

ANA LAURA PAULA DE OLIVEIRA

**DÉFICIT HÍDRICO EM DIFERENTES ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DO FEIJOEIRO
COMUM COM INOCULAÇÃO DE *Bacillus aryabhattai***

Botucatu

2025

ANA LAURA PAULA DE OLIVEIRA

**DÉFICIT HÍDRICO EM DIFERENTES ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DO FEIJOEIRO
COMUM COM INOCULAÇÃO DE *Bacillus aryabhattai***

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador(a): Fernando Ferrari Putti

Coorientador(a): Gustavo Ferreira da Silva

Botucatu

2025

O48d

Oliveira, Ana Laura Paula de

Déficit hídrico em diferentes estádios fenológicos do feijoeiro comum com inoculação de *Bacillus aryabhattai* / Ana Laura Paula de Oliveira. -- Botucatu, 2025

85 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Fernando Ferrari Putti

Coorientador: Gustavo Ferreira da Silva

1. Bioinsumos. 2. Déficit hídrico. 3. Eficiência no uso da água. 4. *Priestia aryabhattai*. 5. Rizobactérias. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: DÉFICIT HÍDRICO EM DIFERENTES ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DO FEIJOEIRO COMUM COM INOCULAÇÃO DE *Bacillus aryabhattai*

AUTORA: ANA LAURA PAULA DE OLIVEIRA
ORIENTADOR: FERNANDO FERRARI PUTTI
COORIENTADOR: GUSTAVO FERREIRA DA SILVA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Agrícola, pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO FERRARI PUTTI**
Data: 27/02/2025 08:41:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. FERNANDO FERRARI PUTTI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia FCE UNESP TupaSP

Documento assinado digitalmente
 **ADONIS MOREIRA**
Data: 26/02/2025 17:59:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pesquisador Dr. ADÔNIS MOREIRA (Participação Virtual)
Fertilização do Solo e Nutrição de Plantas / Embrapa Soja

Documento assinado digitalmente
 **JULIANO CARLOS CALONEGO**
Data: 27/02/2025 08:56:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

Botucatu, 26 de fevereiro de 2025.

Dedico,

À minha mãe, Adriana, e ao
meu noivo, João Pedro, que
sempre me apoiaram

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à Deus e à Nossa Senhora Aparecida, por permitir que eu tivesse determinação para realizar este trabalho.

À minha mãe, Adriana, a sua força e dedicação foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Como mãe, você enfrentou inúmeros desafios e sempre fez tudo o que estava ao seu alcance para me dar as melhores oportunidades e valores. Sua determinação e resiliência são minha maior inspiração e motivação. Nada disso seria possível sem seu amor incondicional, seu apoio e seu exemplo.

Ao meu noivo, João Pedro, pelo amor, apoio e paciência ao longo de toda essa jornada. Suas palavras de incentivo e sua compreensão nos momentos mais difíceis foram fundamentais para que eu pudesse alcançar este objetivo. Obrigada por estar sempre ao meu lado, sonhando do mesmo sonho e acreditando no meu potencial. Este trabalho é também um reflexo do seu cuidado e companheirismo.

Aos meus sogros, Sandra e Gelson agradeço o carinho, compreensão e incentivo constante durante toda a minha jornada acadêmica.

Ao meu irmão, João Pedro, e aos meus sobrinhos Leonardo, Luiza e Iran por estarem comigo e me apoiarem nos momentos de maior dificuldade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Ferrari Putti, por sua orientação, dedicação, paciência e apoio ao longo deste trabalho. Sua experiência e incentivo foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Gustavo Ferreira da Silva, por seu apoio, contribuições e orientação ao longo deste projeto, sua colaboração foi essencial para este trabalho.

À Prof. Dra. Tayla Evellin e ao laboratorista Paulo César, por todo apoio e ajuda durante a execução deste trabalho.

À todos os professores e funcionários da Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) – UNESP – Botucatu/SP pela possibilidade de realização deste curso.

À Universidade Virtual do Estado de São Paulo (Univesp), pela concessão da bolsa de estudos, que foi fundamental para a realização deste trabalho.

À todos os professores e funcionários da Unifenas, por terem cedido o local para realização desta pesquisa.

RESUMO

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é importante para a alimentação humana e para a economia brasileira, mas sua produtividade é vulnerável ao déficit hídrico devido ao sistema radicular superficial e ciclo curto. Com a intensificação de secas prolongadas, a irrigação se apresenta como uma solução, mas seu alto custo limita o acesso para pequenos agricultores. Nesse contexto, o uso de bioinsumos surge como uma alternativa sustentável e de baixo custo para reduzir os efeitos do estresse hídrico. Este estudo objetivou-se investigar o potencial do *Bacillus aryabhattai* em aumentar a tolerância do feijoeiro ao déficit hídrico, avaliando a possibilidade de restrição hídrica em estádios fenológicos específicos da planta e o uso de diferentes lâminas de irrigação, que não comprometa a produtividade. Dois experimentos foram conduzidos em casa de vegetação e o delineamento utilizado foi o de blocos casualizados, o primeiro foi em esquema fatorial 2 x 4, com quatro repetições, caracterizado pela presença e ausência do *B. aryabhattai*, e quatro lâminas de irrigação (40, 60, 80 e 100% da ETc) e o segundo em um fatorial 3 x 4, com quatro repetições, em que os fatores estudados foram a restrição de água em três fases fenológicas (V3, R6 e R8) e quatro lâminas de irrigação (40, 60, 80 e 100% da ETc). Foram avaliados altura de planta, altura de inserção da primeira vagem, número de vagens por planta, número de grãos por vagem, número de grãos por planta, produção por planta, massa de 100 grãos, massa seca das raízes, teor de nitrogênio (N) dos grãos, teor de proteína dos grãos e unidade formadora de colônia. Os resultados mostram que as lâminas de 80% e 100% da ETc obtiveram boa produção, de 16 e 20 g planta⁻¹, respectivamente, enquanto a fase V3 foi mais sensível ao déficit hídrico. A inoculação com *B. aryabhattai* aumentou a eficiência do uso da água em 13% e melhorou a produção do feijão. O manejo adequado da irrigação é essencial para a produção do feijoeiro e a inoculação com *B. aryabhattai* fortalece a tolerância ao estresse hídrico, promovendo uma agricultura mais eficiente no uso da água.

Palavras-chave: bioinsumos; déficit hídrico; eficiência no uso da água; *Priestia aryabhattai*; rizobactérias.

ABSTRACT

The common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is important for human nutrition and the Brazilian economy, but its productivity is vulnerable to water deficit due to its shallow root system and short cycle. With the intensification of prolonged droughts, irrigation presents itself as a solution, but its high cost limits access for small farmers. In this context, the use of bio inputs emerges as a sustainable and low-cost alternative to reduce the effects of water stress. This study aimed to investigate the potential of *Bacillus aryabhattai* in increasing the tolerance of common beans to water deficit, evaluating the possibility of water restriction in specific phenological stages of the plant and the use of different irrigation depths, which do not compromise productivity. The experiment was conducted in a greenhouse, at the Professor Edson Antônio Velano University, in the municipality of Alfenas. Two experiments were conducted in a randomized block design, the first was in a 2 x 4 factorial scheme, with four replications, characterized by the presence and absence of *B. aryabhattai*, and four irrigation depths (40, 60, 80 and 100% of ETc). The second experiment was a 3 x 4 factorial, with four replications, in which the factors studied were water restriction in three phenological phases (V3, R6 and R8) and four irrigation depths (40, 60, 80 and 100% from ETc). Plant height, height of insertion of the first pod, number of pods per plant, number of grains per pod, number of grains per plant, production per plant, mass of 100 grains, dry mass of roots, nitrogen (N) content of grains, protein content of grains and colony forming unit were evaluated. The results show that the 80% and 100% ETc blades obtained good production, of 16 and 20 g plant⁻¹, respectively, while the V3 phase was more sensitive to water deficit. Inoculation with *B. aryabhattai* increased water use efficiency by 13% and improved bean production. Proper supervision management is essential for common bean production and inoculation with *B. aryabhattai* strengthens tolerance to water stress, promoting more efficient agriculture in water use.

Keywords: bio inputs; water deficit; water use efficiency; *Priestia aryabhattai*; rhizobacteria.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Médias climatológicas durante a condução do experimento dentro da casa de vegetação	32
Figura 2 - Croqui da área experimental utilizada no experimento 1.....	34
Figura 3 - Croqui da área experimental utilizada no experimento 2.....	35
Figura 4 - Tanque Classe A utilizado para mensurar a quantidade de água a ser irrigada no experimento	37
Figura 5 - Altura das plantas para os tratamentos com e sem <i>B. aryabhatai</i> sob diferentes lâminas de irrigação	42
Figura 6 - Altura de inserção da primeira vagem para os tratamentos com e sem <i>B. aryabhatai</i> sob diferentes lâminas de irrigação	43
Figura 7 - Número de vagens por planta para os tratamentos com e sem <i>B. aryabhatai</i> sob diferentes lâminas de irrigação	44
Figura 8 - Número de grãos por vagem para os tratamentos com e sem <i>B. aryabhatai</i> sob diferentes lâminas de irrigação	45
Figura 9 - Número de grãos por planta para os tratamentos com e sem <i>B. aryabhatai</i> sob diferentes lâminas de irrigação	46
Figura 10 - Produção de grãos por planta para os tratamentos com e sem <i>B. aryabhatai</i> sob diferentes lâminas de irrigação	47
Figura 11 - Massa de 100 grãos para os tratamentos com e sem <i>B. aryabhatai</i> sob diferentes lâminas de irrigação	48
Figura 12 - Massa seca da raiz para os tratamentos com e sem <i>B. aryabhatai</i> sob diferentes lâminas de irrigação	49
Figura 13 - Teor de nitrogênio do grão para os tratamentos com e sem <i>B. aryabhatai</i> sob diferentes lâminas de irrigação	50
Figura 14 - Teor de proteína no grão para os tratamentos com e sem <i>B. aryabhatai</i> sob diferentes lâminas de irrigação	51

Figura 15 - Produtividade da água de irrigação (g m ⁻³) para os tratamentos com e sem <i>B. aryabhatai</i> sob diferentes lâminas de irrigação	52
Figura 16 - Unidade formadora de colônia para os tratamentos com e sem <i>B. aryabhatai</i> sob diferentes lâminas de irrigação (10 ⁵)	53
Figura 17 - Altura das plantas para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos	55
Figura 18 - Altura de inserção da primeira vagem para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos.....	56
Figura 19 - Número de vagens por planta para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos	57
Figura 20 - Número de grãos por vagem para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos	58
Figura 21 - Número de grãos por planta para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos	59
Figura 22 - Produção de grãos por planta para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos	60
Figura 23 - Massa de 100 grãos para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos	61
Figura 24 - Massa seca da raiz para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos	62
Figura 25 - Teor de nitrogênio no grão para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos	63

Figura 26 - Teor de proteína do grão para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos	64
Figura 27 - Produtividade da água de irrigação (gm^{-3}) para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos.....	65
Figura 28 - Unidade formadora de colônia para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos (10^5).....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise química do solo utilizado para preencher os vasos da condução do experimento	32
Tabela 2 - Análise física do solo utilizado para preencher os vasos da condução do experimento	33
Tabela 3 - Coeficiente da cultura (Kc) para os estádios fenológicos do feijoeiro	38
Tabela 4 - Valores de P e coeficiente de variação (CV) para as variáveis altura de plantas (AP), altura de inserção da primeira vagem (AIPV), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP), produção (P), massa de 100 grãos (100) massa seca da raiz (MSR), nitrogênio nos grãos (N%), proteína bruta nos grãos (PB%), produtividade da água de irrigação (PAir) e unidade formadora de colônia (UFC).....	41
Tabela 5 - Valores de P e coeficiente de variação (CV) para as variáveis altura de plantas (AP), altura de inserção da primeira vagem (AIPV), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP), produção (P), massa de 100 grãos (M100), massa seca da raiz (MSR), nitrogênio nos grãos (N%), proteína bruta nos grãos (PB%), produtividade da água de irrigação (PAir) e unidade formadora de colônia (UFC).....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1	Aspectos gerais da cultura do feijão	23
2.2	Importância da irrigação no feijoeiro	24
2.3	Déficit hídrico em plantas	26
2.4	Bactérias promotoras de crescimento.....	28
2.5	<i>Bacillus aryabhattai</i>	30
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1	Caracterização da área experimental.....	31
3.2	Atributos físicos e químicos do solo e adubação.....	32
3.3	Inoculação das sementes	33
3.4	Delineamento experimental	34
3.5	Instalação e condução	35
3.6	Irrigação.....	36
3.7	Variáveis avaliadas	38
3.8	Análise Estatística	40
4	RESULTADOS	41
4.1	Experimento 1	41
4.2	Experimento 2	54
5	DISCUSSÃO	67
6	CONCLUSÕES.....	74
	REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa originária das américas e cultivada em todo território brasileiro. É um alimento fundamental na dieta da população, principalmente pelo fato de ser uma fonte de proteína vegetal, seu consumo é significativo em todas as classes sociais, mas especialmente entre as de menor poder aquisitivo (Robinson *et al.*, 2019; Coelho; Valcacer Coelho, 2021).

A restrição hídrica é uma das principais limitações para a produção do feijão, causando estresse nas plantas, afetando a fotossíntese e o metabolismo celular. Durante o seu ciclo, a planta de feijão requer entre 300 a 500 mm de água, dividindo-se em média de 3 a 4 mm diários, podendo chegar a 7 mm durante o florescimento, com maior sensibilidade ao déficit nas fases de germinação, florescimento e enchimento de grãos.

É considerada uma cultura sensível ao déficit hídrico, pelo seu ciclo ser relativamente curto, entre 80 a 95 dias, sistema radicular pouco profundo, alcançando aproximadamente 20 cm, e possuir baixa eficiência no uso da água (EMBRAPA, 2013). Esse impacto da escassez hídrica é ainda mais agravante quando cultivado na safra da seca ou de inverno quando não há irrigação, onde dependerá exclusivamente da chuva e da água armazenada no solo, o que pode comprometer até 80% da produção (Justino *et al.*, 2019).

As mudanças climáticas têm agravado ainda mais a escassez hídrica para o cultivo do feijoeiro. Nos últimos anos, eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, têm se tornado cada vez mais frequentes, afetando significativamente a produção agrícola. A previsão de temperaturas mais elevadas e a redução na ocorrência de chuvas representam uma ameaça crescente à segurança alimentar, especialmente em áreas de cultivo em sequeiro, o que torna ainda mais urgente o desenvolvimento de estratégias de manejo eficiente para este cenário (Gitz *et al.*, 2016).

A irrigação surge como ferramenta para compensar a insuficiência de chuvas e auxiliar no desenvolvimento saudável da planta, consequentemente, aumentar a produtividade se comparado ao sistema de sequeiro (Amudha e Balasubramani, 2011). No entanto, os sistemas de irrigação exigem alto investimento inicial, o que pode limitar o uso para pequenos agricultores, que são responsáveis por grande parte da produção de feijão (Polania *et al.*, 2016).

Diante dessa limitação, é necessário a busca de ferramentas sustentáveis para mitigar os efeitos da escassez hídrica. Uma das soluções promissoras é o consórcio com rizobactérias, essas que promovem o crescimento das plantas, estimulam o desenvolvimento radicular, aumentando a capacidade da planta de tolerar maiores períodos de estiagem (Bonilla Buitrago *et al.*, 2021). Algumas bactérias são capazes de formar um biofilme que ajuda a manter o sistema radicular hidratado, aumentando essa tolerância, além disso, promove a produção de fitohormônios e é responsável pela produção de ACC deaminase, que modula o estresse nas plantas (Lee *et al.*, 2012).

No entanto, pesquisas com o uso de bioinsumos que promovem a tolerância ao estresse no feijoeiro ainda são escassas. Alguns estudos confirmam o potencial de bactérias do gênero *Bacillus* em reduzir os efeitos causados pela seca em culturas como milho, soja e gramíneas (Park *et al.*, 2017; Moreno-Galván *et al.*, 2020; Mendoza-Labrador *et al.*, 2021; Deng *et al.*, 2022).

Este estudo baseou-se na hipótese de que o uso de *Bacillus aryabhattai* como bioinsumo promove maior resistência ao déficit hídrico no feijoeiro, permitindo a restrição da irrigação durante alguns estádios da planta, sem causar impacto negativo na produtividade. Além disso, o uso do *B. aryabhattai* pode melhorar a eficiência do uso da água, permitindo a redução nos níveis de irrigação, sem atrapalhar o desenvolvimento pleno do feijão.

Diante da crescente necessidade de otimizar o uso da água na agricultura e considerando o potencial da bactéria *Bacillus aryabhattai* em promover a tolerância ao estresse hídrico em plantas, o presente trabalho tem como objetivo determinar a lâmina de irrigação ideal e identificar o momento mais adequado para restringir a irrigação do feijoeiro, utilizando o *Bacillus aryabhattai* como estratégia para mitigar os efeitos do déficit hídrico sem comprometer a produção. Busca-se avaliar o efeito desse microrganismo na tolerância do feijoeiro ao estresse hídrico, analisar a produtividade da cultura sob diferentes níveis de irrigação associados ao uso do *Bacillus aryabhattai* e identificar o estágio fenológico mais adequado para a restrição da irrigação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais da cultura do feijão

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa originária do continente americano, pertencente à família das fabáceas e amplamente produzida no Brasil e no mundo. Seu grão é de grande importância para a segurança alimentar e faz parte da dieta básica da população, em virtude de ser uma das principais fontes de proteína de origem vegetal (Wander; Chaves 2011; Robinson *et al.* 2019).

Além de se destacar como proteína vegetal, o feijão é rico em carboidratos complexos, vitaminas do complexo B, minerais como (cálcio) Ca, (ferro) Fe, (magnésio) Mg e (zinco) Zn, além de fornecer fibra alimentar (Hartmann; Siegrist, 2017; Domene *et al.*, 2021). O feijão desempenha um papel fundamental na alimentação da população brasileira (Sousa; Ferreira, 2021), sendo consumido de maneira significativa por diferentes classes sociais, principalmente nas camadas de menor poder aquisitivo (Coelho; Valcacer Coelho, 2021).

Seu consumo vai além da preferência alimentar da população, no caso dos brasileiros, é um hábito que tem raízes históricas relacionadas ao consumo pelos povos indígenas no século XVI. Isso pode estar associado à observação de que é uma espécie cujo centro de origem inclui a América do Sul (Bezerra *et al.*, 2022). Além da importância alimentar, trata-se de uma cultura que tem como benefício o aumento da fertilidade do solo, uma vez que possui a capacidade de fixação de nitrogênio (Magrini *et al.*, 2019).

No Brasil, as principais espécies de feijoeiro cultivadas são *P. vulgaris* (feijão comum) e *Vigna unguiculata* (feijão caupi ou feijão de corda), em que a mais cultivada é a *P. vulgaris*, que possui grande variedade genética. Dentre os cultivares presentes no Brasil, pode-se classificar pela sua coloração, sendo divididos em grupos como carioca, preto, branco, jalo, rosinha, entre outros. Sendo que o feijão carioca corresponde a cerca de 40% da produção total do país (Backes 2014).

De acordo com a FAO (2023), 91 países produziram pelo menos uma tonelada de feijão, enquanto 151 países o consumiram. No ano de 2023 o Brasil foi considerado o segundo maior produtor, atrás apenas da Índia. De acordo com dados da CONAB (2024), a área cultivada no Brasil nesta safra alcançou uma produção de 3.259,4 mil

toneladas, 0,5% maior que no ano anterior, com uma área de 2.880,1 mil hectares, 0,8% maior que a safra 2022/2023.

O consumo de feijão nas últimas quatro décadas teve uma queda de 44%, passando de 25 para 14 kg por habitante ao ano. Esse declínio é atribuído à alta dos preços, ao aumento de alimentos ultraprocessados na dieta dos brasileiros, substituindo as opções mais saudáveis. Esse fenômeno é intensificado pela maior urbanização, que favorece a conveniência dos ultraprocessados. Além disso, houve uma migração do consumo para proteínas de origem animal, especialmente frango, impulsionada pelo aumento da classe média durante esse período (CONAB, 2021).

