interior e o exterior dos órgãos vegetais e exercem efeitos benéficos ou neutros sobre o crescimento das plantas (Mariano, 2004). As BPCV possuem o potencial de estimular o desenvolvimento das plantas, de forma indireta ou direta pela ação do microrganismo (Glick, 2012).

Entre esses microrganismos estão os que vivem sob influência da rizosfera, região do solo sob influência direta das raízes das plantas, caracterizada por intensa atividade microbiana (Hiltner, 1904). Nessa região concentram-se as rizobactérias que são capazes de colonizar ou adentrar nos tecidos vegetais, estabelecendo uma relação simbiótica entre planta-microrganismo, no qual ambas são beneficiadas (Glick, 2012).

Há uma grande diversidade de microrganismos com capacidade de promover o crescimento das plantas. Entre as principais BPCV empregadas na área da pesquisa, destacam-se: *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Burkholderia*, *Streptomyces* e *Enterobacter* (Oliveira *et al.*, 2014). Dentre os gêneros citados, *Bacillus* e *Pseudomonas* estão identificados como os gêneros predominantes dentre as comunidades de BPCV (Kang *et al.*, 2015).

Estudo realizado por Kavaruma *et al.* (2013) no semiárido brasileiro, em cactáceas distribuídas ao longo do bioma Caatinga, envolveu o isolamento de bactérias associadas a essas plantas. Das 48 cepas bacterianas identificadas, 73% pertenciam à família Bacillaceae. A frequência expressiva de espécies do gênero *Bacillus* em ambientes do semiárido pode estar associada à formação de endósporos, os quais conferem resistência a estresses abióticos típicos dessas regiões, favorecendo a adaptação e a persistência bacteriana (Nicholson *et al.*, 2000).

É importante ressaltar que as interações que ocorrem entre plantas e BPCV diferem de acordo com o nicho de colonização. Para bactérias endofíticas, ocorre a colonização dos espaços intercelulares dos tecidos vegetais, enquanto bactérias epifíticas induzem a formação de estruturas diferenciadas nas raízes ou a agregação na superfície radicular (De Souza *et al.* 2015).

A interação entre leguminosas e bactérias dos gêneros *Rhizobium* e *Bradyrhizobium* leva à diferenciação de nódulos radiculares, os quais atuam como estruturas especializadas para a realização da fixação biológica de nitrogênio (Guo *et al.*, 2020). De forma distinta, representadas por bactérias dos gêneros *Bacillus* e *Pseudomonas*, a interação ocorre por meio da colonização da superfície das raízes, acompanhada pela formação de biofilmes, os quais favorecem o estabelecimento e a persistência dessas bactérias em condições adversas (Liu *et al.*, 2023).

Esses microrganismos atuam promovendo diretamente o crescimento pela produção de ácido cianídrico, fitohormônios, enzimas como a ACC-deaminase, mineralização de nutrientes, solubilização de fosfatos, fixação do nitrogênio, aumento da absorção pelas raízes, e outros (Mariano, 2004). A utilização de BPCV tem aumentado nos últimos anos, em razão de seus múltiplos mecanismos de ação, dentre eles a mitigação dos efeitos estressantes do déficit hídrico e salinidade, fito-extração de metais pesados, balanço hormonal e biocontrole de fitopatógenos (Dias, 2022).

Os exsudatos radiculares liberados na rizosfera de diferentes espécies vegetais são compreendidos por aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos, ácidos graxos, flavonoides e enzimas (Glick, 2012). Dessa forma, as plantas fornecem vitaminas, hormônios e compostos que favorecem o desenvolvimento das populações bacterianas (Alves *et al.*, 2021). Por outro lado, as BPCV fornecem nutrientes

fitodisponíveis, atenuando o estresse biótico e abiótico, além de proteger a planta contra patógenos (Rashid *et al.*, 2016; Novo *et al.*, 2018).

As BPCV podem mitigar os efeitos causados pelo estresse hídrico, ocasionando redução do dano oxidativo por meio da ação enzimática antioxidante ou de eliminação das espécies reativas de oxigênio (ERO), produzidas pela planta em resposta ao estresse hídrico (Kang *et al.* 2014). A associação bacteriana à base de *Bacillus* em plantas pode reduzir a síntese de ERO nas células por meio de várias enzimas de eliminação (Kakar *et al.*, 2016), podendo ampliar ou reduzir a ação de enzimas antioxidantes em plantas para mitigar o efeito da seca.

De acordo com Grover *et al.* (2011), os microrganismos são importantes recursos biológicos para auxiliar as plantas cultivadas na tolerância ao déficit hídrico e a condições ambientais extremas, além de ter grande capacidade de desenvolvimento em distintos habitats. Para Mariano (2004), uma agricultura sustentável busca aumentar a produção de alimentos sem causar impactos negativos ao meio ambiente e à saúde. Uma das alternativas para atingir esse objetivo é o uso das BPCV, devido à sua facilidade de aplicação e por serem microrganismos nativos, enquadrando-se plenamente na realidade da agricultura orgânica e sustentável.

2.5. *Bacillus aryabhatai*

Bacillus aryabhatai tem se destacado nos últimos anos como um microrganismo promissor no desenvolvimento de bioinsumos agrícolas, especialmente no contexto da agricultura sustentável. Trata-se de uma bactéria promotora de crescimento vegetal (PGPR) pertencente ao gênero *Bacillus*, amplamente reconhecido por sua capacidade de formar esporos e sobreviver em condições ambientais adversas (Shivaji *et al.*, 2009).

É uma bactéria gram-positiva, aeróbia, em formato de bastonete, com capacidade de formar endósporo. Foi originalmente descrita por Shivaji *et al.* (2009), a partir de isolados obtidos da estratosfera terrestre, coletados por meio de amostras de ar atmosférico, o que evidenciou sua elevada capacidade de adaptação a condições extremas. Posteriormente, diversas pesquisas relataram o isolamento dessa bactéria em solos agrícolas, com ênfase na rizosfera de culturas como soja, milho, arroz e trigo.

No Brasil, estudos conduzidos pela Embrapa Meio Ambiente identificaram a presença de *Bacillus aryabhatai* associado às raízes do mandacaru (*Cereus jamacaru*), cacto nativo do bioma Caatinga, no Nordeste brasileiro. Essa associação evidencia a capacidade dessa bactéria de colonizar ambientes semiáridos e de se adaptar a condições edafoclimáticas adversas, como déficit hídrico e altas temperaturas, características marcantes desse bioma (EMBRAPA, 2017).

A Embrapa, por meio de sua linha de pesquisa em microbiologia ambiental, avalia que bactérias tolerantes à seca, ao colonizarem o sistema radicular de plantas sob estresse abiótico, produzem substâncias hidratantes denominadas exopolissacarídeos, os quais, associados a proteínas e DNA, participam da formação de biofilmes na superfície das raízes (EMBRAPA, 2017). Nesse contexto, em 2021, a Embrapa Meio Ambiente em parceria com a empresa NOAA Ciência e Tecnologia Agrícola, lançou o bioinsumo AURAS® à base de *B. aryabhatai*.

A inoculação da bactéria é realizada, preferencialmente, via tratamento de sementes ou aplicação direta no solo, utilizando suspensões bacterianas. Após a aplicação, a bactéria coloniza a rizosfera e o sistema radicular das plantas, estabelecendo associação benéfica, especialmente em condições de estresse hídrico, através da formação do biofilme, que mantém as raízes úmidas (Kokare, 2009).

A utilização do microrganismo tem demonstrado potencial para promover o desenvolvimento do sistema radicular, facilitando a absorção de água nas camadas mais profundas do solo. Essa interação favorece o crescimento das plantas, aumenta a tolerância ao estresse hídrico e melhora a produtividade em ambientes com baixa disponibilidade hídrica (Silva, 2024).

Além dos objetivos citados, essa alternativa busca reduzir os custos de irrigação e otimizar o uso da água, mantendo a produtividade em níveis satisfatórios, uma vez que os momentos críticos da cultura, em que a disponibilidade hídrica é essencial para o desenvolvimento, são conhecidos. De certo modo, a agricultura necessita de maneiras de produzir utilizando menor quantidade de água, levando em consideração a falta de chuva (Oliveira *et al.*, 2024).

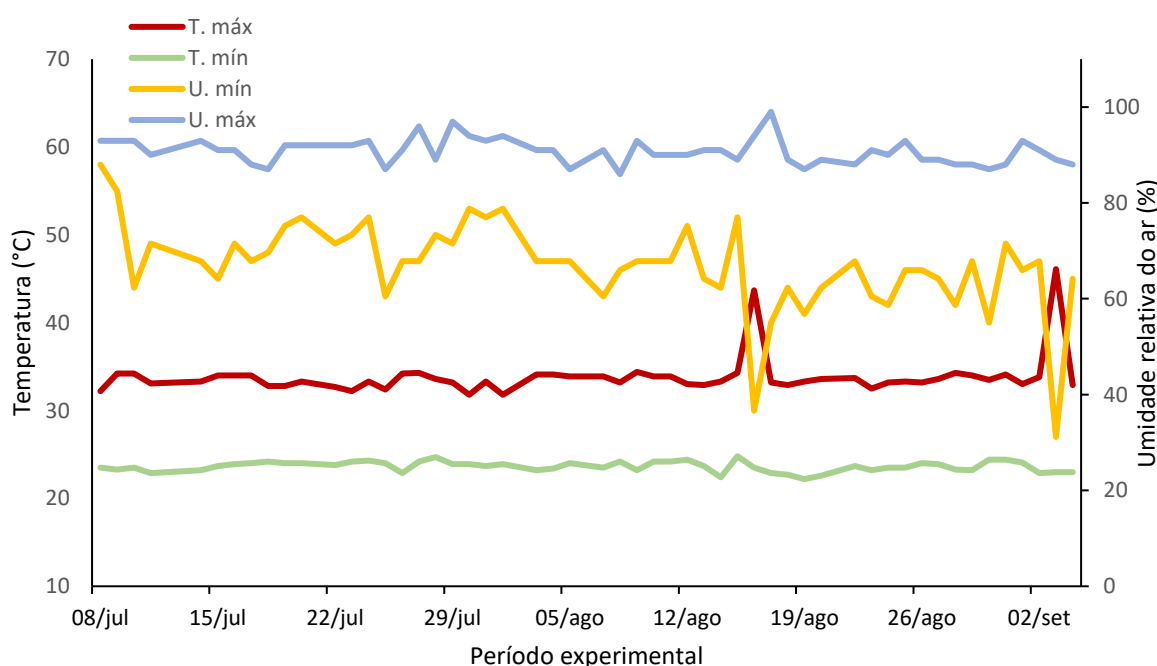
3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização do experimento

O experimento foi realizado entre os meses de junho a setembro de 2025, em casa de vegetação pertencente ao Departamento de Ciências do Solo, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará localizada no Campus do Pici, no município de Fortaleza, Ceará, Brasil, com latitude de 3°44'35"S, longitude 38°34'33"W e altitude de 12 metros do nível do mar.

