

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS
CÂMPUS CENTRAL DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS – SEDE:
ANÁPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA

TAMIRES ESTER PEIXOTO BRAVO

**REINOCULAÇÃO DE RIZÓBIO E CO-INOCULAÇÃO DE *AZOSPIRILLUM*
APLICADO EM COBERTURA EM DISTINTOS
ESTÁDIOS DE CRESCIMENTO DO FEIJÃO**

ANÁPOLIS-GO

2024

TAMIRES ESTER PEIXOTO BRAVO

**REINOCULAÇÃO DE RIZÓBIO E CO-INOCULAÇÃO DE *AZOSPIRILLUM*
APLICADO EM COBERTURA EM DISTINTOS
ESTÁDIOS DE CRESCIMENTO DO FEIJÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás - Campus Central de Ciências Exatas e Tecnológicas - Sede: Anápolis, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de Concentração CNPq: Engenharia de Sistemas Agroindustriais

Orientador: Prof. Dr. Itamar Rosa Teixeira.

ANÁPOLIS-GO

2024

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UEG
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

B826r Bravo , Tamires Ester Peixoto
 REINOCULAÇÃO DE RIZÓBIO E CO-INOCULAÇÃO DE
 AZOSPIRILLUM APLICADO EM COBERTURA EM DISTINTOS
 ESTÁDIOS DE CRESCIMENTO DO FEIJÃO / Tamires Ester
 Peixoto Bravo ; orientador Itamar Rosa Teixeira . --
 Anápolis, 2024.
 65 p.

 Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
 Mestrado Acadêmico em Engenharia Agrícola) -- Câmpus
 Central - Sede: Anápolis - CET, Universidade Estadual
 de Goiás, 2024.

 1. P. vulgaris. 2. nutrição de planta. 3. FBN . 4.
 acúmulo de biomassa . 5. rendimento. I. Teixeira ,
 Itamar Rosa , orient. II. Título.

TAMIREZ ESTER PEIXOTO BRAVO

**REINOCULAÇÃO DE RIZÓBIO E CO-INOCULAÇÃO *AZOSPIRILLUM*
APLICADO EM COBERTURA EM DISTINTOS
ESTÁDIOS DE CRESCIMENTO DO FEIJÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás -
Câmpus Central de Ciências Exatas e Tecnológicas - Sede:
Anápolis, como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola, para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Aprovada em: Anápolis, 03 de setembro de 2024.

Banca examinadora



Documento assinado digitalmente

ITAMAR ROSA TEIXEIRA

Data: 21/10/2024 10:26:50-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Itamar Rosa Teixeira
(Orientador)

Universidade Estadual de Goiás



Documento assinado digitalmente

GISELE CARNEIRO DA SILVA TEIXEIRA

Data: 21/10/2024 11:11:00-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dra. Gisele Carneiro da Silva Teixeira
(Avaliador)

Universidade Estadual de Goiás



Documento assinado digitalmente

RAFAEL BATISTA FERREIRA

Data: 21/10/2024 14:08:01-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr. Rafael Batista Ferreira
(Avaliador)
Faculdade Metropolitana de Anápolis

ANÁPOLIS-GO

2024

Dedico esse trabalho em memória a Luci Tavares, minha avó, que apesar de ter estudado somente até a 4º série, me ensinou muito sobre a vida! Seu último conselho foi: Estude o máximo que puder, trabalhe, aproveite as oportunidades, corra atrás dos seus sonhos! Tudo que não foi possível para ela, me incentivou a fazer até em seu leito de morte! Esse é só o começo vó, agradeço por seus esforços ao sol e como prometido chegarei a sombra!

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Goiás por meio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pelo suporte e estrutura disponibilizados para a realização desse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa de estudos concedida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Itamar Rosa Teixeira pelos ensinamentos repassados, pela paciência, compreensão e pela confiança em mim depositada, permitindo com que eu realizasse este projeto.

A Agência Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária de Anápolis, e seus funcionários, pelo espaço cedido para implementação do experimento, bem como todo suporte durante a condução, em especial ao Jair e Sebastião.

Assim como uma montanha russa minha trajetória como mestranda foi feita de altos e baixos, logo, sem minha rede de apoio jamais chegaria aqui. Neste momento gostaria de agradecer a Deus pela oportunidade e pelo cuidado que teve ao selecionar pessoas tão especiais para estarem ao meu lado, após um dia cansativo de análises, horas de viagens em ônibus lotados e na cabeça os devaneios e inseguranças da vida de uma jovem cientista buscando as vezes o seu próprio “porque”.

Então, recebam meus singelos agradecimentos: Crizete Bravos, Marivaldo Peixoto, Dannila Bravo, Hellen Bravos e Manoel Peixoto. Minha querida e honrosa família, meu alicerce! Daniel Ramalho por todo companherismo e ajuda, principalmente nas capinas no sol ou na chuva.

Não poderia de deixar de agradecer aos meus colegas de Mestrado, Adilson e Nathan por toda ajuda e parceria nos experimentos em campo, aos bolsistas de Iniciação Científica: Juliene, Bruno e Lucas, bolsistas de desenvolvimento institucional: Felipe e Edilene e aos técnicos de laboratório: José Fernando e Jonatas, por todo auxílio recebido nas análises deste trabalho.

Muito obrigada a todos!

“Porque sou eu que conheço os planos que tenho para vocês”, diz o Senhor, “planos de fazê-los prosperar e não de lhes causar dano, planos de dar-lhes esperança e um futuro.”

Jeremias: 29:11.

RESUMO

O feijão comum pode suprir sua demanda por nitrogênio por meio da Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), porém para que isso aconteça, é necessário superar gargalos relacionados às tecnologias de aplicação. Este estudo teve como objetivo investigar a capacidade de resposta do feijoeiro à reinoculação de *Rhizobium tropici* em cobertura, com ou sem a co-inoculação de *Azospirillum brasilense*, em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura. Os experimentos foram conduzidos durante a safra de inverno de 2023 e na safra das águas de 2023/2024, empregando o delineamento de blocos casualizados quatro repetições, sendo os tratamentos constituídos das seguintes combinações: T1 - Reinoculação com *R. tropici* em cobertura V3; T2 - Reinoculação com *R. tropici* em cobertura V4; T3 - Reinoculação com *R. tropici* em cobertura R5; T4 - Reinoculação com *R. tropici* em cobertura R6; T5 - Co-inoculação *R. tropici* + *A. brasilense* em cobertura V3; T6 - Co-inoculação *R. tropici* + *A. brasilense* em cobertura V4; T7 - Co-inoculação *R. tropici* + *A. brasilense* em cobertura R5; T8 - Co-inoculação *R. tropici* + *A. brasilense* em cobertura R6; T9 – Testemunha; T10 - Inoculação com *R. tropici* via semente; T11 - Co-inoculação *R. tropici* + *A. brasilense* via semente; T12 - Adubação mineral nitrogenada. As características avaliadas incluíram: nodulação (número e massa seca de nódulos), morfofisiológicas das plantas (comprimento da raiz principal, massa seca da raiz, massa seca da parte aérea e teor de N foliar), além dos componentes produtivos (número de vagens por planta, número de grãos por vagem, peso médio de cem grãos, rendimento de grãos e estande final). Os dados foram submetidos à análise de variância e o efeito dos tratamentos foi discriminado pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Também foi realizada uma análise de componentes principais (PCA) para identificar as relações entre as características estudadas. Conclui-se que a reinoculação com co-inoculação associando *R. tropici* + *Azospirillum* no estágio V4 contribuiu para melhoria dos processos de nodulação e o desenvolvimento das plantas de feijão em ambas das safras de cultivo. O emprego da reinoculação envolvendo a co-inoculação rizóbio e *Azospirillum* no estágio V4 proporcionou acréscimo equivalente a 8,7% no rendimento de grãos de feijão comparado a utilização da fertilização com adubo de mineral nitrogenado em cobertura com 80 kg ha⁻¹ evidenciando os benefícios da técnica aplicada.

Palavras-chave: *P. vulgaris*; nutrição de planta; FBN; acúmulo de biomassa; rendimento.

ABSTRACT

Common bean can meet its nitrogen demand through Biological Nitrogen Fixation (BNF); however, overcoming bottlenecks related to application technologies is essential for this to occur. This study aimed to investigate the response capacity of common bean (*Phaseolus vulgaris*) to the reinoculation of *Rhizobium tropici* in cover crops, with or without co-inoculation of *Azospirillum brasilense*, at different stages of plant development. The experiments were conducted during the winter crop of 2023 and the rainy season of 2023/2024, using a randomized block design with four replications. The treatments included the following combinations: T1 - Reinoculation with *R. tropici* at V3; T2 - Reinoculation with *R. tropici* at V4; T3 - Reinoculation with *R. tropici* at R5; T4 - Reinoculation with *R. tropici* at R6; T5 - Co-inoculation of *R. tropici* + *A. brasilense* at V3; T6 - Co-inoculation of *R. tropici* + *A. brasilense* at V4; T7 - Co-inoculation of *R. tropici* + *A. brasilense* at R5; T8 - Co-inoculation of *R. tropici* + *A. brasilense* at R6; T9 – Control; T10 - Inoculation with *R. tropici* via seed; T11 - Co-inoculation of *R. tropici* + *A. brasilense* via seed; T12 - Nitrogen mineral fertilization. The evaluated characteristics included: nodulation (number and dry weight of nodules), morphophysiological traits of plants (main root length, root dry weight, aerial part dry weight, and leaf N content), as well as productive components (number of pods per plant, number of grains per pod, average weight of one hundred grains, grain yield, and final stand). The data were subjected to analysis of variance, and treatment effects were discriminated using the Scott-Knott test at 5% probability. A principal component analysis (PCA) was also conducted to identify relationships among the studied characteristics. It was concluded that reinoculation with co-inoculation of *R. tropici* + *Azospirillum* at stage V4 contributed to improvements in nodulation processes and the development of bean plants in both growing seasons. The application of reinoculation involving co-inoculation of rhizobia and *Azospirillum* at stage V4 resulted in an increase of 8.7% in bean grain yield compared to the use of nitrogen mineral fertilization at a rate of 80 kg ha⁻¹, highlighting the benefits of the applied technique.

Keywords: *P. vulgaris*; plant nutrition; BNF; biomass accumulation; performance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Dados climatológicos referentes as temperaturas máxima e mínima e precipitação no período compreendido entre julho de 2023 a março de 2024, no município de Anápolis-GO.	27
Figura 2 - Croqui da área da parcela experimental e suas expectavas bordaduras.	30
Figura 3 – Número de nódulos por planta (NNP) (A) em função dos tratamentos, e análise da massa seca por nódulos em relação as safras de inverno (2023) e águas (2023/2024) (B).	37
Figura 4 – Comprimento da raiz principal (CRP) das plantas de feijão (A) em função dos tratamentos (B), em análise das safras de inverno (2023) e águas (2023/2024).	40
Figura 5 - Massa seca de raiz (MSR) das plantas de feijão em função dos tratamentos, nas de inverno (2023) e águas (2023/2024).	41
Figura 6 – Massa seca da parte aérea (MSPA) das plantas de feijão em função dos tratamentos, nas safras de inverno (2023) e águas (2023/2024).	42
Figura 7 – Teor de nitrogênio foliar (TN) das plantas de feijão em função dos tratamentos, em análise conjunta das safras de inverno 2023 e águas 2023/2024.	44
Figura 8 - Estande final (EF) em função dos tratamentos (B), em análise das safras de inverno (2023) e águas (2023/2024) (A).	45
Figura 9 - Número de vargens por planta (NVP) de feijão em função das safras de inverno (2023) e águas (2023/2024).	46
Figura 10 - Número de vargens por planta (NVP) em função dos tratamentos, em análise conjunta das safras de inverno 2023 e águas (2023/2024).	47
Figura 11 – Número de grãos por vargem em função dos tratamentos, nas safras de inverno (2023) e das águas (2023/2024).	49
Figura 12 – Peso de cem grãos (MCG) (g) em função dos tratamentos, em análise conjunta das safras de inverno (2023) e águas (2023/2024).	50
Figura 13 - Rendimento em kg ha ⁻¹ (REND) do feijão cultivado nas safras de inverno (2023) e águas (2023/2024).	51
Figura 14 – Rendimento de grãos de feijão em kg ha ⁻¹ em função dos tratamentos.	52
Figura 15 - Mapa de análises dos componentes principais (PCA) para as características nodulares, morfofisiológicas e agrônômicas das plantas de feijão cultivadas nas safras de inverno (2023) e águas (2023/2024).	54

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Características químicas e físicas dos solos, coletados na camada 0-20 cm, na área experimental da Agência Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária (EMATER). UEG, CET, Anápolis/GO, 2024.	28
Tabela 2 – Resumo da Análise de Variância para os caracteres: número de nódulos por planta (NNP) e massa seca de nódulos (MSN), avaliados em amostras de 5 plantas de feijão colhidas em R7 nas safras de inverno 2023 e águas 2023/2024, UEG, Anápolis-GO, 2024.	35
Tabela 3 – Resumo da Análise de Variância para os caracteres: comprimento de raiz (CR), massa seca da raiz (MSR), massa seca por planta (MSP) e teor de nitrogênio das folhas (TN), avaliados em amostras de 5 plantas de feijão colhidas em R7 nas safras de inverno 2023 e águas 2023/2024, UEG, Anápolis-GO, 2024.	39
Tabela 4 – Resumo da Análise de Variância para os caracteres: estande final (EF), número de vargens por planta (NVP), número de grãos por vargens (NGV), peso de cem grãos (PCG) E rendimento (REND) UEG, Anápolis-GO, 2024.	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Aspectos gerais da cultura do feijão.....	16
2.2	Fenologia do feijão	18
2.3	Importância do nitrogênio para o feijoeiro	21
2.4	Desempenho do feijoeiro ao processo de FBN.....	22
3	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	Caracterização da área de estudo.....	27
3.2	Delineamento experimental e tratamentos	28
3.3	Implementação e condução	29
3.4	Características avaliadas.....	31
3.4.1.	<i>Características nodulares</i>	31
3.4.1.1.	Número de nódulos por planta (NNP).....	32
3.4.1.2.	Massa seca de nódulos por planta (MSN).....	32
3.4.2.	<i>Características morfofisiológicas</i>	32
3.4.2.1.	Comprimento da raiz principal (CRP)	32
3.4.2.2.	massa seca da raiz (MSR) e massa seca da parte aérea (MSPA)	32
3.4.2.3.	Teor de nitrogênio foliar (TN)	32
3.4.3.	<i>Características Agronômicas</i>	33
3.4.3.1	Estande final (EF).....	33
3.4.3.2.	Número de vargens por planta (NVP).....	33
3.4.3.3.	Número de grãos por vargem (NGV).....	33
3.4.3.4.	Massa de 100 grãos (PCG).....	33
3.4.3.5.	Rendimento de grãos (REND)	33
3.5	Análise estatística	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	Análises Nodulares.....	35
4.2	Análises Morfofisiológicas.....	38
4.3.	Análises Agronômicas.....	44
4.4	Análise dos Componentes Principais (PCA)	53
5	CONCLUSÃO.....	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris*) é uma planta nodulífera, pertencente à família Fabaceae. Seu grão tem grande importância no contexto socioeconômico brasileiro, fazendo parte do prato típico, servindo como uma fonte de proteína acessível, e também, como fonte de renda para pequenos e grandes produtores em distintos níveis tecnológicos e em diferentes regiões do país (SALES, 2020). Pela sua facilidade e adaptabilidade de se desenvolver sob diversas condições edafoclimáticas, o feijoeiro é produzido praticamente em todo o território nacional, onde são empregados sistemas de produção diversificados, desde a agricultura de subsistência até cultivos altamente tecnificados (GARÉ, 2020).

A área total para a produção do feijoeiro na safra 2022/2023 foi de 2,7 milhões de hectares e uma produção de três milhões de toneladas, com produtividade média apenas de 1.123 kg ha⁻¹ (CONAB, 2023), sendo que um dos fatores responsáveis por essa baixa produtividade é a deficiência nutricional. Nesse sentido, o nitrogênio (N) se destaca como um dos nutrientes mais limitantes à produtividade, cujo principal fornecimento, de maneira geral, ocorre por meio da adubação mineral, processo de alto custo, as vezes ineficiente pela limitação de recursos do produtor, além de potencial poluidor por ser de origem fóssil (MARCHNER, 2012).

A deficiência de N, sobretudo, nas fases reprodutivas, onde a taxa de absorção da planta varia de 2,0-2,5 kg N ha⁻¹ dia⁻¹ (ROSOLEM; MARUBAYASHI, 1994), causam limitações em diversas funções vitais, principalmente correlacionadas ao desenvolvimento vegetativo do feijoeiro. O nitrogênio além de ser o mais extraído pela cultura (140 kg ha⁻¹), também é o mais exportado, com uma média de 25 kg t⁻¹ de grãos (SORATTO *et al.*, 2013).

A dose de N recomendada para a adubação da cultura é de 100 kg ha⁻¹, fracionada em duas aplicações, 40 e 60 kg ha⁻¹, respectivamente na base e em cobertura (VIEIRA, 1998). Esta demanda pode ser suprida pelo N do solo, pela adubação nitrogenada e pelo processo de Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN). A FBN é um processo realizado por bactérias que possuem um aparato biológico capaz de captar o N atmosférico, que não é prontamente assimilável pelas plantas, e transformá-lo até que possa ser assimilado e, participar da nutrição de algumas culturas agrícolas (HUNGRIA *et al.*, 2013), como as fabáceas. O processo de nodulação é controlado pela interação entre a planta hospedeira, bactéria simbiote e fatores ambientais (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006).