A cultura apresenta grande versatilidade, dessa forma é cultivado em praticamente todos os estados brasileiros, a depender das condições climáticas, tipo de solo e épocas de semeadura. Essa flexibilidade permite que o cultivo ocorra em regiões com diferentes características ambientais, desde áreas com clima mais seco até aquelas com maior umidade, tornando o feijão uma cultura essencial no cenário agrícola do país. Além disso, o cultivo abrange diferentes tipos de sistema, desde a agricultura de subsistência, praticada por pequenos agricultores, até sistemas de alta tecnologia (Pereira *et al.*, 2017).

A versatilidade do cultivo do feijão não se reflete apenas na sua adaptação a diferentes condições climáticas e de solo, mas também na capacidade de ser produzido em até três safras distintas no Brasil, o que oferece demanda constante no mercado. A primeira safra ocorre entre os meses de agosto e dezembro, chamada de “safra das águas” devido a grande quantidade de chuva nesta época, a segunda safra ocorre entre janeiro e abril, chamada de “safra da seca” e a terceira safra entre maio a julho, chamada de “safra de outono/inverno”, esta que necessita da utilização de um sistema de irrigação (CONAB, 2020).

2.2 Importância da irrigação no feijoeiro

O feijoeiro é uma das espécies mais afetadas pela falta de água, isso porque seu ciclo é curto, seu sistema radicular é pouco profundo e possui baixa eficiência do uso da água (Smith *et al.*, 2019). Dessa maneira, pode ter sua produção afetada quando cultivado em sistema de sequeiro, especialmente, na safra de inverno, pois é dependente do regime pluviométrico, sendo que em condições de déficit hídrico seu potencial produtivo pode reduzir em até 80% (Justino *et al.*, 2019). Ao longo do seu

ciclo, o feijoeiro requer cerca de 300 a 500 mm de água, distribuído em seus diferentes estádios, em que a germinação, florescimento e formação de vagens são as fases que mais necessitam de água, e seu suprimento garante um bom rendimento da lavoura (EMBRAPA, 2013).

Quando o fornecimento de água através da chuva é insuficiente, a irrigação surge como uma ferramenta essencial para diminuir os impactos das variações climáticas. Segundo Amudha e Balasubramani (2011), a irrigação ajuda a manter o desenvolvimento saudável da cultura, além de aumentar os índices de produtividade do feijoeiro.

Durante as fases iniciais, como a germinação e emergência, o consumo de água é menor, mas a disponibilidade de água é essencial para garantir o crescimento inicial das plântulas. À medida que o feijoeiro avança para o estágio vegetativo e, posteriormente, para o reprodutivo, o consumo de água aumenta, especialmente durante o florescimento, quando a planta necessita de 5 a 7 mm de água por dia.

Na fase de enchimento de vagens, o feijoeiro apresenta alta demanda por água, necessitando de 6 a 8 mm por dia, o que afeta diretamente o tamanho das vagens e a formação das sementes. Se houver déficit hídrico, a produtividade e a qualidade podem ser comprometidas. No entanto, à medida que a planta se aproxima da maturação, o consumo de água diminui, e a irrigação deve ser reduzida para evitar problemas como doenças e atraso na colheita.

A irrigação, além de garantir a disponibilidade hídrica em momentos críticos, promove o aumento da produtividade. De acordo com estudos realizados por Bernardo *et al.* (2019), ela é especialmente eficaz em períodos de baixa precipitação, permitindo que a planta expresse melhor seu potencial produtivo. O manejo correto da irrigação, garantindo o fornecimento de água no momento e na quantidade adequada, é essencial para evitar excessos ou déficits que possam comprometer a produção, o que permite que a planta alcance seu máximo potencial produtivo, além de garantir o uso eficiente dos recursos hídricos (Carvalho, 2013).

2.3 Déficit hídrico em plantas

A seca é um dos fatores que mais afetam o desenvolvimento e o crescimento do feijoeiro (Zlobin *et al.*, 2018). A falta de água para plantas, ou déficit hídrico, é uma condição que ocorre quando a quantidade de água absorvida pela planta é menor que a demandada por ela. A restrição hídrica é responsável por causar disfunção nas plantas, diminuição de seu turgor, afeta a fotossíntese, causa inadequação do funcionamento do metabolismo celular da planta (Monteiro *et al.*, 2014), inibição da síntese proteica e favorece a produção de espécies reativas de oxigênio (Tiwari *et al.*, 2015).

Em função da escassez de água, diversos fatores podem comprometer o crescimento das plantas, como por exemplo a inibição da fotossíntese, que é o processo mais importante realizado pelas plantas. Esse fenômeno acontece devido ao desacoplamento dos fotossistemas I e II (PSI e PSII), que operam sequencialmente para captar energia durante a fotossíntese, com a finalidade de otimizar os processos celulares e armazenar energia (Taiz *et al.*, 2017).

A deficiência hídrica provoca a inibição da fotossíntese, pois os elétrons gerados nos centros de reação não conseguem ser transferidos para a coenzima NADP⁺, dessa forma, há a formação de espécies reativas de oxigênio (EROs). Estas que podem ser na forma de oxigênio singlete (O_2), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), radical hidroxila ($OH\cdot$) e ânion superóxido ($O_2\cdot^-$), que são tóxicas às células vegetais (Ferrari *et al.*, 2015; Taiz *et al.*, 2017).

Embora as EROs sejam subprodutos do metabolismo aeróbico das plantas, o aumento da sua produção ativa metabolismos antioxidantes das plantas (Garcia-Caparrós *et al.*, 2021). No estresse, forma-se o ânion superóxido ($O_2\cdot^-$), que, apesar de não representar uma ameaça significativa ao ciclo de Calvin, antecede a produção de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que tem a capacidade de inativar as enzimas dessa rota. Para minimizar os danos, às plantas ativam defesas enzimáticas, como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), além de mecanismos não enzimáticos que utilizam ascorbato, glutatona, carotenoides e tocoferóis (Gupta *et al.*, 2018).

Durante o estresse hídrico, além do aumento das EROs, ocorre o aumento das concentrações de ácido abscísico (ABA), que desempenham um papel importante na resposta ao estresse. A concentração de ABA nas plantas pode aumentar em até 50

vezes em poucas horas, causando o fechamento estomático para reduzir a perda de água por transpiração. Apesar do fechamento dos estômatos reduzir a perda de água, ele diminui a absorção de CO₂, que afeta diretamente a fotossíntese e o acúmulo de matéria seca. Com a redução da transpiração, o calor não é dissipado de forma adequada, o que leva ao aumento da temperatura das folhas, afeta a estabilidade do transporte de elétrons e reduz a eficiência fotossintética (Taiz *et al.*, 2017).

Outro mecanismo utilizado pelas plantas para sobreviverem aos períodos de seca severa é o ajuste osmótico celular. A planta é caracterizada por sua habilidade de sintetizar e acumular solutos, os quais são utilizados em períodos de baixa disponibilidade de água, visando reduzir o potencial hídrico celular e garantir a hidratação e funcionalidade da célula (Taiz *et al.*, 2017). A prolina é o principal aminoácido osmorregulador, permitindo à célula reter água, mantendo seu metabolismo normal e inibindo a peroxidação lipídica (Gill; Tuteja, 2010).

Algumas plantas desenvolveram estratégias adaptativas para sobreviver em situações de seca, possibilitando uma utilização mais eficaz da água. Dentre esses processos estão o desenvolvimento de raízes mais profundas para obter água em camadas mais profundas do solo, o fechamento estomático mais eficaz, o espessamento da cutícula para diminuir a evaporação, além de alterações morfológicas como a redução ou transformação das folhas em espinhos (Lima *et al.*, 2016).

A sensibilidade ao estresse hídrico varia ao longo das diferentes fases do desenvolvimento das plantas (Zlobin *et al.*, 2018). No feijoeiro, os estádios reprodutivos, como o florescimento e o enchimento de grãos, são particularmente críticos, pois o déficit hídrico nesses períodos pode causar o abortamento floral e a queda de flores, resultando na redução do número de vagens por planta e, conseqüentemente, na diminuição da produtividade (Monteiro *et al.*, 2014; Tiwari *et al.*, 2015). No entanto, os efeitos da deficiência hídrica não se restringem apenas às fases reprodutivas, podendo impactar significativamente em todas as etapas do ciclo da cultura.

Na fase V0, anterior à germinação, a escassez de água compromete a viabilidade das sementes, favorecendo sua deterioração e aumentando a suscetibilidade a patógenos do solo, já que a respiração celular consome rapidamente as reservas energéticas acumuladas, sem que ocorra reidratação suficiente para

ativar o processo germinativo (Taiz et al., 2017). No estágio V1, a baixa umidade do solo dificulta a emergência das plântulas, reduzindo a população efetiva de plantas e comprometendo o estande inicial da lavoura. Durante os estádios V2 a V4, o estresse hídrico limita o crescimento vegetativo, reduzindo o número e o tamanho das folhas e afetando a área fotossintética, além de restringir o desenvolvimento do sistema radicular, o que dificulta a absorção de água e nutrientes (Oliveira, 2018; Zlobin et al., 2018).

Já nos estádios R5 e R6, o déficit hídrico intensifica os prejuízos, interferindo diretamente na formação dos órgãos reprodutivos, causando abortamento floral e queda das flores (Oliveira, 2018). Nos estádios R7 e R8, a escassez hídrica compromete a retenção das vagens recém-formadas e o desenvolvimento das sementes, reduzindo a massa dos grãos e impactando tanto o rendimento quanto a qualidade da produção (Oliveira, 2018). Vale destacar que a demanda por água varia conforme as condições ambientais, o estágio fenológico e a cultivar utilizada. Por isso, o uso de práticas como a irrigação e o uso de bioinsumos torna-se fundamental para mitigar os efeitos do déficit hídrico e melhorar a eficiência no uso da água (Oliveira et al., 2014; Brito et al., 2015).

2.4 Bactérias promotoras de crescimento

As rizobactérias promotoras de crescimento em plantas (PGPR, do inglês *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*) desempenham um papel importante na agricultura sustentável. O solo abriga uma infinidade de microrganismos, incluindo uma vasta gama de bactérias que interagem com as plantas (Leach et al., 2017). Essas bactérias, especialmente as que estão presente na rizosfera, são capazes de promover o crescimento das plantas, com o uso de diferentes mecanismos, como fixação biológica de nitrogênio (FBN), solubilização de fósforo, produção de sideróforos, produção de hormônios e proteção contra patógenos (Colombo et al., 2014; Malusá e Vassilev, 2014; Mitter et al., 2021; Aloo et al., 2022).

Os microrganismos promotores de crescimento de plantas têm sido muito utilizados como bioinsumos graças aos seus benefícios para o crescimento das plantas. Entre os gêneros mais estudados estão *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Bacillus* e *Pseudomonas*, que contribuem de diversas maneiras para melhorar a nutrição e o

desenvolvimento das plantas (Tabassum *et al.*, 2017; Bhadrecha *et al.*, 2023; Kumawat *et al.*, 2024).

Existem também duas classificações de bactérias, quanto ao seu modo de ação, conhecidas como endofíticas e epifíticas. As bactérias endofíticas são microrganismos que colonizam os tecidos internos da planta, sem causar danos. Elas podem colonizar as raízes, o caule e as folhas, adentrando através de fissuras, estômatos ou ferimentos. Uma vez dentro dos tecidos, essas bactérias formam uma relação mutualística com a planta, em que se beneficiam dos nutrientes disponíveis e, em troca, promovem o crescimento da planta (Pozzebon; Santos, 2016).

Já as epifíticas, como muitas existentes na rizosfera, vivem externamente, na superfície das raízes ou nas proximidades do solo. Essas bactérias também desempenham papéis essenciais na promoção de crescimento vegetal. Elas podem facilitar a absorção de nutrientes pela planta, como fósforo e nitrogênio, produzir hormônios de crescimento, e atuar como biocontrole de pragas e doenças. Enquanto as endofíticas se estabelecem dentro das plantas, as não endofíticas influenciam o ambiente externo da planta, no entanto, as duas são capazes de promover o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

Para que um microrganismo seja considerado um bioinsumo, ele deve apresentar algumas características, como a alta capacidade de colonização na rizosfera, colonização estável e eficácia em diferentes condições do ambiente e do campo. Além disso, o microrganismo deve ter capacidade de competir com os microrganismos nativos do solo, melhorar a disponibilidade de nutrientes no solo, ser ecologicamente sustentável e seguro para o ambiente e para a saúde humana (Backer *et al.*, 2018; Keswani *et al.*, 2019; Aloo *et al.*, 2022).

As plantas exercem controle significativo sobre os microrganismos que elas se associam, e até variações pequenas na genética das plantas podem causar efeitos na composição microbiana. Esse controle é realizado através de sinais moleculares liberados pelas raízes ao longo do ciclo de vida da planta, essas moléculas sinalizadoras podem ser açúcares, aminoácidos e ácidos orgânicos, que auxiliam no crescimento microbiano na rizosfera, permitindo a interação benéfica com as plantas. Esses sinais moleculares, denominados como exsudatos, podem atrair microrganismos específicos, variando em constituição de acordo com o genótipo da planta, estágio de desenvolvimento e condições ambientais (Schiltz *et al.*, 2015;

Musilova *et al.*, 2016; Nelson, 2017). Assim, a interação entre plantas e rizobactérias é fundamental para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis, proporcionando maior produtividade de forma natural e contribuindo para a preservação do meio ambiente.

O feijoeiro comum é uma cultura de grande importância econômica e social, porém é altamente suscetível aos efeitos do déficit hídrico. A bactéria *B. aryabhattai* tem se mostrado uma promissora para mitigar os danos causados pela falta de água em diversas culturas. No entanto, a literatura ainda apresenta uma escassez significativa no que diz respeito à compreensão dos mecanismos de ação e dos benefícios do uso dessa bactéria no cultivo do feijoeiro.

2.5 *Bacillus aryabhattai*

O *B. aryabhattai* é uma espécie de rizobactéria, que foi identificada pela primeira vez em 2009, a partir disso, diversas estirpes têm sido utilizadas ao redor do mundo. No Brasil, a rizobactéria é encontrada na rizosfera de um cacto, com o nome de mandacaru (*Cereus jamacaru*), que é adaptado para sobreviver em climas com altas temperaturas e escassez de água. Dessa maneira, o *B. aryabhattai* tem sido usado com a finalidade de promover tolerância à seca em plantas (Veloso, 2021).

A aplicação do *B. aryabhattai* como produto, ocorre principalmente através da inoculação de sementes, no qual realiza-se a formação de um biofilme, composto por exopolissacarídeos, que mantém as raízes da planta hidratada e conseqüentemente, garante maior tolerância às plantas. Além disso, estudos realizados por Lee *et al.* (2012), relatam que o *B. aryabhattai* promove a produção de fitohormônios como ácido indolacético, ácido abscísico e giberelina, e também auxilia na solubilização de fósforo e proporcionam a produção de ACC deaminase, que é uma enzima que desempenha um papel importante na modulação do estresse em plantas.

Conforme Oliveira *et al.* (2024), os bioinsumos à base de rizobactérias, como *B. aryabhattai*, são ferramentas promissoras para enfrentar os desafios das mudanças climáticas na agricultura, embora enfrentem limitações significativas devido à falta de estudos. No entanto, o avanço contínuo nesse campo é essencial para garantir a segurança alimentar e a sustentabilidade ambiental, ressaltando a necessidade de investimento em novas pesquisas para entender melhor a ação desses microrganismos nas plantas e seu impacto contra estresses abióticos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

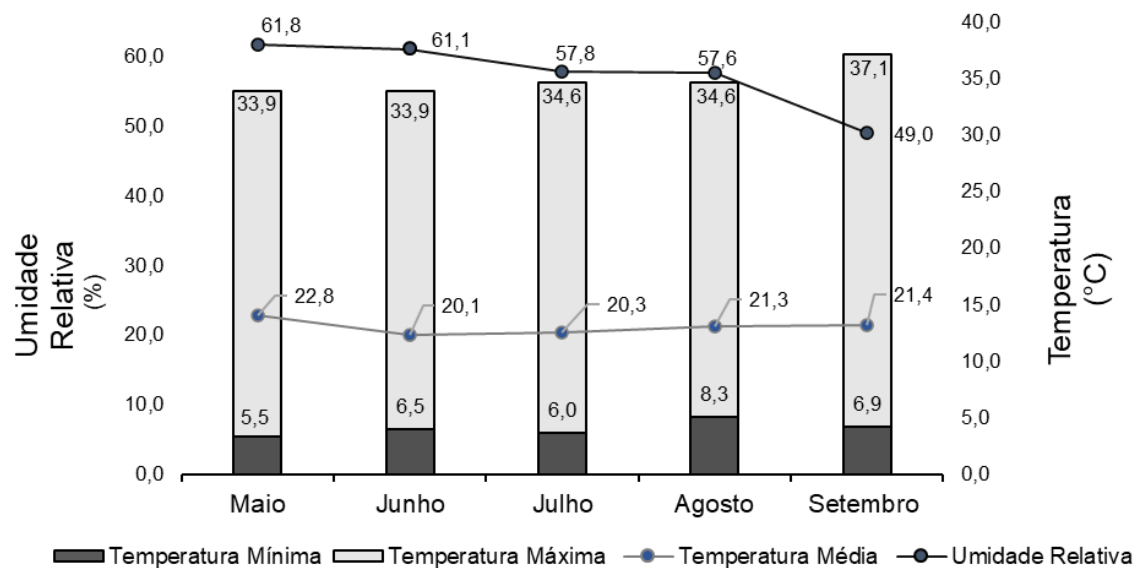
O experimento foi realizado em casa de vegetação, localizada na Universidade Professor Edson Antônio Velano – Unifenas, na cidade de Alfenas – MG, cujas coordenadas geográficas são latitude de 21°27'21", longitude de 45°56'39" e altitude de 843 m.

A casa de vegetação possui estrutura do teto em arco, com altura máxima de 5 m, comprimento de 20 m e largura de 6 m, totalizando 120 m². O teto é coberto por um plástico transparente (150 micras), o que permite a entrada de luz solar para o desenvolvimento das plantas, enquanto as laterais são revestidas com tela de sombrite, que ajuda a reduzir a intensidade de luz em alguns horários do dia e proteger contraventos fortes.

Segundo a classificação de Köppen, a cidade de Alfenas é classificada como CWa e CW6b. Este tipo de clima é caracterizado como temperado úmido e moderadamente quente, com inverno seco e verão úmido. O clima da cidade apresenta, em média, um período de seca que varia entre três a quatro meses, o que influencia diretamente na condução do experimento agrícola, principalmente em relação ao manejo hídrico da cultura.

Os dados climáticos, que incluem as medições de temperatura mínima e máxima e a umidade relativa do ar (Figura 2), foram registrados durante a condução do experimento por meio de um termo-higrômetro digital. Este instrumento foi instalado estrategicamente próximo à área experimental, para garantir a precisão das medições. O termo-higrômetro foi zerado todos os dias, durante todo o experimento, para assegurar que as leituras fossem o mais confiáveis possível.

Figura 1 - Médias climatológicas durante a condução do experimento dentro da casa de vegetação



Fonte: Autor.

3.2 Atributos físicos e químicos do solo e adubação

O experimento foi realizado em vasos de 8 litros, com solo coletado de Latossolo, com as características químicas apresentadas na Tabela 1 e físicas na Tabela 2. O manejo da adubação e calagem seguiu as recomendações do Boletim 100 para a cultura do feijoeiro (Wutke *et al.*, 2022).

Tabela 1 - Análise química do solo utilizado para preencher os vasos da condução do experimento

pH	MO	P Mehlich	K+	Ca	Mg	H+Al	SB	T	V
Cacl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- cmolc dm ⁻³ -----						%
5,3	17	2	0,4	2,2	0,7	3,1	3,3	6,4	52

Fonte: Mehlich, 1953.

Tabela 2 - Análise física do solo utilizado para preencher os vasos da condução do experimento

Areia			Argila	Silte	Textura do Solo
Grossa	Fina	Total			
----- g kg ⁻¹ -----					
120	125	245	591	164	Argilosa

Fonte: Embrapa, 2017.

Após a análise, o solo foi peneirado para remover impurezas e, em seguida, amontoado para a correção. A correção da acidez foi realizada por meio do cálculo de calagem, considerando um volume de 7 litros de solo por vaso. Para a correção, utilizou-se calcário dolomítico com PRNT de 83%, na dose de 1.420 kg ha⁻¹, 25,84 g por vaso, aplicado 60 dias antes da semeadura.