Durante o experimento, com o auxílio de um termo-higrômetro digital, foram monitoradas diariamente as temperaturas máximas e mínimas e a umidade relativa do ar no interior da estufa, com uma variação de 31,8 a 46,1 °C, 22,2 a 24,8 °C e 24,5 a 96%, respectivamente (Figura 1).

Figura 1 - Médias diárias das temperaturas mínimas e máximas e da umidade relativa do ar durante o experimento.



Fonte: Elaborada pela autora. Abreviações: T. máx. – Temperatura máxima; T. mín – Temperatura mínima; U. máx – Umidade máxima; U. mín – Umidade mínima.

3.2. Material vegetal

Para este experimento foram utilizadas sementes de feijão-caupi da cultivar BRS Guariba, fornecidas pelo Banco Ativo de Germoplasma (BAG) da Universidade Federal do Ceará, localizado em Fortaleza, Ceará. Essa cultivar foi selecionada por ser adaptada e recomendada para a região Nordeste.

Antes da semeadura, as sementes foram imersas em solução de álcool etílico a 70% por 30 segundos para quebrar a tensão superficial, em seguida em solução de hipoclorito de sódio 1% por 5 minutos para desinfecção (Maia *et al.* 2023; Abreu *et al.* 2019). Feito isso, foram lavadas com água destilada para remover o excesso de hipoclorito, conforme descrito por Hungria & Araújo (1994).

3.3. Análise de solo

O solo utilizado neste estudo foi coletado na profundidade de 0-20 cm de uma área não cultivada da Horta Didática pertencente a Universidade Federal do Ceará, localizada em Fortaleza, Ceará. Após a coleta, uma amostra foi encaminhada para o Laboratório de Análises Agronômicas Unithal, localizado em Campinas, São Paulo, para determinação dos parâmetros químicos. Além disso, os parâmetros físicos do solo foram determinados no Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Ciências do Solo da UFC (Tabela 1).

Tabela 1 - Atributos químicos e físicos do solo utilizado no experimento.

Atributos químicos										
C	M.O	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+AL	SB	CTC
(g dm ⁻³)	%	...(mg dm ⁻³)...		(cmolc dm ⁻³).....					
4	0,7	18	11,7	3,3	0,5	0,2	ALD	1,1	0,73	1,83
Atributos químicos					Atributos físicos					
V	CE	pH	Areia	Silte	Argila	ps	pp	Classificação textural		
%	dS m ⁻¹	H ₂ O	g kg			g cm ⁻³			Arenosa	
39,89	1,1	6,5	952	16	32	1,43	2,65			

Fonte: Laboratório de Análises Agronômicas Unithal; Laboratório de Física do Solo, UFC. Abreviações: C - Carbono; M.O - Matéria orgânica; P - Fósforo; K - Potássio; Na - Sódio; Ca - Carbono; Mg - Magnésio; Al - Alumínio; H+Al - Acidez potencial; SB - Soma de bases; CTC - Capacidade de troca de cátions; V - Saturação de bases; CE - Condutividade elétrica; pH - Potencial hidrogeniônico; ps - Densidade do solo; pp - densidade das partículas.

A partir dos resultados da análise de solo e da recomendação nutricional para a cultura baseada na Recomendação de Adubação e Cálculo para o Estado do Ceará (Aquino, 1993), foi realizada a adubação química, aplicando 0,80 g planta⁻¹ de cloreto de potássio e 2,50 g planta⁻¹ de superfosfato simples na adubação de fundação. Nas adubações de cobertura, foi aplicado 2,17 g planta⁻¹ sulfato de magnésio e 4,68 g planta⁻¹ de nitrato de cálcio em três parcelas iguais ao longo do ciclo da cultura. Foi aplicado 0,25 g planta⁻¹ de ureia, 15 dias após a emergência das plântulas.

3.4. Água de irrigação

A quantidade de água de cada tratamento foi calculada a partir do nível de 100% da capacidade de retenção de água (CRA) que foi determinada no Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Ciências do Solo da UFC. A determinação da CRA foi realizada em quatro repetições.

Após a homogeneização do solo, retirou-se uma amostra que foi pesada e secada em estufa a 100°C, utilizando 1 kg de solo por coluna para a determinação da CRA. Após a secagem, adicionou água nas colunas até ficar saturado, após o escoamento do excesso, foi pesado novamente e determinou-se a capacidade de retenção de água pela diferença entre a massa do solo úmido e do solo seco (Dutra *et al.*, 2012).

O monitoramento e a manutenção da irrigação foram feitos diariamente em todos os vasos, pesando-os e repondo o volume de água evapotranspirado para manter cada tratamento no respectivo nível de CRA estipulado, utilizando uma balança com capacidade para 20 kg. A imposição dos tratamentos iniciou aos 15 dias após a semeadura (DAS), a partir desse momento, cada tratamento passou a receber as lâminas de irrigação correspondente a cada nível de déficit estabelecido.

Foram adotados quatro níveis de disponibilidade hídrica: 40, 50, 65 e 80% da CRA. Quando o tratamento submetido a menor lâmina de irrigação (40% da CRA) atingia o percentual de umidade estabelecido, realizava-se a reposição de água nivelando todos os tratamentos a 80% da CRA. Iniciando-se, a partir daí, um novo ciclo de deficiência hídrica.

3.5. Bioinsumo

O *Bacillus aryabattai* utilizado no experimento foi obtido a partir do produto Auras®, desenvolvido pela empresa brasileira NOOA Ciência e Tecnologia Agrícola, constituído pela cepa CMAA 1363 na concentração de 1×10^8 UFC mL⁻¹.

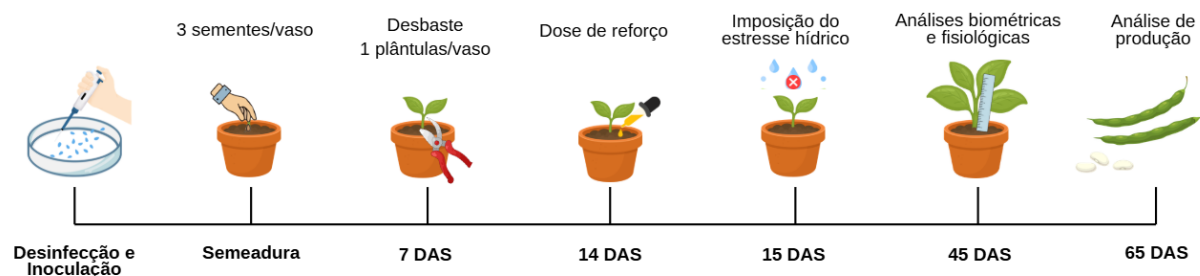
As sementes dos tratamentos com bioinsumo foram inoculadas com a aplicação de 2 mL do produto AURAS®, de forma concentrada. Aos 14 dias após a semeadura, as plântulas dos tratamentos inoculados com *B. aryabhattai* receberam uma reaplicação, na dose de 1 mL.

3.6. Condução do experimento

Foi utilizado vasos plásticos de 8 litros preenchidos com 9 kg de solo com densidade de $1,43 \text{ g cm}^{-3}$. A semeadura ocorreu no dia 29 de junho de 2025, foram semeadas 3 sementes por vasos em uma profundidade de 3 cm, sete dias após a semeadura, foi realizado o desbaste manual, deixando uma plântula por vaso.

Durante o período experimental, foram realizados os tratos culturais necessários para a adequada condução da cultura.

Figura 2 - Esquema ilustrativo da condução do experimento indicando as etapas de imposição do déficit hídrico, aplicação do bioinsumo e variáveis analisadas em plantas de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.) cv. Guariba.



Fonte: Elaborado pela autora. Abreviaturas: DAS – Dias após a semeadura.

3.7. Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (DIC) em um arranjo fatorial 2 x 4, sendo dois tratamentos de sementes (presença e ausência de *B. aryabhatai*) e 4 percentuais de umidades do solo a partir da capacidade de retenção de água do solo (80; 65; 50 e 40 %), com oito repetições, totalizando 64 unidades experimentais.

É importante mencionar que uma das plantas foi utilizada para análises biométricas e fisiológicas (destrutivas) na pré-floração. Já a outra planta, foi conduzida até o final do ciclo para obter dados de produtividade aos 65 dias.

3.8. Variáveis analisadas

3.8.1. Análises biométricas

Na pré-floração, foi selecionado uma planta para realizar análises biométricas. Foram analisados a altura da planta (AP) com o auxílio de uma régua graduada e diâmetro do caule (DC) com o paquímetro digital. A altura da planta foi medida considerando-se a distância entre colo da planta até a gema apical do ramo principal e o diâmetro do caule foi mensurado na altura da inserção dos cotilédones. Também foi contabilizado o número de folhas (NF) pela contagem dos trifólios de cada planta.

Coletaram-se as plantas, separando-as em folhas, caules e raízes, em seguida, cada parte foi acondicionada em sacos de papel que posteriormente foram levados para secagem em estufa de circulação de ar, mantida a 65 °C, até peso constante; subsequentemente, o material foi pesado em balança de precisão de 0,0001 g, obtendo-se, assim, a massa seca de folhas (MSC), do caule (MSC) e raízes (MSR).