Pesquisas na área de FBN contribuíram para o desenvolvimento de estirpes comerciais oriundas da espécie *Rhizobium tropici*, na qual apresentam maior resistência a altas

temperaturas, acidez do solo e altamente competitivo (HUNGRIA & KASCHUK, 2014; SOUSA *et al.*, 2022). As estirpes SEMIA 4077, SEMIA 4080 e SEMIA 4088 pertencentes a espécie de *Rhizobium tropici* compõem os inoculantes comerciais destinados ao uso na cultura do feijoeiro (BRASIL, 2011). Apesar da espécie *R. tropici* apresentar maior eficiência no fornecimento de nitrogênio para o feijoeiro via FBN, os agricultores são relutantes ao emprego da referida tecnologia quando se visa a obtenção de elevadas produtividades, acima de 1800 kg ha⁻¹. Em razão disso, faz-se necessário a busca de novas tecnologias pela pesquisa visando melhorar eficiência da FBN para o feijoeiro de alta produtividade.

Dentre as técnicas estudadas destaca-se a co-inoculação mista com *R. tropici* + *Azospirillum* brasilense e a reinoculação em cobertura empregando *R. tropici* ou a co-inoculação mista com *R. tropici* + *Azospirillum* brasilense. A reinoculação consiste na aplicação do inoculante em cobertura, direcionada para o sistema radicular da planta, com o intuito de manter a população de rizóbios do solo em níveis adequados, atendendo toda a demanda de nitrogênio da planta (TEIXEIRA *et al.*, 2022).

As aplicações de inoculante em cobertura possibilitaram aumentar a nodulação nas culturas da soja e feijão, respectivamente, bem como sua massa seca, resultados atribuídos ao fato das plantas superarem as limitações de autorregulação da nodulação na fase inicial, o que permite o desenvolvimento de novos nódulos funcionais com a realização da reinoculação em cobertura, capaz de suportar o aumento da demanda de N em fases posteriores do ciclo de crescimento, principalmente durante o enchimento das vagens (MORETTI *et al.* 2018; TEIXEIRA *et al.* 2022).

A co-inoculação consiste em uma técnica de manejo utilizada a fim de obter benefícios e aumentar o potencial da FBN a partir de associação entre bactérias do grupo rizóbio e as bactérias promotoras de crescimento vegetal, a exemplo do *Azospirillum* brasilense. Esta alternativa é representada por um grupo de bactérias associativas capazes de promover o crescimento das plantas mediante alterações fisiológicas devido à liberação de fitohormônios como auxinas e citocininas que promovem aumento no crescimento radicular (ZAFAR *et al.*, 2012). A presença de bactérias do gênero *Azospirillum* consegue liberar fitohormônios que induzem a formação de pêlos radiculares, sendo possível aumentar a produção de massa seca e o número de nódulos por planta (GARCIA *et al.*, 2016).

Em estudo realizado pela Ferreira *et al.* (2020), foi possível averiguar que o *Azospirillum* potencializa o desenvolvimento do feijoeiro, principalmente as raízes, resultando em melhores condições para que abasteça a simbiose com o *Rhizobium* na fixação de N. Além da associação, o maior volume radicular gerado pelo *Azospirillum* melhora a absorção de água

e de nutrientes no solo e promove o crescimento da parte área e da produção de grãos. Contudo, os trabalhos existentes na literatura envolvendo a co-inoculação de *R. tropici* + *A. brasilense* na cultura de feijão foram realizados diretamente na semente (STEINER *et al.*, 2019; FERREIRA *et al.*, 2020), sendo raro os estudos em que a técnica foi realizada em cobertura (ALMEIDA *et al.*, 2022).

Dessa forma, é relevante a condução de pesquisas visando conhecer o efeito da aplicação de *R. tropici* associado ou não a *Azospirillum brasilense* em co-inoculação na cultura do feijoeiro, em complementação a inoculação ou co-inoculação realizada via semente, além de identificar o estágio ideal para realizar a aplicação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais da cultura do feijão

A espécie *Phaseolus vulgaris* L., popularmente feijão comum, é uma planta fabacea com mecanismo fotossintético C3, autógama, anual herbácea, trepadora ou não, com raiz principal pivotante. Possui característica típica dessa família apresentando fruto tipo legume, mais conhecido como vagem, com duas valvas unidas por duas suturas. Essa vagem pode ser de forma cilíndrica ou achatada, curta ou comprida (de 12 cm a 15 cm ou mais), reta ou ligeiramente curva, com coloração a depender da cultivar e do estágio de maturação da planta (REZENDE *et al.*, 2018; FERREIRA *et al.*, 2021).

As sementes são dispostas nas vagens, e possuem forma arredondada, elíptica, reniforme ou oblonga, com tamanhos variando de muito pequenas (<20 g/100 grãos) a grandes (>40 g/100 grãos), a depender do material genético (VIEIRA, 2000).

Suporta temperaturas entre 15°C e 30°C, porém tem melhor desenvolvimento dentro da faixa de 20°C e 22°C, considerada ideal (VIEIRA *et al.*, 2006). Suas necessidades hídricas, de maneira geral, variam entre 100 mm por mês, onde a cultura demanda de uma maior quantidade de água nas fases reprodutivas e apresentando um ciclo médio de 90 dias, podendo variar, de acordo com a latitude, condições climáticas e cultivar, entre 60 dias (superprecoce) e 115 dias (tardio) (DOURADO NETO & FANCELLI, 2000).

De simples cultivo, possui grande capacidade de adaptação podendo ser produzida em diversas condições edafoclimáticas. Contudo, o manejo adequado da fertilidade do solo, por meio da correção da acidez e do atendimento as necessidades nutricionais é fator determinante da produtividade da cultura e deve ser controlado de maneira criteriosa, buscando a máxima eficiência econômica. O uso inadequado e excessivo de fertilizantes sem atender aos critérios técnicos pode causar desequilíbrios nutricionais que resultam em aumento da incidência de doenças e pragas, podendo afetar a produtividade e a rentabilidade (CARVALHO *et al.*, 2020).

Dentre as doenças que acometem a cultura, destacam-se a antracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*), mancha-angular (*Pseudocercospora griseola*), ferrugem (*Uromyces appendiculatus*), oídio (*Erysiphe polygoni*), podridão-radicular-seca (*Fusarium solani*), murcha de fusarium (*Fusarium oxysporum* f. sp. *phaseoli*), mofo-branco (*Sclerotinia sclerotiorum*) e mosaico-dourado do feijoeiro (*Bean golden mosaic virus*) (EMBRAPA, 2018). No âmbito das pragas os ataques mais frequentes nas lavouras de feijão são promovidos pela vaquinha (*Diabrotica speciosa*), mosca branca (*Bemisia tabaci*), Mosca

minadora (*Liriomyza sp.*) e cigarrinha verde (*Empoasca kraemeri*), onde o controle pode ser feito com Manejo Integrado de Pragas (MIP) e aplicações de inseticidas específicos.

Originária na América Latina, é vista como importante fonte de proteína vegetal, devido sua semente ferro-proteica e seu valor acessível se comparado as outras opções do mercado como por exemplo o grão-de-bico (COELHO, 2023). Além disso, esta Fabacea tem sido classificada por estudos científicos como um alimento funcional, devido à composição nutricional, alto teor de fibras, prebióticos, cálcio, vitamina B e diversos micronutrientes. A literatura aponta evidências de que o feijão apresenta múltiplos benefícios à saúde e que o consumo pode proteger de problemas como: estresse oxidativo, doenças cardiovasculares, diabetes, doenças intestinais, síndrome metabólica e câncer (MESSINA, 2014).

A produção mundial de feijão, historicamente, é pautada nos objetivos de segurança alimentar e qualidade nutricional. Durante muito tempo sua produção era concentrada em populações de menor poder aquisitivo, com pouco aparato tecnológico produziam para o autossustento. Com a realização de estudos para o desenvolvimento de cultivares mais atraentes ao mercado, o feijão passou a chamar o interesse de grandes produtores, em uma escala mais tecnológica.

Os principais países produtores mundiais de feijão são: Índia, Brasil, Mianmar, Tanzânia, China, México, Estados Unidos, Uganda, Argentina e Quênia, nessa ordem. Os maiores importadores são Índia, China, Bangladesh, Estados Unidos e Egito (FAO, 2023), incluindo todas as feijões pertencentes aos gêneros *Phaseolus* e *Vigna*. Contudo, quando se refere especificamente a espécie *P. vulgaris*, a mais importante comercialmente no mundo dentro do gênero *Phaseolus*, o Brasil se destaca como primeiro produtor mundial do grão, com de 3,1 milhões de toneladas em área cultiva da 2,8 milhões de hectares e produtividade média de 1.107 kg ha⁻¹ (CONAB, 2023). Essa produtividade é considerada baixa em razão do emprego de tecnologias mais simples por parte dos pequenos agricultores que são predominantes na cadeia produtiva do feijão, sobretudo na safra das águas. Rendimentos maiores são obtidos nos sistemas mais tecnificados adotados por médios e grandes produtores (FERREIRA & SOUZA, 2017) nas safras da seca e de inverno.

Presente no prato típico brasileiro, o Brasil é autossuficiente na produção desse grão tão importante para sua população; em média cada brasileiro consome 14 kg de feijão por ano (COELHO, 2023). Dentre os grupos comerciais consumidos se destaca o Carioca, que equivale cerca de 60% do consumo de feijão entre os brasileiros, fatores como sabor e menor tempo de cozimento são pontos que chamaram a atenção dos consumidores (CHIORATO *et al.*, 2018).

A produção de feijão é afetada por diversos fatores, como riscos ambientais, bioestresse e políticas governamentais dos países. A cultura pode estar sujeita a várias doenças, principalmente sob altas temperaturas e excesso de umidade. Os maiores custos de produção de feijão podem incluir insumos minerais, defensivos agrícolas para o controle de pragas e doenças e mão de obra (COÊLHO, 2023).

O feijão no Brasil é cultivado em três safras distintas (safra das águas, safra da seca e safra de inverno) e faz parte dos sistemas de produção de pequenos, médios e grandes produtores, esses últimos em escala empresarial altamente tecnológica. As regiões que mais produzem feijão no Brasil são: Sul, Sudeste e Centro-Oeste, com destaque para os estados do Paraná, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso (CONAB, 2023).

Em decorrência do exposto, pode-se observar que o feijão ocupa um papel importante atuando na segurança alimentar mundial, por ser um alimento funcional presente na dieta das classes mais desfavorecidas economicamente (VANLAUWE *et al.*, 2019). Além disso, seu cultivo gera renda e empregos para essas populações. Devido seu valor nutricional, esse grão tem chamado a atenção das demais classes sociais, a busca pelo alimento impulsiona do desenvolvimento tecnológico da cultura, visando a criação de cultivares competitivas no mercado consumidor e métodos de cultivo sustentável. Nesse sentido, o Brasil tem um papel importante no desenvolvimento do *P. vulgaris*, sendo pioneiro em pesquisas de melhoramento genético e fixação biológica de nitrogênio (HUNGRIA *et al.* 2018).

A pesar da evolução, as produções dos grãos estão relativamente baixas se comparado ao potencial produtivo. Um dos fatores que reflete diretamente no desempenho do feijoeiro é o estado nutricional em que se encontram as plantas, em especial o nitrogênio (N), devido ao seu sistema radicular limitado e pouco profundo (25 cm), consequentemente as plantas têm menor superfície de exploração, somado a um curto ciclo fenológico e à dinâmica apresentada por esse nutriente no solo (móvel). Sendo assim, a fertilidade do solo é um fator importante e a cultura requer que os nutrientes sejam fornecidos em local, quantidade e momento adequados para que haja absorção satisfatória nas fases de maior demanda (SALES, 2020).

2.2 Fenologia do feijão

Uma das maneiras comumente utilizadas por produtores para verificar um certo estágio de desenvolvimento das plantas é a contagem de dias a partir da semeadura. Todavia, em razão de se cultivar feijão nas mais variadas condições, em divergentes lugares, com várias cultivares, esse método torna-se muito variável e com baixo poder de precisão (VIEIRA, 1998). Logo, utiliza-se a escala de classificação fenológica.

A fenologia, segundo Kluthcouski *et al.* (2009), refere-se ao estudo dos fenômenos

periódicos dos seres vivos e suas relações com as condições do ambiente em que estão inseridos, correlacionando-os com os aspectos morfológicos. Portanto, conhecer a fenologia de uma cultura é importante para se entender as necessidades nutricionais e auxiliar na tomada de decisões ao longo do ciclo de crescimento da mesma, uma vez que as plantas, nas suas diferentes fases fenológicas apresentam diferentes exigências (LOURENÇO *et al.*, 2023).

Neste contexto, a fenologia representa o estudo de como a planta se desenvolve ao longo das suas diferentes etapas: germinação, emergência, crescimento e desenvolvimento vegetativo, florescimento, frutificação, formação de sementes e maturação. No feijoeiro, a escala proposta por Fernández *et al.* (1985) é a mais aceita por pesquisadores e produtores, na expectativa de garantir o manejo correto ao longo do ciclo. A escala apresenta dez divisões fenológicas, divididas em fase vegetativa, com cinco estádios (V0, V1, V2, V3 e V4) e fase reprodutiva, com cinco estádios (R5, R6, R7, R8 e R9), diferentes entre si pela ocorrência de diferentes eventos morfológicos, bioquímicos e fisiológicos (EMBRAPA, 2018; LOURENÇO *et al.*, 2023).

O estágio vegetativo 0 (V0) é caracterizado pelo período de germinação, iniciando no dia da sementeira e finalizando quando os cotilédones atingem a superfície. A sementeira feita de forma correta é essencial para o sucesso dessa etapa, onde temperaturas entre 12°C e 25°C são ideais para garantia de uma boa taxa de germinação, o déficit hídrico nessa fase faz com que as sementes apodreçam ao invés de germinarem. Quando os cotilédones se tornam visíveis e começam a se separar, se inicia o estágio vegetativo 1 (V1), finalizando quando as primeiras folhas se abrem (EMBRAPA, 2018).

Já a fase vegetativa 2 (V2) se inicia quando as primeiras folhas se encontram totalmente abertas e termina com a abertura da primeira folha trifoliolada. Caso a sementeira tenha sido realizada com excesso de profundidade e as sementes utilizadas apresentarem baixo vigor, o resultado final poderá gerar folhas pequenas e má formadas. Até essa fase, as necessidades nutricionais da planta são supridas pela própria semente e sua reserva (EMBRAPA, 2018).

A etapa V3 inicia-se quando a primeira folha trifoliolada se apresenta completamente aberta. Considera-se que a cultura atingiu esse estágio quando 50% das plantas apresentam essa característica. Neste estágio, ocorre a queda dos cotilédones e a planta começa a depender diretamente das reservas nutricionais do solo para o seu melhor desenvolvimento (COSTA *et al.*, 2020). Essa fase também é caracterizada por iniciar a formação de nódulos pelo processo de FBN (EMBRAPA, 2018). O término dessa etapa se culmina quando a terceira folha trifoliolada se abre posicionando-se sob a primeira folha trifoliolada (VIEIRA,

1998).

O fim da etapa V3 dá início ao V4, caracterizado quando 50% das plantas se encontram com terceira folha trifoliolada completamente aberta, até o surgimento dos primeiros botões florais. Nessa fase vegetativa há uma maior sensibilidade quanto a disponibilidade de água, temperatura e luminosidade para assegurar uma maior área foliar e consequente produtividade. A partir desse período, os processos de absorção de nutrientes e crescimento da planta se aceleram e, portanto, todos os nutrientes devem estar disponíveis para serem absorvidos, com ênfase ao nitrogênio, uma vez que é o principal responsável pelo aumento da área foliar e pelo acúmulo de biomassa seca. Neste período, se inicia fixação de N pelo processo de FBN (EMBRAPA, 2018; LOURENÇO *et al.*, 2023).

No estágio V4 é comumente realizada a adubação de cobertura com N mineral (GUIMARÃES *et al.*, 2017). Apesar de ser fase vegetativa, a indisposição de nutrientes e condições favoráveis para o desenvolvimento das plantas pode acarretar diretamente na redução da produção. Em estudo realizado por Costa *et al.* (2020) plantas submetidas a baixa disponibilidade de oxigênio apresentaram redução no número de grãos, sendo em V3/V4 a maior perda em produção conferindo maior sensibilidade a hipóxia nesta fase.

O início da fase reprodutiva se dá com a pré-floração e prolonga até a abertura da primeira flor, essa etapa é chamada de R5. A floração, ou etapa R6, se inicia com a abertura da primeira flor e se estende até a queda da corola, expondo a primeira vagem em seu início de desenvolvimento. Estas são fases de rápido acúmulo de nutrientes pela planta. Nesses estádios a planta deve estar nutrida em quantidade e proporção adequadas e todos os nutrientes para assegurar o pegamento das flores que definem o número de vagens por planta (EMBRAPA, 2018). De acordo com Almeida *et al.* (2022) nessas etapas atividade de nitrogenase começa a reduzir, iniciando o declínio da FBN.

O R7 é o estágio onde ocorre a formação das vagens, bem como do seu desenvolvimento longitudinal, até atingirem o seu comprimento máximo. Nessa fase, a principal atividade é voltada para a formação de vagens e, portanto, as atividades nas raízes são reduzidas. Caso o acúmulo de nutrientes até essa fase não tenha ocorrido de maneira satisfatória, a cultura poderá responder a aplicação de boro, nitrogênio, fósforo e potássio via foliar, podendo contribuir para o enchimento de vagens. Temperaturas acima de 35°C e escassez hídrica podem causar o abortamento e diminuição do tamanho de vagens (FAGERIA *et al.*, 2015; EMBRAPA, 2018; LOURENÇO *et al.*, 2023).