A adubação de semeadura do feijoeiro foi realizada utilizando 0,65, 3,4 e 0,47 g vaso⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente. A adubação de cobertura foi realizada em V3 (primeira folha trifoliada) com 3,2 e 0,46 g vaso⁻¹ de N e K₂O, respectivamente; e em R5 (pré-floração) com 3,2 g vaso⁻¹ de N. Foram utilizados ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio como fontes de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente.

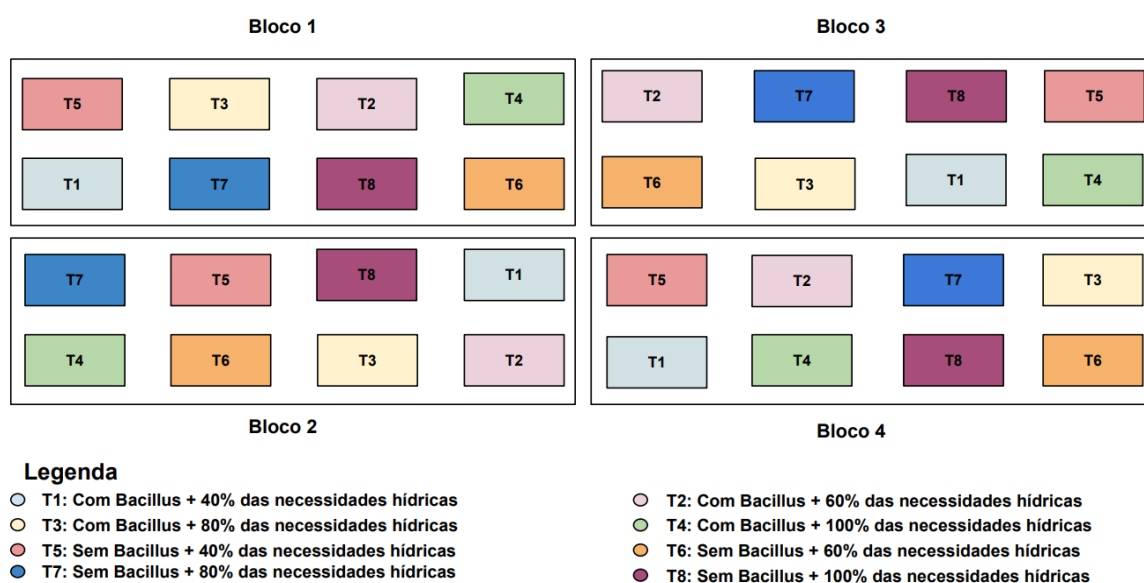
3.3 Inoculação das sementes

Foram separadas 100 g de sementes de feijão, para cada tratamento, nos quais foram inoculadas com *Rhizobium tropici*, com as cepas 4077 e 4088 na dose de 2,5 mL por kg de sementes, este colocado como manejo convencional do feijoeiro, sendo assim, todas as sementes receberam o produto, independente do tratamento. Já para a inoculação dos tratamentos com *B. aryabhattai*, foi utilizado a cepa CMAA 1363, na dose de 4 mL por quilo de semente. A mistura dos inoculantes às sementes, foi realizada no Laboratório de Microbiologia da Unifenas.

3.4 Delineamento experimental

Foram realizados dois experimentos, ambos conduzidos em delineamento de blocos casualizados. O primeiro experimento foi em esquema fatorial 2 x 4, com quatro repetições (Figura 2). Os fatores estudados incluíram a presença e ausência de *B. aryabhattai*, com quatro lâminas de irrigação (40, 60, 80 e 100% da ETc), em que a restrição hídrica iniciou-se a partir do estágio fenológico V3.

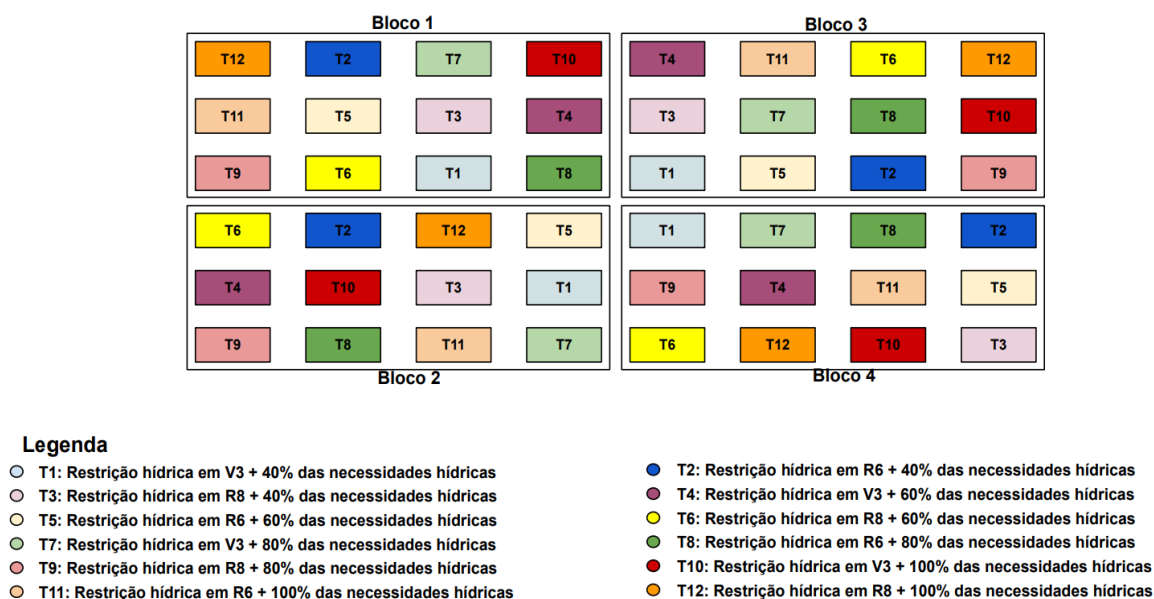
Figura 2 - Croqui da área experimental utilizada no experimento 1



Fonte: Autor.

O segundo em esquema fatorial 3 x 4, com quatro repetições (Figura 3). O primeiro fator estudado foi a restrição hídrica em 3 fases fenológicas: primeira folha trifoliada (V3), florescimento (R6) e enchimento de grãos (R8) e o segundo fator foram as lâminas de irrigação (40, 60, 80 e 100%), em que todos os tratamentos foram submetidos à inoculação com *B. aryabhattai*.

Figura 3 - Croqui da área experimental utilizada no experimento 2



Fonte: Autor.

3.5 Instalação e condução

Após 60 dias da correção do solo, os vasos foram forrados com TNT (tecido não tecido) na base e preenchidos com solo. Em 9 de maio de 2024, foi realizada a semeadura da cultivar BRS Estilo, que apresenta ciclo de 85-95 dias, porte ereto, alta produtividade, grãos de qualidade e resistência ao acamamento. Foram semeadas 10 sementes por vaso, a uma profundidade de 4 cm, em vasos de 8 litros. Dez dias após a emergência, realizou-se o desbaste, deixando apenas três plantas por vaso.

A cultivar BRS Estilo possui ciclo de 85-95 dias, porte ereto, alta produtividade e grãos de qualidade. É resistente ao acamamento e adaptada à colheita mecanizada, sendo indicada para plantio em diferentes épocas e regiões do Brasil

Os regimes de irrigação foram aplicados de acordo com cada tratamento específico. A primeira restrição hídrica foi iniciada em V3 (primeira folha trifoliada), a segunda restrição hídrica foi iniciada em R6 (florescimento) e a terceira e última restrição ocorreu no estágio R8 (enchimento de grãos) (Oliveira, 2018). Todos os regimes hídricos foram iniciados de acordo com seu respectivo tratamento, nas quais permaneceram em regime hídrico de 40, 60, 80 e 100% da ETc até a colheita.

Durante o período do experimento, foi realizado o monitoramento de plantas daninhas diariamente, realizando o arranquio manual das plantas, quando necessário.

Para o controle de pragas foi realizada a montagem de iscas amarelas, contendo atrativo a base de laranja e melaço, para capturar os insetos. Além disso, foi aplicado um inseticida biológico à base de neem (*Azadirachta indica*), e como controle químico, foi utilizado o princípio ativo imidacloprido, na dose de 300 g do produto comercial por hectare, nos estádios V3, V4, R5 e R7, com o auxílio de uma bomba costal, com ponteira em leque e pressão máxima para garantir a uniformidade da aplicação. Em relação a doenças, não foi realizada nenhum tipo de aplicação, contando apenas com o tratamento de sementes industriais, que contém dois fungicidas e um inseticida, sendo eles: piraclostrobina, tiofanato metílico e fipronil, que são registrados para o feijoeiro.

O florescimento pleno do feijoeiro ocorreu aos 55 DAE (dias após a emergência) e aos 100 DAE as plantas atingiram o estágio R9, sinalizado através da mudança na coloração das vagens e queda das folhas. Neste estágio, foi realizada a colheita manual de duas plantas por vaso, para fins de avaliações dos componentes de produção.

3.6 Irrigação

As irrigações foram realizadas diariamente, no período da manhã, de acordo com o tratamento aplicado no experimento, ajustando a quantidade de água com base nas condições climáticas observadas na área. Para determinar a necessidade de irrigação (Equação 1), utilizou-se a evaporação medida pelo Tanque Classe A, que foi instalado próximo a área do experimento, dentro da casa de vegetação, para garantir precisão nas medições de evaporação (Figura 4).

Figura 4 - Tanque Classe A utilizado para mensurar a quantidade de água a ser irrigada no experimento



Foto: Ana Laura Paula de Oliveira

A evapotranspiração de referência (ET_o), que indica a quantidade perdida de água por evaporação e a transpiração da cultura de referência, foi calculada a partir da multiplicação da evaporação do Tanque Classe A (ECA), pelo coeficiente do tanque (K_t) (Equação 1). O K_t atual serve como ajuste para que a evaporação medida pelo tanque represente as condições reais do ambiente, considerando a velocidade do vento e a umidade relativa, seguindo as orientações propostas por Allen (1998).

Equação 1 - Equação para determinação da quantidade de irrigação necessária através do Tanque Classe A.

$$\text{Lâmina de irrigação} = [(K_t \times ECA) \times K_c] \times AV$$

Em que:

K_t: Coeficiente do tanque ($0,48 + 0,0045 \times \text{Umidade relativa do ar}$);

ECA: Evaporação do tanque Classe A em mm;

K_c: Coeficiente da cultura;

ET_c: Evapotranspiração da cultura (ET_o x K_c);

AV: área do vaso (0,14m²).

Para determinar a evapotranspiração da cultura (ET_c), foi feito o cálculo multiplicando o valor da ET_o pelo coeficiente da cultura (K_c) Equação 2. O K_c da cultura pode variar de acordo os estádios fenológicos da cultura, conforme a Tabela 3, o que permite que a quantidade de água aplicada através da irrigação seja adaptada para as necessidades específicas da planta, garantindo o uso eficiente da água.

Tabela 3 - Coeficiente da cultura (K_c) para os estádios fenológicos do feijoeiro

Estádio de desenvolvimento	Duração em dias	K _c
Semeadura - emergência (V1)	8	0,40
V1 - 3ª folha trifoliada (V4)	34	
V4 - pré-floração (R5)	13	
R5 – início da floração (R6)	6	1,15
R6 – início do enchimento de grãos (R8)	19	
R8 – maturação fisiológica (R9)	19	
R9 - Colheita	10	0,35
TOTAL DO CICLO	109	

Fonte: Adaptado de Pavani *et al.*, 2009.

3.7 Variáveis avaliadas

No final do ciclo do feijão, foram selecionadas aleatoriamente duas das três plantas existentes em cada vaso para a determinação de diversos parâmetros. Para a altura das plantas, utilizou-se uma fita métrica graduada (cm) para medir a distância entre a base e o ápice da haste principal. A altura de inserção da primeira vagem foi determinada medindo-se a distância do colo da planta até o nó onde ocorreu a emissão da primeira vagem, também com o auxílio de uma fita métrica graduada.

O número de vagens por planta foi obtido por meio da contagem manual das vagens em duas plantas por vaso. Para o número de grãos por vagem foi realizado a debulha das vagens e foi determinado através da contagem manual dos grãos, desconsiderando aqueles que não se desenvolveram completamente devido ao

estresse hídrico. Para a obtenção do número de grãos por planta, após a contagem dos grãos por vagem, todos os grãos foram reunidos e contados manualmente.

A produção de grãos foi determinada após a contagem, com os grãos de cada planta sendo secos até a estabilização da umidade em 13% e posteriormente pesados em uma balança de precisão. A massa de 100 grãos foi estimada pela pesagem de uma amostra representativa e aplicação da regra de três para calcular o peso correspondente a 100 unidades. A massa seca da raiz foi obtida após a secagem das raízes frescas em estufa a 55°C por um período de 72 horas, seguida da pesagem.

O teor de nitrogênio (N) nos grãos foi determinado conforme a metodologia descrita por Malavolta *et al.* (1997), utilizando o método de Kjeldahl. Para isso, foram pesadas 0,2 gramas da amostra moída, que foi digerida com ácido sulfúrico e um catalisador (sulfato de cobre) até a conversão do nitrogênio orgânico em amônio. Após a digestão, a mistura foi neutralizada com uma solução alcalina de hidróxido de sódio. O nitrogênio liberado foi destilado e capturado em uma solução de ácido bórico, e a porcentagem de nitrogênio foi determinada utilizando a seguinte equação:

Equação 2 - Equação para determinação de nitrogênio nos grãos

$$N\% = (V \times Fc \times N \times 14 \times 100) \div \text{Peso da amostra (g)}$$

Em que:

V: volume do ácido gasto na titulação (mL);

Fc: Fator de correção do ácido;

N: normalidade do ácido.

A proteína bruta dos grãos foi calculada após a determinação do nitrogênio, multiplicando-se o valor obtido por 6,25, fator de conversão padrão que considera que as proteínas contêm aproximadamente 16% de nitrogênio, conforme descrito por Krul (2019).

A produtividade da água de irrigação foi determinada pela razão entre a produção de cada planta (Kg planta^{-1}) e o volume de água aplicado por vaso ($\text{m}^3 \text{ planta}^{-1}$) ao final do ciclo, adaptado de Fernandez *et al.* (2020), conforme a equação:

Equação 3 - Equação para determinação da eficiência do uso da água em função da produtividade

$$PAir = Y \div ITN$$

Em que:

PAir = Produtividade da água de irrigação (g m^{-3});

Y = Produção da cultura (g planta^{-1});

ITN = Volume de água aplicado na irrigação ($\text{m}^3 \text{ vaso}^{-1}$).

A unidade formadora de colônias (UFC) foi utilizada para quantificar o número de microrganismos viáveis presentes na amostra de solo. A avaliação exigiu a diluição do solo em solução salina (0,60% NaCl) para formar uma suspensão, seguida por uma diluição seriada em diferentes proporções para possibilitar a contagem das colônias. As diluições foram inoculadas em placas de Petri contendo meio de cultura BDA (ágar batata dextrose) estéril, utilizando uma pipeta de 0,1 mL. As placas foram incubadas a 25°C por períodos de 24 e 48 horas, e a contagem das colônias foi realizada conforme orientações de Madigan *et al.* (2004). A concentração de microrganismos foi determinada pela seguinte equação:

Equação 4 - Fórmula para calcular unidade formadora de colônias.

$$\text{UFC mL}^{-1} = \text{Número de colônias na placa} \times \text{Fator de diluição} \div \text{Volume do inóculo}$$

3.8 Análise Estatística

Os dados foram avaliados quanto à normalidade pelo teste de Anderson-Darling e quanto à homocedasticidade pelo teste de Levene. Posteriormente, prosseguiu com a análise de variância (ANOVA), com nível de significância de 5% de probabilidade de erro. As médias foram submetidas ao teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro através do software AgroEstat, as equações de regressão foram realizadas pelo software R e os gráficos foram desenvolvidos com o auxílio do SigmaPlot 14.1.

4 RESULTADOS

4.1 Experimento 1

Os fatores bioinsumo e irrigação influenciaram significativamente algumas características das plantas, conforme apresentado na Tabela 4.

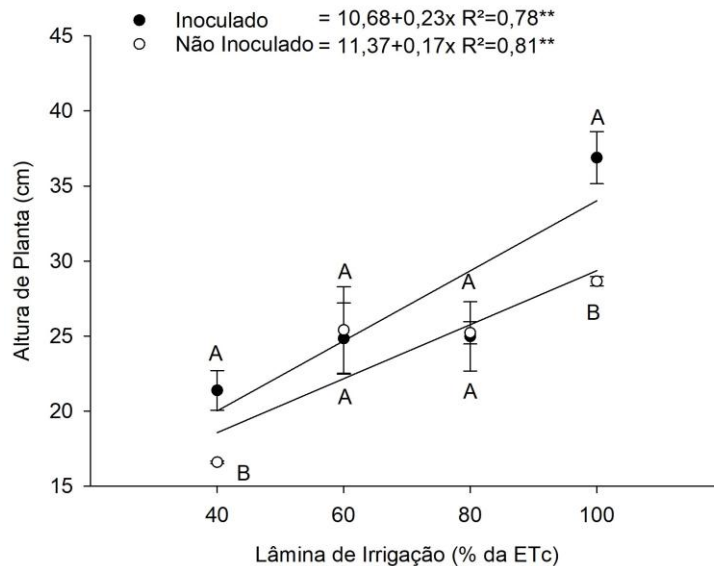
Tabela 4 - Valores de P e coeficiente de variação (CV) para as variáveis altura de plantas (AP), altura de inserção da primeira vagem (AIPV), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP), produção (P), massa de 100 grãos (100) massa seca da raiz (MSR), nitrogênio nos grãos (N%), proteína bruta nos grãos (PB%), produtividade da água de irrigação (PAir) e unidade formadora de colônia (UFC).

	AP (cm)	AIPV (cm)	NVP	NGV	NGP	M100 (g)
Bioinsumo	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	0,2804 <i>ns</i>
Irrigação	< 0,0001**	0,5076 <i>ns</i>	0,0001**	0,4293 <i>ns</i>	0,0018**	< 0,0001**
Bio x Irrigação	< 0,0001**	0,0004**	0,0859 <i>ns</i>	0,0115*	0,0088**	< 0,0001**
CV	9,42	5,31	9,26	4,93	8,10	2,56
	P (g planta ⁻¹)	MSR (g planta ⁻¹)	N (%)	PB (%)	PAir (g m ⁻³)	UFC
Bioinsumo	< 0,0001**	< 0,0001**	0,0244**	0,0219*	< 0,0001**	0,0003
Irrigação	0,0042**	< 0,0001**	0,3756 <i>ns</i>	< 0,0001**	0,0008**	< 0,0001**
Bio x Irrigação	0,2026 <i>ns</i>	< 0,0001**	0,0023**	< 0,0001**	0,0818 <i>ns</i>	0,1331 <i>ns</i>
CV	7,37	9,05	8,03	2,99	8,97	4,68

ns: não significativo, **: 1% de significância, *: 5% de significância.

A altura de planta foi influenciada pela interação entre a inoculação de bioinsumos e os diferentes níveis de irrigação (Tabela 4). O aumento na lâmina de irrigação proporcionou acréscimo linear na altura das plantas. Em relação ao uso de *B. aryabhatai*, houve aumento de 18,5% e 22,3% na altura das plantas em condições de estresse hídrico (40% da ETc) e irrigação plena (100% da ETc), respectivamente, em comparação às plantas não inoculadas (Figura 5).

Figura 5 - Altura das plantas para os tratamentos com e sem *B. aryabhatai* sob diferentes lâminas de irrigação

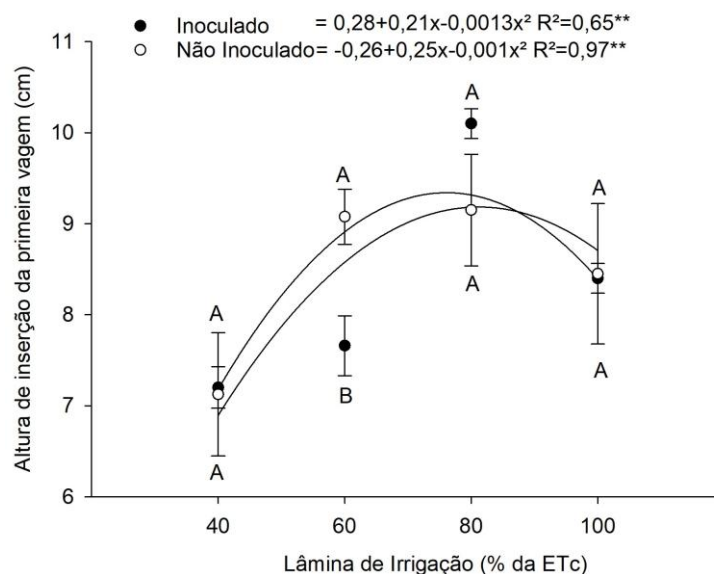


******significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre a inoculação e a não inoculação com *B. aryabhatai* a 5% de probabilidade.