3.8.2. Análises fisiológicas

As avaliações dos parâmetros fotossintéticos foram realizadas no período da manhã, entre 09:00 e 11:00 horas, no terceiro trifólio totalmente expandido de cada

planta, utilizando um analisador de gases por infravermelho (Infrared Gas Analyser - IRGA, modelo LCpro-SD). A fim de minimizar possíveis oscilações na intensidade da radiação solar, durante as leituras utilizou-se no IRGA fonte artificial de radiação fotossinteticamente ativa acoplada na pinça do equipamento sob intensidade luminosa de $1800 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Foram determinadas a taxa fotossint\u00e9tica l\u00edquida (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), a condut\u00e2ncia estom\u00e1tica (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), a concentra\u00e7\u00e3o interna de CO_2 (C_i , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) e a taxa de transpira\u00e7\u00e3o (E , $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). A partir da rela\u00e7\u00e3o A/E , foi estimada a efici\u00eancia do uso da \u00e1gua (EUA).

Na ocasi\u00e3o da determina\u00e7\u00e3o das trocas gasosas, avaliou-se o teor de clorofila com um leitor de \u00edndice SPAD (Soil Plant Analysis Development). Al\u00e9m disso, o teor relativo de \u00e1gua (TRA) foi determinado conforme descrito por Barrs e Weatherley (1962). Para isso, coletou-se a terceira folha completamente expandida e foram retirados 10 discos de 1,0 cm de di\u00e2metro. Ap\u00f3s pesadas para obten\u00e7\u00e3o da massa fresca (MF), os discos foram imersos em \u00e1gua destilada por 3 horas para atingir a plena turgesc\u00eancia, sendo ent\u00e3o novamente pesados para determina\u00e7\u00e3o da massa t\u00fargida (MT). Em seguida, os discos foram acondicionados em estufa com 60° durante 72 horas para obter a massa seca (MS). O TRA foi calculado pela equa\u00e7\u00e3o: $\text{TRA (\%)} = (\text{MF} - \text{MS}) / (\text{MT} - \text{MS}) \times 100$.

3.8.3. An\u00e1lises de produ\u00e7\u00e3o

Os par\u00e2metros produtivos foram coletados ao t\u00e9rmino do experimento, aos 65 dias ap\u00f3s a semeadura (DAS). Foram avaliados o comprimento das vagens (CVA), o n\u00famero de vagens por planta (NVP), peso de 100 sementes (P_{100s}) e peso total dos gr\u00e3os (PTG).

3.9. An\u00e1lise estat\u00edstica

Para a an\u00e1lise dos dados biom\u00e9tricos, fisiol\u00f3gicos e produtivos, procedeu-se com a verifica\u00e7\u00e3o da normalidade dos dados, por meio do teste de Shapiro-Wilk e, depois, os dados das vari\u00e1veis analisadas foram submetidos \u00e0 an\u00e1lise de vari\u00e2ncia, avaliando-se a signific\u00e2ncia dos tratamentos pelo teste F ($p \leq 0,05$). Quando significativas, as m\u00e9dias foram comparadas pelo teste de Tukey. Para an\u00e1lise

estatística e representação gráfica foram utilizados o Programa R e Microsoft Excel (versão 2508), respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Crescimento do feijão-caupi

Independente da aplicação do bioinsumo, a restrição hídrica promoveu decréscimos expressivos no crescimento do feijão-caupi em comparação com as plantas cultivadas em condições adequadas de água. Nesse contexto, a atuação do microrganismo não foi suficiente para compensar os efeitos negativos do déficit hídrico, resultando em respostas semelhantes entre plantas inoculadas e não inoculadas (Tabela 2).

Tabela 2 - Parâmetros de crescimento do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.) cv. Guariba sob condições de déficit hídrico e efeito da aplicação com *B. aryabhatai*.

Parâmetro	Condição hídrica				<i>B. aryabhatai</i>		P-VALOR		
	40	50	65	80	COM	SEM	CH	BIO	CH X BIO
AP	53,12 b	93,5 a	111,12 a	111,25 a	90,94 B	93,56 A	<0,001	0,068	0,532
DC	7,21 d	8,06 c	9,42 b	10,25 a	8,98 A	8,49 B	<0,001	0,001	0,976
NF	9,25 c	11,12 c	15,87 b	19,12 a	13,5 B	14,18 A	<0,001	0,289	0,541

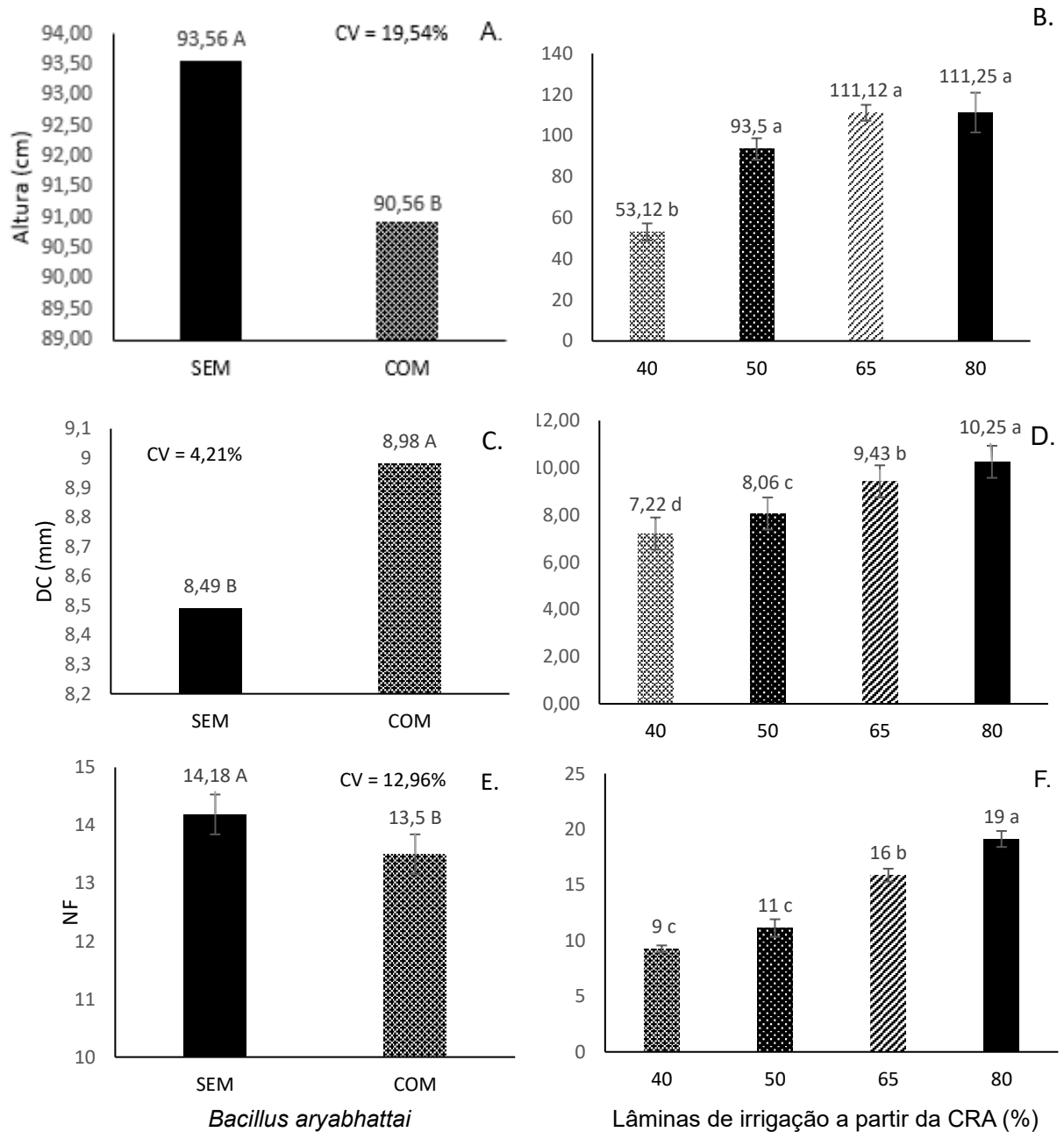
Fonte: Elaborada pela autora. AP – Altura da planta; DC – Diâmetro do caule; NF – Número de folhas; CH – Condição hídrica; BIO – Uso do biológico; CH x BIO – Interação entre a condição hídrica e o uso do biológico. Letras minúsculas indicam comparação entre os níveis de disponibilidade hídrica, enquanto letras maiúsculas indicam comparação entre tratamentos com e sem *Bacillus aryabhatai*. Os valores representam a média de quatro repetições.

Na altura das plantas, as lâminas de 65 e 80% da CRA proporcionaram os maiores valores, não diferindo entre si. Esse comportamento indica que, mesmo com uma redução hídrica de 15%, foi possível manter o crescimento em altura semelhante à condição de maior disponibilidade hídrica, evidenciando um potencial de economia de água sem prejuízo no desenvolvimento da cultura.

Em relação ao diâmetro do caule, observou-se que plantas inoculadas apresentaram maior espessamento do caule quando comparadas às não inoculadas. Esse comportamento indica maior vigor estrutural proporcionado pela BPCV, Vessey (2003) ressalta que esses microrganismos promovem o crescimento das plantas, mas o efeito pode ser variáveis quanto aos parâmetros, espécies e condições ambientais.

Sob condições de maior restrição hídrica, o crescimento das plantas é refletido em menores valores de altura, área foliar e acúmulo de biomassa, uma vez que o desenvolvimento vegetativo é dependente da disponibilidade de água (Taiz *et al.*, 2017). Assim como ocorreu para altura, diâmetro do caule e do número de folhas das plantas de feijão-caupi com menor disponibilidade de água (Figura 3).

Figura 3 - Altura (A e B), diâmetro do caule (C e D) e número de folhas (E e F) de plantas de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.), cv. Guariba, em função da aplicação de *B. aryabhattai* e da disponibilidade de água.



Fonte: Elaborada pela autora. Letras minúsculas indicam comparação entre os níveis de disponibilidade hídrica, enquanto letras maiúsculas indicam comparação entre tratamentos com e sem *Bacillus aryabhattai*. Barras verticais indicam erro padrão.