A etapa de enchimento das vagens, ou R8, corresponde ao período de crescimento das sementes, até atingirem o tamanho real. É considerado ideal para a realização da dessecação,

quando necessário (SILVA *et al.*, 2021). Há também a senescência de nódulos e, portanto, as atividades de FBN até o estágio R8 se encerram (EMBRAPA, 2018).

As etapas reprodutivas são as mais críticas em relação às necessidades hídricas, nutricionais em especial a demanda de N, onde sua deficiência poderá refletir diretamente na área foliar, causando amarelecimento, atraso no desenvolvimento e consequente diminuição de atividade fotossintética, refletindo também na queda da formação de vagens e produtividade (TEIXEIRA *et al.*, 2022).

Por fim, o estágio R9 é onde ocorre a maturação, compreende desde o início do amarelamento das vagens, até a queda total das folhas e secagem das plantas. O teor de umidade dos grãos gira em torno de 15% e está pronto para a colheita (SILVA *et al.*, 2021). Na safra das águas pesquisadores e produtores veem enfrentando problemas com a colheita do feijão, prolonga-se a exposição dos grãos no campo, promovendo perdas e reduzindo o vigor e qualidade das sementes (LOURENÇO *et al.*, 2023).

2.3 Importância do nitrogênio para o feijoeiro

O nitrogênio (N) é de longe o elemento mais abundante e altamente essencial para as plantas, representando 1,5–2% da sua biomassa seca (DE VRIES & ZHANG, 2016). O nitrato (NO_3^-) é supostamente uma fonte fundamental de nitrogênio para as plantas na maioria dos solos agrícolas (IMPA *et al.*, 2019). Para o metabolismo do nitrogênio, a nitrato redutase (NR) converte o NO_3^- absorvido pelas plantas em NO_2^- , enquanto a nitrito redutase converte o NO_2^- em NH_4^+ . A forma resultante de nitrogênio NH_4^+ é então assimilada pela glutamina sintetase (GS) em clorofila, aminoácidos e outros metabólitos diretamente ligados ao aumento da produtividade (FIAZ *et al.*, 2023).

O nitrogênio é o macronutriente mais absorvido pelo feijoeiro, sendo que cerca de 50% deste é exportado pelos grãos (OLIVEIRA *et al.*, 1996). A cultura do feijão absorve o nitrogênio durante todo o ciclo, mas a exigência é maior na época do florescimento e enchimento de grãos (GUIMARÃES *et al.*, 2017; TEIXEIRA *et al.*, 2022). Apesar disso, é comum para a cultura do feijão a recomendação de parte da adubação de nitrogênio na semeadura, juntamente com fósforo e potássio, e parte em cobertura (VIEIRA, 1998). A dose de N recomendada para a cultura é de 100 kg ha^{-1} , fracionada em duas aplicações, 40 e 60 kg ha^{-1} , respectivamente na base e em cobertura (VIEIRA, 1998). Esta demanda pode ser suprida pelo N do solo, pela adubação nitrogenada e pelo processo de fixação biológica do nitrogênio (FBN), sendo a primeira técnica comumente empregada para fornecer a demanda de N para a cultura do feijão (TEIXEIRA *et al.*, 2022).

O manejo do nitrogênio é difícil, pois apesar de ser o requerido em maior quantidade pelo feijoeiro possui uma dinâmica complexa no solo, podendo perder-se facilmente por lixiviação ou volatilização, comprometendo o meio ambiente e reduzindo a eficácia do manejo (FERREIRA *et al.*, 2018). Em ambientes tropicais, como no caso do Brasil as perdas por volatilização da amônia e a lixiviação do nitrato podem superar até 50% da quantidade aplicada (LISBOA *et al.*, 2019). Essa característica culmina na ineficácia em atingir-se a dose recomendada de N para o feijoeiro, em que pode ser inferior à demanda da cultura limitando a produtividade dos grãos, visto que a deficiência de N ocasiona vários níveis de clorose, além do enfraquecimento da planta, comprometendo o crescimento e consequentemente a produção (SOUSA *et al.*, 2021). Por outro lado, o uso de doses excessivas, empregado incorretamente para suprir o problema de volatilização do mineral, aumenta o risco de desequilíbrio nutricional e ambiental (NASCIMENTO *et al.*, 2021).

A adubação mineral de N vem apresentando questionamentos sobre sua eficiência. O alto teor poluente em seu processo de fabricação e o valor final excessivo, têm influenciado pesquisas para o desenvolvimento de formas mais sustentáveis e financeiramente atraentes, capazes de suprir a demanda desse macronutriente na cultura do feijão (REIS *et al.*, 2023; ZHENG *et al.*, 2023). Dessa forma, o uso de fertilizantes organominerais e a Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), são formas alternativas de garantir a disponibilidade de N de maneira acessível e sustentável.

2.4 Desempenho do feijoeiro ao processo de FBN

O nitrogênio (N), elemento essencial para as plantas é altamente disponível no ar atmosférico, que contém cerca de 78% de N_2 em seu volume. No entanto, nenhuma planta possui mecanismos bioquímicos que reduzam o N_2 , pois a ligação tripla existente entre os dois átomos que formam a molécula é altamente forte, necessitando de um sistema enzimático bastante energético encontrado apenas em algumas bactérias que vivem no solo, em forma livre ou formando associações simbióticas com as raízes de algumas plantas (SACHS, 2018).

Por meio do complexo enzimático nitrogenase, as bactérias diazotróficas (fixadoras de nitrogênio atmosférico) são capazes de reduzir o N_2 atmosférico à amônia (NH_3), sendo, em seguida, convertida em íon amônio (NH_4^+), a principal fonte de nitrogênio assimilável pelas plantas. O processo de fixação biológica de nitrogênio ocorre em estruturas especializadas nas raízes denominadas nódulos, em que o hospedeiro fornece proteção e fotoassimilados em troca do nitrogênio fixado (THAL *et al.*, 2018).

O mutualismo entre as plantas e as bactérias não é uma obrigação: os organismos

podem existir de forma independente. No entanto, quando há falta de nitrogênio no solo, eles se comunicam por meio de uma complexa troca de sinais químicos. Assim, a planta, ao detectar a ausência de N em seus tecidos, libera substâncias químicas atrativas através das raízes, como flavonoides e betaínas (THAL *et al.*, 2018). Ao encontrarem essas substâncias no solo, as bactérias produzem os chamados Fatores Nod, compostos por oligossacarídeos de lipoquitina (FERNANDEZ-GÖBEL *et al.*, 2019). Nas raízes das plantas, existem receptores para esses Fatores Nod. No caso das fabáceas, como o feijão, esses receptores são lectinas presentes nos pelos radiculares, que são ativadas pelos Fatores Nod para facilitar a união dos rizóbios com a parede celular das raízes (CONINCK & VAN DAMME, 2021).

Esse fenômeno supracitado é visto como uma alternativa sustentável e economicamente viável para suprir ao máximo a demanda de N nas plantas (PASTOR-BUEIS *et al.*, 2021). O caso de sucesso da FBN em commodity foi observado na cultura da soja. Atualmente, o Brasil é o maior produtor de soja (*Glycine max* L.) do mundo, com uma produção de 156 milhões de toneladas na safra 2022/23, sem gastos com fertilizantes nitrogenados, o que implica numa economia anual de mais de 10,3 bilhões de dólares (CONAB, 2023). Esse sucesso, incentiva o estudo e o aprimoramento de técnicas para as demais fabáceas de interesse comercial, sendo o feijoeiro comum o principal.

Nos anos 60, teve início a análise da FBN em feijão convencional, investigando diversos aspectos como tipo de solo, cultivares de feijão e cepas bacterianas que poderiam afetar a interação entre rizóbio e planta (DÖBEREINER & RUSCHEL, 1961). Com o passar dos anos, outros fatores que influenciam essa interação foram estudados: o ciclo de cultivo do feijão (BARRADAS *et al.*, 1989; BODDEY *et al.*, 1996 citados por: HUNGRIA *et al.*, 2023), a resposta da interação a altas temperaturas e baixa umidade do solo (PERES *et al.*, 1994, HUNGRIA & VARGAS, 2000), e cepas nativas capazes de melhorar a FBN.

Estirpes de rizóbios competitivas, geneticamente estáveis, tolerantes a solos ácidos e a altas temperaturas têm sido selecionadas, principalmente dentro do gênero *Rhizobium*, com melhor eficiência da FBN no feijoeiro. Como resultado, estirpes como *R. tropici* SEMIA 4077 (= CIAT 899) e SEMIA 4088 (= H 12) e *R. freirei* SEMIA 4080 (= PRF 81) foram selecionadas e são autorizadas para a produção de inoculantes para a cultura do feijoeiro no Brasil (BRASIL, 2011) na atualidade.

Apesar de algumas pesquisas apontarem o bom desempenho (BARROS *et al.*, 2018) a inoculação do feijoeiro-comum com estirpes ainda não apresenta resultados sólidos que garantem a recomendação inequívoca da técnica na substituição total da adubação mineral, fazendo com que a prática seja subavaliada e pouco explorada pelos produtores,

representando apenas 0,3% do consumo total de inoculantes no país (ANPII, 2018). De acordo com Hungria (2013), a cultura encontra desafios a serem superados, dentre eles: a escassez de programas de melhoramento genético focados nessa simbiose; a sensibilidade das estirpes de *Rhizobium* a condições ambientais adversas; senescência precoce dos nódulos e a ineficácia desses rizóbios em fixar o nitrogênio atmosférico no solo, apesar de serem eficientes na formação de nódulos.

Segundo avaliado nos estudos de Teixeira *et al.* (2022) e Coelho (2021) a capacidade de resposta do feijoeiro em fixar o nitrogênio atmosférico é questionável, principalmente devido à sua incapacidade de fornecer todo o nitrogênio nas fases de floração e enchimento de grãos, quando a cultura mais necessita, variável a depender da cultivar.

De acordo com Andraus *et al.* (2016), cultivares de ciclo precoce e semi-precoce, quando inoculadas com estirpes comerciais de *R. tropici*, mantêm nódulos ativos entre 19 a 47 dias após a emergência, três dias a mais que cultivares com ciclo de vida regular como BRS Estilo e Pérola. Nas cultivares com ciclo de vida regular, os nódulos ativos foram observados entre 20 a 45 dias após a emergência, atingindo o número máximo de nódulos ativos (60%) durante os estágios de desenvolvimento V4 a R5, estabilizando-se no estágio R6, até que no estágio R7 se inicia o processo de senescência, atingindo a senescência total no estágio R8 para todas as cultivares avaliadas.

O método de inoculação mais empregado é o via semente com uso de inoculantes sólidos (turfa) exclusivamente, entretanto outros métodos de aplicação então sendo usados pelos produtores, como a inoculação feita diretamente nas sementes ou no sulco de plantio antes da semeadura, além de não necessitar de equipamentos específicos e maior proteção do aplicador que está tratando a semente, o que se tornou viável com a lançamento do mercado de inoculantes líquidos.

Estudos recentes foram conduzidos com o objetivo de investigar as formas de inoculação capazes de melhorar a eficiência da nodulação no feijoeiro e suprir a necessidade de N no período mais crítico da cultura, de forma a reduzir ao máximo a utilização de N mineral e garantir melhor custo benefício para o produtor em soja (MORETTI *et al.*, 2018) e feijão (TEIXEIRA *et al.*, 2022). Segundo Oliveira *et al.*, (2017), a inoculação do feijoeiro via sulco de semeadura resultou em maior produtividade (1.975 kg ha^{-1}) quando comparada com a inoculação via sementes (1.563 kg ha^{-1}) e significativamente semelhante à produtividade obtida com a adubação mineral de $80 \text{ kg de N ha}^{-1}$ (1.979 kg ha^{-1}). A inoculação via sulco de semeadura é recomendada quando as sementes de feijão forem tratadas com fungicidas, visto que estes agroquímicos podem comprometer a sobrevivência das bactérias inoculadas e

prejudicar o estabelecimento da simbiose entre rizóbios e o feijoeiro (CARDILLO *et al.*, 2019).

O processo de reinoculação tardia ou inoculação suplementar de células rizobianas em cobertura, é estudado na atualidade como uma possível alternativa para melhorar o processo de FBN no feijão-comum. A prática consiste na realização da inoculação no ato da semeadura, diretamente na semente, seguido pela aplicação de inoculante em cobertura, em pulverização realizada nas proximidades do sistema radicular da planta (TEIXEIRA *et al.*, 2022). Nesse processo busca-se disponibilizar os microrganismos nos estádios críticos da planta, compreendido entre florescimento e enchimento de grãos, para suprir a necessidade N durante todo o ciclo da cultura (ALMEIDA *et al.*, 2022).

Em pesquisa realizada por Sousa *et al.* (2020) foi possível verificar que a combinação de inoculação via semente com inoculação adicional em cobertura no estágio V4 pode substituir a aplicação de ureia com doses de 20 e 40 kg ha⁻¹ na base e em cobertura, respectivamente, sem afetar a produtividade do feijão comum, em um experimento realizado em Ipameri-GO. De maneira similar, Garé (2020) constatou que a reinoculação com *R. tropici* no estágio V4 resultou em uma melhoria na produção de grãos da cultivar IPR Campos Gerais, em um experimento conduzido sob plantio direto, no Mato Grosso do Sul.

De acordo com Teixeira *et al.* (2022) a aplicação do inoculante aumentou a taxa de nodulação do feijoeiro cultivar BRS Cometa, bem como a biomassa seca produzida pelas plantas. A dose de 257 mL ha⁻¹ do inoculante líquido a base de *R. tropici* aplicado no estágio V4 em área anteriormente inoculada via semente apresentou maior produtividade de feijão, sem a necessidade de suplementação de nitrogênio mineral.

Outra prática que tem contribuído para melhoria da FBN é a co-inoculação, tanto nas culturas da soja como de feijão. A ideia de combinar duas ou mais estirpes ou espécies de microrganismos nas práticas de inoculação é baseada na exploração de seus diferentes modos de ação como a FBN, a produção de reguladores de crescimento, a solubilização de fosfatos e a ação de biocontrole, influenciando positivamente o desenvolvimento vegetal e refletindo, principalmente, na produtividade das culturas agrícolas (AHEMAD & KIBRET, 2014; SANTOS *et al.*, 2019). Nas condições brasileiras, com o feijoeiro, a inoculação convencional de *R. tropici* pode reduzir o uso de fertilizante nitrogenado, e quando inoculadas junto com outras bactérias promotoras de crescimento, os ganhos em nodulação, biomassa da parte aérea e raízes, e produtividade podem ser ainda maiores (STEINER *et al.*, 2019).

Em estudo realizado pela Ferreira *et al.* (2020), foi possível averiguar que o *Azospirillum* potencializa o desenvolvimento do feijoeiro, principalmente as raízes, resultando

em melhores condições para que abasteça a simbiose com o *Rhizobium* na fixação de N. Além da associação, o maior volume radicular gerado pelo *Azospirillum* melhora a absorção de água e de nutrientes no solo e promove o crescimento da parte aérea e da produção de grãos. Contudo, os trabalhos existentes na literatura envolvendo a co-inoculação de *R. tropici* + *A. brasilense* na cultura de feijão foram realizados diretamente na semente (STEINER *et al.*, 2019).