Em relação à altura de inserção da primeira vagem, houve interação entre os fatores estudados (Tabela 4). Conforme apresentado na Figura 8, a lâmina de irrigação correspondente a 60% da ETc foi a única a apresentar diferença entre a presença e a ausência do *B. aryabhatai*. Sendo que a inoculação com o *B. aryabhatai* resultou em aumento de 15,5% na altura de inserção da primeira vagem em comparação às plantas não inoculadas (Figura 6).

Figura 6 - Altura de inserção da primeira vagem para os tratamentos com e sem *B. aryabhattai* sob diferentes lâminas de irrigação

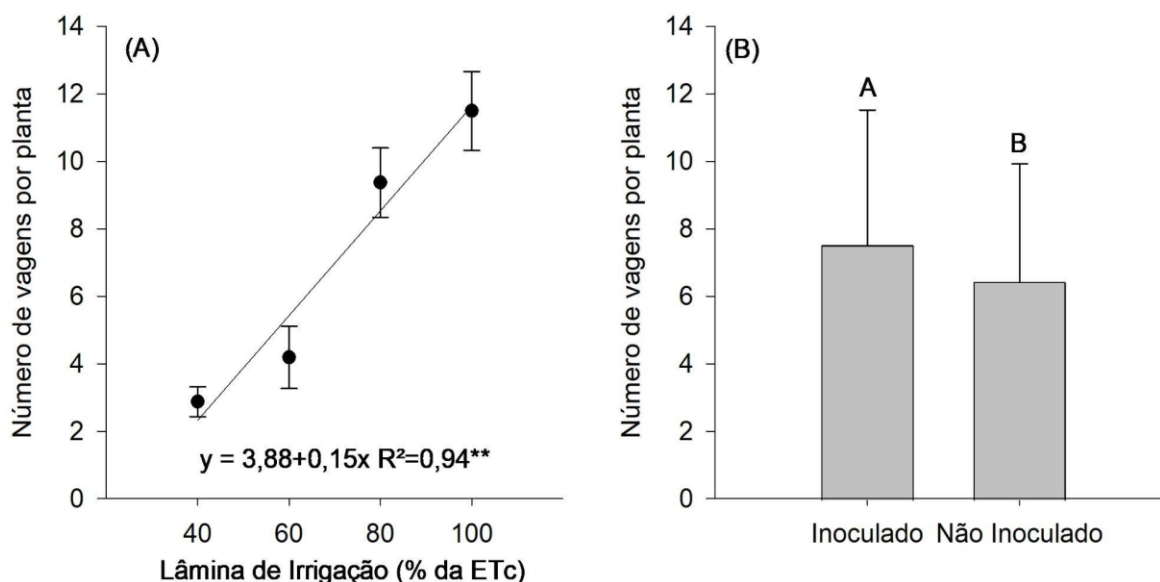


******significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre a inoculação e a não inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

Para o número de vagens por plantas, não houve interação significativa entre os fatores bioinsumos e irrigação (Tabela 4). Porém, a relação entre o número de vagens e a lâmina de irrigação foi linear, indicando que o aumento da disponibilidade hídrica contribuiu para maior número de vagens por planta (Figura 7a). No caso do fator inoculação, a presença de *B. aryabhattai* promoveu aumento no número de vagens por planta (Figura 7b). Em média, as plantas inoculadas apresentaram incremento de aproximadamente 20% no número de vagens em comparação às não inoculadas.

Figura 7 - Número de vagens por planta para os tratamentos com e sem *B. aryabhattai* sob diferentes lâminas de irrigação

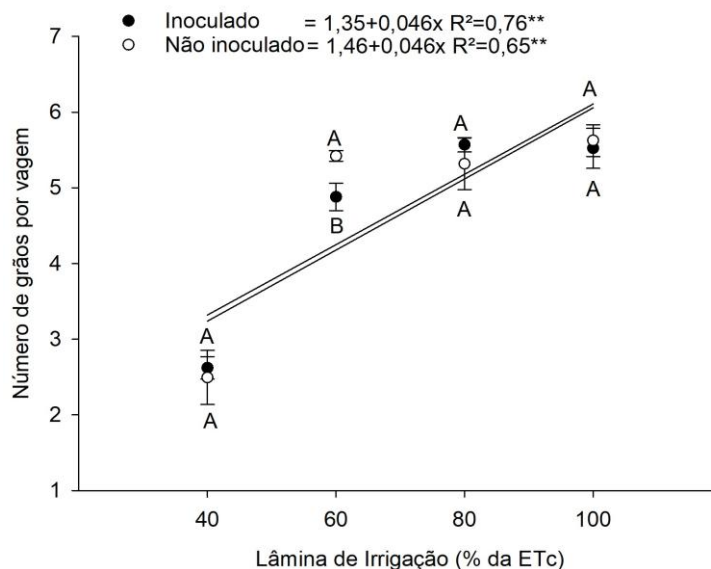


******significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre a inoculação e a não inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

O número de grãos por vagem foi influenciado pela interação com aplicação do bioinsumo e os diferentes níveis de irrigação (Tabela 4). A maior disponibilidade hídrica resultou em aumento no número de grãos por vagem, independente do fator inoculação (Figura 8). Essa relação linear sugere que a disponibilidade de água desempenha um papel fundamental na formação de grãos por vagem, proporcionando melhores condições fisiológicas para o desenvolvimento reprodutivo das plantas. Contudo, no manejo com 60% da ETC, a inoculação com *B. aryabhattai* potencializou essa resposta, produzindo, em média, 11,4% de grãos a mais por vagem, em comparação às plantas não inoculadas.

Figura 8 - Número de grãos por vagem para os tratamentos com e sem *B. aryabhattai* sob diferentes lâminas de irrigação

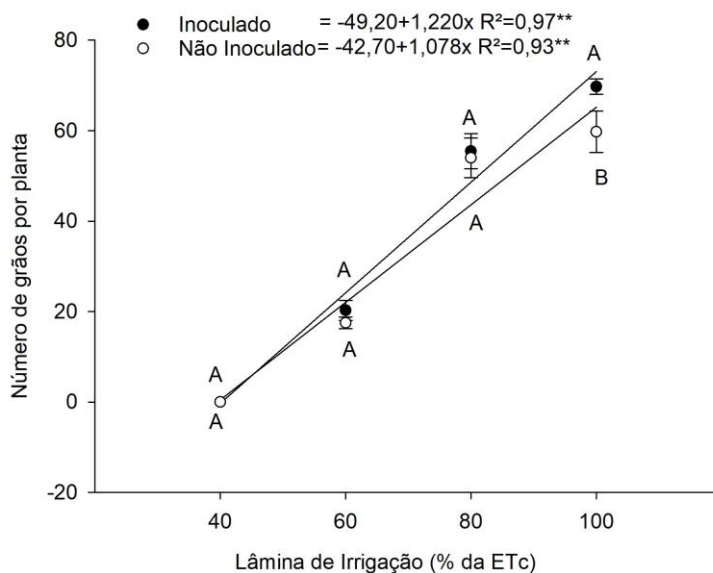


******significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre a inoculação e a não inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

O manejo da irrigação e a aplicação de *B. aryabhattai* influenciaram significativamente o número de grãos por planta (Tabela 4). À medida que as lâminas de irrigação aumentaram, observou-se um crescimento linear no número de grãos por planta, tanto nos tratamentos com bioinsumo quanto nos de sem bioinsumo. No entanto, apenas a lâmina de 100% da ETc proporcionou diferença significativa em relação a presença e ausência do bioinsumo (Figura 9). A disponibilidade hídrica plena e a aplicação de bioinsumos proporcionaram um aumento de aproximadamente 10 grãos por planta quando irrigadas com a lâmina de 100%.

Figura 9 - Número de grãos por planta para os tratamentos com e sem *B. aryabhattai* sob diferentes lâminas de irrigação



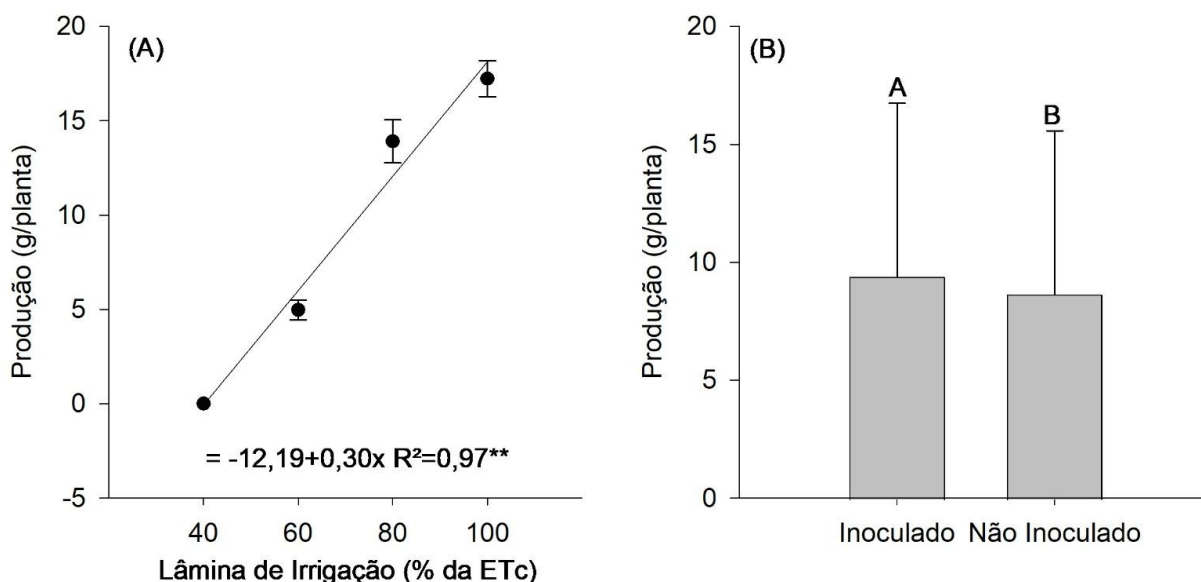
******significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre a inoculação e a não inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

A produção de grãos (PG), não foi detectada interação significativa entre as lâminas de irrigação e a presença ou ausência do *B. aryabhattai*, conforme indicado na Tabela 4. A ausência dessa interação sugere que os fatores atuam de forma independente, embora possam ser complementares para promover o aumento da produção, ou seja, os benefícios de um fator não dependem diretamente do outro.

Conforme apresentado na Figura 10a, a PG aumentou de forma linear com o incremento das lâminas de irrigação, evidenciando que a maior disponibilidade hídrica favorece a produção. No mesmo sentido, a Figura 10b mostra que a aplicação do bioinsumo proporcionou uma produção significativamente maior em comparação às plantas não inoculadas, independentemente do nível de irrigação.

Figura 10 - Produção de grãos por planta para os tratamentos com e sem *B. aryabhattai* sob diferentes lâminas de irrigação



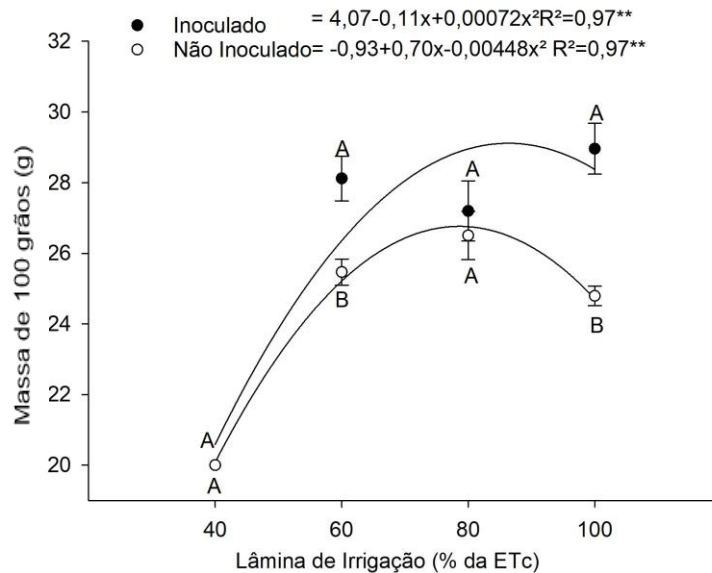
**significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre a inoculação e a não inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

Diferentemente da produção total de grãos, a massa de 100 grãos apresentou uma interação significativa entre a inoculação com *B. aryabhattai* e os diferentes níveis de irrigação, conforme demonstrado na Tabela 4. De acordo com a Figura 11, diferenças significativas entre a presença e a ausência do bioinsumo foram observadas apenas nas lâminas de irrigação de 60% e 100% da ETc.

Nessas condições, as plantas inoculadas apresentaram um aumento na massa de 100 grãos de 9,42% sob 60% da ETc e de 14,36% sob 100% da ETc, em comparação com as plantas não inoculadas. No entanto, a Figura 13 também evidencia a existência de uma faixa ótima de irrigação, conforme a derivação para maximizar a massa de 100 grãos, situada entre 60% e 80% da ETc, para as plantas não inoculadas. Acima desse intervalo, observa-se redução no peso dos grãos em ambos os tratamentos (com e sem inoculação).

Figura 11 - Massa de 100 grãos para os tratamentos com e sem *B. aryabhattai* sob diferentes lâminas de irrigação

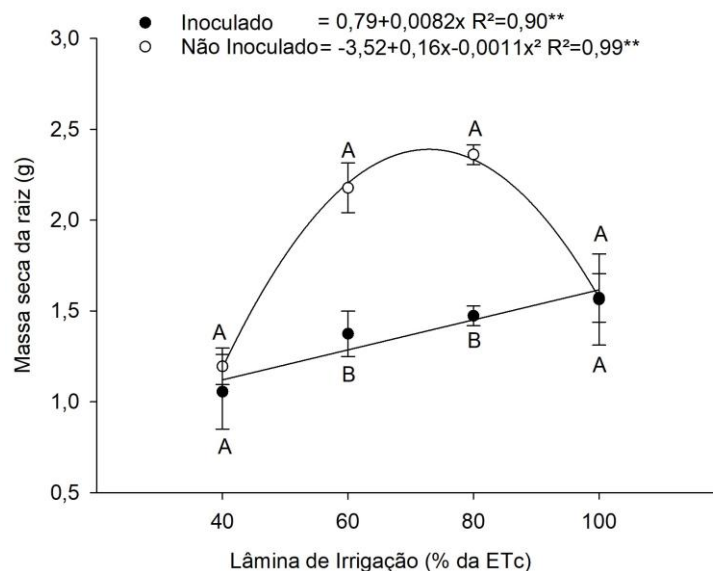


******significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F,.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre a inoculação e a não inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

A massa seca das raízes apresentou interação entre as lâminas de irrigação e a aplicação de bioinsumo (Tabela 4). Para os tratamentos inoculados, houve aumento linear para a massa seca da raiz de acordo com a maior disponibilidade hídrica. Por outro lado, nas plantas não inoculadas, a maior massa seca da raiz ($2,5 \text{ g planta}^{-1}$) foi observada com lâmina de 72,73% da ETc, de acordo com a derivação. A diferença entre os tratamentos foi mais evidente na lâmina de 60% e 80% da ETc, onde as plantas não inoculadas apresentaram massa seca da raiz 58,6% e 60,5% maiores em comparação às inoculadas, respectivamente (Figura 12).

Figura 12 - Massa seca da raiz para os tratamentos com e sem *B. aryabhattai* sob diferentes lâminas de irrigação



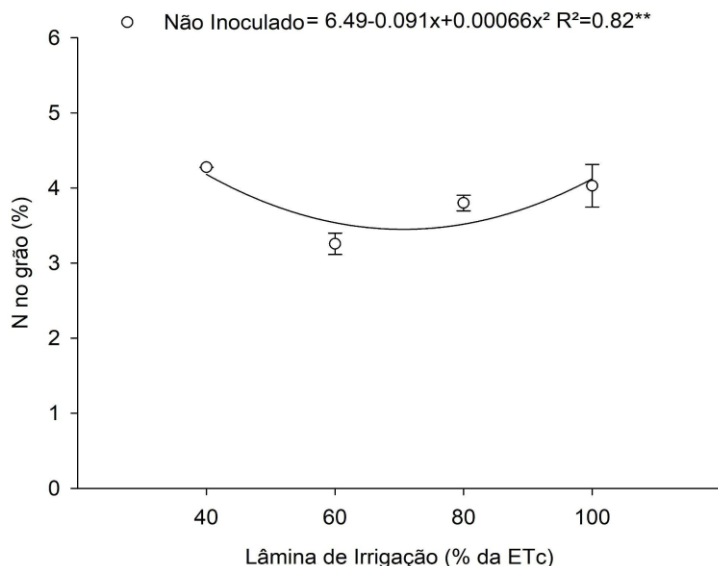
****significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.**

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre a inoculação e a não inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

Para o teor de N no grão houve interação entre os fatores estudados (Tabela 4), em que a lâmina de 40% e 60% da ETc possuem diferenças quanto ao uso de bioinsumo. As plantas inoculadas apresentaram teores de nitrogênio similares, independentemente da quantidade de água aplicada.

Por outro lado, nas plantas não inoculadas, o teor de nitrogênio variou com a lâmina de irrigação, atingindo o ponto mínimo (0,9%) na lâmina de 68,9% da ETc. Esse resultado sugere que o teor de nitrogênio nas plantas é resultado da interação de diversos fatores, incluindo a disponibilidade de água, a fixação biológica de nitrogênio e outros processos fisiológicos. A lâmina de irrigação de 68,9% da ETc pode representar uma condição em que esses processos estão desbalanceados (Figura 13).

Figura 13 - Teor de nitrogênio do grão para os tratamentos com e sem *B. aryabhattai* sob diferentes lâminas de irrigação



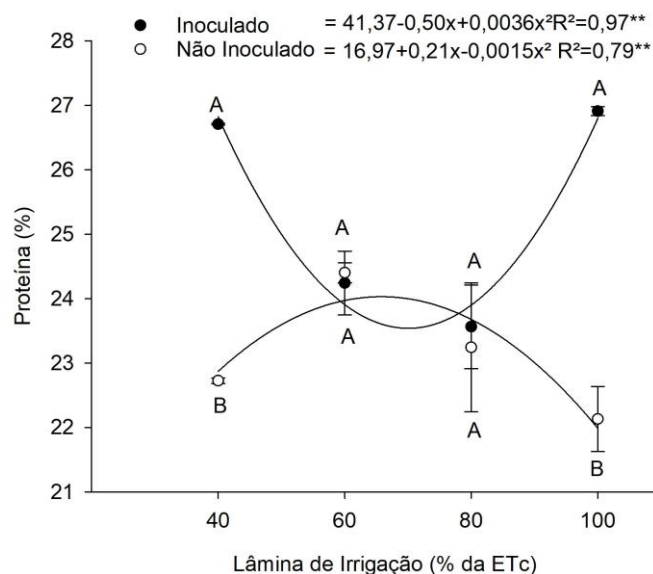
******significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre a inoculação e a não inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

A análise do teor de proteína nos grãos revelou uma interação significativa entre a lâmina de irrigação e a inoculação com bioinsumo (Tabela 4). Essa interação foi mais evidente nas lâminas de 40% e 100% da ETc, em que as plantas inoculadas apresentaram um aumento de 17,5% e 20,3%, respectivamente, em comparação com as plantas não inoculadas (Figura 14).

Para as plantas não inoculadas, o maior teor de proteína pode ser observado com a lâmina de 70% da ETc, com 24% de acordo com a derivação da equação, enquanto nas plantas inoculadas, o menor teor de proteína ocorreu nessa mesma lâmina, com 16,2% (Figura 14). Esses resultados sugerem que a combinação entre a inoculação e as lâminas de 40% e 100% da ETc foi mais benéfica para o aumento do teor de proteína nos grãos.