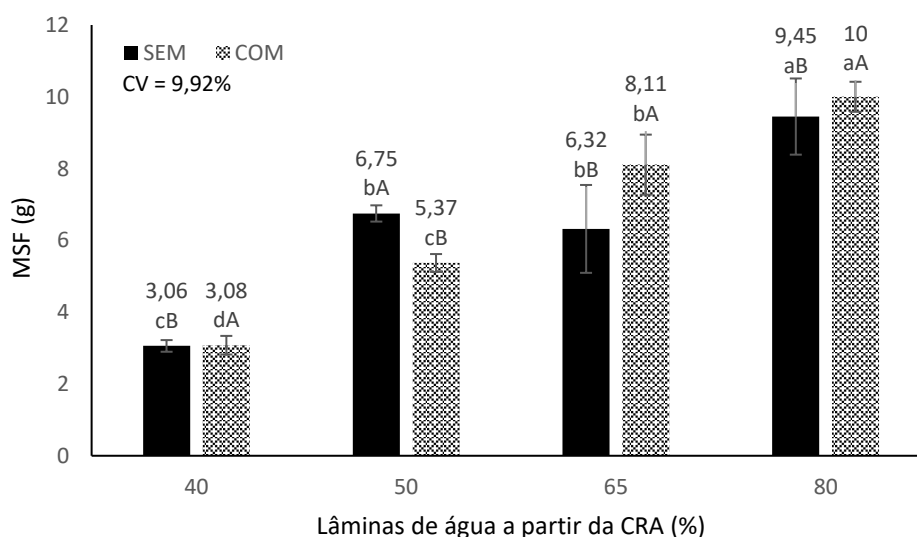
O bioinsumo apresentou efeito positivo específico para o DC, enquanto a disponibilidade hídrica foi o principal fator determinante do crescimento das plantas de feijão-caupi.

O número de folhas também foi reduzido sob maior déficit hídrico, refletindo um alvo sensível do desenvolvimento vegetativo à disponibilidade de água. O déficit hídrico diminui o desenvolvimento foliar, reduzindo o surgimento de novos nós e acelerando a senescência das folhas, o que leva a menor número total de folhas por planta em comparação com condições de plena irrigação (Wijewardana *et al.*, 2019)

As plantas de feijão-caupi tiveram a produção de massa seca condicionadas pela interação da disponibilidade hídrica e inoculação do *B. aryabhattai* (Figuras 4 e 5). De maneira geral, o déficit hídrico atuou como fator limitante, reduzindo o crescimento das plantas, enquanto a presença da bactéria promoveu um incremento positivo na massa seca sob maior disponibilidade de água.

A análise da massa seca é um importante indicador da eficiência biológica de uma cultura, pois representa o saldo real entre o que foi produzido via fotossíntese e o que foi consumido pela respiração celular. Conforme destacado por Larcher (2006), a biomassa seca reflete a capacidade de adaptação da planta ao ambiente, quanto maior o déficit, menor é a capacidade da planta de converter energia solar em tecidos estruturais.

Figura 4 - Massa seca da folha (MSF) de plantas de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.) cv. Guariba, em função da aplicação de *B. aryabhattai* e da disponibilidade de água.

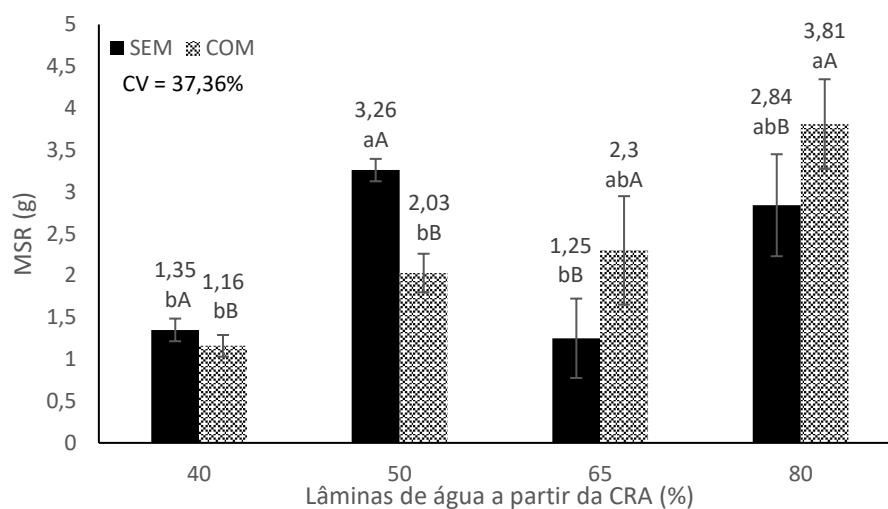


Fonte: Elaborada pela autora. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas indicam comparação entre os níveis de disponibilidade hídrica, enquanto

letras maiúsculas indicam comparação entre tratamentos com e sem *Bacillus aryabhatai*. Barras verticais indicam erro padrão.

Park *et al.* (2017) estudando soja e arroz sob estresse hídrico com inoculação de *B. aryabhatai*, observaram que a presença do microrganismo incrementou significativamente o crescimento das plantas, com maior comprimento de parte aérea e tamanho de folha.

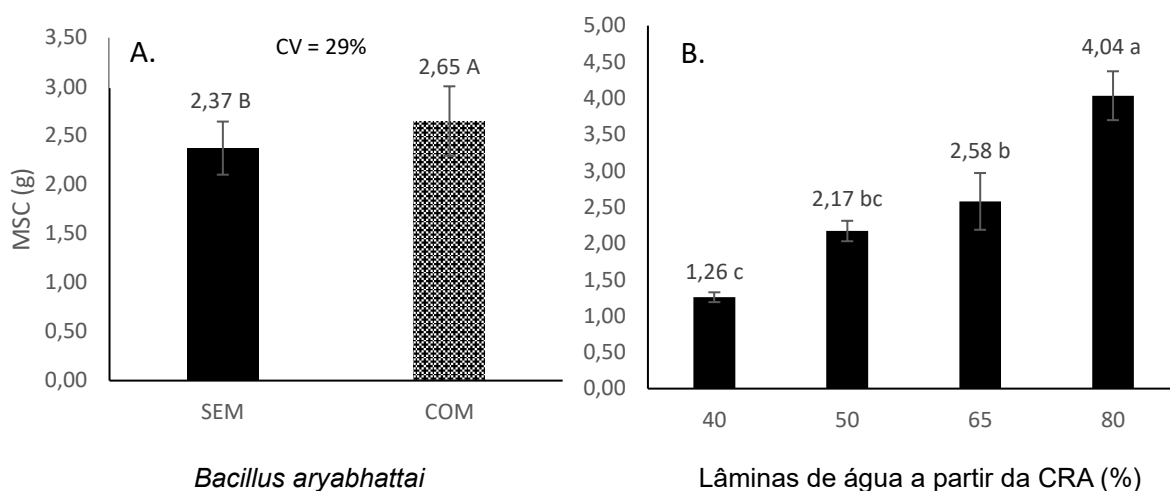
Figura 5 - Massa seca de raiz do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.) cv. Guariba, em função da aplicação de *Bacillus aryabhatai* e da disponibilidade hídrica.



Fonte: Elaborada pela autora. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas indicam comparação entre os níveis de disponibilidade hídrica, enquanto letras maiúsculas indicam comparação entre tratamentos com e sem *Bacillus aryabhatai*. Barras verticais indicam erro padrão.

Para o parâmetro de MSC (Figura 6), não houve interação entre a disponibilidade hídrica e o uso do bioinsumo, indicando que esses fatores influenciaram as plantas de feijão-caupi de maneira independente. A redução da água de 80% para 40% da CRA, reduziu a massa seca do caule de 4,04 g para 1,26 g (Figura 6, A). Paralelamente, a inoculação com a bactéria apresentou um efeito positivo, elevando a média geral da MSC de 2,37 g para 2,65 g (Figura 6, B).

Figura 6 - Massa seca do caule do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.) cv. Guariba, em função da aplicação de *Bacillus aryabhatai* e da disponibilidade hídrica.



Fonte: Elaborada pela autora. Letras minúsculas indicam comparação entre os níveis de disponibilidade hídrica, enquanto letras maiúsculas indicam comparação entre tratamentos com e sem *Bacillus aryabhatai*. Barras verticais indicam erro padrão.

Ao analisar a massa seca, as plantas sob maior déficit hídrico apresentaram menor acúmulo de biomassa tanto nas folhas (66,73%), quanto em caule (68,81%) e raízes (43,92%), em comparação às plantas mantidas sob irrigação plena. Com isso, é possível sugerir que o efeito da falta de água foi mais acentuado na massa seca da parte aérea do que na massa seca das raízes. De acordo com Taiz *et al.* (2017), o processo que é mais afetado pelo déficit hídrico é o da expansão celular, reduções no suprimento hídrico inibem o crescimento do caule e folhas, mas estimulam o alongamento das raízes.

Da mesma forma que observado neste experimento, estudos experimentais demonstram que o déficit hídrico reduz a acumulação de massa seca total, com a massa seca da parte aérea sendo afetada de forma mais intensa do que a das raízes, e um consequente aumento relativo da alocação de biomassa para as raízes sob déficit hídrico, refletindo ajustes no padrão de partição de biomassa em resposta à limitação de água (Li *et al.*, 2024; Eziz *et al.*, 2017).

Essa diferença ocorre porque, em condições de déficit hídrico, as leguminosas tendem a priorizar o crescimento radicular em busca de água em camadas mais profundas do solo. O aumento relativo nas raízes em relação as folhas, é uma resposta adequada a reduções na disponibilidade de água, assim a sensibilidade do crescimento da parte aérea em função do déficit hídrico pode ser

vista como uma adaptação a seca em vez de uma restrição fisiológica (Taiz *et al.* 2017).

A atuação do *Bacillus aryabhattai* como agente mitigador foi fundamental para reduzir os efeitos do déficit hídrico, especialmente na parte aérea. Conforme observado na lâmina de 65%, a inoculação permitiu um incremento que elevou a massa seca de 6,32 g para 8,11 g, demonstrando que a bactéria auxiliou na manutenção do metabolismo vegetal mesmo sob restrição hídrica moderada. De acordo com Bhattacharyya *et al.* (2020), o *Bacillus aryabhattai* atua como um mediador fisiológico, auxiliando a planta a tolerar períodos de escassez hídrica através da produção de exopolissacarídeos e da síntese de enzimas.