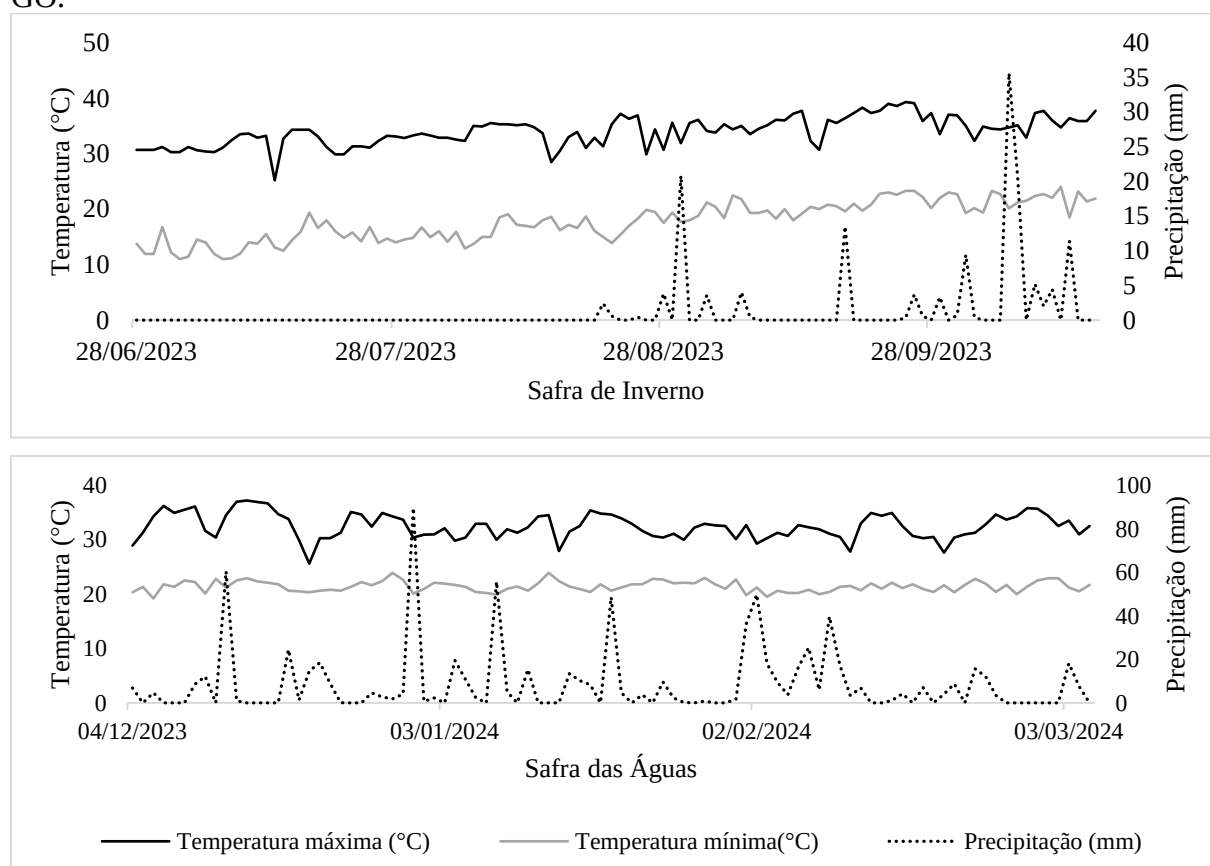
Os resultados do emprego das técnicas citadas acima se mostram satisfatórios, porém há uma carência de estudos relacionados ao uso de reinoculação com *R. tropici* ou co-inoculação com *azospirillum* em cobertura. Nesse cenário, afim de contribuir às pesquisas acerca da FBN no feijoeiro, e atendendo aos princípios da inovação, visando a sustentabilidade, é oportuno investigar se a inoculação via semente, somada a reinoculação com *R. tropici* ou co-inoculação com *Azospirillum* em diferentes fases de crescimento do feijoeiro, poderia substituir parcialmente ou totalmente o uso da adubação nitrogenada.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

Os experimentos foram conduzidos em duas safras agrícolas, “inverno” de 2023 (Safra 1) e “águas” de 2023/2024 (Safra 2), na área experimental da Agência Goiânia de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária – EMATER, situada no município de Anápolis-GO, cuja a localização geográfica: 16°20’12,13” Sul e 48°53’15.96” Oeste, e altitude média de 1058 m (GOOGLE EARTH, 2023). O clima da região, segundo a classificação de Köppen é do tipo Aw tropical úmido, com estação seca no período outono inverno (maio-outubro) e chuvas no período primavera-verão (novembro-abril) e a temperatura média anual é de 22°C, com precipitação média anual de 1677 mm (CLIMATE-DATA.ORG, 2024). Os dados climáticos prevaletentes durante a condução dos experimentos são apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Dados climatológicos referentes as temperaturas máxima e mínima e precipitação no período compreendido entre julho de 2023 a março de 2024, no município de Anápolis-GO.



Fonte: Adaptado de INMET (2024).

Para as análises do solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distroférrico (SANTOS *et al.*, 2018) foram retiradas amostras na camada de 0 – 20 cm e enviadas para o laboratório para caracterização químico-física, cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características químicas e físicas dos solos, coletados na camada 0-20 cm, na área experimental da Agência Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária (EMATER). UEG, CET, Anápolis/GO, 2024.

Características Químicas			
Variáveis	Unidades	Resultados Safra 1 (Inverno)	Resultados Safra (Águas)
Cálcio (Ca)	cmol/dm ³	2,9	2,8
Magnésio (Mg)	cmol/dm ³	1	0,7
Alumínio (Al)	cmol/dm ³	0	0
Acidez Potencial (H + Al)	cmol/dm ³	3,8	2,9
Potássio (K)	cmol/dm ³	0,36	0,31
Potássio (K)	mg/dm ³	140,7	119,4
P (Melich)	mg/dm ³	18,1	12,7
Enxofre (S)	mg/dm ³	2	3,4
Sódio (Na)	mg/dm ³	2,1	6,4
Zinco (Zn)	mg/dm ³	11,1	6,5
Boro (B)	mg/dm ³	0	0
Cobre (Cu)	mg/dm ³	2,7	2,2
Ferro (Fe)	mg/dm ³	19,8	26,2
Manganês (Mn)	mg/dm ³	22,8	19,3
CTC pH 7,0	-	8,07	6,74
Saturação em Bases (Sat. Bases)	%	52,9	56,94
Matéria Orgânica (M.O.)	g/dm ³	31	28
Carbono	g/dm ³	17,98	16,24
pH (CaCl ₂)	-	5,1	5
Características físicas			
Variáveis	Unidades	Safra 1 - Inverno	Safra 2 - Águas
Areia	g/kg	450	450
Silte	g/kg	110	110
Argila	g/kg	440	440

Fonte: Adaptado de Solocria Laboratório Agropecuário Ltda (2023).

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

Os experimentos foram conduzidos no delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos testados no estudo estão descritos no Quadro 1.

Quadro 1 – Descrição dos tratamentos testados nos experimentos de inverno de 2023 (safra 1) e águas 2023/2024 (safra 2).

Tratamentos	Descrição
T1	Reinoculação com <i>R. tropici</i> em cobertura V3
T2	Reinoculação com <i>R. tropici</i> em cobertura V4
T3	Reinoculação com <i>R. tropici</i> em cobertura R5
T4	Reinoculação com <i>R. tropici</i> em cobertura R6
T5	Co-inoculação <i>R. tropici</i> + <i>A. brasilense</i> em cobertura V3
T6	Co-inoculação <i>R. tropici</i> + <i>A. brasilense</i> em cobertura V4
T7	Co-inoculação <i>R. tropici</i> + <i>A. brasilense</i> em cobertura R5
T8	Co-inoculação <i>R. tropici</i> + <i>A. brasilense</i> em cobertura R6
T9	Testemunha
T10	Inoculação com <i>R. tropici</i> via semente
T11	Co-inoculação <i>R. tropici</i> + <i>A. brasilense</i> via semente
T12	Adubação mineral nitrogenada

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

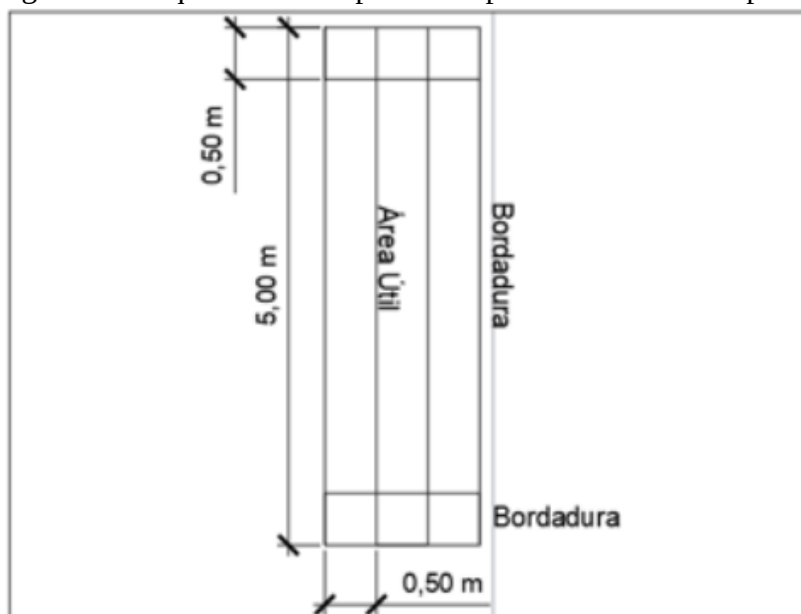
Os tratamentos inoculados foram submetidos inicialmente ao procedimento de aplicação de inoculantes líquidos comerciais via sementes com células de *R. tropici* (SEMIA4088 e SEMIA 4077) (2×10^9 UFC ml⁻¹) na dose de 150 ml 50 kg⁻¹ e a co-inoculação com *A. brasilense* (3×10^9 UFC ml⁻¹) na dose de 100 ml 50 kg⁻¹ semente, conforme doses recomendadas pelos fabricantes para a cultura do feijão, para ambos os experimentos. Posteriormente estes tratamentos receberam as reinoculações, em ambas das safras de cultivo com doses triplicadas, em função da maior interação dos produtos biológicos com as partículas do solo (GALINDO *et al.*, 2018; ALMEIDA *et al.*, 2022). Foram testados ainda quatro tratamentos: testemunha (sem adubação nitrogenada), sementes inoculadas com *R. tropici* e co-inoculada com *A. brasilense* e adubação mineral nitrogenada (16 e 64 kg N ha⁻¹ respectivamente na base e em cobertura).

3.3 Implementação e condução

As parcelas experimentais foram constituídas de quatro fileiras de 5,0 m de comprimento, espaçadas de 0,50 m, sendo as duas linhas centrais consideradas com área útil, e as duas linhas laterais, e o primeiro 0,50 m da extremidade bordaduras da parcela (Figura 2). Anteriormente ambas as áreas de cultivo foram cultivadas com milho safrinha. Todavia, foi necessária a realização da calagem, com aplicação de 2,0 ton ha⁻¹ de calcário dolomítico para corrigir a acidez elevada do solo (Quadro 1), e três meses após foram submetidas ao preparo

do solo convencional, com uma aração e duas gradagens. Na adubação de base dos dois experimentos foi realizada em todas as parcelas experimentais empregando 400 kg ha⁻¹ do adubo formulado 4-30-20 no sulco de plantio. A adição da dose de 16 kg N ha⁻¹ na base nos tratamentos submetidos a inoculação e/ou co-inoculação via semente e/ou reinoculação foi realizado visando propiciar o arranque inicial das plantas, visto que as bactérias inoculadas ainda não estão em atividade plena no sistema radicular do feijoeiro (TEIXEIRA *et al.*, 2022).

Figura 2- Croqui da área da parcela experimental e suas expectativas bordaduras.



Fonte: Autora (2024).

A densidade de plantas da área foi em 12 plantas por metros por ocasião da avaliação da emergência do estande, não sendo necessário a realização de desbaste nas duas áreas de cultivo. Foi utilizada a cultivar de feijão BRS Estilo, que possui grão tipo carioca, porte ereto, hábito de crescimento indeterminado (tipo II), ciclo médio de 90 dias, adaptada a colheita mecanizada, resistência ao mosaico comum e reação intermediária a antracnose e ferrugem, potencial produtivo de 4,0 t ha⁻¹ (EMBRAPA, 2018).

Os procedimentos de reinoculação foram iniciados no estágio V4 e concluído no estágio R6, sendo as aplicações realizadas com auxílio de um pulverizador de 5 litros, com jato direcionado para o solo, visando disponibilizar a população de bactérias no sistema radicular da planta. A adubação de cobertura foi realizada no tratamento com adubo mineral nitrogenado, tendo a ureia como fonte, na dose de 80 kg ha⁻¹, foi fracionada aos 25 e 35 dias após a emergência – DAE para evitar perdas de volatilização e/ou lixiviação.

Na safra de inverno foi realizada irrigação por aspersão durante todo o ciclo do feijão usando equipamento de aspersão para suprir as necessidades hídricas da cultura, mantendo-se uma frequência de duas irrigações semanais durante a fase de crescimento e três irrigações após o florescimento e enchimento de grãos. Já na safra das águas, foi conduzido sem a necessidade de irrigação.

Foi necessário fazer o controle de formigas cortadeiras (*Atta spp.*) entre os estádios iniciais da cultura compreendido entre os estádios V1 a V3, por meio da distribuição de iscas nas áreas dos experimentos a base do Fipronil. O controle de plantas daninhas foi realizado com o uso de herbicida pós-emergência Fusiflex (Fomesafem + Fluasifop-P-Butíl), dose 1,0 L ha⁻¹ foi aplicado aos 25 DAE em ambas as áreas experimentais. Os inseticidas Mospilan (Acetamiprido), dose 100 g ha⁻¹, e Pirate (Clorfenapir), dose 1,0 L ha⁻¹, foram usados para controlar mosca branca e vaquinha, enquanto o fungicida Approve[®] (Tiofanato Metílico), na dose de 100 g p.c. 100 L⁻¹) foi usado para controle das doenças antracnose e mancha angular preventivamente logo após o florescimento. No estágio R8 foi aplicado o dessecante Reglone (Diquat), dose 1,0 L ha⁻¹, visando uniformizar maturação e acelerar à colheita nos dois experimentos.

3.4. Características avaliadas

No estágio R7 (pleno enchimento de vagem) foram realizadas amostragem de cinco plantas inteiras, incluindo a raiz em ambos os experimentos, nos primeiros 0,5 m das fileiras que fizeram parte da área útil da parcela, com auxílio de uma pá reta visando recuperar o máximo de sistema radicular das plantas na profundidade de 0-0,3 m de profundidade. O excesso de solo do sistema radicular foi retirado e as plantas inteiras foram acondicionadas em sacos plásticos e imediatamente levadas ao Laboratório de Análise Vegetal – LABAV situado no Centro de Pesquisa e Pós-Graduação – CPPG da UEG/CCET, onde as raízes foram lavadas em água corrente para retiradas do solo remanescente, além da parte aérea quando necessária.

Em seguida, as plantas foram seccionadas na região do colo visando fazer as avaliações do sistema radicular e da parte aérea da planta, de forma individualizada, conforme citado abaixo, para as características nodulares e morfofisiológicas.

3.4.1. Características nodulares

3.4.1.1. Número de nódulos por planta (NNP)

Após a separação e lavagem, as raízes foram dispostas em papel absorvente para a retirada do excesso de água. Posteriormente ocorreu a verificação e retirada dos nódulos com tamanho acima de 1 mm, com auxílio de uma pinça. Os nódulos destacados foram colocados em uma placa de petri e contabilizados. O resultado foi obtido pela média aritmética expresso numericamente por planta.

3.4.1.2. Massa seca de nódulos por planta (MSN)

Os nódulos destacados foram levados à estufa de circulação forçada por 72 horas à 65 °C, com pesagem do material seco em balança de precisão, para determinação da massa seca de nódulos por planta. Com base nesses resultados, foi calculada a razão entre a massa seca e o número de nódulos por planta, para obtenção da massa seca de nódulos por planta (MOREIRA, 2017).

3.4.2. Características morfofisiológicas

3.4.2.1. Comprimento da raiz principal (CRP)

O comprimento de raiz principal foi aferido com o auxílio de uma régua, medindo a distância entre o colo da planta e a extremidade final da raiz (coifa). O resultado foi obtido através da média aritmética das 5 plantas coletadas e expresso em cm.

3.4.2.2. massa seca da raiz (MSR) e massa seca da parte aérea (MSPA)

Para se obter a massa seca, os órgãos das plantas foram separados em: raiz e parte aérea. As amostras foram colocadas em sacos de papel kraft, e então levadas a estufa de circulação forçada regulada em 72 ± 1 °C, por um período de 72 horas, pesando-as posteriormente em balança de precisão (0,001g) para obtenção da massa seca da raiz e parte aérea, nos quais os resultados foram expressos em gramas por planta (ALMEIDA *et al.*, 2022).

3.4.2.3. Teor de nitrogênio foliar (TN)

Foram retirados 20 trifólios completamente desenvolvidos a partir do ápice da haste principal na área útil da parcela para avaliação do teor foliar de N seguindo o método de Kjeldahl, conforme metodologia descrita por Silva (2009).

3.4.3. Características Agronômicas

No estágio de plena maturação (R9) foi realizada inicialmente a avaliação do estande final e a coleta de 10 plantas na área útil da parcela para avaliação dos componentes, e posteriormente o restante das parcelas para avaliação do rendimento de grãos, conforme citados a seguir:

3.4.3.1 Estande final (EF)

Logrado por meio da contagem direta de todas as plantas da área útil de cada parcela.

3.4.3.2. Número de vagens por planta (NVP)

Obtida pela obtenção da média baseada no número de vagens obtido das dez plantas. O resultado expresso em unidades por planta.

3.4.3.3. Número de grãos por vagem (NGV)

Média obtida com base no número de grãos obtidos no total de vagens das dez plantas. O resultado expresso em unidades por planta.

3.4.3.4. Massa de 100 grãos (PCG)

Resultado expresso em gramas, obtido pela amostra de 100 grãos escolhidos aleatoriamente das 10 plantas.

3.4.3.5. Rendimento de grãos (REND)

Calculada pela massa dos grãos provenientes de todas as plantas coletadas na área útil, pesando-as em balança de precisão de 0,01 g, o resultado extrapolado para kg ha^{-1} e teor de água corrigido para 13%.

3.5 Análise estatística

Os dados obtidos foram inicialmente submetidos a normalidade dos resíduos e homogeneidade de variâncias, visando atender os pressupostos metodológicos, e posteriormente as estatísticas paramétricas, sendo realizada a análise de variância a 5% de probabilidade e ao teste de Scott Knott a 5% de probabilidade para discriminar os efeitos das comparações múltiplas das médias dos tratamentos envolvendo a análise conjunta das duas safras de cultivo. Essas análises foram conduzidas utilizando o pacote ExpDes.pt (FERREIRA *et al.*, 2021). As análises estatísticas foram realizadas empregando o software R

Studio (R CORE TEAM, 2022), e para a representação gráfica dos resultados foi utilizado o pacote ggplot2 (WICKHAM, 2016).