Figura 14 - Teor de proteína no grão para os tratamentos com e sem *B. aryabhattai* sob diferentes lâminas de irrigação

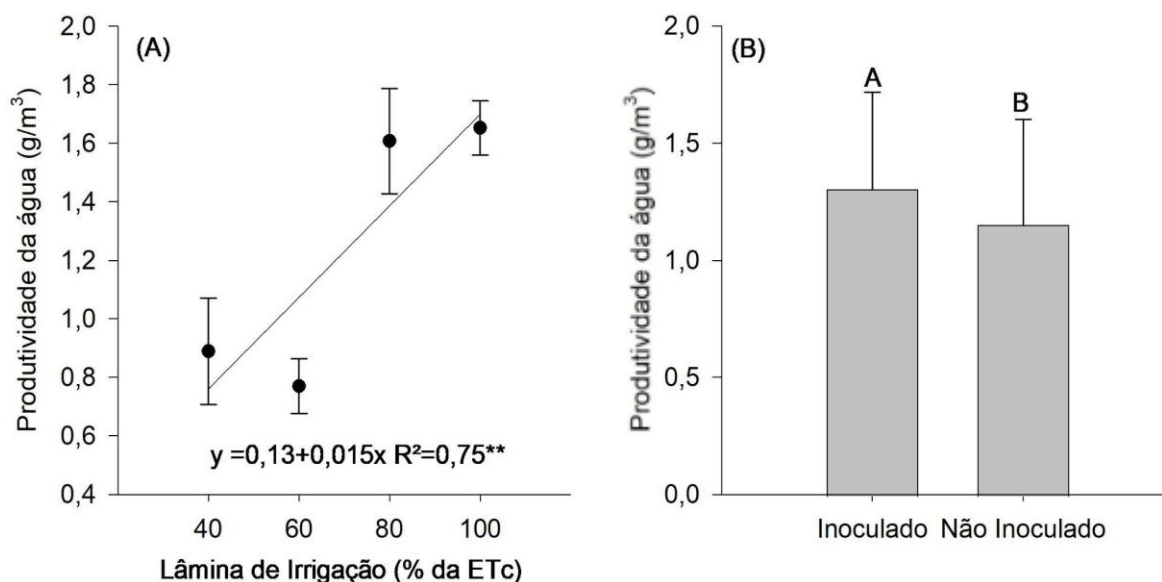


******significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre a inoculação e a não inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

A produtividade da água de irrigação não demonstrou interação significativa entre os fatores estudados (Tabela 4). Para as lâminas de irrigação, houve crescimento linear (Figura 15a). Em relação ao fator *B. aryabhattai*, as plantas inoculadas com *B. aryabhattai* apresentaram 13% mais eficiência do uso da água, em comparação às plantas não inoculadas (Figura 15b). A ausência de interação significativa entre esses fatores sugere que ambos os tratamentos afetam a eficiência no uso da água de forma independente, e quando associados podem trazer benefícios mútuos às plantas.

Figura 15 - Produtividade da água de irrigação (g m^{-3}) para os tratamentos com e sem *B. aryabhatai* sob diferentes lâminas de irrigação

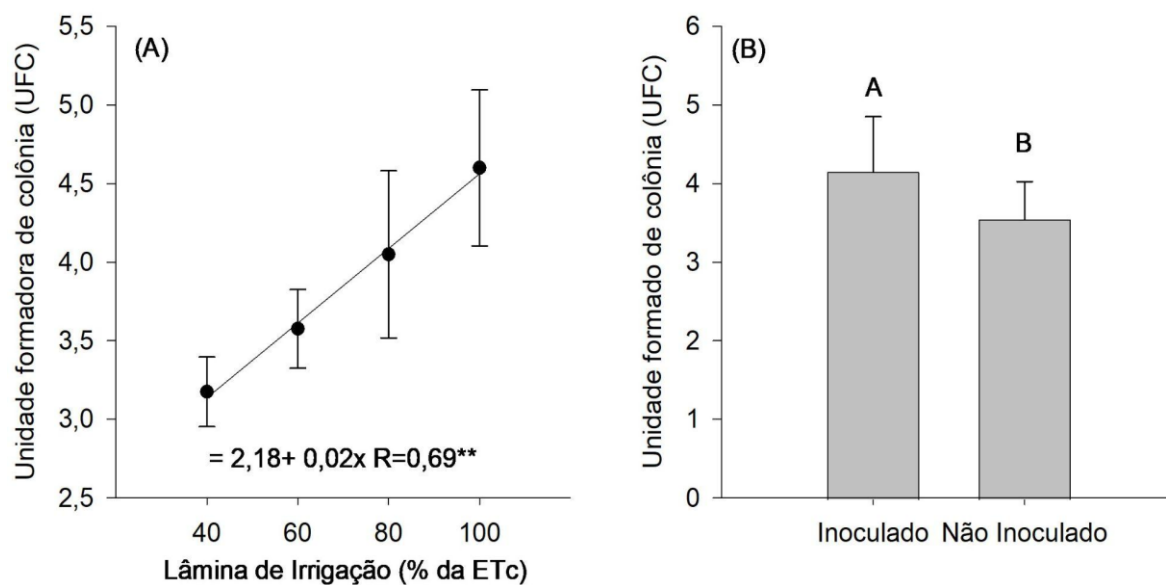


******significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Letras diferentes indicam diferenças significativas entre a inoculação e a não inoculação com *B. aryabhatai* a 5% de probabilidade.

A variável unidade formadora de colônia (UFC) não apresentou interação entre os fatores avaliados (Tabela 4). De acordo com a Figura 16a, é possível observar que houve um crescimento linear em função das lâminas de irrigação. Já para o fator bioinsumo, a inoculação com *B. aryabhatai* proporcionou maior número de colônias de microrganismos, se comparado com as plantas não inoculadas (Figura 16b).

Figura 16 - Unidade formadora de colônia para os tratamentos com e sem *B. aryabhattai* sob diferentes lâminas de irrigação (10^5)



******significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Letras diferentes indicam diferenças significativas entre a inoculação e a não inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

4. 2 Experimento 2

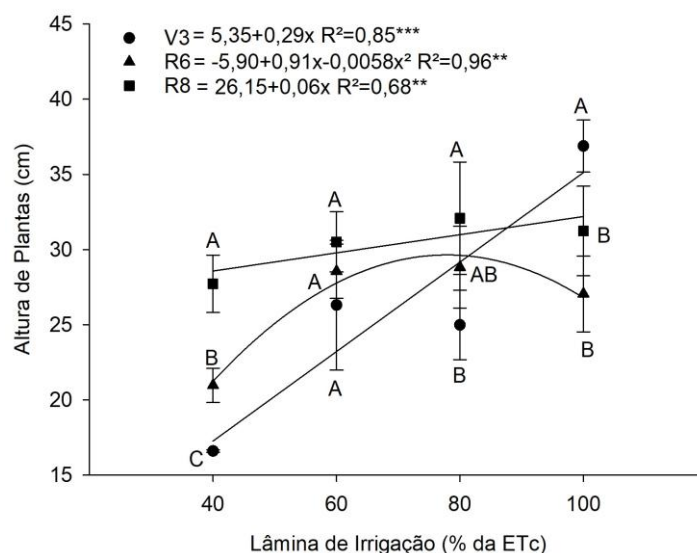
Os fatores restrição hídrica e fases fenológicas influenciaram significativamente algumas características das plantas de feijão (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores de P e coeficiente de variação (CV) para as variáveis altura de plantas (AP), altura de inserção da primeira vagem (AIPV), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP), produção (P), massa de 100 grãos (M100), massa seca da raiz (MSR), nitrogênio nos grãos (N%), proteína bruta nos grãos (PB%), produtividade da água de irrigação (PAir) e unidade formadora de colônia (UFC).

	AP (cm)	AIPV (cm)	NVP	NGV	NGP	M100
Fenologia	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**
Irrigação	0,0022**	0,0021**	< 0,0001**	0,0096**	< 0,0001**	< 0,0001**
F × I	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	0,1762 <i>ns</i>	< 0,0001**	< 0,0001**
CV (%)	9,09	6,27	9,46	6,91	8,55	2,87
	P (g planta ⁻¹)	MSR	N (%)	PB (%)	PAir (g m ⁻³)	UFC
Fenologia	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**
Irrigação	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	0,0006
F × I	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001**	0,03*
CV (%)	7,53	4,30	2,97	3,00	2,88	3,78

A altura de planta foi influenciada pela interação entre o estágio fenológico da cultura e os diferentes níveis de irrigação (Tabela 5). Nos estádios V3 (primeira folha trifoliolada) e R8 (enchimento de grãos), a altura da planta aumentou linearmente com o incremento da lâmina de irrigação. Já em R6 (florescimento), o comportamento foi quadrático, com ponto ótimo de irrigação próximo a 80% da ET_c (30,32 cm de altura) (Figura 17).

Figura 17 - Altura das plantas para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos

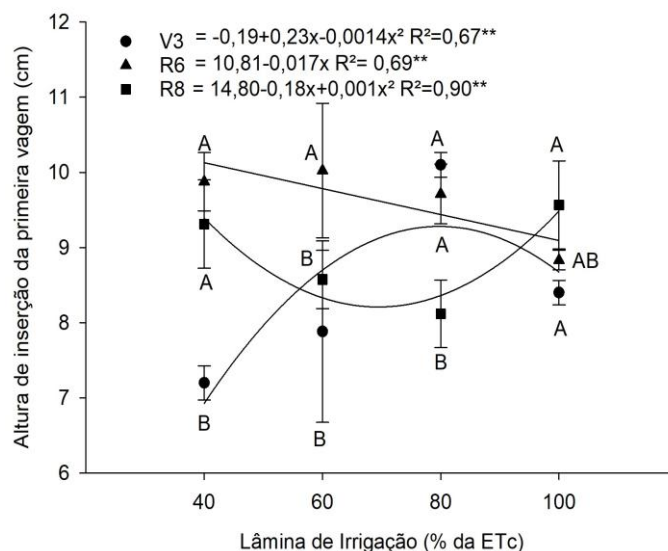


*** 0,1% de probabilidade pelo teste de F, **significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F. Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre as fases de restrição hídrica com a inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

Para a altura de inserção da primeira vagem observou-se a interação entre os estádios fenológicos da planta e lâminas de irrigação (Tabela 5). Observa-se que, no estágio V3, a altura é menor que os demais estádios, em que o ponto máximo ocorre na lâmina de 82% da ETc, com uma altura de 8,49 cm e tende a diminuir com a irrigação plena. Enquanto no estágio R6 há um decréscimo linear, em que a lâmina de 40% da ETc apresenta uma altura maior que a lâmina de 100% (Figura 18).

Já o estágio R8, apresentou um declínio nas lâminas intermediárias (60 e 80% da ETc), em que o ponto mínimo ocorre na lâmina de 70% com uma altura de 8,2 cm, e após esta dose há um aumento da altura para aproximadamente 9,8 cm. Em síntese, a altura de inserção da primeira vagem é influenciada pelo estágio de desenvolvimento e pela lâmina de irrigação, sendo que, nos estádios iniciais, o déficit hídrico reduz significativamente a altura, enquanto nos estádios mais avançados há maior compensação.

Figura 18 - Altura de inserção da primeira vagem para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos



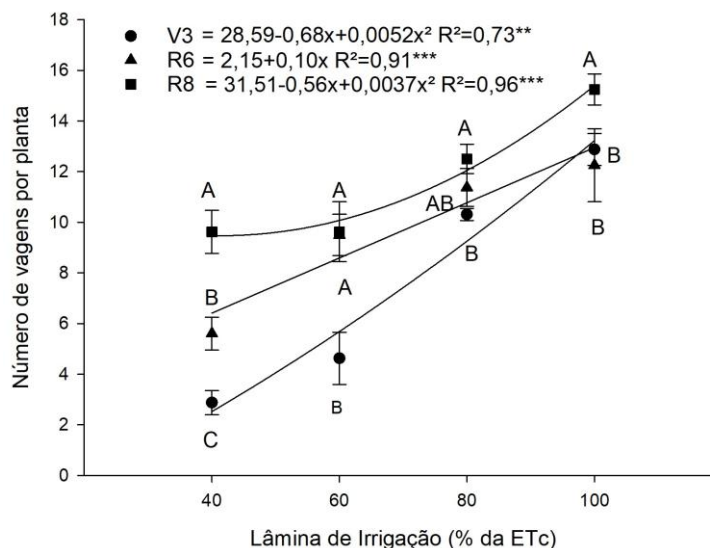
******significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre as fases de restrição hídrica com a inoculação com *B. aryabhatai* a 5% de probabilidade.

A variável número de vagens por planta apresentou uma interação significativa entre os fatores avaliados (Tabela 5). O estágio V3 mostrou-se o mais sensível ao déficit hídrico severo (40% da ETc), seguido pelos estádios R6 e R8 (Figura 19).

No estágio R6, observou-se um aumento linear no número de vagens por planta conforme a disponibilidade hídrica aumentava. No entanto, a fase de enchimento de grãos (R8) demonstrou a maior resposta ao incremento da irrigação, superando os demais estádios nas lâminas de 40%, 80% e 100% da ETc.

Figura 19 - Número de vagens por planta para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos

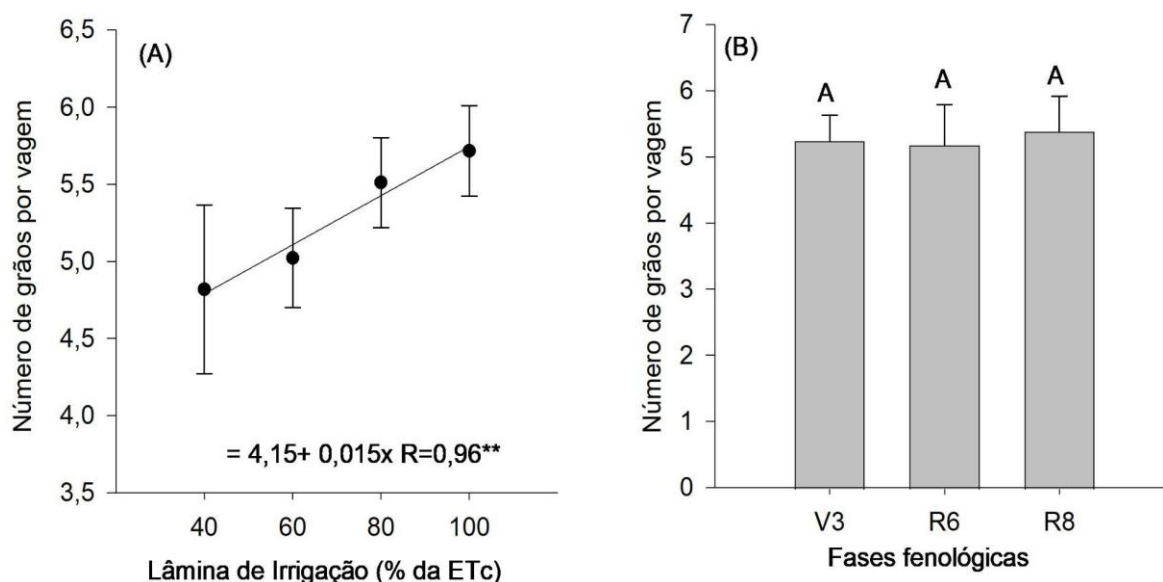


*** significativo a 0,1% de probabilidade pelo teste F **significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre as fases de restrição hídrica com a inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

Na variável número de grãos por vagem não houve interação entre as lâminas aplicadas com o estágio fenológico que foi imposto a restrição hídrica (Tabela 5). A ausência da interação entre os fatores sugere que ambos os tratamentos atuam de forma independente. Por meio da Figura 20a é possível observar que houve um crescimento linear da produção de grãos por vagem, em que a menor disponibilidade hídrica teve a menor quantidade de grãos, enquanto a irrigação plena proporcionou 30,4% mais grãos. Já em relação a implantação do déficit hídrico nas diferentes fases fenológicas, o número de grãos não diferiu, apresentando valor médio de 5 grãos por vagem (Figura 20b).

Figura 20 - Número de grãos por vagem para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos



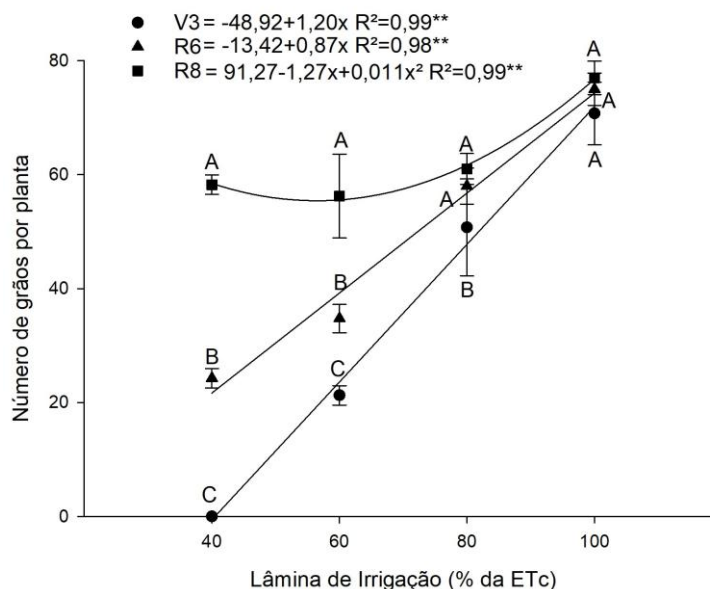
**significativo a 1% de probabilidade.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre as fases de restrição hídrica com a inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

O número de grãos por planta apresentou interação da irrigação e os estádios fenológicos (Tabela 5). O estágio V3 mostrou-se altamente sensível ao déficit hídrico, sendo que a lâmina de 40% da ETc resultou em menor número de grãos, e que a lâmina de 60%, 80% e 100% da ETc apresentaram 21, 50 e 70 grãos a mais, respectivamente (Figura 21). Em R6 o comportamento foi semelhante, porém ao comparar a lâmina de 40% da ETc, houve incremento de 24 grãos por planta, comparado a produção em V3 (Figura 21).

Por outro lado, quando a restrição hídrica foi imposta no estágio R8, a menor produção de grãos por planta obtida (54,6 g) foi obtida com o fornecimento de 57,7% da ETc (Figura 23) os danos foram menores, em que o menor regime hídrico proporcionou 24,4% menos grãos que a disponibilidade de irrigação de 100% da ETc, enquanto que no estágio V3 não teve produção com 40% da ETc e alcançou 70 grãos com 100% da Etc, e R6 quando submetido ao déficit de 40% da ETc proporcionou um número de grãos 68% menor que a irrigação plena, demonstrando que o estágio R8 possui maior resiliência à restrição hídrica.

Figura 21 - Número de grãos por planta para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos



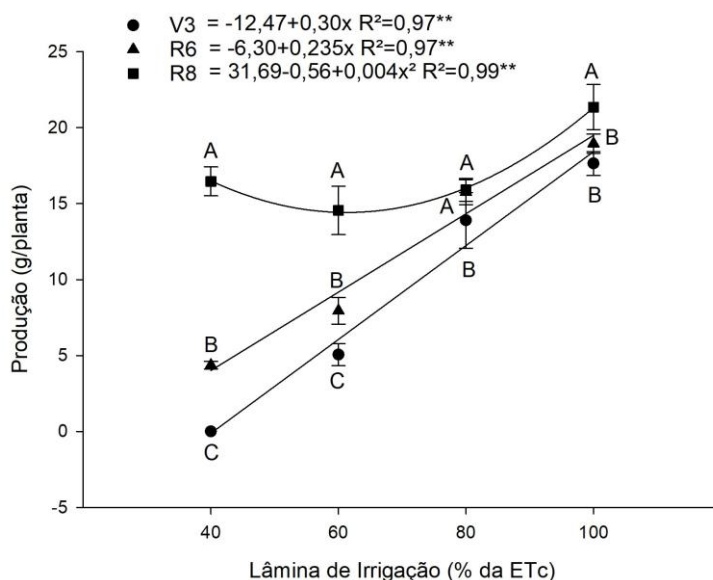
** significativo a 0,1% de probabilidade pelo teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre as fases de restrição hídrica com a inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

A produção de grãos por planta apresentou uma interação significativa entre os fatores avaliados (Tabela 5). Os resultados indicam que o estágio V3, sob déficit hídrico severo (40% da ETc), foi o mais afetado, não havendo produção de grãos. Por outro lado, nesse mesmo estágio, a irrigação com 80% e 100% da ETc resultou em uma produção 175,3% e 249,3% maior, respectivamente, em comparação à irrigação com 60% da ETc.