4.2. Respostas fisiológicas

O déficit hídrico afetou negativamente as variáveis fisiológicas do feijão-caupi, enquanto a inoculação com *Bacillus aryabhattai* apresentou efeito somente na eficiência do uso da água (EUA). As plantas submetidas a maior restrição hídrica (40% da CRA) quando comparadas às plantas sem déficit (80% da CRA), apresentaram reduções de 61% na transpiração (E), 60,8% na condutância estomática (gs), 70% na taxa fotossintética (A), 23,9% na eficiência do uso da água (EUA) e 15,1% no índice SPAD (Tabela 3).

Tabela 3 - Respostas fisiológicas de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.) cv. Guariba sob condições de déficit hídrico e efeito da aplicação com *B. aryabhattai*.

Parâmetro	Condição hídrica				<i>B. aryabhattai</i>		P-VALOR		
	40	50	65	80	COM	SEM	CH	BIO	CH X BIO
E	1,50 b	3,46 a	4,13 a	3,83 a	3,14 B	3,32 A	<0,001	0,678	0,532
Ci	187,62 a	173,37 a	206,62 a	193,62 a	198,06 A	182,56 B	0,177	0,146	0,532
gs	0,12 b	0,33 ab	0,39 a	0,39 a	0,28 B	0,34 A	0,015	0,348	0,593
A	3,76 b	12,86 a	11,45 a	12,53 a	8,9 B	11,4 A	<0,001	0,085	0,499
EUA	2,48 d	4,19 a	2,78 c	3,26 b	2,51 B	3,84 A	0,076	0,008	0,16
TRA	68,13 c	78,21 a	75,10 ba	70,35 cb	72,65 B	73,24 A	<0,001	0,709	0,186
SPAD	61 b	68,9 a	67,4 a	71,9 a	68,4 A	66,2 B	<0,001	0,181	0,444

Fonte: Elaborada pela autora. E - Transpiração; Ci - Concentração de carbono interno; gs - Condutância estomática; A - Fotossíntese líquida; EUA - Eficiência do uso da água; TRA - Teor relativo de água; SPAD - Índice SPAD; CH - Condição hídrica; BIO - Uso do biológico; CH x BIO - Interação entre a condição hídrica e o uso do biológico. Letras minúsculas indicam comparação entre os níveis de disponibilidade hídrica, enquanto letras maiúsculas indicam comparação entre tratamentos com e sem *Bacillus aryabhattai*. Os valores representam a média de quatro repetições.

As trocas gasosas foram severamente reduzidas pelo déficit hídrico e essa resposta pode ser atribuída à restrição causada na condutância estomática (Tabela 3). Essa resposta também foi obtida por Melo *et al.* (2022), que observaram que o déficit hídrico severo compromete a condutância estomática e a taxa fotossintética, impedindo a manutenção do metabolismo basal do feijão-caupi.

Taiz & Zeiger (2010) afirmam que sob condições de estresse hídrico, os estômatos fecham em resposta à diminuição do potencial hídrico nas folhas, levando a uma redução da condutância estomática, o que diminui a transpiração e limita a entrada de CO₂, como estratégia para conservação da água.

As plantas de feijão-caupi submetidas à lâmina de 40% da CRA obtiveram uma gs de 0,1 mol m².s⁻¹, quase atingindo o fechamento total dos estômatos, o que resulta na redução da transpiração e limita a assimilação de CO₂. Resultados semelhantes foram obtidos por Endres *et al.* (2010), uma gs de 0,01 mol m² s⁻¹ em *Phaseolus vulgaris*, assim como Lima (2017) estudando respostas fisiológicas do *Vigna unguiculata* L., em condições de déficit severo, também obteve uma gs de 0,01 mol m² s⁻¹.

De forma semelhante aos resultados obtidos nesse estudo, a aplicação de lâminas de irrigação com baixa disponibilidade hídrica causou reduções significativas nos parâmetros fisiológicos de plantas de feijão-caupi (Dutra *et al.*, 2015), assim como Silva (2019) evidenciou que o feijão-caupi apresenta sensibilidade ao déficit hídrico, observando queda progressiva das taxas de A, E e gs ao intensificar o déficit hídrico.

Os maiores valores de transpiração foram observados nas condições hídricas de 50, 65 e 80%, diferindo significativamente da condição de 40% de disponibilidade hídrica. Esse comportamento reflete a restrição estomática imposta pelo déficit hídrico severo, uma vez que, sob baixa disponibilidade de água, as plantas reduzem a abertura estomática, limitando as trocas gasosas como forma de manter o estado hídrico das células (Larcher, 2006).

Assim como os demais aspectos fisiológicos citados, a taxa fotossintética apresentou valores significativamente menores na condição hídrica de 40%. Esse comportamento evidencia que a fotossíntese está diretamente associada à limitação estomática, reduzindo a assimilação de CO₂ sob déficit hídrico. De acordo com Flexas *et al.* (2018), em estágios iniciais e moderados de déficit hídrico, a limitação estomática é o principal fator responsável pela queda da fotossíntese.

Ainda na tabela 3, observou-se que a concentração de carbono interno se manteve constante mesmo em condições de baixa disponibilidade de água. Isso mostra que, embora os estômatos tenham se fechado para evitar a perda de água, a planta não conseguiu consumir o CO₂ que já estava dentro da folha. Dessa forma, sugere-se que as limitações impostas à fotossíntese não foram apenas de ordem estomática. Segundo Souza *et al.* (2023), este comportamento indica que fatores não estomáticos, como a redução da atividade enzimática, impediram esse consumo. Assim, a falta de água não apenas fechou os estômatos, mas também paralisou suas atividades metabólicas. Em culturas anuais, como feijão-guandu e soja, o estresse hídrico reduz os parâmetros de trocas gasosas, podendo modificar a Ci em função da intensidade (Munjonji *et al.*, 2021).

As plantas inoculadas com *B. aryabhatai* apresentaram maiores valores de Ci em comparação com às plantas não inoculadas. Essa resposta sugere que a inoculação do microrganismo contribuiu para reduzir limitações difusivas ao CO₂, favorecendo o metabolismo fotossintético. Resultados semelhantes são relatados por estudos que demonstram que a inoculação em PGPB pode aumentar a atividade fisiológica geral da planta, elevando o consumo de água, o que nem sempre se traduz em maior eficiência hídrica, especialmente sob condições de estresse mais intenso (Gupta *et al.*, 2021).

Quanto à EUA, não apresentou diferenças significativas entre as lâminas de irrigação, entretanto, foi maior nas plantas inoculadas com *B. aryabhatai* (3,84) quando comparadas às não inoculadas (2,51). O microrganismo contribuiu para melhorar a relação carbono assimilado e água transpirada. Mesmo sem alterar diretamente *g_s* e *A*, a bactéria contribuiu para o uso mais eficiente da água.

O Teor Relativo de Água (TRA) foi severamente reduzido sob a condição de déficit hídrico, atingindo uma média de 68,13%. De acordo com Taiz e Zeiger (2010), a manutenção do status hídrico é essencial para a integridade das membranas e o funcionamento do aparato fotossintético. A redução do TRA sob déficit correlacionou-se diretamente com o fechamento estomático e a queda na fotossíntese líquida, evidenciando que a planta priorizou a sobrevivência em detrimento da produção de biomassa.

Em relação ao índice SPAD, o mesmo é importante para a determinação dos teores relativos de clorofila, por ser um método não invasivo e rápido, além disso,

os teores de clorofila estão diretamente relacionados às taxas fotossintéticas (Silva, 2019). O índice SPAD foi significativamente afetado pela condição hídrica. As plantas sob maior restrição apresentaram menor valor de SPAD, enquanto as demais lâminas mantiveram valores mais elevados, não diferindo entre si. Conforme descrito por Silva (2019), o SPAD demonstrou tendência de redução com a intensificação do déficit hídrico, ou pela maior degradação ou pela menor síntese, assim como observado no presente estudo.

O índice SPAD é amplamente utilizado como estimador não invasivo e rápido do teor relativo de clorofila nas folhas, o que está diretamente associado à capacidade fotossintética das plantas. Estudos recentes demonstram que o déficit hídrico reduz significativamente os valores de SPAD, refletindo a diminuição dos pigmentos fotossintéticos sob déficit de água, o que está relacionado à redução da síntese de clorofila e ao aumento de sua degradação (Silva, 2019; Liu et al., 2019).

Em relação ao Índice SPAD, houve uma redução de 15%, comparando as lâminas de 80% e 40% da CRA. Demonstra que a disponibilidade hídrica limitou a capacidade de captação de energia da planta. A degradação da clorofila reduz a eficiência fotossintética, limitando a assimilação de CO₂, mesmo quando ele está disponível no ambiente (Barros, 2021; Ferreira, 2023).

4.3. Desempenho produtivo do feijão-caupi

O déficit hídrico imposto afetou negativamente o rendimento produtivo do feijão-caupi. As plantas submetidas à condição hídrica restrita apresentaram reduções de 75% no número de vagens por planta (NVP), 51% no comprimento da vagem (CVA), quando comparadas às plantas em pleno suprimento hídrico (Tabela 4).

Tabela 4 – Uso de *Bacillus aryabhattai* sobre os caracteres produtivos de plantas de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.), cv. Guariba em função da aplicação de *Bacillus aryabhattai* e da disponibilidade hídrica.

Parâmetro	Condição hídrica				<i>B. aryabhattai</i>		P-VALOR		
	40	50	65	80	COM	SEM	CH	BIO	CH X BIO
NVP (und)	6,87 c	16 b	18,87 b	27,5 a	17,06 B	17,56 A	<0,001	0,761	0,757
CVA (m)	8,94 c	14,6 b	17,47 ab	18,48 a	14,96 A	14,77 B	<0,001	0,823	0,503
P100G (g)	26,07 a	22,75 b	24,96 a	23,67 b	24,31 B	24,42 A	<0,001	0,715	0,085

Fonte: Elaborada pela autora. NVP – Número de vagens por planta; CVA – Comprimento da vagem; P100g – Peso de cem grãos. Letras minúsculas indicam comparação entre os níveis de disponibilidade hídrica, enquanto letras maiúsculas indicam comparação entre tratamentos com e sem *Bacillus aryabhattai*. Os valores representam a média de quatro repetições.