Adicionalmente, foi realizada a análise dos componentes principais (PCA), a fim de avaliar de modo exploratório a relação entre as variáveis estudadas. Esta análise foi realizada no Programa R Studio (R CORE TEAM, 2022) e foi utilizado o pacote factoextra (KASSAMBARA & MUN, 2020) para a representação gráfica dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análises Nodulares

Pelo resultado da análise de variância pode-se observar que o número de nódulos por planta (NNP) de feijão foi influenciado pela interação safras *versus* tratamentos, enquanto a massa seca de nódulos (MSN) foi influenciada somente pelo fator safra (Tabela 2). O elevado valor para o coeficiente de variação da interação safra *versus* tratamento foi verificado para a característica NNP - 35,9%, considerado muito alto, segundo a classificação para experimentação agrícola proposta por Pimentel-Gomes (1990).

Todavia, esta baixa precisão experimental em estudos envolvendo essa característica é considerada normal, e também é relatada nos trabalhos de Almeida *et al.* (2022) e Sales (2020) nos quais foram obtidos C.V superiores a 50%. A explicação para esse elevado valor está na dificuldade em recuperar todo o sistema radicular das plantas amostradas. Apesar disso, foi possível detectar diferença significativa ($p > 0,05$) sobre as referidas características. Como relação a MSN, foi observada boa precisão experimental da obtenção dos dados.

Tabela 2 – Resumo da Análise de Variância (Quadrado Médio) referente ao número de nódulos por planta (NNP) e massa seca de nódulos (MSN) do feijoeiro submetido a tratamentos relacionados a inoculação com *R. tropici* e co-inoculação com *A. brasilense*, na semente e em cobertura, em duas safras de cultivo. UEG, Anápolis-GO, 2024.

Causas de variação	GL	Quadrado Médio	
		NNP	MSN
Blocos d. safras	3	1,467*	0,000068 ^{ns}
Safras (S)	1	60,822**	0,002655 **
Resíduo a	33	0,433 ^{ns}	0,000123 ^{ns}
Tratamento (T)	11	2,511**	0,000132 ^{ns}
S x T	11	1,685*	0,000127 ^{ns}
Resíduo b	36	0,736 ^{ns}	0,000101 ^{ns}
C.V 1 (%)	-	27,5	1,1
C.V 2 (%)	-	35,9	1,0

G.L. Grau de Liberdade; C.V 1. Coeficiente de Variação da interação T x bloco; C.V 2 Coeficiente de Variação (S x T); Resíduo a interação T x bloco; Resíduo b interação entre safras; * Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de F; ** significativo a 1% pelo teste de F; ns não significativo.

Fonte: Elaborada pela Autora (2024).

A maior quantidade de NNP de feijão foi produzida na safra das águas no Trat. 1 que recebeu reinoculação de *R. tropici* em V3 – 22 NNP seguido do Trat. 6 com co-inoculação via semente e reinoculação + co-inoculação por cobertura em V4 (Figura 3A), valor este próximo

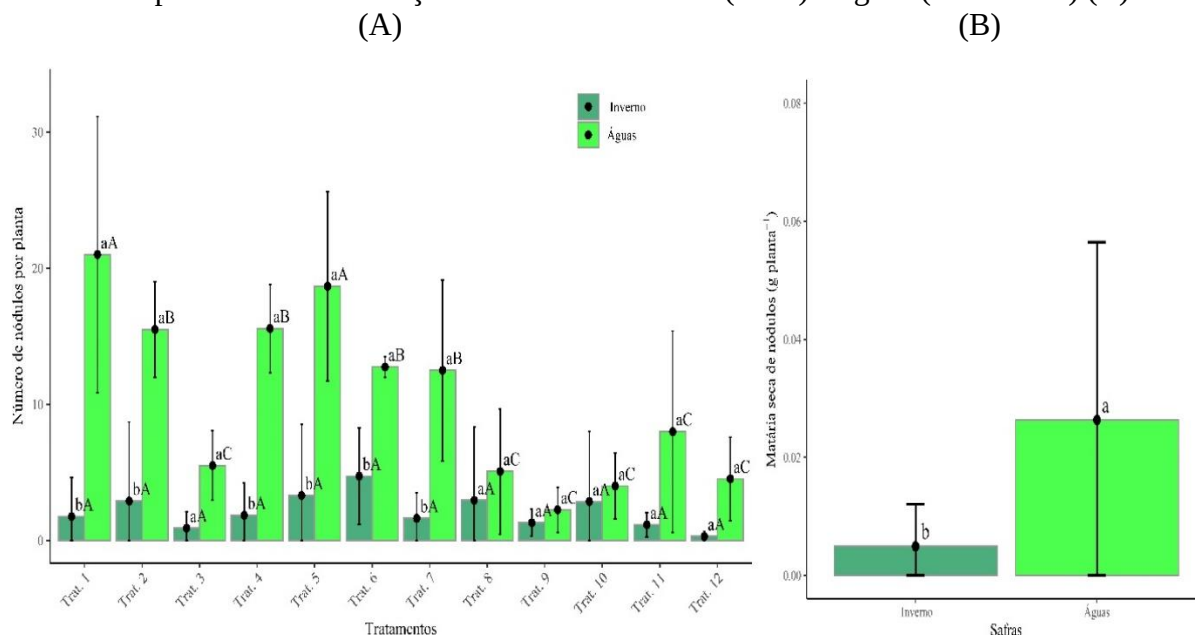
ao obtido em pesquisa realizada por Almeida *et al.* (2022), que obtiveram 24 NNP para a cultivar BRS Esteio co-inoculada em V4. Em contrapartida, os menores valores de NNP foram observados para Trat. 9, correspondente a testemunha com ausência de inoculante e adubação mineral, e o Trat. 12, adubação mineral, que mantiveram o baixo desempenho em ambas as safras.

Esses resultados corroboram aos relatos de Lourenço *et al.* (2023), que para os quais a existência de pequenas quantidades de nódulos encontradas nestes tratamentos pode ser atribuída a presença de estirpes nativas no solo, capazes de fixar N₂ simbioticamente, mas que não superam aos valores encontrados para os tratamentos que receberam inoculação com estirpes selecionadas nas sementes e em reinoculação, e co-inoculação, as quais são mais eficientes, destacando-se o uso do produto biológico como um método eficaz na formação e incremento de nódulos.

Destaca-se ainda, o acréscimo do NNP nos tratamentos que receberam a aplicação dos inoculantes em cobertura (Trat.1 a Trat. 8) se comparados aos que foram inoculados apenas via semente (Trat. 10 e Trat. 11) na safra 2 (águas). Resultados semelhantes foram obtidos em estudo conduzidos por Moretti *et al.* (2018) com soja e por Teixeira *et al.* (2022) com feijão, e confirma a eficácia da técnica de reinoculação em cobertura realizada no estudo, por permitir o desenvolvimento de novos nódulos funcionais, capaz de suportar o aumento da demanda de N em fases reprodutivas das plantas de feijão.

Em contrapartida, na safra de inverno pode-se averiguar que o processo de nodulação do feijoeiro foi menos eficiente se comparado a safra das águas, o que pode ser atribuído a ocorrência de baixas temperaturas durante especialmente nos estádios iniciais da cultura, em torno 15 °C (Figura 1), justamente quando as populações de bactérias inoculadas estão estabelecendo no sistema radicular do feijoeiro. Essa condição climática, já esperada para época, ocasionou o atraso na germinação/emergência das sementes. De acordo com Vieira (2006), isto ocorre porque quando a semente é lançada ao solo, ela apenas desencadeará o processo de germinação quando encontrar condições ideais de temperatura, umidade e luminosidade. O atraso influencia o processo de infecção das rizobactérias nas plantas, pois aumenta a competição entre as bactérias inoculadas e as bactérias nativa do solo, sendo as últimas mais resistentes as condições edafoclimáticas e capazes de gerar maiores populações em condições extremas (VANLAUWE *et al.*, 2019). Geralmente, a temperatura ótima para os rizóbios realizarem FBN em interação com o feijoeiro varia de 25 °C a 38 °C (COELHO *et al.*, 2021), intervalo superior as temperaturas máxima e mínima verificadas no estudo, em torno de 30 °C a 15 °C (Figura 1).

Figura 3 –Número de nódulos por planta (NNP) (A) em função dos tratamentos, e análise da massa seca por nódulos em relação as safras de inverno (2023) e águas (2023/2024) (B).



Trat 1 – Reinoculação em cobertura no V3, Trat 2 - Reinoculação em cobertura no V4, Trat 3 – Reinoculação em cobertura no R5, Trat 4 - Reinoculação em cobertura no R6, Trat 5 – Co-inoculação em cobertura no V3, Trat 6 – Co-inoculação em cobertura no V4, Trat 7- Co-inoculação em cobertura no R5, Trat 8 – Co-inoculação em cobertura no R6, Trat 9- Testemunha, Trat 10 - Inoculação via semente, Trat 11- Co-inoculação via semente, Trat 12- Adubação mineral nitrogenada. Letras minúsculas comparação entre safras nos tratamentos, letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma safra. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%.

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Apesar disso, nota-se um comportamento semelhante no processo de nodulação das plantas ao obtido na safra das águas, com a maior quantidade de NNP sendo encontrada no sistema radicular do feijoeiro no tratamento que recebeu co-inoculação com *R. tropici* e *Azospirillum* via semente + reinoculação e co-inoculação em cobertura no estádio, porém no estádio V4 (Trat. 6), com média de 5 nódulos por planta (Figura 3A). A média geral do NNP encontrado foi entorno de 2,8 nódulos envolvendo todos os tratamentos na safra de inverno, o que é considerado baixo se comparado aos encontrados no estudo realizado por Ribeiro *et al.* (2024), no qual o tratamento com reinoculação com co-inoculação *R. tropici* + *A. brasilense* + micronutrientes Mo/Co, propiciou a obtenção de maior média com 20,4 nódulos por planta, usando também a cv. BRS Estilo na safra das águas.

Os resultados da MSN refletem em parte aos dados do NNP, visto que foi detectado efeito significativo entre safras somente, com destaque para a safra das águas, na qual foram obtidas 0,0264 g de nódulos por planta, correspondendo a 26,4 mg nódulos por planta (Figura 3B). Apesar da MSN não ter sido influenciada pelos tratamentos estudados foi possível verificar que o emprego da co-inoculação via semente e em cobertura possibilitou a obtenção

de nodulação considerada adequada, atingido valores médios superior a 20 NNP e MSN superior a 100 mg por planta (dados não mostrados), considerados satisfatórios para uma boa eficiência da FBN conforme relato de Silva Neto *et al.* (2013).

De forma geral, pode-se observar em ambas as safras que a realização da co-inoculação *R. tropici* + *A. brasilense* na semente seguindo da reinoculação em cobertura, possibilitou o aumento do NNP e da MSN das plantas, resultados que também foram encontrados em outros estudos: Peres *et al.* (2016), constataram em sua experimentação, utilizando *R. tropici* e *A. brasilense* em co-inoculação, aumento da nodulação do feijão comparado a inoculação com *R. tropici* isoladamente, assim como os estudos de Steiner *et al.* (2019), ao concluírem que a co-inoculação com *A. brasilense* proporcionou incremento no número de nódulos por planta em relação às plantas inoculadas apenas com rizóbios.

Destaca-se ainda, que numericamente, os tratamentos que envolveram inoculações e co-inoculação via semente e posteriormente em reinoculação em cobertura apresentaram valores superiores de nodulação em relação ao tratamento com adubação nitrogenada em cobertura para número e massa seca de nódulos. Na literatura comumente são encontrados resultados de pesquisa que corroborem com o comportamento destes dados a respeito do efeito negativo do N mineral sobre o desempenho das rizobactérias (SALES *et al.*, 2020; RAMIRES *et al.*, 2018; TEIXEIRA *et al.* 2022).

4.2 Análises Morfofisiológicas

Pelo resultado da análise de variância pode-se averiguar que as características morfológicas comprimento de raiz principal (CRP) foi influenciada isoladamente pelo fator safra, enquanto a massa seca de raiz (MSR) e a massa seca da parte aérea (MSPA) do feijão foram influenciadas pela interação entre safras de cultivo *versus* tratamentos. O teor foliar de nitrogênio (TN) não foi alterado pelos fatores investigados (Tabela 3). Os valores de C.V. variaram de 10,7 a 21,7%, e quando comparado aos critérios estabelecidos por Pimentel-Gomes (1990) para avaliar precisão de experimentos agrícolas de campo: baixos - < 10%; médio – entre 10 a 20%; alto - entre 20 e 30%, e muito alto - > 30%, pode-se considerar que houve boa precisão experimental na obtenção dos dados.

As plantas de feijão cultivadas na safra inverno de (2023) apresentaram maior CRP, com valor médio equivalente a 22 cm, correspondendo a um crescimento vertical da raiz 29,4% maior em comparação à safra das águas (2023/2024), em que foi obtido 17 cm de CRP, na qual a disponibilidade hídrica dependia apenas da precipitação (Figura 4A).

Tabela 3 – Resumo da Análise de Variância (Quadrado Médio) referente ao comprimento da raiz principal (CRP), massa seca da raiz (MSR), massa seca parte aérea (MSPA) e teor de nitrogênio das folhas (TN) do feijoeiro submetido a tratamentos relacionados a inoculação com *R. tropici* e co-inoculação com *A. brasilense*, na semente e em cobertura, em duas safras de cultivo. UEG, Anápolis-GO, 2024.

Causas de variação	GL	Quadrado Médio			
		CRP	MSR	MSPA	TN
Blocos d. safras	3	2,28 ^{ns}	0,3192 [*]	41,743 ^{**}	31,903 ^{ns}
Safras (S)	1	598 [*]	6,4584 ^{**}	2,768 ^{ns}	9,375 ^{ns}
Resíduo a	33	11,11 ^{ns}	0,1041 ^{ns}	5,128 ^{ns}	16,501 ^{ns}
Tratamento (T)	11	18,11 ^{ns}	0,4160 ^{**}	23,159 ^{**}	22,728 ^{ns}
S x T	11	11,58 ^{ns}	0,3384 [*]	24,411 [*]	19,67 ^{ns}
Resíduo b	36	7,4 ^{ns}	0,1301 ^{ns}	5,763 ^{ns}	22,701 ^{ns}
C.V 1 (%)	-	17,1	16,3	20,5	10,7
C.V 2 (%)	-	13,9	18,2	21,7	12,5

G.L. Grau de Liberdade; C.V 1. Coeficiente de variação da interação T x bloco; C.V 2 Coeficiente de Variação (S x T); Resíduo a interação T x bloco; Resíduo b interação entre safras; * Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de F; ** significativo a 1% pelo teste de F; ns não significativo.

Fonte: Elaborada pela Autora (2024).

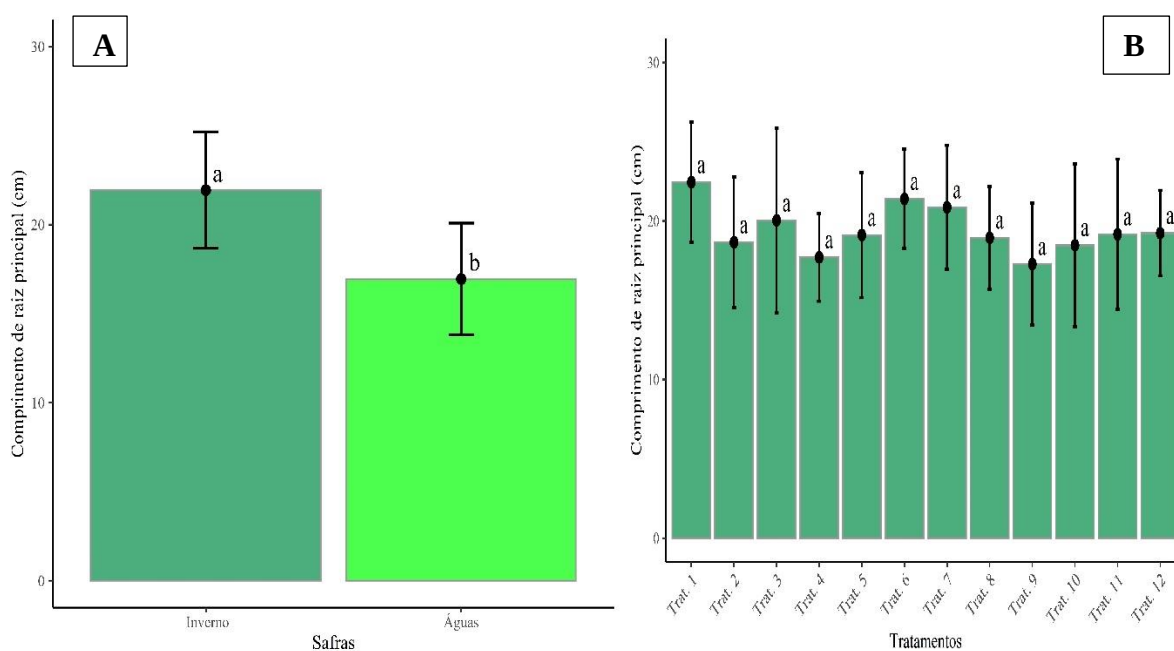
Embora as limitações ao processo de nodulação das plantas de feijão sejam impostas pelas temperaturas mais baixas durante a safra de inverno, especialmente na fase inicial da cultura, a boa disponibilidade hídrica proporcionada pela irrigação, juntamente com o aumento das temperaturas acima de 25 °C a partir do estágio reprodutivo, criou condições mais favoráveis para o desenvolvimento do feijoeiro, incluindo o crescimento das raízes.