Assim também ocorreu para a restrição hídrica em R6, que apresentou comportamento linear, sendo que na lâmina de 80% da irrigação apresentou produção igual à observada no estágio R8 para a mesma lâmina. Em contrapartida, a restrição hídrica de 40, 60 e 80% da ETc em R8 não se diferiram entre si; enquanto, a lâmina de 100% da ETc se resultou em maior produção por planta ($21,4 \text{ g planta}^{-1}$) (Figura 22).

Figura 22 - Produção de grãos por planta para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos

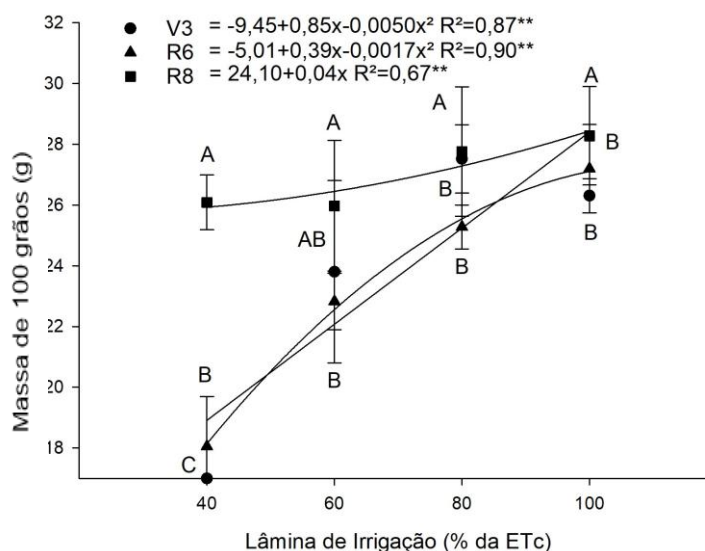


** significativo a 0,1% de probabilidade pelo teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre as fases de restrição hídrica com a inoculação com *B. aryabhatai* a 5% de probabilidade.

Houve interação entre os níveis de irrigação e os estádios fenológicos para variável massa de 100 grãos (Tabela 5). Observa-se que, em todos os estádios avaliados (V3, R6 e R8), o aumento da quantidade de água fornecida à planta resultou em incremento no peso dos grãos (Figura 23). No entanto, a resposta variou entre os diferentes estádios fenológicos, sendo o estágio V3 o mais sensível à irrigação, que refletiu em baixo massa de grãos quando submetidos a irrigação deficitária com 40% da ETc e seu ponto máximo ocorreu na lâmina de 85% da ETc (26,6 g). Enquanto em R6 o ponto máximo ocorreu em 100% da ETc, com aproximadamente 28 g em 100 grãos. Já no estágio R8, o peso dos grãos apresentou um crescimento linear em resposta ao aumento da disponibilidade hídrica, porém com menor sensibilidade aos diferentes regimes de irrigação, mantendo-se praticamente estável, variando de 26 g em 40% da ETc a 29 g em 100% da ETc.

Figura 23 - Massa de 100 grãos para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos

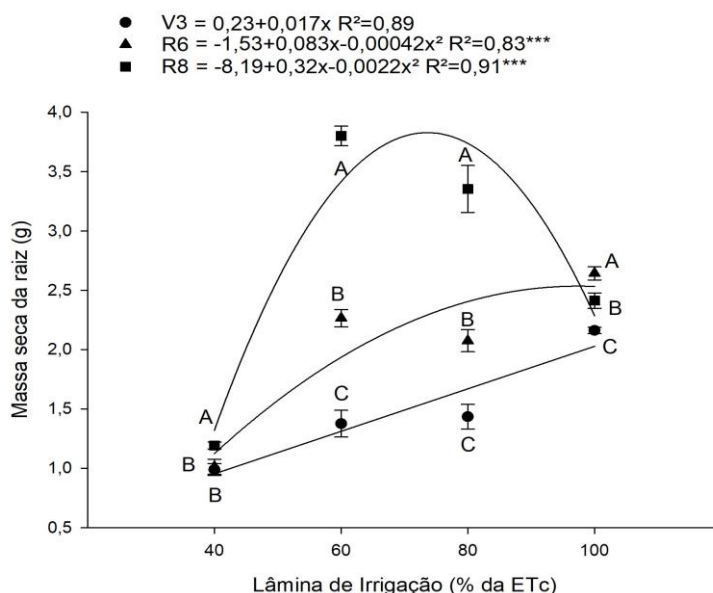


** significativo a 10% de probabilidade pelo teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre as fases de restrição hídrica com a inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

Para a massa seca das raízes, foi observado interação entre os fatores estudados (Tabela 5). No estágio V3, a massa seca de raízes foi menor que nos demais tratamentos para as lâminas de 60%, 80% e 100% da ETc. Este comportamento foi semelhante em R6, com maior massa seca das raízes, que apresentou um crescimento de acordo com a maior disponibilidade hídrica. No entanto, em R8, o comportamento diferiu, o acúmulo máximo de massa seca ocorreu em 70% da ETc (3,8 g), conforme o ajuste da regressão, e o aumento da lâmina de irrigação resultou em redução da massa seca da raiz para 2,4 g (Figura 24).

Figura 24 - Massa seca da raiz para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos



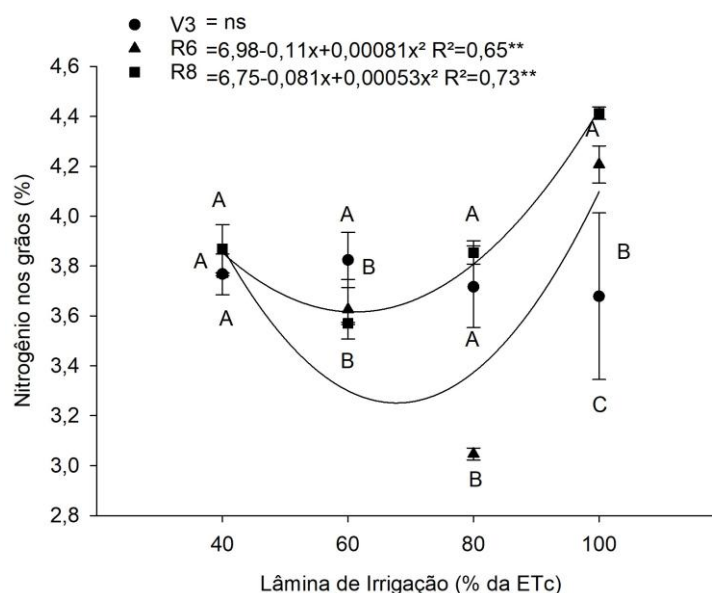
** significativo a 10% de probabilidade pelo teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre as fases de restrição hídrica com a inoculação com *B. aryabhatai* a 5% de probabilidade.

Os resultados evidenciam a interação da lâmina de irrigação com as fases fenológicas em que foi imposto o déficit hídrico para o teor de N (Tabela 5). Os resultados indicam que, no estágio fenológico V3, não houve diferenças significativas (*ns*) no teor de nitrogênio em função das lâminas de irrigação, contudo, nos estádios R6 e R8, foram observadas respostas significativas (Figura 25).

Nos estádios R6 e R8, verificou-se que os menores teores de nitrogênio não ocorreram nas condições de maior ou menor disponibilidade hídrica, mas sim em lâminas intermediárias, especificamente em 67,9% da ETc para o estágio R6 e 76,42% da ETc para o estágio R8, com um teor de 1,8% e 1,6% de N, respectivamente. Esses resultados evidenciam a importância da interação entre a disponibilidade hídrica e o estágio fenológico na dinâmica do N na planta, sugerindo que o *B. aryabhatai* pode ter um papel na mitigação dos efeitos do déficit hídrico, principalmente nas condições de maior restrição hídrica, como demonstrado na Figura 25.

Figura 25 - Teor de nitrogênio no grão para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos



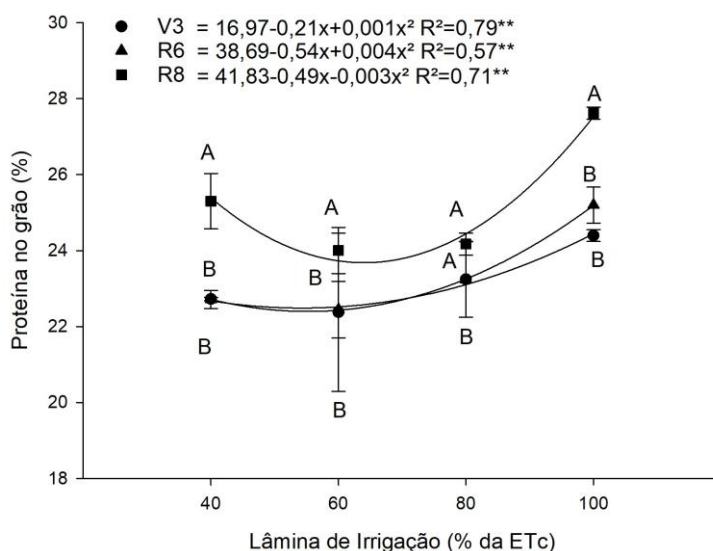
******significativo a 1% de probabilidade pelo teste F, *ns* não significativo.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre as fases de restrição hídrica com a inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

Os resultados da Tabela 5 evidenciam que há uma interação das lâminas de irrigação e os estádios fenológicos (V3, R6 e R8) no teor de proteína dos grãos do feijoeiro. Conforme a figura 26, no estágio fenológico V3, os valores de proteína variaram de forma menos pronunciada, sem apresentar diferenças tão acentuadas entre as lâminas de irrigação. O teor de proteína apresentou valores relativamente estáveis, com médias próximas de 24% em todas as condições avaliadas (Figura 26).

Em R6, o teor de proteína nos grãos foi menor em condições de lâminas intermediárias de irrigação (60% da ETc), com valores médios próximos de 22%, enquanto aumentou tanto sob déficit hídrico severo (40% da ETc), alcançando cerca de 24%, quanto com a maior lâmina de irrigação (100% da ETc), onde os valores chegaram a 25%. No estágio fenológico R8, os efeitos das lâminas de irrigação foram ainda mais acentuados. Os menores teores de proteína foram registrados em lâminas intermediárias (60% da ETc), com valores próximos de 21%, enquanto as maiores concentrações de proteína ocorreram sob 40% da ETc e máxima irrigação (100% da ETc), com valores alcançando cerca de 26% e 27%, respectivamente (Figura 26).

Figura 26 - Teor de proteína do grão para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos



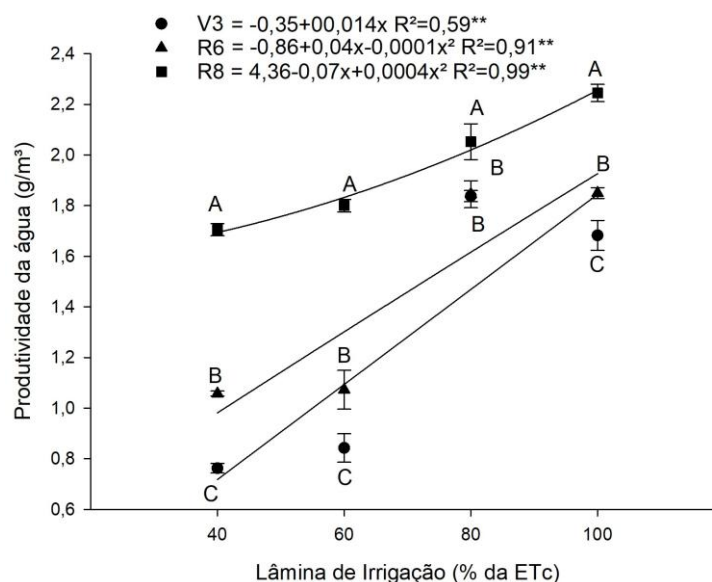
******significativo a 10% de probabilidade pelo teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre as fases de restrição hídrica com a inoculação com *B. aryabhatai* a 5% de probabilidade.

Houve interação das lâminas de irrigação e os estádios fenológicos (V3, R6 e R8) na produtividade da água de irrigação do feijoeiro (Tabela 5). Em V3 a produtividade da água foi mais sensível às lâminas de irrigação, com valores médios variando entre 0,8 e 1,2 g m⁻³. Já nos estádios reprodutivos (R6 e R8), a produtividade da água aumentou significativamente com o incremento da lâmina de irrigação, especialmente em R8 (Figura 27).

Em R6, a produtividade aumentou de forma mais expressiva, atingindo valores de até 1,8 g m⁻³ na maior lâmina (100% da ETc). Enquanto no estágio R8, os maiores valores de produtividade foram observados, alcançando até 2,4 g m⁻³ também na lâmina de 100% da ETc. A restrição hídrica (40% da ETc) resultou em uma redução significativa da produtividade da água em todos os estádios, evidenciando a importância da água para a cultura do feijoeiro.

Figura 27 - Produtividade da água de irrigação (gm^{-3}) para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos



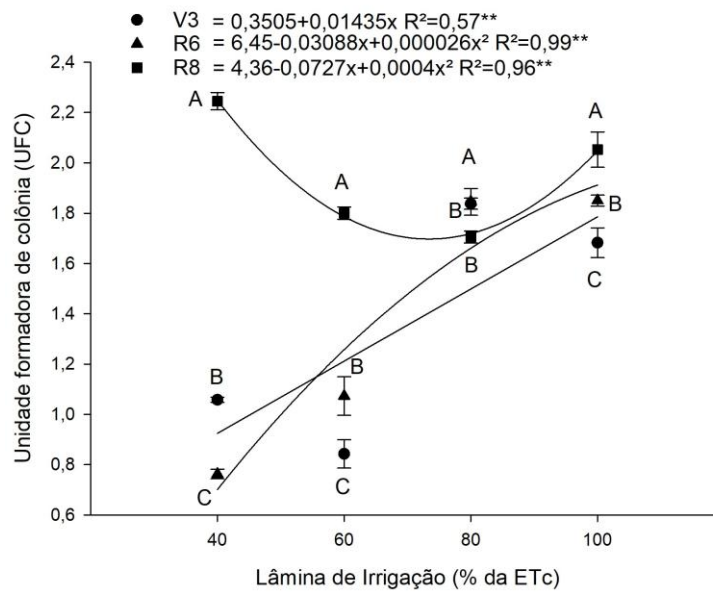
******significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre as fases de restrição hídrica com a inoculação com *B. aryabhattai* a 5% de probabilidade.

Os resultados demonstram que há uma interação das lâminas de irrigação e os estádios fenológicos (V3, R6 e R8) na unidade formadora de colônia (UFC) do feijoeiro (Tabela 5). No estágio fenológico V3, os valores de UFC aumentaram de forma linear com o incremento das lâminas de irrigação, atingindo um máximo de aproximadamente $1,6 \times 10^5$ UFC na maior lâmina (100% da ETc) (Figura 28).

Já para o estágio R6 foi possível observar que a maior lâmina proporcionou aproximadamente $2,2 \times 10^5$ UFC, sugerindo que a proliferação microbiana foi mais eficiente com níveis moderados de irrigação. No estágio R8, os valores de UFC foram os mais altos em todas as lâminas de irrigação, destacando-se a menor lâmina (40% da ETc), onde os valores ultrapassaram $2,2 \times 10^5$ UFC.

Figura 28 - Unidade formadora de colônia para os tratamentos com bioinsumo sob diferentes lâminas de irrigação e restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos (10^5)



****significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.**

Letras diferentes nas lâminas de irrigação indicam diferenças significativas entre as fases de restrição hídrica com a inoculação com *B. aryabhatai* a 5% de probabilidade.

5 DISCUSSÃO

O feijoeiro é uma cultura bastante sensível à falta de água, mas ainda se sabe pouco sobre quais fases do seu desenvolvimento são mais vulneráveis a esse estresse, especialmente quando se utiliza *Bacillus aryabhattai*. Essa falta de informação dificulta a adoção de estratégias mais eficientes de manejo. Os resultados desta pesquisa mostram que a inoculação com *B. aryabhattai* pode ser uma alternativa promissora para ajudar a planta a enfrentar períodos de escassez hídrica.

Essa bactéria promove o crescimento vegetal, contribui para a tolerância ao estresse hídrico e melhora a eficiência do uso da água, ajudando a preservar os processos fisiológicos das plantas mesmo em condições adversas (Melo, 2022). Assim, se torna importante conhecer a necessidade hídrica da cultura em cada período de seu desenvolvimento, pois isso poderá minimizar os efeitos que a irrigação deficitária pode causar, dessa maneira, o conhecimento técnico-científico contribui para o aumento do rendimento e qualidade da cultura (Fischer Filho *et al.*, 2014).

Os resultados mostram a sensibilidade do feijão à escassez hídrica, evidenciando os estádios mais críticos da cultura e como o *B. aryabhattai* é capaz de minimizar os danos causados às plantas. O efeito do *B. aryabhattai* em condições controladas de casa de vegetação, resultou em desempenho superior das plantas (Figura 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13 e 14).

Os resultados para a variável altura das plantas e inserção da primeira vagem foram significativamente influenciados pela interação entre os tratamentos, em que a inoculação com *B. aryabhattai* resultou em efeitos positivos nesses parâmetros, especialmente em condições de estresse hídrico (Figura 5 e 6).

Para a altura das plantas, era esperado crescimento linear com o avanço do ciclo e o aumento das lâminas de irrigação. Os resultados encontrados nesta pesquisa estão em consonância com o trabalho de Junior *et al.* (2024), que observou incremento na altura da soja inoculadas com *B. aryabhattai*. Este incremento na altura das plantas, pode estar relacionado com o papel do microrganismo na promoção do acúmulo de hormônios como as auxinas, que estimulam o alongamento celular, e o ácido abscísico, que regula a abertura e fechamento dos estômatos, conferindo maior tolerância ao estresse hídrico (Park *et al.*, 2017).

Isso também foi verificado para a altura de inserção da primeira vagem, onde a inoculação do *B. aryabhattai* proporcionou aumento em 15%, comparado às plantas

não inoculadas. Apesar disso, os valores médios obtidos (aproximadamente 10 cm) ficaram abaixo do ideal, que seria superior a 12 cm, o que compromete a eficiência da colheita mecanizada (Silva *et al.*, 2020). Essa limitação pode ser atribuída ao fato de o experimento ter sido conduzido em vasos, o que restringe o volume de solo explorado pelas raízes e conseqüentemente refletindo na altura das plantas.

Além do mais, a resposta do feijoeiro na supressão da irrigação nos diferentes estádios fenológicos influenciou no desenvolvimento das plantas. A resposta da planta quanto a altura das plantas e a altura de inserção da 1ª vagem variou ao longo do ciclo de cultivo, em que a supressão da irrigação no estágio inicial (V3) foi mais sensível ao déficit hídrico, enquanto no estágio mais avançado (R8) houve uma tendência de recuperação com o aumento da lâmina de irrigação.

Semelhante aos resultados desta pesquisa, tem-se o trabalho de Melo (2017), que realizou a restrição hídrica no feijoeiro em duas fases: fase vegetativa e fase reprodutiva, e como resultado teve que a altura de plantas teve maior influência quando submetida ao déficit hídrico durante a fase vegetativa, com redução de aproximadamente 10 cm, comparado ao déficit hídrico em fase reprodutiva. O déficit hídrico durante a fase inicial do desenvolvimento do feijoeiro provoca a redução do crescimento e da superfície fotossintética, que conseqüentemente, influencia no número de flores, de vagens e de grãos (Karamanos *et al.*, 1982).

A inoculação com *B. aryabhattai* nesta pesquisa resultou em aumento linear na massa seca da raiz à medida que aumentava a lâmina de irrigação, demonstrando que o bioinsumo favorece significativamente o desenvolvimento radicular em condições de boa disponibilidade hídrica. De acordo com Fuga (2021), esses resultados podem ser atribuídos à capacidade do *B. aryabhattai* de estimular o crescimento radicular e de pelos absorventes, por meio da produção de exopolissacarídeos, que auxiliam na retenção de água e de ACC deaminase, que reduz os efeitos negativos do estresse hídrico, promovendo sistema radicular mais robusto e funcional.