Durante o experimento, observou-se que a redução da disponibilidade hídrica afetou a fenologia da cultura, resultando em uma menor emissão de botões florais e no aumento do índice de abortamento de flores. Além disso, a restrição hídrica causou um atraso no ciclo de desenvolvimento: enquanto as plantas sem restrição hídrica já se encontravam em pleno estágio de enchimento de grãos, as plantas sob déficit ainda iniciavam a emissão dos primeiros botões.

O NVP é um dos componentes mais sensíveis ao déficit hídrico, principalmente quando a falta de água ocorre durante as fases de floração e canivete (Ferreira, 2023). Essa restrição reduz a capacidade de formação e manutenção de vagens, causando menor oferta de fotoassimilados e abortamento das estruturas reprodutivas. Conforme descrito por Fancelli & Dourado Neto (1997), a ocorrência de déficit hídrico próximo e anterior ao florescimento pode ocasionar severa retração do crescimento vegetativo, limitando a produção.

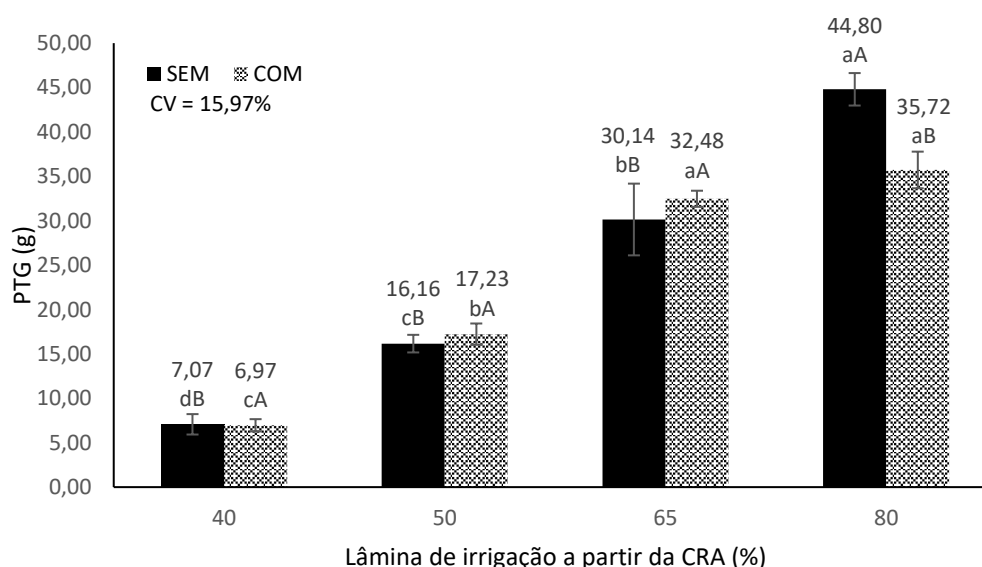
A redução acentuada no NVP demonstra que a baixa disponibilidade de água impede que o feijoeiro atinja seu pleno potencial produtivo. Assim como no presente estudo, resultados semelhantes foram descritos por Hara *et al.* (2022), onde os autores verificaram que o NVP responde de forma linear à disponibilidade de água, sendo um indicador direto do status hídrico da planta durante a formação das vagens.

Com a aplicação do bioinsumo, observou-se incremento no CVA promovendo maior comprimento de vagens por planta. Entretanto, esse parâmetro foi severamente afetado pela disponibilidade hídrica, nas plantas em pleno suprimento, o comprimento médio foi de 18,48 cm, caindo para 8,94 cm sob déficit, representando uma redução de 51,6% no tamanho da vagem.

Em relação ao P100G, observou-se que mesmo sob restrição hídrica, as plantas mantiveram um peso elevado, o que pode ser atribuído ao menor número de vagens por planta (NVP), permitindo uma partição de fotoassimilados mais concentrada nas poucas sementes remanescentes, conforme discutido por Larcher (2006) sobre estratégias de sobrevivência vegetal.

Na figura 7, observa-se que o peso total de grãos (PTG) do feijão-caupi foi influenciada pela disponibilidade hídrica e pela inoculação do *B. aryabhatai*, evidenciando interação entre os fatores. Em síntese, houve incremento progressivo do PTG com o aumento da lâmina de irrigação, independente da inoculação, indicando a elevada sensibilidade do feijão-caupi ao déficit hídrico durante a fase reprodutiva. Ao comparar as lâminas de 80 e 40% da disponibilidade de água, houve uma redução 84,2% no peso total de grãos (PTG).

Figura 7 - Peso total de grãos (PTG) de plantas de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.), cv. Guariba, em função da aplicação de *Bacillus aryabhatai* e da disponibilidade hídrica.



Fonte: Elaborada pela autora. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas indicam comparação entre os níveis de disponibilidade hídrica, enquanto letras maiúsculas indicam comparação entre tratamentos com e sem *Bacillus aryabhatai*. Barras verticais indicam erro padrão.

Assim como nesse estudo que foi obtido um decréscimo acentuado na produção de grãos, Rodrigues *et al.* (2018), avaliando populações F2 de feijão-caupi submetidas a regimes com e sem déficit hídrico, observaram que a condição de

escassez de água reduziu, em média, em 29,83% a produção de grãos dos genótipos avaliados, indicando impacto negativo da restrição hídrica no desempenho da cultura sob déficit.

Nascimento *et al.* (2004) constataram que o nível crescente de déficit hídrico afetou drasticamente o desempenho do genótipo de feijão-caupi IPA 206, além de reduções significativas nos componentes de produção para os níveis de 40 e 60% de água disponível no solo. Essas perdas de produtividade estão associadas ao fato de que o déficit hídrico aplicado nas fases de floração e enchimento de vagens reduz significativamente o crescimento e o número de órgãos reprodutivos (Mousa *et al.*, 2025).

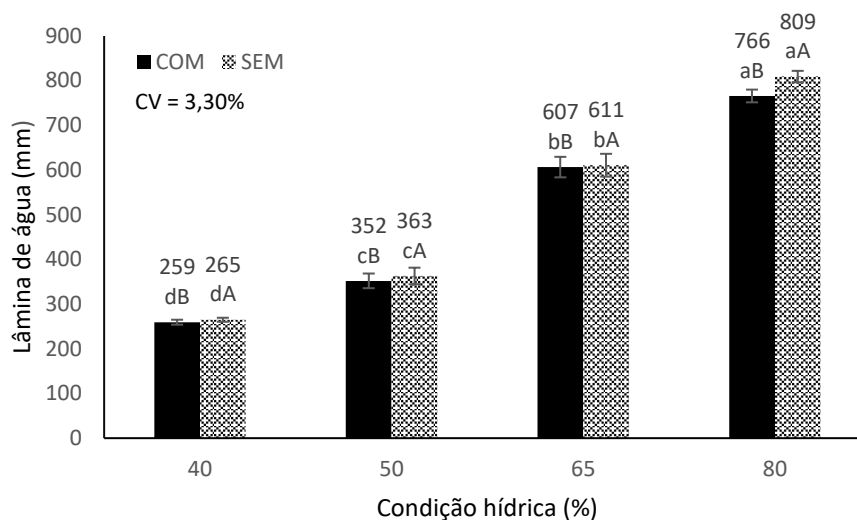
Apesar da redução do PTG sob menores lâminas de irrigação, observa-se que a inoculação do microrganismo promoveu resultados superiores, especialmente nas condições de 50 e 65% da CRA, quando comparada ao tratamento sem o *B. aryabhatai*. Esse comportamento sugere que o microrganismo foi capaz de atenuar parcialmente os efeitos do déficit hídrico.

4.4. Consumo hídrico

Durante a condução do experimento, o controle diário da reposição da irrigação permitiu quantificar com precisão o volume de água necessário para manter cada planta nos níveis estabelecidos da capacidade de retenção de água (CRA). Com isso, ao analisar o consumo de água acumulado durante todo o ciclo da cultura, foi obtido que as plantas inoculadas com *Bacillus aryabhatai* demandaram uma menor reposição hídrica diária para a manutenção da CRA em todos os níveis testados, com destaque para a lâmina de 80%, onde foi obtido uma redução de 5,3% no consumo acumulado das plantas inoculadas em relação às plantas não inoculadas (Figura 8).

Tal resultado pode ser atribuído à capacidade do *B. aryabhatai* de produzir exopolissacarídeos (EPS). Esse comportamento corrobora os estudos de Arraes *et al.* (2016), que afirmam que bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV) auxiliam na manutenção do status hídrico da planta através da produção de EPS. Essa substância atua na formação de um biofilme ao redor das raízes, reduzindo a taxa de evaporação e aumentando a retenção de umidade na rizosfera.

Figura 8 - Consumo hídrico acumulado (mm) em feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.) cv. Guariba, sob influência da inoculação com *Bacillus aryabhattai* e disponibilidade hídrica durante o experimento.



Fonte: Elaborada pela autora. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas indicam comparação entre os níveis de disponibilidade hídrica, enquanto letras maiúsculas indicam comparação entre tratamentos com e sem *Bacillus aryabhattai*. Barras verticais indicam erro padrão.

Avaliando diferentes frequências de irrigação no crescimento de mudas de cana-de-açúcar pré-brotadas, May *et al.* (2019) observaram maior eficiência no uso da água em plantas inoculadas com a bactéria. Segundo os autores, a interação entre a bactéria e o sistema radicular contribuiu para melhor desempenho fisiológico das plantas sob condições hídricas restritas.

Essa barreira física permite que a planta mantenha a turgidez celular com menor quantidade de água. Segundo Lima *et al.* (2019), a inoculação com *Bacillus* em leguminosas cultivadas sob déficit hídrico favorece a estabilidade das membranas e o acúmulo de solutos compatíveis.