Apesar da não detecção de efeito significativo entre os tratamentos, numericamente, os maiores valores de CRP foram verificados nos tratamentos que receberam co-inoculação, com o desenvolvimento médio de 23 cm, enquanto o tratamento T9 (testemunha, ausência de inoculação e adubação mineral) apresentou a menor média - 17 cm (Figura 4B). De acordo com Hungria *et al.*, (2023) a ausência de N a fertilização nesse tratamento justifica o limitado crescimento e acúmulo de biomassa no sistema radicular do feijoeiro, comparado os tratamentos que receberam inoculante ou adubação mineral nitrogenada, além de confirmar o potencial do emprego da inoculação de bactérias nodulíferas, em associação ou não com *azopirillum* em promover acréscimo do CRP do feijão.

Resultados semelhantes foram encontrados em estudo conduzido por Horácio *et al.* (2020) ao avaliar o CRP do feijão comum submetido a co-inoculação com rizóbio, *azopirillum* e cianobactérias, no qual concluiu que a incrementação de bactérias promotoras do crescimento radicular na inoculação proporcionou um aumento de 43% do comprimento

radicular em relação ao tratamento testemunha que assumiu o pior desempenho dentre as possibilidades estudadas no trabalho.

Figura 4 – Comprimento da raiz principal (CRP) das plantas de feijão (A) em função dos tratamentos (B), em análise das safras de inverno (2023) e águas (2023/2024).



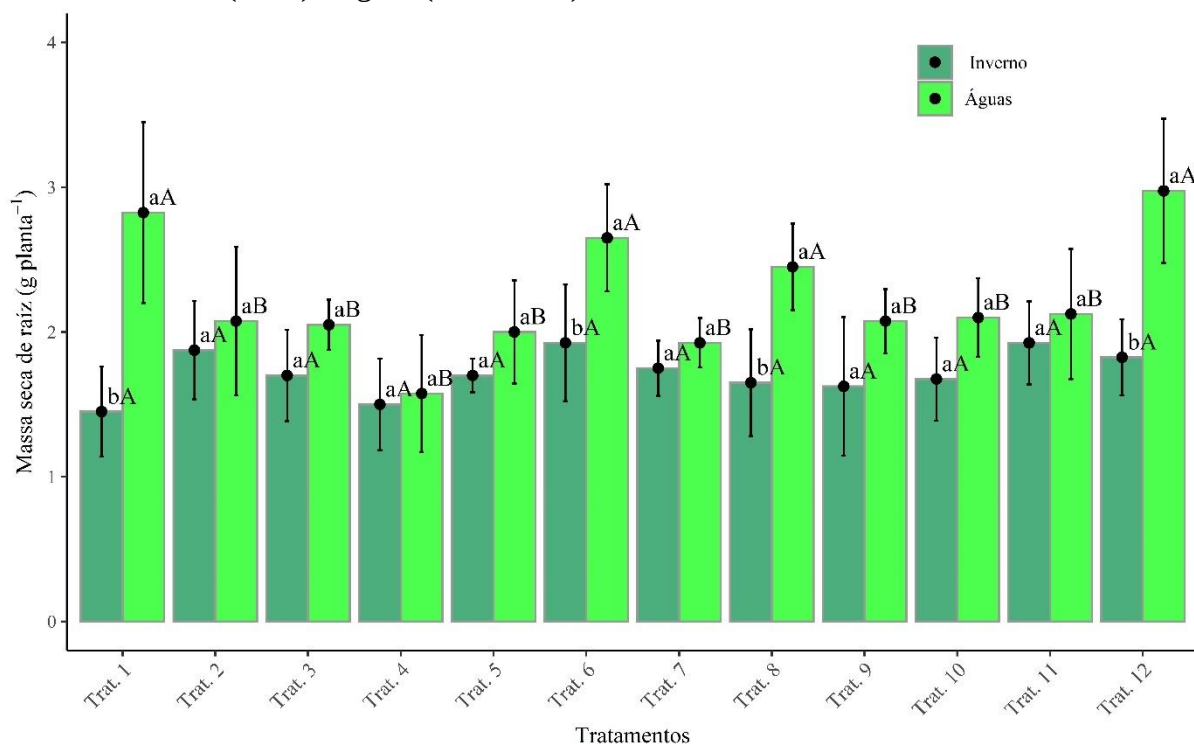
Trat 1 – Reinoculação em cobertura no V3, Trat 2 - Reinoculação em cobertura no V4, Trat 3 – Reinoculação em cobertura no R5, Trat 4 - Reinoculação em cobertura no R6, Trat 5 – Co-inoculação em cobertura no V3, Trat 6 – Co-inoculação em cobertura no V4, Trat 7- Co-inoculação em cobertura no R5, Trat 8 – Co-inoculação em cobertura no R6, Trat 9- Testemunha, Trat 10 - Inoculação via semente, Trat 11- Co-inoculação via semente, Trat 12- Adubação mineral nitrogenada. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%.
Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Para a MSR pode-se averiguar resultado interação safras *versus* tratamentos, com desempenho superior a 22,7% obtido na safra das águas (Figura 5) em relação à safra de inverno, contrariado o resultado visto na safra de inverno para CRP. Logo, pode-se afirmar que o maior valor de MSR produzida na safra das águas em relação à safra de inverno é devido ao maior desenvolvimento das raízes laterais, conforme afirma Souza *et al.* (2017), o desenvolvimento radicular está diretamente ligado as condições do solo, principalmente a compactação, problema bastante recorrente em áreas de plantio convencional, como no caso desse estudo.

Frisa-se ainda, que a MSR é um parâmetro importante a ser observado, uma vez que um sistema radicular mais volumoso pode propiciar maior absorção de nutrientes pela planta, pelo maior contato da raiz com o solo, proporcionando então uma maior resposta da planta quanto ao seu potencial produtivo (BETTIOL, 2019). Os tratamentos que apresentaram maior

massa do sistema radicular foram: Trat 12 (adubação mineral nitrogenada) e Trat 6 (reinoculação + co-inoculação em V4) nas diferentes épocas de cultivo estudadas. Destacou-se também o tratamento 1 (reinoculação em V3) com massa de 2.825 g planta⁻¹ na safra das águas.

Figura 5 – Massa seca de raiz (MSR) das plantas de feijão em função dos tratamentos, nas safras de inverno (2023) e águas (2023/2024).



Trat 1 – Reinoculação em cobertura no V3, Trat 2 - Reinoculação em cobertura no V4, Trat 3 – Reinoculação em cobertura no R5, Trat 4 - Reinoculação em cobertura no R6, Trat 5 – Co-inoculação em cobertura no V3, Trat 6 – Co-inoculação em cobertura no V4, Trat 7- Co-inoculação em cobertura no R5, Trat 8 – Co-inoculação em cobertura no R6, Trat 9- Testemunha, Trat 10 - Inoculação via semente, Trat 11- Co-inoculação via semente, Trat 12- Adubação mineral nitrogenada. Letras minúsculas comparação entre safras nos tratamentos, letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma safra. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%.

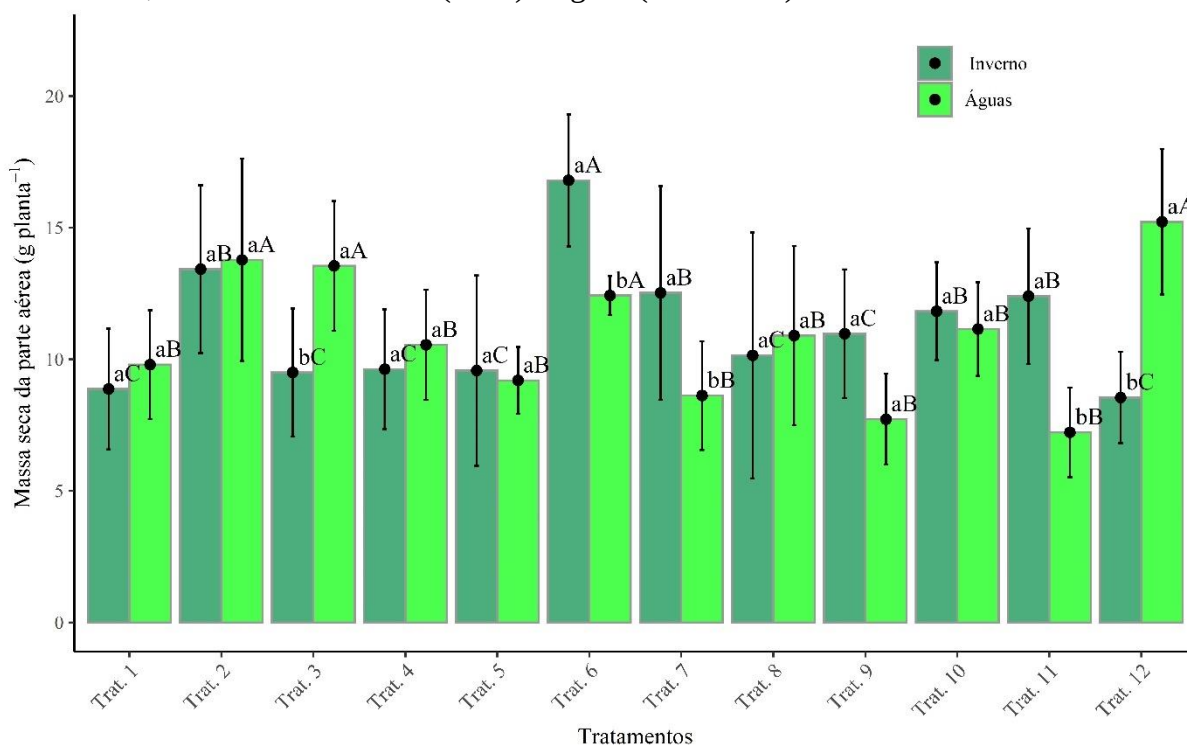
Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

A massa seca da parte aérea (MSPA) do feijoeiro foi influenciada pela interação safras *versus* tratamentos, corroborando aos resultados obtidos para o NNP e a MSR, com destaque para o tratamento 6 que recebeu co-inoculação semente e em cobertura no estágio V4 na safra de inverno, tendo produzindo 16,8 g por planta, seguido dos tratamentos 2, 3 e 12 na safra 2 (águas) em que foram associados a reinoculação em cobertura com rhizobium + azospirillum nos estádios V4 e R5 e o emprego do adubo mineral nitrogenado, com obtenções da MSPA correspondentes a 14,9 g por planta para os tratamentos 2 e 3 e 15,6 g por planta (Figura 6).

Nesse contexto, foi possível constatar que houve incremento considerável na MSPA

produzida no tratamento 6, correspondendo a acréscimos 50,1% em relação à testemunha, em resposta ao emprego da co-inoculação com *A. brasilense* via semente seguindo da reinoculação em cobertura. No estágio V4, a planta está se preparando para o início de sua fase reprodutiva, logo existe uma alta exigência nutricional nesse período, sobretudo de N. Com a disponibilização de rizobactérias por cobertura, foi possível ter um melhor desempenho da FBN que culminou no desenvolvimento da planta. Semelhantemente, Almeida *et al.*, (2022) estudando os efeitos da co-inoculação e reinoculação diversas doses no estágio V4, para a cultivar BRS estilo, notou-se que a presença de inoculante rizobiano associado ao *A. brasilense* proporcionou melhor desenvolvimento do sistema radicular das plantas, com média geral de 20,4 cm. Também foi observado um ganho de 115% em relação a MSR e 65% em relação MSPA quando comparado a testemunha.

Figura 6 – Massa seca da parte aérea (MSPA) das plantas de feijão em função dos tratamentos, nas safras de inverno (2023) e águas (2023/2024).



Trat 1 – Reinoculação em cobertura no V3, Trat 2 - Reinoculação em cobertura no V4, Trat 3 – Reinoculação em cobertura no R5, Trat 4 - Reinoculação em cobertura no R6, Trat 5 – Co-inoculação em cobertura no V3, Trat 6 – Co-inoculação em cobertura no V4, Trat 7- Co-inoculação em cobertura no R5, Trat 8 – Co-inoculação em cobertura no R6, Trat 9- Testemunha, Trat 10 - Inoculação via semente, Trat 11- Co-inoculação via semente, Trat 12- Adubação mineral nitrogenada. Letras minúsculas comparação entre safras nos tratamentos, letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma safra. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%.

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Os acréscimos da MSPA em resposta ao emprego da co-inoculação no feijão parecem estar relacionados à presença de *A. brasilense* na planta, pois esse simbiote promove aumento do crescimento radicular, uma vez que esse microrganismo pode aumentar a produção de auxinas, citocininas e giberelinas, fitohormônios, hormônios responsáveis pelo crescimento vegetal (DARTORA *et al.*, 2013), em consequência aumenta o número de nódulos nas raízes pela aplicação conjunta das células rizobianas. As auxinas atuam no desenvolvimento e crescimento das raízes, e desta forma, o fornecimento deste fitohormônio durante o ciclo da planta pode favorecer aumento no sistema radicular, resultando em melhor nutrição e consequente crescimento do vegetal (HUNGRIA *et al.* 2023).

Além disso, pode-se notar que os resultados obtidos para a MSR e MSPA apresentaram comportamento semelhante em termos de significâncias dos tratamentos testados, demonstraram a existência de forte relação entre estas características, e certamente com reflexo nas características relacionadas as avaliações agronômicas realizadas no momento da colheita.

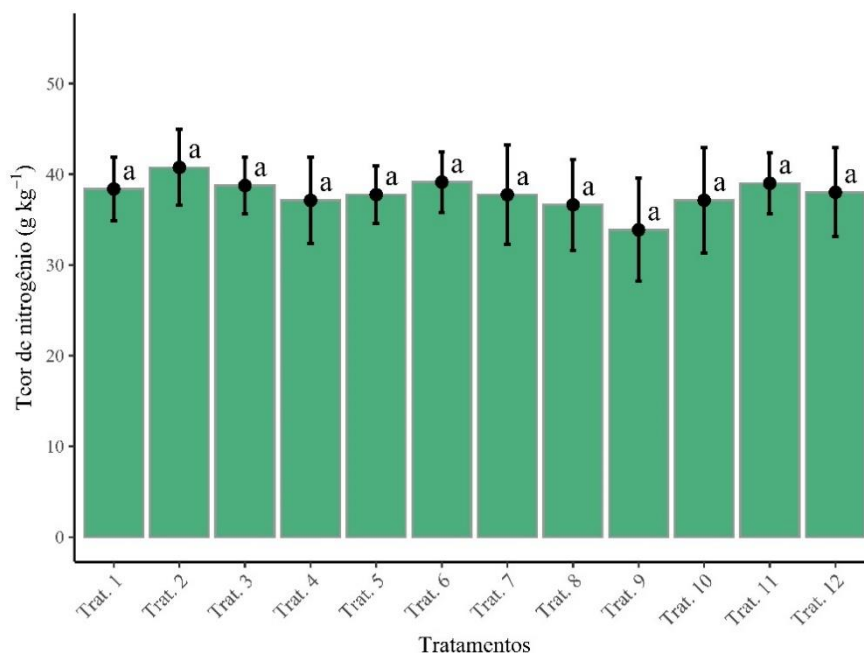
Quanto ao teor de nitrogênio das folhas (TN) foi possível verificar valores médios que variaram de 35 a 41 g kg⁻¹, sem apresentar diferença significativa entre as safras e os tratamentos, como também a interação entre os fatores (Figura 7). Estes valores médios do teor foliar de N encontrados na pesquisa são condizentes aos verificados em pesquisa realizada por Lourenço *et al.* (2023) ao estudar a reinoculação em cobertura com *R. tropici* em diferentes estádios do feijão, cujos valores ariam entre 30 a 50 g kg⁻¹ de N, intervalo considerados por Ambrosano *et al.* (1997) como adequado para o bom desenvolvimento do feijão. Esta afirmativa aparentemente é verdadeira vista não ter sido detectado sintomas de deficiência de N nas plantas de feijão em todos os tratamentos até mesmo na testemunha.

Apesar disso, foi possível averiguar que o tratamento 2, correspondente ao emprego do reinoculação com *R. tropici* em cobertura no V4 apresentou maior teor foliar de N em relação aos demais tratamentos, contudo ressalta-se que isso foi uma tendência.

Segundo Rosolem (1987), o transporte de nutrientes tem início durante a formação das vagens, quando o nitrogênio presente nas folhas é direcionado para este processo e posteriormente para o enchimento dos grãos. A amostragem neste estudo foi realizada no estágio R7 do feijoeiro, caracterizado pela formação das vagens, período em que há uma alta demanda de nutrientes devido ao enchimento dos grãos. Isso pode ter levado ao efeito de diluição do teor de nitrogênio total (TN), onde o nitrogênio é translocado das folhas, onde sua concentração é maior para os grãos em enchimento, onde sua concentração é menor. Esse fenômeno pode justificar a falta de significância desse parâmetro quando analisado nas folhas.

Silva *et al.* (2009) e Kaneko *et al.* (2010) também não encontraram influência significativa do teor de nitrogênio foliar no feijoeiro quando submetido a tratamentos com inoculação, assim como nesse estudo.

Figura 7 – Teor de nitrogênio foliar (TN) das plantas de feijão em função dos tratamentos, em análise conjunta das safras de inverno 2023 e águas 2023/2024.



Trat 1 – Reinoculação em cobertura no V3, Trat 2 - Reinoculação em cobertura no V4, Trat 3 – Reinoculação em cobertura no R5, Trat 4 - Reinoculação em cobertura no R6, Trat 5 – Co-inoculação em cobertura no V3, Trat 6 – Co-inoculação em cobertura no V4, Trat 7- Co-inoculação em cobertura no R5, Trat 8 – Co-inoculação em cobertura no R6, Trat 9- Testemunha, Trat 10 - Inoculação via semente, Trat 11- Co-inoculação via semente, Trat 12- Adubação mineral nitrogenada. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%.