É importante destacar que, no estágio inicial (V3), a massa seca das raízes (MSR) foi significativamente menor, evidenciando a alta sensibilidade ao déficit hídrico severo nesta fase (Figura 24). Nos estádios R6 e R8, o comportamento foi distinto, em R6, o maior acúmulo foi observado com 100% da ETc; enquanto em R8 o maior valor ocorreu com 70% da ETc, seguido de redução na lâmina máxima (Figura 24). Essa diferença é explicada por Kasper *et al.* (2019) no qual pode estar associada às

mudanças na alocação de recursos metabólicos ao longo do ciclo fenológico, com maior necessidade de água e nutrientes para a formação de vagens e enchimento de grãos em R6, e ajustes metabólicos para a maturação em R8. Esse padrão reforça a importância de manejar adequadamente as lâminas de irrigação para maximizar o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, a absorção de recursos essenciais.

No entanto, para as plantas não inoculadas, as plantas submetidas ao déficit hídrico intermediário (60% e 80% da ETc) desenvolveram maior MSR porque, em condições de estresse hídrico, as plantas tendem a alocar mais recursos para o crescimento radicular, como estratégia adaptativa para explorar maior volume de solo em busca de água e nutrientes (Taiz *et al.*, 2017). Em contrapartida, as plantas inoculadas concentram mais energia em outras partes do seu desenvolvimento, devido à atenuação do estresse hídrico promovida pelo *B. aryabhattai*, reduzindo a necessidade de investir no crescimento radicular.

A análise dos fatores estudados revelou que tanto a disponibilidade hídrica quanto o uso do *Bacillus aryabhattai* foram essenciais para determinar a produtividade do feijoeiro, considerando os parâmetros número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV) e número de grãos por planta (NGP).

A disponibilidade hídrica influencia na floração, na formação das vagens e dos grãos. Este estudo evidenciou que as maiores disponibilidades de água resultaram em aumentos significativos nessas variáveis (Figuras 7, 8, 9 19, 20 e 21). A água é essencial para o transporte de nutrientes e para a manutenção das células, processos fundamentais para a formação de vagens saudáveis (Oliveira *et al.*, 2017).

Além disso, o *B. aryabhattai* pode ter auxiliado na melhoria da eficiência da planta em absorver nutrientes de forma que houve melhores resultados sob a sua inoculação. O *B. aryabhattai* é capaz de promover o desenvolvimento das plantas, graças à produção de fitohormônios como AIA, giberelina e ácido abscísico (ABA), estes hormônios que conferem crescimento as plantas e podem interferir nos componentes produtivos do feijoeiro (Lee *et al.*, 2012).

O efeito da redução da irrigação ocasionou perdas significativas nas variáveis mencionadas (Figuras 7, 8 e 9), o que pode estar associado a alterações nos processos fisiológicos essenciais das plantas, como fotossíntese, transporte de nutrientes e crescimento celular, o que resultam em perdas significativas nos parâmetros avaliados (Barbosa *et al.*, 2023). Além disso, o déficit hídrico induz a planta

ao estresse oxidativo, ocasionando o acúmulo de radicais livres que danificam as células (Santos e Carlesso, 2023).

Nas condições em que o experimento foi realizado o comportamento entre os períodos de déficit hídrico, foi possível observar que no estágio V3 as plantas são mais sensíveis ao déficit hídrico. Isso porque, esta fase é crítica para o estabelecimento do potencial produtivo da planta, pois é quando ocorre o maior desenvolvimento das raízes e acúmulo de nutrientes, que serão necessários para o crescimento e a formação dos grãos (Oliveira, 2018). Uma planta com sistema radicular bem desenvolvido terá maior capacidade de sobreviver a condições adversas, isso explica que a restrição durante o enchimento de grãos não influenciou drasticamente na produção de grãos.

Como visto anteriormente, os ganhos obtidos refletiram na produção e na massa de 100 grãos. O manejo da irrigação com a inoculação de *B. aryabhattai* promoveram melhoria na produção do feijoeiro, pois a disponibilidade hídrica adequada ao longo do ciclo da cultura favorece no desenvolvimento das plantas enquanto a inoculação do *B. aryabhattai* auxilia a formação de vagens cheias e em grãos mais pesados proporcionando o aumento da produtividade. Este estudo está em conformidade com a pesquisa de Fulaneti (2022), onde a aplicação do *B. aryabhattai* promoveu um incremento de aproximadamente 33% na produção da soja.

No trabalho de Carvalho (2023), no qual foi estudado a inoculação de diversos microrganismos em conjunto, incluindo o *B. aryabhattai*, obteve como resultado que o maior massa de 100 grãos foi de 19,11 g para a soja, com a coinoculação de *B. aryabhattai* e *Trichoderma harzianum*. Esse valor representou um aumento de 21,5% em relação ao controle, que não recebeu inoculação de microrganismos. Isso pode ter ocorrido graças ao potencial da bactéria em fortalecer as plantas, aumentar a disponibilidade e a absorção de nutrientes, fazendo com que a planta responde melhor ao estresse hídrico. Isso ocorre, em partes, devido a produção de exopolissacarídeos em formato de biofilme, que ajudam a reter água próxima às raízes, garantindo maior disponibilidade hídrica para as plantas (Melo, 2022).

Em conjunto da disponibilidade hídrica o momento ideal da irrigação também desempenha papel determinante no desenvolvimento da cultura (Pavani *et al.*, 2009). Os resultados destes experimentos evidenciaram que o déficit hídrico (40%, 60% e 80% da ETc) no estágio V3 impactou significativamente o desenvolvimento das plantas, com efeitos ainda mais acentuados sob déficit hídricos severos. A falta de

água durante essa fase pode ter desencadeado estresse oxidativo nas plantas, promovendo a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), que danificam células e comprometem processos fisiológicos essenciais (Gupta *et al.*, 2018). Esse cenário resultou em menor capacidade de retomada do crescimento, afetando negativamente o desempenho das plantas ao longo do ciclo.

A produtividade da água de irrigação (PAir) aumentou linearmente com a aplicação de lâminas de irrigação mais elevadas, independente da utilização do bioinsumo (Figuras 15). Contudo, é importante destacar que os resultados obtidos com a lâmina de 80% da ETc foram semelhantes aos da lâmina de 100% da ETc (Figura 29). Isso sugere que uma leve redução no volume de água aplicada não compromete a produtividade, indicando eficiência hídrica otimizada nessa condição.

Neste caso, foi evidente que a aplicação de 80% da ETc pode ser uma alternativa viável para economizar água, sem perdas significativas na produção. Estudos como o de Silva *et al.* (2020) mostram que os ajustes na irrigação podem manter ou até melhorar a produtividade agrícola, de forma que ao diminuir a lâmina de irrigação, sem comprometer a produção do feijão, pode influenciar significativamente na economia de água e na economia financeira.

Em consonância, o *B. aryabhatai* atuou, de forma independente, melhorando a eficiência da água em comparação às não inoculadas, especialmente no estágio R8. Esse efeito pode ser explicado pelo fato de a bactéria ser estudada como uma estratégia para atenuar os efeitos da escassez hídrica e melhorar a eficiência de água pelas culturas (Melo, 2022). Isso sugere que a aplicação do *B. aryabhatai* com a irrigação de 80% da ETc, poderá ser uma estratégia eficaz para aumentar a produtividade e consumir menos água.

O teor de N nas plantas está diretamente relacionado à síntese de proteínas, uma vez que N é um componente essencial para a formação dos aminoácidos, estes que compõem as proteínas (Taiz *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2020). Nos resultados obtidos, a interação entre as lâminas de irrigação e o uso do *B. aryabhatai* se mostraram importantes para o teor de N e proteína dos grãos (Figuras 13 e 14).

As plantas não inoculadas tiveram redução no teor de nitrogênio sob déficit hídrico. Essa redução pode ter levado à diminuição da síntese proteica, já que os dois parâmetros estão diretamente ligados. Além disso, plantas sob déficit hídrico muitas das vezes possuem dificuldade para absorver nutrientes e até mesmo associar-se às

bactérias que realizam a fixação biológica de nitrogênio, impactando negativamente nos resultados, conforme visto nesta pesquisa.

No entanto, nas plantas inoculadas com o *B. aryabhattai*, os teores de nitrogênio permaneceram estáveis independente da lâmina de irrigação, em que o microrganismo pode conferir a planta maior tolerância ao estresse hídrico, de forma que não comprometa a FBN e a absorção de N mineral fornecido por adubação ou mesmo presente no solo, mesmo em condições de pouca água (Melo, 2022). Essa estabilidade do teor de nitrogênio pode ter favorecido, ou até mesmo aumentado, a síntese de proteínas, como visto na Figura 16. Neste trabalho, as plantas inoculadas e com lâmina de 40% ETc tiveram os mesmos resultados que as inoculadas com 100% da ETc para o teor de proteína. Isso pode ser explicado pelo fato de que a presença do bioinsumo fez com que as plantas se tornassem capazes de utilizar o nitrogênio de forma eficiente, mesmo em condições extremas de irrigação (Deng *et al.*, 2017).

Considerando os estádios fenológicos (Figuras 25 e 26), no estágio V3, a demanda por nitrogênio era baixa, pois as plantas ainda estavam iniciando seu desenvolvimento, dessa maneira não houve grandes variações no teor de N e proteína em função da lâmina de irrigação, em contrapartida, é nesse estágio que se inicia a formação mais intensiva dos nódulos. Em R6, menores teores de N nas lâminas intermediárias (67,90% da ETc) resultaram em menores teores de proteína, indicando que a disponibilidade de nitrogênio limitou a produção proteica. Já em R8, tanto o déficit hídrico severo (40% da ETc), quanto a irrigação máxima (100% da ETc) houve maior teor de proteína e nitrogênio. Os maiores teores de N em plantas sob déficit severo podem ter ocorrido devido ao fato das plantas ativarem mecanismos de defesa em situações de estresse, como a síntese de proteínas de choque térmico (HSPs), e também por aumentarem a expressão de enzimas relacionadas ao metabolismo do nitrogênio, como a glutamina sintetase, contribuindo para o aumento do conteúdo de proteína nos grãos (Hu *et al.*, 2022).

Em relação às unidades formadoras de colônias (UFC), houve crescimento linear em função das lâminas de irrigação, indicando que a disponibilidade hídrica influencia positivamente o desenvolvimento microbiano no solo. Conforme Ren *et al.*, (2018), isso ocorre porque a água é essencial para o transporte de nutrientes, a manutenção da atividade metabólica e a mobilidade dos microrganismos, além de contribuir para a estabilidade da estrutura do solo, criando um ambiente mais favorável

à colonização microbiana. A inoculação com *Bacillus aryabhattai* foi determinante para aumentar o número de colônias, demonstrando sua capacidade de promover comunidades microbianas benéficas.

Entre os estádios fenológicos em que foi imposto o déficit hídrico, o R8 se destacou, em que proporcionou valores superiores a $2,4 \times 10^5$ UFC na lâmina máxima de irrigação (100% da ETc). Esse resultado reflete o papel da água no solo, como fator para mobilidade, atividade metabólica e formação de biofilmes através do conjunto com a inoculação, que são essenciais para a colonização eficiente da rizosfera. Estudos de Kasper *et al.* (2019) e Saad; Hirt Eida; Hirt (2020) confirmam que ambientes mais úmidos favorecem a interação planta-microrganismos, que potencializa os benefícios promovidos pelas rizobactérias.

O aumento de colônias bacterianas pode ter ocorrido devido ao fato do *B. aryabhattai* atuar como um microrganismo facilitador, o que modifica o ambiente da rizosfera para favorecer as comunidades bacterianas que promovem o crescimento das plantas. Esse fenômeno está relacionado à capacidade da bactéria de solubilizar nutrientes, como o P, por meio dos ácidos orgânicos e liberar metabólitos secundários, que atraem outras rizobactérias benéficas, resultando em um solo com maior diversidade microbiana (Song *et al.*, 2022).

6 CONCLUSÕES

O presente estudo sobre o manejo da irrigação em diferentes fases fenológicas do feijoeiro, associado à inoculação de *Bacillus aryabhattai*, evidencia a influência direta da disponibilidade hídrica e do uso de bioinsumos no desenvolvimento e na produtividade da cultura. Os resultados demonstraram que a restrição hídrica no estágio inicial (V3) impactou significativamente o rendimento da cultura, reduzindo a produção de grãos em até 68% quando submetida a apenas 40% da evapotranspiração da cultura (ETc).

A produção de grãos por planta variou conforme os níveis de irrigação e o estágio fenológico. No estágio R8, o fornecimento de 100% da ETc resultou na maior produtividade, atingindo 21,4 g por planta. A massa de 100 grãos também foi influenciada pelos regimes hídricos, oscilando entre 26 g (40% da ETc) e 29 g (100% da ETc), com o maior acúmulo no estágio R6 sob irrigação plena. O número de vagens por planta seguiu um padrão de incremento linear com o aumento da disponibilidade hídrica, sendo o estágio R8 o momento em que foram observados os melhores resultados.

A inoculação com *Bacillus aryabhattai* proporcionou benefícios adicionais à cultura do feijoeiro, favorecendo o desenvolvimento radicular e aumentando a tolerância ao déficit hídrico. As plantas inoculadas apresentaram um acréscimo na massa de 100 grãos de 9,42% sob 60% da ETc e de 14,36% sob 100% da ETc, evidenciando a eficácia do bioinsumo na mitigação dos impactos da restrição hídrica. Além disso, a eficiência do uso da água foi otimizada, uma vez que a lâmina de 80% da ETc apresentou produtividade semelhante à de 100%, indicando a possibilidade de redução no consumo hídrico sem prejuízo significativo à produção.

Em síntese, a integração de estratégias de manejo hídrico eficiente e a utilização de *Bacillus aryabhattai* como bioinsumo configura uma ferramenta promissora para a produção do feijoeiro em condições de restrição hídrica. Esses resultados ajudam a promover práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis, contribuindo para aumentar a produtividade dos agricultores e preservar os recursos naturais.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, Richard G. Crop evapotranspiration. **FAO irrigation and drainage paper**, v. 56, p. 60-64, 1998.
- ALOO, B. N.; TRIPATHI, V.; MAKUMBA, B. A.; MBEGA, E. R. Plant growth-promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1002448, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.1002448. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.1002448/full>. Acesso em: 20 dez. 2024
- AMUDHA, J.; BALASUBRAMANI, G. Recent molecular advances to combat abiotic stress tolerance in crop plants. **Biotechnol. Mol. Biol. Rev**, v. 6, n. 2, p. 31-58, 2011. Disponível em: https://academicjournals.org/article/article1381502214_Amudha%20and%20Balasubramani.pdf. Acesso em: 15 out. 2024
- BACKER, R.; ROKEM, J. S.; ILANGUMARAM, G.; LAMONT, J.; PRASLICKOVA, D.; RICCI, E.; ... SMITH, D. L. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. **Frontiers in plant science**, v. 9, p. 1473, 2018. doi: 10.3389/fpls.2018.01473. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2018.01473/full>. Acesso em: 14 out. 2024
- BACKES, R. L. A soberania do feijão. **Agropecuária Catarinense**, v. 27, n. 1, p. 18-20, 2014.
- BARBOSA, M. R.; DE SOUZA, L. M; NASCIMENTO, K. R. P. ROS e o estresse oxidativo por seca em plantas. **Multidisciplinary Sciences Reports**, v. 3, n. 3, 2023. DOI: <https://doi.org/10.54038/ms.v3i3.44>. Disponível em: <https://multidisciplinarysciences.org/multidisciplinarysciences/article/view/44>. Acesso em: 15 nov. 2024
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de irrigação. –Viçosa: Ed. **UFV**. 625p, 2006.
- BEZERRA, L. M. C.; FREDO, C. E.; CORREIRA, G. G.; SPATTI, A. C.; CHIORATO, A. F. Analysis of the bean agricultural production system in the state of São Paulo from a survey of agricultural production areas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, p. e276881, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2023.276881>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/F5QCXVcScsKgskpXyRScDGs/abstract/?lang=en>. Acesso em: 15 out. 2024

BHADRECHA, P.; SINGH, S.; DWIBEDI, V. A plant's major strength in rhizosphere: the plant growth promoting rhizobacteria. **Archives of Microbiology**, v. 205, n. 5, p. 165, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00203-023-03502-2>. Acesso em: 23 out. 2024

BONILLA BUITRAGO, R. R.; GONZÁLEZ DE BASHAN, L. E.; PEDRAZA, R. O.; ESTRADA BONILLA; G. A.; PARDO DÍAZ, S.; MAZO MOLINA, D. C.; ...; RAMÍREZ GÓMEZ, M. M. Bactérias promotoras de crescimento vegetal em sistemas de agricultura sostenible. 2021. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-bac-20.500.12324-36976/Description>. Acesso em: 22 out. 2024

BRITO, R. R.; GRASSI FILHO, H.; SAAD, J. C. C.; OLIVEIRA, S. R. M. Produtividade do feijoeiro sob diferentes potenciais matriciais e fatores de depleção da água no solo. **Nativa**, v. 03, n. 02, p. 109-114, 2015. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v3i2.2039>. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/2039>. Acesso: 30 out. 2024

CARVALHO, J. D. E. Resposta do feijoeiro comum à irrigação com déficit, sob semeadura direta. 2013.

CARVALHO, R. C. S. Co-inoculação com microrganismos promotores de crescimento de plantas no desenvolvimento e produtividade da soja. 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/4eecc468-3811-4007-bf84-3395dff88f93/content>. Acesso em: 30 out. 2024

COELHO, C.; VALCACER-COELHO. O padrão do consumidor de arroz e feijão no estado de Goiás. **Arroz e feijão**, p. 71, 2021.

COLOMBO, C.; PALUMBO, G.; HE, J. Z.; PINTON, R.; CESCO, S. Review on iron availability in soil: interaction of Fe minerals, plants, and microbes. **Journal of soils and sediments**, v. 14, p. 538-548, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11368-013-0814-z>. Acesso: 12 nov. 2024

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Produção De Grãos – Feijão, Milho E Soja. Caderno Setorial Etene. v. 4, p.1-11, 2020. Disponível em: https://www.melhorparaasuaempresa.com.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1038/1/2018_CDS_51.pdf. Acesso em: 10 nov. 2024

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Perspectivas para a agropecuária. Vol. 9, safra 2021/22, Edição Grãos. Brasília: 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/perspectivaspara-a-agropecuaria>. Acesso em: 27 nov. 2024.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Safra 2024/25, 1º levantamento. Brasília: 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 10 nov. 2024.

DENG, C.; ZHANF, N.; LIANG, X.; HUANG, T.; LI, B. *Bacillus aryabhattai* LAD impacts rhizosphere bacterial community structure and promotes maize plant growth. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 102, n. 14, p. 6650-6657, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.12032>. Disponível: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jsfa.12032>. Acesso em: 1 nov. 2024

DOMENE, S.; GHEDINI, N. S. R. V.; STELUTI, J. Importância nutricional do arroz e do feijão. **Arroz e feijão: tradição e segurança alimentar**, p. 147-163, 2021.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos, 3ª ed., Rio de Janeiro, 2013. 353 p.

FAOSTAT. Crops. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 16 out. 2024.

FERNÁNDEZ, J.E.; ALCÓN, F.; DÍAZ-ESPEJO, A. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. **Agricultural water management**, v. 237, p. 106074, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106074>. Disponível: <https://digital.csic.es/handle/10261/206061>. Acesso em: 3 nov. 2024

FERRARI, E.; PAZ, A.; SILVA, A. C. Déficit hídrico no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas no Mato Grosso. **Nativa**, v. 3, n. 1, p. 67-77, 2015. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v3i1.1855>. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/1855>. Acesso em: 3 nov. 2024

FISCHER FILHO, J. A.; ZOCOLER, J. L.; POLONI, N. M.; FURLANI JUNIOR, E. Evapotranspiração e disponibilidade hídrica em feijoeiro (*phaseolus vulgaris*) sob estresse hídrico. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, Fortaleza, v. 8, n. 5, p. 366-374, 2014. DOI: [http://dx. doi.org/10.7127/rbai.v8n500232](http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v8n500232). Disponível em: https://inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/232/pdf_188. Acesso em: 03 nov. 2024

FUGA, C. Pesquisa e desenvolvimento Nooa Brasil, AURAS. Quarto Centenário, PR, 20 ago. 2021, p.27. Acesso em: 08 ago. 2024

FULANETI, S, F. Opções de bactérias na coinoculação na cultura da soja. Universidade Federal de Santa Maria, p. 44-47, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/25956/>

DIS_PPGAGRONOMIA_2022_FULANETI_FERNANDO.pdf?sequence=1. Acesso em: 15 mai. 2024

GARCIA-CAPARROS, P.; DE FILIPPIS, L.; GUL, A. Oxidative stress and antioxidant metabolism under adverse environmental conditions: a review. **The Botanical Review**, v. 87, p. 421-466, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12229-020-09231-1>. Acesso em: 13 jun. 2024

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 909-930, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0981942810001798>. Acesso em: 16 jun. 2024

GITZ, V.; MEYBECK, A.; LIPPER, L.; YOUNG, C. D.; BRAATZ, S. Climate change and food security: risks and responses. **Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Report**, v. 110, n. 2, p. 3-36, 2016. Disponível em: https://ciheam.org/uploads/attachments/250/06_Meybeck_WL_37.pdf. Acesso em: 30 mai. 2024

GUPTA, D. K.; PALMA, J. M.; CORPAS, F. J. **Antioxidants and antioxidant enzymes in higher plants**. Berlin: Springer International Publishing, 2018.