5. CONCLUSÃO

A redução da disponibilidade hídrica promoveu decréscimos nos parâmetros morfofisiológicos e produtivos das plantas de feijão-caupi. A interação entre a disponibilidade hídrica e o *Bacillus aryabhattai* foi observada apenas para a massa seca de folhas, massa seca de raízes e peso total dos grãos.

Em condições de maior restrição hídrica (40 e 50% da CRA) nas plantas de feijão-caupi inoculadas com *B. aryabhattai*, não foi possível identificar a atuação nos efeitos negativos causados pelo déficit hídrico, principalmente devido à ausência de influência significativa em caracteres importantes, como a fotossíntese e produção.

A aplicação de lâminas de água com 40% da CRA, reduz o potencial hídrico da planta, limita o funcionamento das atividades fotossintéticas, diminui as trocas gasosas, causando diminuição no crescimento e produção das plantas de feijão-caupi.

As plantas inoculadas com *B. aryabhattai* tiveram uma melhor eficiência do uso da água. Apesar disso, é necessário estudos mais detalhados quanto a dosagem do bioinsumo e para certificar sua potencialidade na mitigação do déficit hídrico na cultura do feijão-caupi.

REFERÊNCIAS

- ALCANTARA, R. M. C. M.; SOUSA, T. S.; PERES, T. L.; OLIVEIRA, A. K. S.; SILVA, E. A.; COSTA, P. M. **Parâmetros morfológicos e produtivos da cultura do milho inoculado com bactérias promotoras de crescimento vegetal em Teresina, PI.** Teresina: Embrapa Meio-Norte, p. 30, 2021.
- ALMEIDA, J. L. C. S. **Estratégias de mitigação do estresse hídrico em mudas de *Talisia esculenta* (A. St.-Hil.) Radlk.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal da Grande Dourados, 2022.
- ARIAS, V. D.; COSTA, D. L.; SOUZA, P. J.; TAKAKI, A.; LIMA, M. J. Temperaturas basais e necessidade térmica para o ciclo de desenvolvimento do feijão-caupi. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 21, p. 1781-1792, 2015.
- ARRAES, F. B. M. Aspectos genéticos e fisiológicos da tolerância à seca em plantas. **Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia**, Brasília, DF, 2016.
- BARRS, H. D.; WEATHERLEY, P. E. A re-evaluation of relative turgidity techniques to estimate water deficits in leaves. **Australian Journal of Biological Sciences**, v. 15, p. 413-428, 1962.
- BASHAN, Yoav; DE-BASHAN, Luz E.; PRABHU, S. R.; HERNANDEZ, Juan Pablo. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: Formulations and practical perspectives (1998-2013). **Plant and Soil**, v. 378, n. 1–2, p. 1–33, 2014. DOI: 10.1007/s11104-013-1956-x.
- BASTOS, E. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; NOGUEIRA, C. C. P. **Cultivo de feijão-caupi.** Brasília: Embrapa, 2017.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Bioinsumos. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/ptbr/assuntos/inovacao/bioinsumos>. Acesso em: 03 dez. 2025.
- CAMPOS, A. J de. M.; SANTOS, S. M.; NACARATH, I. R. F. F. Water Stress in Plants: A Review. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, e311101523155, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i15.23155. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/23155>. Acesso em: 23 dez. 2025.
- CAVALCANTE, A. C. R.; CAVALLINI, M. C.; LIMA, N. R. C. B. **Estresse por déficit hídrico em plantas forrageiras.** Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, p. 50, 2009.
- CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought — from genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, Clayton, v. 30, n. 3, p. 239, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/fp02076>. Acesso em: 12 nov. 2025.

CORDEIRO, L. G. Fator de sensibilidade ao déficit hídrico da cultura do feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p. 153-157, 1998.

COSTA, R. C. L. Aspectos fisiológicos da simbiose *Rhizobium*-leguminosa sob estresse hídrico. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 8, n. 2, p. 143-152, 1996.

CRUZ, D. R. C.; SANTOS, F. L. S.; SANCHES, D. S. O uso de bioinsumos na agricultura brasileira: uma revisão sobre impactos ambientais e econômicos. **Revista Mirante**, v. 18, n. 3, 2025. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/mirante/article/view/17543>. Acesso em: 12 nov. 2025.

DESRAVINES, R. P. **Produção otimizada de feijão-caupi imaturo sob adubação orgânica em ambiente semiárido**. 2022. 60f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró-RN, 2022.

DIAS, A. S. **Bactérias promotoras de crescimento de plantas: conceitos e potencial de uso**. Nova Xavantina, MT: Pantanal, 2022.

DUTRA, F. Parâmetros fisiológicos e componentes de produção de feijão-caupi cultivado sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, v. 10, n. 2, p. 189–197, 2015.

EMBRAPA. Mapa divulga balanço anual de registros de agrotóxicos e bioinsumos em 2025. Mapa divulga balanço anual de registros de agrotóxicos e bioinsumos em 2025. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/mapa-divulga-balanco-anual-de-registros-de-agrotoxicos-e-bioinsumos-em-2025?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 09 jan. 2026.

EMBRAPA. Queen-of-the-night bacteria becomes bioproduct to promote drought tolerance in plants. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/60941801/bacteria-encontrada-no-mandacaru-vira-bioproduto-que-promove-tolerancia-a-seca-em-plantas>. Acesso em: 3 dez. 2025.

EZIZ, A.; YAN, Z.; TIAN, D.; HAN, W.; TANG, Z.; FANG, J. Drought effect on plant biomass allocation: A meta-analysis. **Ecology and Evolution**, v. 7, n. 24, p. 11002-11010, nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.3630>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29299276/>. Acesso em: 19 jan. 2026.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT database**. Roma, 2024. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/>. Acesso em: 3 dez. 2025.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Fenologia do milho**. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. (Ed.). Tecnologia da produção de milho. Piracicaba: Publique, p. 122-130, 1997.

FEIJÃO. Acompanhamento da Safra Brasileira: grãos. Brasília, v. 13, n. 3, p. 41-56, dez. 2025. Safra 2025/2026. Terceiro levantamento. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2024-25/12o-levantamento-safra-2024-25>. Acesso em: 15 dez. 2025.

FERREIRA, F. E. P. Rendimento do feijão-caupi submetido ao estresse hídrico em diferentes cenários produtivos. 2023. 118 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

FREIRE FILHO, F. R. **Origem, evolução e domesticação do caupi**. Goiânia: Embrapa Centro-Norte, p. 21, 1988.

FREIRE FILHO, F. R. Origem, evolução e domesticação do caupi. In: VIDAL NETO, F. C.; CAVALCANTI, J. J. V. (ed.). **Melhoramento genético de plantas no Nordeste**. Brasília, DF: Embrapa, 2013. cap. 4, p. 85-149.

FREIRE FILHO, F. R.; ROCHA, M. M.; RIBEIRO, V. Q.; LOPES, A. C. A. Adaptabilidade e estabilidade produtiva de feijão-caupi. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.1, p.24-3, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/4gFjhLyRT6SrgcrfBV396rv/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 11 dez. 2025.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO V. Q.; ROCHA, M. M.; SILVA, K. J. D.; NOGUEIRA, M. S.; RODRIGUES, E. V. **Produção, melhoramento genético e potencialidades do feijão-caupi no Brasil**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, p. 84, 2011.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q. **Feijão-caupi na Embrapa Meio-Norte: melhoramento, cultivares lançadas, genealogias e base genética**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2023.

GLICK, B. R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. **Scientifica**, p. 1–15, 2012.

GLIESSMAN, S. R (2000). **Agroecologia: processo ecológico em agricultura sustentável**. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS, p. 653, 2000.

GROVER, M.; ALI, S. Z.; SANDHYA, V.; RASUL, A.; VENKATESWARLU, B. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential role in alleviating drought stress in plants. **Microbiological Research**, v. 184, p. 13-24, 2016.

KANG, S. M.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; YOU, Y. H.; KIM, J. H.; KIM, J. G.; HAMAYUN, M.; LEE, I. J. Plant growth-promoting rhizobacteria reduce adverse effects of salinity and osmotic stress by regulating phytohormones and antioxidants in *Cucumis sativus*. **Journal of Plant Interactions**, v. 9, p. 673– 682, 2014.

KOKARE, C. R.; CHAKRABORTY, S.; KHOPADE, A. N.; MAHADIK, K. R. Biofilm: Importance and applications. **Indian Journal of Biotechnology**, v. 8, p. 159-168, 2009. Disponível em: <https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/3883/1/IJBT%208%282%29%20159-168.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2025.

HARA, F. A. S.; SERUDO, R. N.; VENDRUSCOLO, J.; INÁCIO, A. C. F.; MOURA, R. P. M. Resposta do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) a diferentes níveis de reposição hídrica na fase vegetativa. *Research, Society and Development*, [s. l.], v. 11, n. 6, e29013, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29013>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/29013>. Acesso em: 19 jan. 2026.

KAVAMURA, V.; SANTOS, S. N.; SILVA, J. L. da.; PARMA, M. M.; AVILA, L. A.; VISCONTI, A.; ZUCCHI, T. D.; TAKETANI, R. G.; ANDREOTE, F. D.; MELO, I. S. de. Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant growth promotion under drought. **Microbiological Research**, v. 168, n. 4, p. 183-191, 2013.

LI, G.; SI, M.; ZHANG, C.; SHEN, Z.; WANG, S.; SHAO, J. Responses of plant biomass and biomass allocation to experimental drought: A global phylogenetic meta-analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, [s. l.], v. 347, art. 109917, 15 mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109917>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192324000327>. Acesso em: 19 jan. 2026.

LIMA, G. K. S. *Bacillus* spp. como promotores de crescimento e mitigadores de estresse hídrico em mudas de espécies florestais e agrícolas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 4, p. 950-960, 2019.

LIU, Yunpeng et al. Root colonization by beneficial rhizobacteria. **FEMS Microbiology Reviews**, [s. l.], v. 48, n. 1, fuad066, jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsre/fuad066>. Disponível em: <https://academic.oup.com/femsre/article/48/1/fuad066/7472113>. Acesso em: 05 jan. 2026.