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

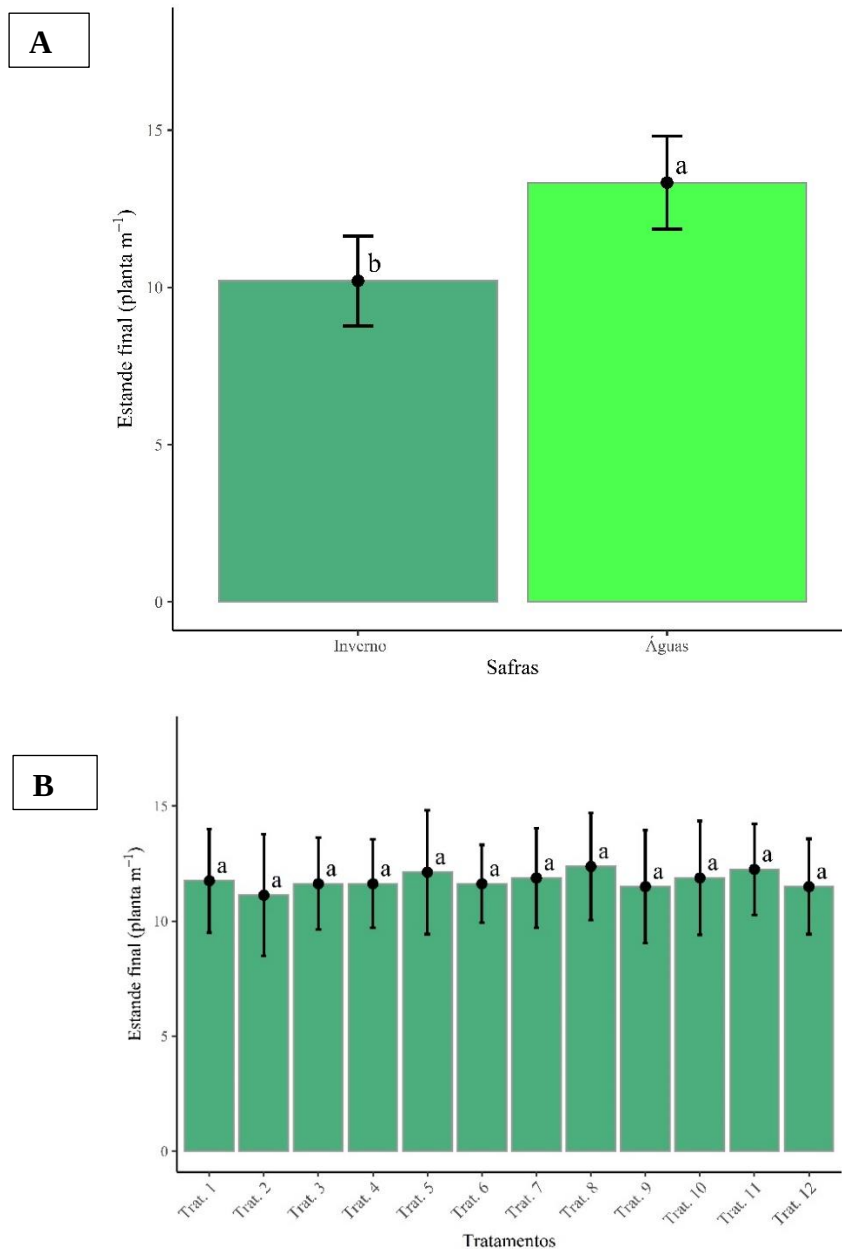
4.3. Análises Agronômicas

A análise de variância dos atributos agronômicos permitiu averiguar que os fatores safras e os tratamentos influenciaram isoladamente o número de vargens por planta (NVP) e o rendimento de grãos (REND), enquanto o número de grãos por vargem (NGV) foi influenciado pela interação dos fatores em estudo, e o estande final de plantas (EF) somente pelas safras. Os coeficientes de variação entre 10,0 a 24,21%, o que de acordo com Pimentel-Gomes (1990) demonstram boa precisão experimental na obtenção dos dados (Tabela 4).

O estande final (EF) de plantas de feijão não foi afetado pelos tratamentos, mantendo valores médios entre 11 a 13 plantas por metro linear (Figura 8 A, B). Isso confirma que os tratamentos testados não influenciaram esta variável. A variação observada no EF é pequena e não impacta a produtividade do feijoeiro, pois as plantas de feijão são capazes de compensar

os espaços disponíveis. Além disso, um estande final de 11 a 13 plantas por metro linear, combinado com um espaçamento de 0,5 m, resulta em uma densidade de 200 a 230 mil plantas por hectare, próxima da população de 240 mil plantas por hectare considerada adequada para a cultura do feijão, conforme descrito por Souza *et al.* (2017).

Figura 8 - Estande final (EF) em função dos tratamentos (B), em análise das safras de inverno (2023) e águas (2023/2024) (A).



Trat 1 – Reinoculação em cobertura no V3, Trat 2 - Reinoculação em cobertura no V4, Trat 3 – Reinoculação em cobertura no R5, Trat 4 - Reinoculação em cobertura no R6, Trat 5 – Co-inoculação em cobertura no V3, Trat 6 – Co-inoculação em cobertura no V4, Trat 7- Co-inoculação em cobertura no R5, Trat 8 – Co-inoculação em cobertura no R6, Trat 9- Testemunha, Trat 10 - Inoculação via semente, Trat 11- Co-inoculação via semente, Trat 12- Adubação mineral nitrogenada. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

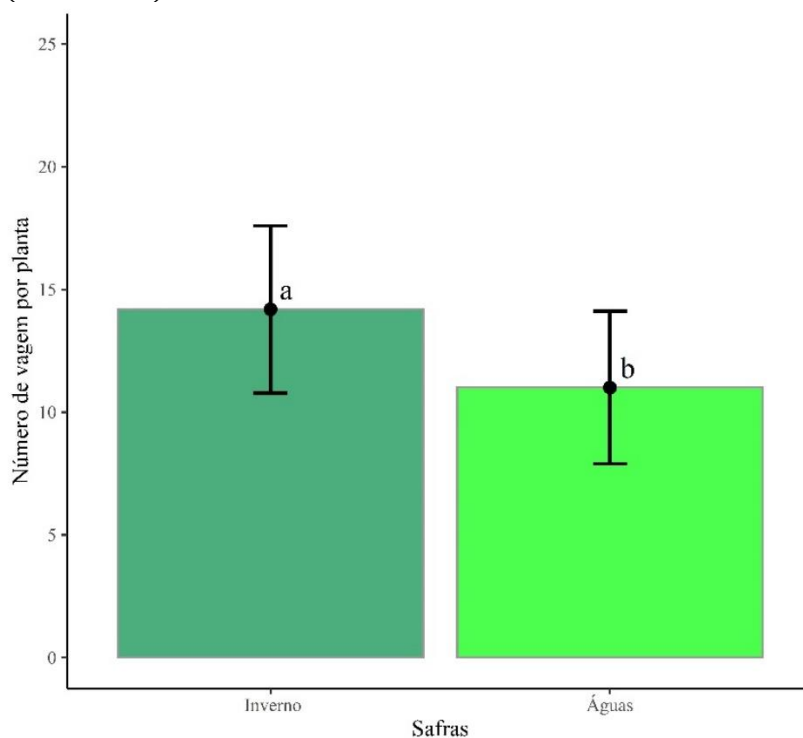
Tabela 4 – Resumo da Análise de Variância (Quadrado Médio) referente ao estande final (EF), número de vargens por planta (NVP), número de grãos por vargens (NGV), peso de cem grãos (PCG) e rendimento (REND). UEG, Anápolis-GO, 2024.

Causas da variação	GL	Quadrado médio				
		EF	NVP	NGV	PCG	REND
Blocos	3	12,625**	10,652 ^{ns}	0,7626*	31,372**	651478**
Safras (S)	1	234,375**	243,525**	3,4884**	65,010 ^{ns}	6683426**
Resíduo a	33	1,761 ^{ns}	5,883 ^{ns}	0,2219 ^{ns}	5,894 ^{ns}	86628 ^{ns}
Tratamento (T)	11	0,996 ^{ns}	49,046**	0,4921*	5,556 ^{ns}	11911321**
S x T	11	1,511 ^{ns}	3,634 ^{ns}	0,4955*	5,215 ^{ns}	173897 ^{ns}
Resíduo b	36	2,083 ^{ns}	5,407 ^{ns}	0,1874 ^{ns}	4,031 ^{ns}	124379 ^{ns}
C.V 1 (%)	-	11,2	19,2	13,8	10,0	20,2
C.V 2 (%)	-	12,2	18,4	12,7	8,3	24,2

G.L. Grau de Liberdade; C.V 1. Coeficiente de variação da interação T x bloco; C.V 2 Coeficiente de Variação (S x T); Resíduo a interação T x bloco; Resíduo b interação entre safras; * Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de F; ** significativo a 1% pelo teste de F; ns não significativo.

Fonte: Elaborada pela Autora (2024).

Figura 9 - Número de vargens por planta (NVP) de feijão em função das safras de inverno (2023) e águas (2023/2024).



Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%.

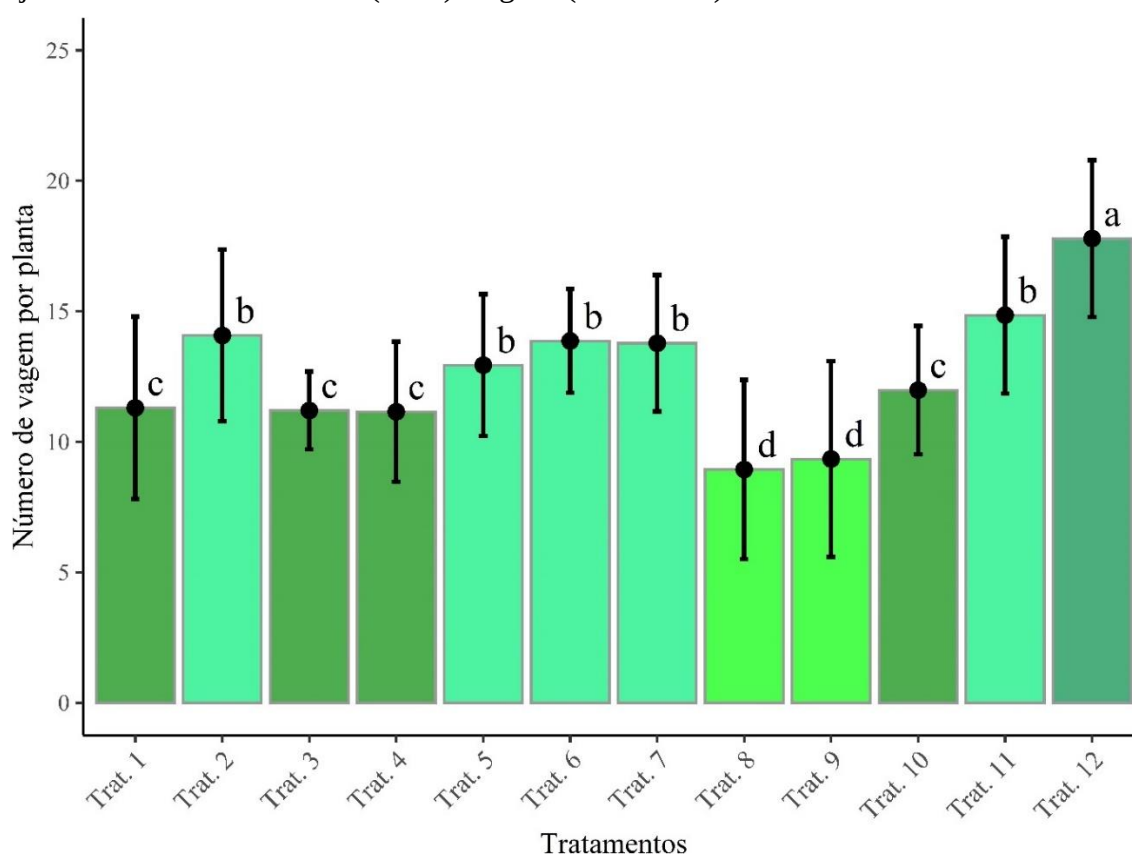
Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

O NVP apresentou diferença significativa entre as safras, com destaque para a de inverno 2023 cuja média encontrada foi de 15 vargens por planta, correspondendo a 21,4% de acréscimo em comparação a média obtida na safra das águas (2023/2024) (Figura 9). Frisa-se

que a safra de inverno foi afetada por fatores bióticos a exemplo do acúmulo termal causado pelas baixas temperaturas nas fases iniciais do desenvolvimento (Figura 1), que acometeram parte de sua população de plantas (Figura 8), contribuindo para obtenção do maior número de vagens por planta em relação à safra das águas devido ao fator compensação, que não sofreu como esse estresse e manteve seu estande preenchido.

Segundo Iapar (2011) a média de NVP deve ser torno de 14 vagens por planta, portanto os resultados obtidos neste estudo são concordantes as informações de literatura. Além disso, os resultados obtidos corroboram com outras pesquisas utilizando também a cultivar BRS Estilo, Schossler *et al.* (2016), que encontraram médias próximas ao estudar esse componente quando submetido à inoculação e co-inoculação com estirpes de *Rhizobium tropici* e *Azospirillum brasilense*.

Figura 10 - Número de vagens por planta (NVP) em função dos tratamentos, em análise conjunta das safras de inverno (2023) e águas (2023/2024).



Trat 1 – Reinoculação em cobertura no V3, Trat 2 - Reinoculação em cobertura no V4, Trat 3 – Reinoculação em cobertura no R5, Trat 4 - Reinoculação em cobertura no R6, Trat 5 – Co-inoculação em cobertura no V3, Trat 6 – Co-inoculação em cobertura no V4, Trat 7- Co-inoculação em cobertura no R5, Trat 8 – Co-inoculação em cobertura no R6, Trat 9- Testemunha, Trat 10 - Inoculação via semente, Trat 11- Co-inoculação via semente, Trat 12- Adubação mineral nitrogenada. Letras e cores iguais não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%.
Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Além da interferência das safras, os resultados de NVP também se mostraram responsivos os tratamentos aplicados (Figura 10), contrariando os resultados das pesquisas Sales (2020) e Caixeta *et al.* (2016) que não encontram influências dos tratamentos ao avaliar o NVP e o NGP do feijoeiro submetido a inoculação, ambos atrelaram ao fato de serem características com alta herdabilidade que geralmente são pouco modificadas pelo manejo, a menos que as plantas sejam muito bem nutridas. Nessas condições, elas tendem a responder com maior altura e um maior número de ramos produtivos, o que pode influenciar positivamente na quantidade de vagens.

O maior NVP foram encontrados no tratamento 12 que recebeu adubação mineral, seguido dos tratamentos co-inoculados T11 - via semente e em cobertura em V3, V4 e R5 respectivamente T5, T6 e T7, somando-se ao grupo o tratamento reinoculado com *R. tropici* em V4 - T1. Esses resultados corroboram com os dados encontrados ao analisar a MSPA no estágio R7, confirmando a eficiência da técnica envolvendo co-inoculação via semente seguido da reinoculação no estágio V4, por propiciar bom desenvolvimento vegetativo e demanda nutricional suprido pela FBN, concordando aos resultados encontrados nas pesquisas de Almeida *et al.* (2022) e Schossler *et al.* (2016) que, avaliaram os componentes de produção e a produtividade de feijão quando inoculado com *R. tropici* e/ou *A. brasilense* e observaram que as reinoculações e co-inoculações promoveram incremento no número de vagens por planta. O uso dessa técnica apresentou resultados próximos aos obtidos com adubação mineral nitrogenada, confirmando a eficiência do processo.

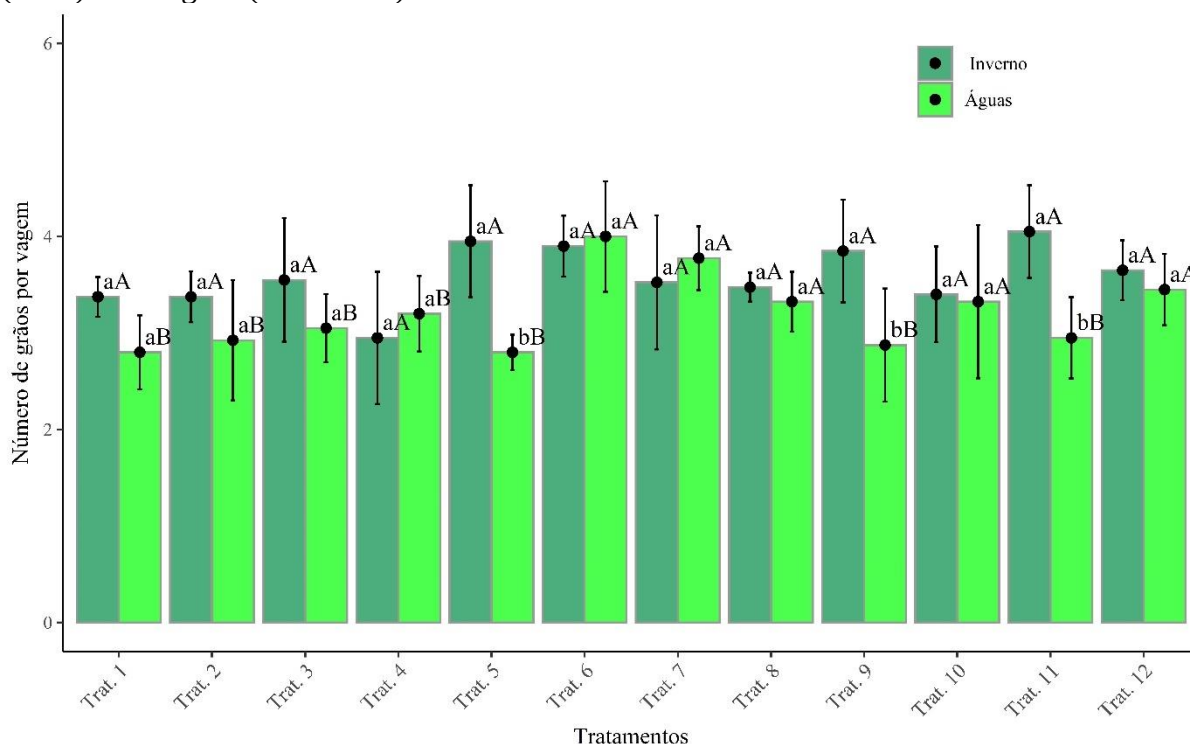
Ao analisar o desempenho médio de NVP do tratamento testemunha (T9) nota-se um comportamento que se assemelha aos outros resultados encontrados na literatura (FERREIRA *et al.*, 2020; LOURENÇO *et al.*, 2023; SALES, 2021) no qual a testemunha se mantém entre os piores tratamentos, justificado pelo déficit de nitrogênio para o bom desenvolvimento vegetativo do feijoeiro.