HARTMANN, C.; SIEGRIST, M. Consumer perception and behaviour regarding sustainable protein consumption: A systematic review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 61, p. 11-25, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.12.006>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224416302904?casa_token=_h0Wp9eiTgQAAAAA:egDpZPjx0XiRX7bgCad6yTHAygZuxDFaq1yOYBosg0j4r_zccfjLeQVdZgq2JxhD5NrDJgFN7wl. Acesso em: 24 nov. 2024

HU, C.; YANG, J.; QI, Z.; WU, H.; WANG, B.; ZOU, F.; ...; LIU, Q. Heat shock proteins: Biological functions, pathological roles, and therapeutic opportunities. **MedComm**, v. 3, n. 3, p. e161, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/mco2.161>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/mco2.161>. Acesso em: 24 nov. 2024

JUNIOR, C. F. G.; SIMONETTI, A. P. M. M.; VALLE, K. J. S. DO. Tratamento de sementes com a utilização de *Bacillus aryabhattai* em diferentes doses na cultura da soja. In: Ciências agrárias: práticas e inovações. **Atena Editora**. p. 91–102, 2024. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.6492413046>. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/post/tratamento-de-sementes-com-a-utilizacao->

de-bacillus-aryabhattai-em-diferentes-doses-na-cultura-da-soja. Acesso em: 02 jan. 2025.

JUSTINO, L. F.; JÚNIOR, J. A.; BATTISTI, R.; HEINEMANN, A. B.; LEITE, C. V.; EVANGESLISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Assessment of economic returns by using a central pivot system to irrigate common beans during the rainfed season in Central Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 224, p. 105749, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105749>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377419308637?casa_token=-tL1G1-wQ7IAAAAAA:gxYuEgrxE6rEsyCJMnSrvllsOAaPlcOWAxCGb2yiLSsgQLjpC3lgy-VJ5noqc8f3cl2FfVHy33E. Acesso em: 23 dez. 2024

KARAMANOS, A. J.; ELSTON, J.; WADSWORTH, R. M. Water stress and leaf growth of field beans (*Vicia faba* L.) in the field: water potentials and laminar expansion. *Annals of Botany*, v. 49, n. 6, p. 815-826, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a086308>. Disponível em: <https://academic.oup.com/aob/article-abstract/49/6/815/147109?login=false>. Acesso em 2 jan. 2025

KASPER, S.; CHRISTOFFERSEN, B.; SOTI, P.; RACELIS, A. Abiotic and biotic limitations to nodulation by leguminous cover crops in South Texas. *Agriculture*, Brasília, v. 9, n. 10, p. 1-20, sep. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture9100209>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/9/10/209>. Acesso em: 21 dez. 2024

KESWANI, C.; PRAKASH, O.; BHARTI, N.; VÍLCHEZ, J. I.; SANSINEAE, E.; LALLY, R. D. Re-addressing the biosafety issues of plant growth promoting rhizobacteria. **Science of the Total Environment**, v. 690, p. 841-852, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.046>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719331596?casa_token=FZDTATX5kz0AAAAA:gZQLFMNiVSkFKxRj4AxZkdopcbaRp72Cyi10dTDd2Uo9PMG1dqrXJ7gNGLv8FTfRWj6hCkSEAw. Acesso em: 13 dez. 2024

KRUL, E. S. Calculation of nitrogen-to-protein conversion factors: A review with a focus on soy protein. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 96, n. 4, p. 339-364, 2019.

KUMAWAT, K. C.; RAZDAN, N.; SAHARAN, K. Rhizospheric microbiome: Bio-based emerging strategies for sustainable agriculture development and future perspectives. **Microbiological Research**, v. 254, p. 126901, 2022. DOI: [10.1016/j.micres.2021.126901](https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126901). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S094450132100207X>. Acesso em: 13 dez. 2024

LEACH, J. E.; TRIPLETT, L. R.; ARGUESO, C. T.; TRIVEDI, P. Communication in the phytobiome. **Cell**, v. 169, n. 4, p. 587-596, 2017. DOI: 10.1016/j.cell.2017.04.025. Disponível em: [https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674\(17\)30476-2](https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674(17)30476-2). Acesso em 15 jun. 2024

LEE, S.; KA, J. O.; SONG, H. G. Growth promotion of *Xanthium italicum* by application of rhizobacterial isolates of *Bacillus aryabhattai* in microcosm soil. **The Journal of Microbiology**, v. 50, p. 45-49, 2012. DOI: 10.1007/s12275-012-1415-z. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/S12275-012-1415-Z>. Acesso em: 14 jun. 2024

LIMA, M. F. P.; DOMBROSKI, J. L. D.; FREITAS, F. C. L.; PINTO, J. R. S.; SILVA, D. V. Weed growth and dry matter partition under water restriction. **Planta Daninha**, v. 34, n. 04, p. 701-708, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582016340400010>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/7RwNHdkDTsS8JC6wWF7WVxN/?lang=en>. Acesso em: 16 jun. 2024

MADIGAN, M. T., MARTINKO, J., M., PARKER, J. **Microbiologia de Brock, São Paulo: Prentice Hall**, 2004.

MAGRINI, M. B.; CABANC, G.; LASCIALFARI, M.; PLUMECOCQ, G.; AMIOT, M. J.; ANTON, M.; WERY, J. Peer-reviewed literature on grain legume species in the WoS (1980–2018): A comparative analysis of soybean and pulses. **Sustainability**, v. 11, n. 23, p. 6833, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11236833>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/23/6833>. Acesso em 13 jun. 2024

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas; princípios e aplicações. 1989.

MALUSA, E.; VASSILEV, N. A contribution to set a legal framework for biofertilisers. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 98, p. 6599-6607, 2014. DOI: 10.1007/s00253-014-5828-y. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-014-5828-y>. Acesso em: 15 jan. 2025

MELO, M. R. M. Déficit hídrico aplicado em cultivares de feijão, nas fases vegetativa e reprodutiva, associado com o uso de água residuária. 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/7f76e978-ab03-4516-886e-dda5c89242da>. Acesso em: 13 dez. 2024

MELO, I. S. Inoculante à base de *Bacillus aryabhattai* para mitigação do estresse hídrico. **Pesquisas, avanços e futuro : o crescimento da Fixação Biológica de nitrogênio (FBN) e o empenho de pesquisadores e empresas na busca pela sustentabilidade agrícola**, 2022. p. 85. Acesso em: 26 jun. 2024

MENDOZA-LABRADOR, J.; ROMERO-PERDOMO, F.; ABRIL, J.; HERNÁNDEZ, J. P. URIBE-VÉLEZ, D. BUITRAGO, R. B. *Bacillus* strains immobilized in alginate macrobeads enhance drought stress adaptation of guinea grass. **Rhizosphere**, v. 19, p. 100385, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100385>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452219821000811?casa_token=m7wl8byHvg0AAAAA:hd3WEel3JceehQY3l3-poO46klMMPzjYhIHF6klL01QBaRJ7kua2jfQkiMsl3PAJBzmx-rkQ9x4k. Acesso em: 15 dez. 2024

MEHLICH, A. Determination of cation-and anion-exchange properties of soils. **Soil science**, v. 66, n. 6, p. 429-446, 1948. Disponível em: https://journals.lww.com/soilsci/citation/1948/12000/determination_of_cation__and_anion_exchange.4.aspx. Acesso em: 15 jan. 2025

MITTER, E. K.; TOSI, M.; OBREGÓN, D.; DUNFIELD, K. E.; GERMINDA, J. J. Rethinking crop nutrition in times of modern microbiology: innovative biofertilizer technologies. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, p. 606815, 2021. DOI: 10.3389/fsufs.2021.606815. Disponível: <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2021.606815/full>. Acesso em: 10 dez. 2024

MONTEIRO, J. G.; CRUZ, F. J. R.; NARDIN, M. B.; SANTOS, D. M. M. D. Crescimento e conteúdo de prolina em plântulas de guandu submetidas a estresse osmótico e à putrescina exógena. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 49, n. 01, p. 18-25, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000100003>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/XkNBQjh6kJksZWFRvF39sCr/?lang=pt>. Acesso em: 23 nov. 2024

MORENO-GALVÁN, A.; ROMERO-PERDOMO, F. A.; ESTRADA-BONILLA, G.; MENESES, C. H. S. G.; BONILLA, R. R. Dry-caribbean *Bacillus* spp. strains ameliorate drought stress in maize by a strain-specific antioxidant response modulation. **Microorganisms**, v. 8, n. 6, p. 823, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms8060823>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2607/8/6/823>. Acesso em: 23 nov. 2024

MUSILOVA, L.; RIDI, J.; POLIVKOVA, M.; MACEK, T.; UHLIK, O. Effects of secondary plant metabolites on microbial populations: changes in community structure and metabolic activity in contaminated environments. **International journal of molecular sciences**, v. 17, n. 8, p. 1205, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms17081205>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/17/8/1205>. Acesso em: 25 nov. 2024

NELSON, E. B. The seed microbiome: origins, interactions, and impacts. **Plant and Soil**, v. 422, p. 7-34, 2018. doi: 10.1007/s11104-017-3289-7. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-017-3289-7>. Acesso em: 13 nov. 2024

OLIVEIRA, A. E. S.; SIMEÃO, M. MOUSINHO, F. E. P.; GOMES, R. L F. Desenvolvimento do feijão-fava (*Phaseolus lunatus* L.) sob déficit hídrico cultivado em ambiente protegido. **Solos**, v. 1, p. 143-151, 2014. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2014.1867>. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1867>. Acesso em: 14 nov. 2024

OLIVEIRA, A. L.; SANTOS, R. M.; FERREIRA, M. Efeito do estresse hídrico na produção de feijoeiro. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 23, n. 2, p. 120-128, 2017.

OLIVEIRA, L. F. C.; OLIVEIRA, M. D. C.; WENDLAND, A.; HEINEMANN, A. B.; GUIMARÃES, C. M.; FERREIRA, E. D. B.; ...; DA SILVA, S. C. Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos. 2018. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-infoteca-e-doc-1098515/Description>. Acesso em: 15 out. 2024

OLIVEIRA, A. L. P.; SANTOS, J. P.; SILVA, G. F.; PUTTI, F. F. Uso de bioinsumos como possibilidade de atenuação dos efeitos do estresse hídrico. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 22, n. 9, p. e6566-e6566, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n9-039>. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/6566>. Acesso em: 12 set. 2024

PARK, Y. G., MUN, B. G., KANG, S. M., HUSSAIN, A., SHAHZAD, R., SEO, C. W., ...; YUN, B. W. *Bacillus aryabhattai* SRB02 tolerates oxidative and nitrosative stress and promotes the growth of soybean by modulating the production of phytohormones. **PLoS One**, v. 12, n. 3, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173203>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0173203>. Acesso em: 12 set. 2024

PAVANI, L. C.; LOPES, A. S.; PEREIRA, G. T. Desenvolvimento da cultura do feijoeiro submetida a dois sistemas de manejo de irrigação e de cultivo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.31, p.453-459, 2009. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v31i3.621>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asagr/a/df97D5dvtn76TMkTd4CyrRt/?lang=pt>. Acesso: 14 jun. 2024

PEREIRA, H. S.; ALVARES, R. C.; MELO, L. C.; COSTA, A. F. D.; CARVALHO, H. W. L. D. Culinary and nutritional quality of common bean lines with Carioca grain type and interaction with environments. **Revista Ceres**, v. 64, n. 2, p. 159-166, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764020008>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rceres/a/RDyPD8wRddybvMpdfd4R3wD/?lang=en>. Acesso em: 10 dez. 2024

POLANIA, J.; POSCHENRIEDER, C.; RAO, I.; BEEBE, S. Estimation of phenotypic variability in symbiotic nitrogen fixation ability of common bean under drought stress using ^{15}N natural abundance in grain. **European Journal of Agronomy**, v. 79, p. 66-73, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.05.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030116301125>. Acesso em: 23 set. 2024

POZZEBON, B. C.; SANTOS, dos J. Bactérias endofíticas: passado, presente e perspectivas visando um futuro sustentável. **Revisão Anual de Patologia de Plantas**, v. 24, p. 115-129, 2016.

REN, C.; CHEN, J.; LU, X.; DOUGHTY, R.; ZHAO, F.; ZHON, Z.; REN, G. Responses of soil total microbial biomass and community compositions to rainfall reductions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 116, p. 4–10, 2018.

ROBINSON, G. H. J.; BALK, J.; DOMONEY, C. Improving pulse crops as a source of protein, starch and micronutrients. **Nutrition bulletin**, v. 44, n. 3, p. 202-215, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/nbu.12399>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/nbu.12399>. Acesso em: 13 out. 2024

SAAD, M.; EIDA, A. A.; HIRT, H Tailoring plant-associated microbial inoculants in agriculture: a roadmap for successful application. *Journal of experimental botany*, Oxford, v. 71, n. 13, p. 3878-3901, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa111>. Disponível em: <https://academic.oup.com/jxb/article/71/13/3878/5802757?login=false>. Acesso em: 23 nov. 2024

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v2n3p287-294>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/sptHSNGpfSCjGZ656yBJwnN/?lang=pt>. Acesso em: 10 nov. 2024

SCHILTZ, S.; GAILLARD, I.; PAWLICKI-JULLIAN, N.; THIOMBIANO, B.; MESNARD, F.; GONTIER, E. A review: what is the spermosphere and how can it be studied?. **Journal of Applied Microbiology**, v. 119, n. 6, p. 1467-1481, 2015. DOI: 10.1111/jam.12946. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26332271/> . Acesso em: 10 dez. 2024

SILVA, J. F. B. **Estresse hídrico nos diferentes estágios fenológicos do feijão-fava (*Phaseolus lunatus* L.)**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Agronomia, Universidade Federal do Alagoas, p. 27, 2019.

SILVA, J. G.; NASCENTE, A. S.; MACHADO, A. L. T. Colheita mecanizada do feijoeiro: passado, presente e futuro. Brasília: Embrapa, 2020. (Circular Técnica, n.92). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1127024>. Acesso em: 23 nov. 2024

SMITH, M. R.; VEMEKLAAAS, E.; POLANIA, J.; RAO, I. M.; BEEBE, S. E.; MERCHANT, A. Field drought conditions impact yield but not nutritional quality of the seed in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **PLoS One**, v. 14, n. 6, p. e0217099, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217099>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0217099>. Acesso em: 27 out. 2024

SONG, C.; WANG, W.; GAN, Y.; WANG, L.; CHANG, X.; WANG, Y.; YANG, W. Growth promotion ability of phosphate-solubilizing bacteria from the soybean rhizosphere under maize–soybean intercropping systems. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 102, n. 4, p. 1430-1442, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11477>. Disponível em: https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jsfa.11477?casa_token=8vIDsTGZDXcAAAAA%3A8x7Sg1Rri0hd_Htu7H1BY7iUSX2zPicrkYKyfVHxNF78IO7i3mGvAhovL78XbOU6NR7KRslh3lxDzres. Acesso em: 21 dez. 2024

SOUSA, I. S. F., FERREIRA, C. M. Aspectos histórico-culturais do arroz e do feijão na sociedade brasileira. **Arroz e feijão**, p. 47, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Ferreira-10/publication/354587015_Arroz_e_feijao_tradicao_e_seguranca_alimentar/links/6141166d578238365b0b1669/Arroz-e-feijao-tradicao-e-seguranca-alimentar.pdf#page=48. Acesso em: 30 dez. 2024

SUN, Y., WANG, M., MUR, L. A. J., SHEN, Q.; GUO, S. Unravelling the roles of nitrogen nutrition in plant disease defences. **International journal of molecular sciences**, v. 21, p. 572, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21020572>. Disponível: <https://www.mdpi.com/1422-0067/21/2/572>. Acesso em: 02 jan. 2025

TABASSUM, B.; KHAN, A.; TARIQ, M.; RAMZAN, M.; KHAN, M. S. I.; SHAHID, N.; AALIYA, K. Bottlenecks in commercialisation and future prospects of PGPR. **Applied Soil Ecology**, v. 121, p. 102-117, 2017. DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.09.030. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139316305479?casa_token=-G4WGZsPqi8AAAAA:DPemytar4_Dn25idjVYSlaHt829_HV-CZx037-zG93Xj43QTGI-yoOzTafY-fyibateFECsfvb4. Acesso em: 23 out. 2024

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017.

TATAGIBA, S. D.; FIGUEIREDO, A. L. P.; BRANCALEONI, L.; CARELLI, C.; MODOLON, G. F. Crescimento e produção do feijoeiro comum, cultivar “Querência”, do grupo carioca, submetido à restrição hídrica em ambiente protegido.

Agropecuária Científica no Semiárido, v. 20, n. 2, p. 26-34, 2024.

TIWARI, S.; LATA, C.; CHAUHAN, P.S.; NAUTIYAL, C. S. Pseudomonas putida attunes morphophysiological, biochemical and molecular responses in Cicer arietinum L. during drought stress and recovery. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 99, p. 108-117, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.11.001>. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S098194281530156X?casa_token=0P9DH-](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S098194281530156X?casa_token=0P9DH-ZpSygAAAAA:RSIAKIN6TLJZpcl4kFnWshmpgl6Kscv1TKDyNVyZWG3uyLm2SPmAvWEbEz_X9jhLHUF_b0r4nfk)

[ZpSygAAAAA:RSIAKIN6TLJZpcl4kFnWshmpgl6Kscv1TKDyNVyZWG3uyLm2SPmAvWEbEz_X9jhLHUF_b0r4nfk](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S098194281530156X?casa_token=0P9DH-ZpSygAAAAA:RSIAKIN6TLJZpcl4kFnWshmpgl6Kscv1TKDyNVyZWG3uyLm2SPmAvWEbEz_X9jhLHUF_b0r4nfk). Acesso em: 28 nov. 2024

VELOSO, C. Conheça este microrganismo e seus benefícios para a agricultura, 2021. Disponível em: < [Https://blog.verde.ag/nutricao-de-plantas/bacillus-aryabhataiconheca-este-microrganismo-e-seus-beneficios-para-a-agricultura/](https://blog.verde.ag/nutricao-de-plantas/bacillus-aryabhataiconheca-este-microrganismo-e-seus-beneficios-para-a-agricultura/)>. Acesso em: 24 mai, 2024.

WANDER, A. E.; CHAVES, M. O. Consumo per capita de feijão no Brasil de 1998 a 2010: uma comparação entre consumo aparente e consumo domiciliar. Disponível em: <https://core.ac.uk/reader/45501420>. Acesso em: 23 jul. 2024

WUTKE, E. B.; CHIORATO, A. F.; ESTEVES, J. A. F.; CARBONELL, S. A. M.; AMBROSANO, E. J.; LEMOS, L. B.; SORATTO, R. P.; ARF, O.; CANTARELLA, H. Feijão. Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: IAC, 2022.p.246-249

ZLOBIN, I. E.; IVANOV, Y. V.; KARTASHOV, A. V.; SARVIN, B. A.; STAVRIANIDI, A. N.; KRESLAVSKI, V. D.; KUZNETSOV, V. V. Impact of weak water deficit on growth, photosynthetic primary processes and storage processes in pine and spruce seedlings. **Photosynthesis research**, v. 139, p. 307-323, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11120-018-0520-1>. Acesso em: 23 jun. 2024