LOMES, J. Uso de *Bacillus aryabhatai* no desempenho agrônômico da cultura do milho verde sob regimes hídricos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 20, n. 3, p. 1-9, e4208, 2025. Disponível em: <http://agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/4208/1638>. Acesso em: 19 jan. 2026.

LUNA, I. R. G.; SILVA, M. R. C.; GONZAGA, P. H. A.; ALVES, K. S.; SANTOS, A. K. S.; BULHÕES, J. P.; PEREIRA, L. E. L.; ARAÚJO, D. D.; ARAÚJO, J. R. E. S. Rainfall variability and its effects on cowpea production in a municipality of the Paraíba semi-arid region. **Revista Thêma et Scientia**. Paraná, v. 11, n 1, 2021.

MANNEH, N.; ADETIMIRIN, V. O.; DIENG, I.; NTUKIDEM, S. O.; FATOKUN, C. A.; BOUKAR, O. Response of Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) Accessions to Moisture Stress. **International Journal of Plant Biology**, v. 15, n. 4, p. 83, 2024.

MARIANO, R. L. R.; SILVEIRA, E. B.; ASSIS, S. M. P.; GOMES, A. M. A.; NASCIMENTO, A. R. P.; DONATO, V. M. T. S. Importância de bactérias promotoras de crescimento e de biocontrole de doenças de plantas por uma agricultura sustentável. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, vol. 1, p.89-111, 2004.

MATOS FILHO, C. H. A.; GOMES, R. L. F.; ROCHA, M. M.; FREIRE FILHO, F. R.; LOPES, A. C. A. Potencial produtivo de progênies de feijão-caupi com arquitetura ereta de planta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 2, p. 348-354, 2009. ISSN 0103-8478.

MAY, A.; RAMOS, N. P.; SANTOS, M. D. S. D.; SILVA, E. H. F. M. D.; MELO, I. S. D. **Promoção de crescimento de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar inoculadas com *Bacillus aryabhattai* em diferentes frequências de irrigação**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1107857/1/boletim80A.ndre.p df>. Acesso em: 01 dez. 2025.

MENDES, R. M. S.; TÁVORA, F. J. A. F.; PITOMBEIRA, J. B.; NOGUEIRA, R. J. M. C. Relações fonte-dreno em feijão-de-corda submetido à deficiência hídrica. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 38, n. 1, p. 95-103, 2007.

MELO, A. S.; SILVA, A. R.; FERREIRA, F. E. P.; BRITO, M. E. B.; DANTAS, M. S. M. Trocas gasosas e produção de feijão-caupi sob déficit hídrico em diferentes estádios fenológicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 10, p. 741-749, 2022.

NEVES, A. C.; CAMARA, J. A.; CARDOSO, M. J.; SILVA, P. H. S.; ATHAYDE SOBRINHO, C. **Cultivo do feijão-caupi em sistema agrícola familiar**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2017. 15 p. (Circular Técnica, 51). ISSN 0104-7633.

NICHOLSON, W. L.; MUNAKATA, N.; HORNECK, G.; MELOSH, H. J.; SETLOW, P. Resistance of *Bacillus* endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments. **Microbiol Mol Biol Rev**, v. 64, p. 548-572, 2000.

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

OCTAVIANO, C. Muito além da tecnologia: os impactos da Revolução Verde. **ComCiência**, Campinas, n. 120, 2010. ISSN 1519-7654. Disponível em: https://comciencia.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-76542010000600006&lng=e&lng=pt. Acesso em: 30 nov. 2025.

OLIVEIRA, A. L. M.; COSTA, K. D. R.; FERREIRA, D. C.; MILANI, K. M. L.; DOS SANTOS, O. J. A. P.; SILVA, M. B.; ZULUAGA, M. Y. A. Aplicações da biodiversidade bacteriana do solo para a sustentabilidade da agricultura. **Biochemistry and Biotechnology**, v. 3, p. 56–77, 2014.

OLIVEIRA, A. M. C. de; JEAN, A.; DAMASCENO-SILVA, K. J.; MOREIRA-ARAÚJO, R. S. dos R.; FRANCO, L. J. D.; ROCHA, M. de M. Composição centesimal, minerais, taninos, fitatos e qualidade de cozimento de cultivares comerciais de feijão-caupi. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 36, n. 3, p. 22–32, 2023.

OLIVEIRA, A. M. C de.; MELO, B. N.; ROCHA, M. M. Produção de alimentos na base do feijão-caupi (*Vigna unguiculata*): importância nutricional e benefícios para a saúde. **Research Society and Development**, v. 10, n. 14, 2021.

OLIVEIRA, L. K. B. **Nanobioestimulante à base de carbon dots em plantas de feijão-caupi sob estresse salino: aspectos morfofisiológicos, bioquímicos, metabólicos e produtivos**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Fitotecnia), Fortaleza, 2024.

OLIVEIRA, S. L.; FERREIRA, J. S.; BRANDÃO, M. H.; MOREIRA, A. C. S.; CUNHA, W. V. Efeito da aplicação de *Bacillus aryabhattai* no crescimento inicial do feijoeiro sob diferentes capacidades de campo. **Revista COMEIA**, v. 2, n. 1, 2020.

OLIVEIRA, S. M. Componentes de produção de cultivares de feijão-caupi em diferentes condições ambientais do estado de Minas Gerais. **Revista Caderno Pedagógico**, Curitiba, v. 21, n. 13, p. 1-21, 2024.

PEREIRA, E. J. Estudos da composição em macronutrientes, retenção e bioacessibilidade de ferro e zinco em cultivares de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.) em grãos crus e após o cozimento. 2014. 115 f. Tese (Doutorado em Farmácia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Farmácia, Rio de Janeiro, 2014.

PEROSINI, G. L. Estresse hídrico em *phaseolus vulgaris*: respostas anatômicas e fisiológicas. **Educação Ciência e Saúde**, v. 12, n. 2, p. 722, 2025. Disponível em: <https://periodicos.ces.ufcg.edu.br/periodicos/index.php/99cienciaeducacaosaude25/article/view/722/321>. ISSN 2358-7504.

RIBEIRO, V. Q. **Cultivo do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp)**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, p. 108, 2002

SANTOS, J. P.; OLIVEIRA, A. L. P.; PUTTI, F. F. Bioinsumos na agricultura: panorama tecnológico das patentes biológicas. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 9, 2024. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/4137/2710>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SHIVAJI, S.; CHATURVEDI, P.; BEGUM, Z.; PINDI, P. K.; MANORAMA, R.; PADMANABAN, D.; SHOUCHE, Y. S.; PAWAR, S.; VAISHAMPAYAN, P.; DUTT, C. B. S.; DATTA, G. N.; MANCHANDA, R. K.; RAO, U. R.; BHARGAVA, P. M.; NARLIKAR, J. V. *Janibacter hoylei* sp. nov., *Bacillus isronensis* sp. nov. and *Bacillus aryabhatai* sp. nov., isolated from cryotubes used for collecting air from the upper atmosphere. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, Reading, v. 59, pt. 12, p. 2977–2986, 2009.

SILVA, A. C. B.; COELHO, N. T.; FERREIRA, L. E.; SOUZA, E. P. Uso e efeito dos bioinsumos na agricultura. **Ciências Agrárias: o avanço da ciência no Brasil**, v. 4, p. 192-205, 2022.

SILVA, A. C. da.; VASCONCELOS, P. L. R. de.; MELO, L. D. F. A. Diagnóstico da produção de feijão-caupi no Nordeste brasileiro. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, Três Corações, v. 16, n. 2, 2018.

SILVA, A. F. G.; BARBOSA, K. A.; SILVA, A. F.; CRUZ, J. E. Potencial dos bioinsumos para a agricultura sustentável: uma análise a partir de suas características, conceitos e vantagens. **Revista Mirante**, v. 17, n. 2, p. 250-265, 2024. Disponível em: <https://revista.ueg.br/index.php/mirante/article/view/16196>. ISSN 1981-4089.

SILVA, J. S. **Estresse hídrico em variedades tradicionais de feijão-caupi: estratégias fisiológicas e bioquímicas para tolerância ao déficit hídrico**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Fitotecnia), Fortaleza, 2019.

SOUSA, T. J. F.; ROCHA, M. M.; DAMASCENO-SILVA, K. J.; BERTINI, C. H. C. M.; SILVEIRA, L. M.; SOUSA, R. R. D.; SOUSA, J. L. M. Simultaneous selection for yield, adaptability, and genotypic stability in immature cowpea using REML/BLUP. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, n. 1, p. 123, 2019.

SOUZA, F. P.; CASTILHO, T. P. R.; MACEDO, L. O. B. **Um marco institucional para os Bioinsumos na agricultura brasileira baseado na Economia Ecológica**. Brasília: Sustainability in Debate, v. 13, n.1, p. 266-285, 2022.

SOUZA, J. P.; MELO, N. M. J.; COELHO, D. G.; ARAÚJO, S. S. Fisiologia e metabolismo de plantas de feijão sob estresse abiótico. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 45-58, 2023.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TOMAZI, Y; BONOME, L. T. S.; SIQUEIRA, D. J.; MOURA, G. S.; FRANZENER, G. Métodos de assepsia em sementes de feijão. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 14, n. 2, p. 229–237, 2019.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado do Ceará**. Fortaleza: UFC, 1993. 248 p. Disponível em: <https://bdpa.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 05 jan. 2026.

VESSEY, J. K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 255, n. 2, p. 571–586, 2003.

VIDAL, M. C.; AMARAL, D. F. S.; NOGUEIRA, J. D.; MAZZARO, M. A. T.; LIRA, V. M. C. Bioinsumos: a construção de um programa nacional pela sustentabilidade do agro brasileiro. **Economic Analysis of Law Review**, v. 12, n. 3, p. 557–574, 2021.

WIJEWARDANA, Chaturika; ALSAJRI, F. A.; IRBY, J. T.; KRUTZ, L. J.; GOLDEN, B. R.; HENRY, W. B.; REDDY, K. R. Water Deficit Effects on Soybean Root Morphology and Early-Season Vigor. **Agronomy**, v. 9, n. 12, art. 836, dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy9120836>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/9/12/836>. Acesso em: 20 jan. 2026.