Além do déficit nutricional outra questão que afeta o resultado de NVP é a redução do estande que pode ser ocasionada por diversos fatores, como ataque de pragas ainda nas primeiras fases vegetativas, além de nematoides e fungos. Todavia, Vieira (2000) considera que o feijão comum tolera a redução do estande em até 50%, pois possui uma característica fisiológica de compensação que permite aumentar suas ramificações e o número de vagens em resposta a uma baixa população de plantas.

Semelhantemente ao NVP a análise do número de grãos por vagens (NGV) indica a influência dos tratamentos nos resultados e da interação safras *versus* tratamentos. Os valores variaram de 3 a 4 grãos por vagens na safra de inverno e de 2 a 4 na safra das águas. As

maiores médias foram observadas nos tratamentos co-inoculados seguidos da adubação mineral nitrogenada (Figura 11). Destaca-se a constância entre os resultados de T6 (co-inoculação em V4) e T7 (co-inoculação em R5) que mantiveram bons desempenhos em ambas as safras assim como nas características nodulares e morfofisiológicas avaliadas nesse trabalho, o que afirma a relação entre os componentes estudados.

Figura 11 – Número de grãos por vagem em função dos tratamentos, nas safras de inverno (2023) e das águas (2023/2024).



Trat 1 – Reinoculação em cobertura no V3, Trat 2 - Reinoculação em cobertura no V4, Trat 3 – Reinoculação em cobertura no R5, Trat 4 - Reinoculação em cobertura no R6, Trat 5 – Co-inoculação em cobertura no V3, Trat 6 – Co-inoculação em cobertura no V4, Trat 7- Co-inoculação em cobertura no R5, Trat 8 – Co-inoculação em cobertura no R6, Trat 9- Testemunha, Trat 10 - Inoculação via semente, Trat 11- Co-inoculação via semente, Trat 12- Adubação mineral nitrogenada. Letras minúsculas comparação entre safras nos tratamentos, letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma safra. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5%.

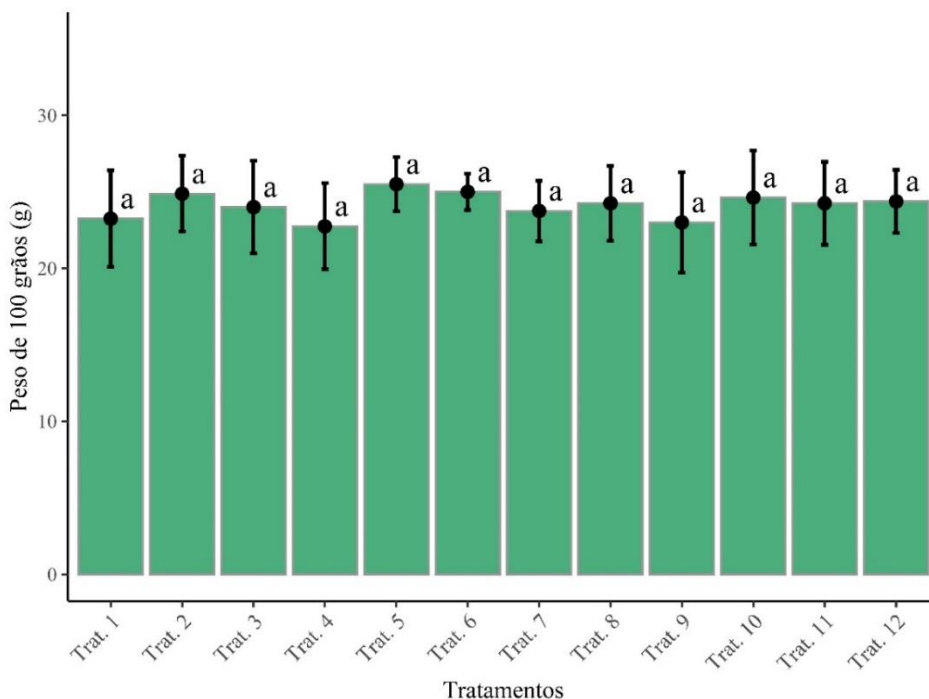
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O tratamento 6 (co-inoculação em V4) conseguiu melhor desempenho em ambas as safras superando numericamente o tratamento 12 com adubação mineral. A maior média de 4 grãos por vagem na safra águas foi encontrada nos tratamentos 6 e 7, co-inoculação em V4 e R5 respectivamente e a menor com 2,8 grãos por vagens foi encontrada em T9 testemunha, não se diferenciando estatisticamente de T5 (co-inoculação em V3) e T11 (co-inoculação por cobertura via semente) com 3 grãos por vagens, sendo que os dois últimos obtiveram bons resultados no componente NVP o que assegura uma boa produção.

De maneira geral, apesar das características avaliadas estarem ligadas a herança genética os tratamentos co-inoculados com a mistura de *R. tropici* + *A. Brasiliense* demonstram bons desempenhos em relação ao NVP e NGV, o que indica o bom funcionamento da relação simbiótica, entre plantas e bactérias para a fixação de nitrogênio. Resultados semelhantes aos encontrados no estudo de Peres *et al.* (2016), que apresentaram interações significativas para a variável NVP em função dos tratamentos, onde os tratamentos utilizando *Rhizobium*, apresentaram menor resultado quando comparado à adubação nitrogenada e co-inoculação com *Azospirillum*.

O peso de cem grãos (PCG) não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos (Figura 12). Segundo Horácio *et al.* (2020) essa característica sofre pouca influência do meio, ou seja, com variação dependente do genótipo da planta, assim como o NGV. O peso médio estimado para cem grãos foi de 24,96 g, dentro do esperado para a cultivar BRS estilo. Em todo caso, os dados demonstram que a qualidade nutricional foi mantida e atendida pelos tratamentos que utilizaram bactérias fixadoras de nitrogênio nas condições experimentais avaliadas.

Figura 12 – Peso de cem grãos (PCG) (g) em função dos tratamentos, em análise conjunta das safras de inverno (2023) e águas (2023/2024).



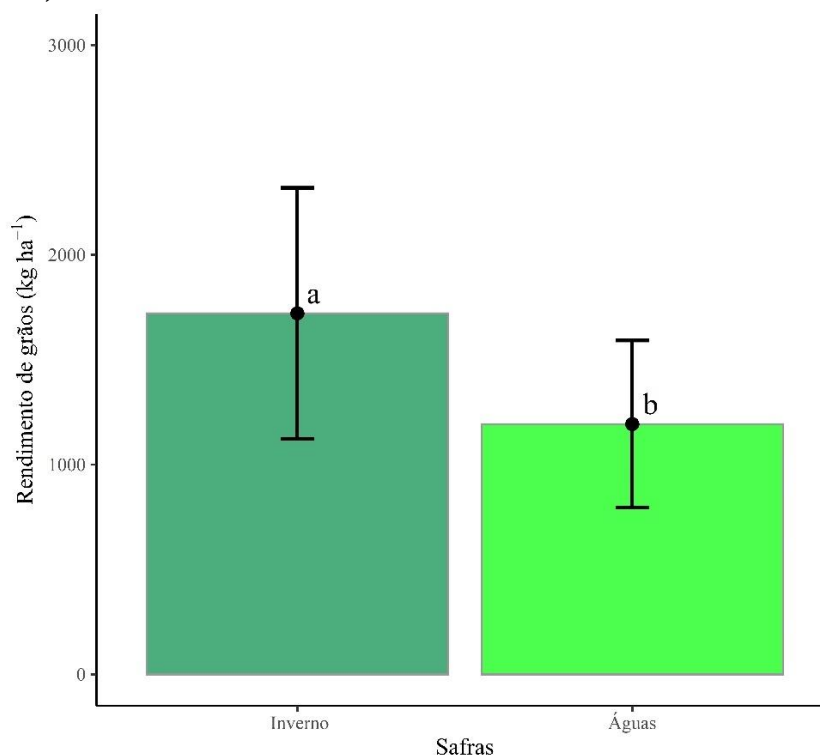
Trat 1 – Reinoculação em V3, Trat 2 - Reinoculação em c V4, Trat 3 – Reinoculação em R5, Trat 4 - Reinoculação em R6, Trat 5 – Co-inoculação em V3, Trat 6 – Co-inoculação em V4, Trat 7- Co-inoculação em R5, Trat 8 – Co-inoculação em R6, Trat 9- Testemunha, Trat 10 - Inoculação via semente, Trat 11- Co-inoculação via semente, Trat 12- Adubação mineral nitrogenada. . Letras e cores iguais não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os valores médios de rendimentos de grãos (REND) apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as safras e os tratamentos testados. Com relação a safras pode-se verificar que a safra das águas apresentou uma produtividade 44 % inferior que a inverno (Figura 13), o que pode ser atrelado a disponibilidade hídrica adequada na safra de inverno, já que esta contou com a tecnologia de irrigação, que preveniu o estresse hídrico e o abortamento das flores. Lembrando que essa tecnologia não foi empregada na safra das águas que dependeu totalmente das condições climáticas, na qual a disponibilidade hídrica era suprida por precipitação. A ocorrência de períodos de estiagem (Figura 1) na safra das águas, também denominado veranico certamente proporcionou queda no rendimento de grãos e a mudança do comportamento do feijoeiro em relação aos tratamentos.

Pode-se dizer que o estresse sofrido pelo acúmulo termal na safra de inverno, influenciou o desenvolvimento vegetativo, como observado nas análises das características morfofisiológicas, porém o controle da disponibilidade hídrica nos estádios reprodutivos foi essencial para assegurar uma boa produção. Os resultados de rendimento da safra das águas demonstram que o feijão (BRS estilo) se mostra mais sensível ao estresse hídrico na fase reprodutiva do que em relação ao acúmulo termal na fase vegetativa.

Figura 13 - Rendimento em kg ha^{-1} (REND) do feijão cultivado nas safras de inverno (2023) e águas (2023/2024).

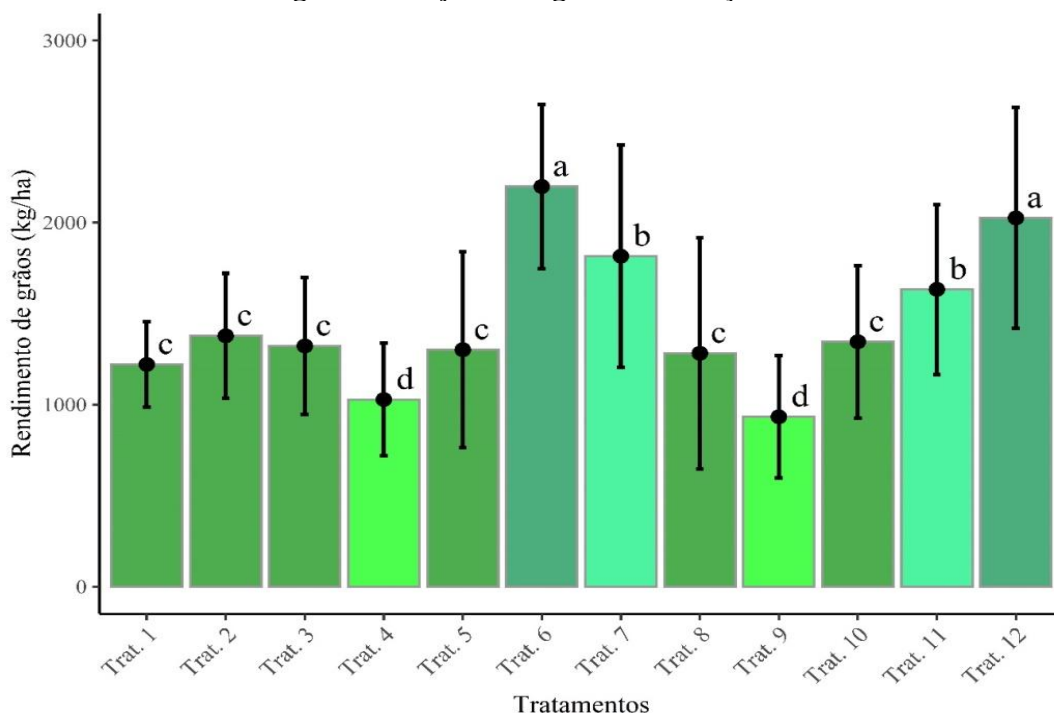


Letras e cores iguais não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.
Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Os tratamentos com reinoculação envolvendo co-inoculação de *R. tropici* + *A. brasilense* em V4 (T6) e a adubação mineral de nitrogênio na base e cobertura (T12), proporcionou a obtenção de médias de produtividade de grãos de 2.197,87 e 2.025,75 kg por hectare, respectivamente, e se mostraram superiores aos demais tratamentos estudados nessa pesquisa. O tratamento testemunha (T9), sem qualquer fonte de nitrogênio, registrou apenas 932,75 kg por hectare de grãos, e apresentou a menor produtividade em ambas as safras (Figura 14).

Os resultados obtidos corroboram com Filla (2019). Os tratamentos que envolveram a inoculação com *R. tropici* e a co-inoculação com *R. tropici* + *A. brasilense* não diferiram estatisticamente do tratamento com adubação em cobertura de 90 kg por hectare de nitrogênio (ureia) na fase V4, porém todos diferiram da testemunha sem inoculação e sem adubação. Schossler *et al.*, (2016) obtiveram resultados semelhantes do presente experimento, onde encontraram diferenças estatísticas significativas entre o tratamento co-inoculado com *R. tropici* + *A. brasilense* e a testemunha.

Figura 14 – Rendimento de grãos de feijão em kg ha⁻¹ em função dos tratamentos



Trat 1 – Reinoculação em cobertura no V3, Trat 2 - Reinoculação em cobertura no V4, Trat 3 – Reinoculação em cobertura no R5, Trat 4 - Reinoculação em cobertura no R6, Trat 5 – Co-inoculação em cobertura no V3, Trat 6 – Co-inoculação em cobertura no V4, Trat 7- Co-inoculação em cobertura no R5, Trat 8 – Co-inoculação em cobertura no R6, Trat 9- Testemunha, Trat 10 - Inoculação via semente, Trat 11- Co-inoculação via semente, Trat 12- Adubação mineral nitrogenada. Letras e cores iguais não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

O presente estudo é pioneiro ao explorar a combinação de inoculação na semente com reinoculação associada à co-inoculação por cobertura em diferentes estádios. Estes resultados são comparados e estão alinhados com o trabalho realizado por Almeida *et al.* (2022), que testou a resposta de duas cultivares de feijoeiro comum à reinoculação e co-inoculação em cobertura em diferentes dosagens, e concluíram que a técnica da reinoculação de células rizobianas associadas com *azospirillum*, em complementação a inoculação de realizada nas sementes, pode substituir totalmente o fornecimento de N mineral na cultura de feijão comum, conclusões semelhantes aos obtidos nessa pesquisa.

Apesar disso, a análise dos resultados demonstra o bom desempenho do tratamento com reinoculação + co-inoculação em V4 que não se diferencia estatisticamente da adubação mineral, e apresenta um aumento de 8,7 % do rendimento em relação ao último. Esse ganho percentual no rendimento dos grãos chega aos incríveis 136% em relação aos resultados obtidos na testemunha (T9), 34,56% superior a produtividade encontrada no tratamento que recebeu apenas co-inoculação via semente (T11), o que segura que o estágio V4 é o ideal para a reaplicação dos inoculante via cobertura. Além da aplicação no estágio ideal o bom desempenho de T6 está atrelado a presença da bactéria promotora do crescimento vegetal *Azospirillum*, visto que essa proporcionou um aumento de 59,5% do rendimento de grãos em relação ao tratamento que recebeu *R. tropici* na semente e em cobertura no estágio V4.

Destaca-se ainda, que a maior produtividade média obtida neste estudo para o T6, de 2.197 kg ha⁻¹, se encontrou acima da obtida na safra 2022/2023 de feijão comum que foi de 1.123 kg ha⁻¹ (CONAB, 2023). Os resultados obtidos na presente pesquisa mostram que os efeitos da co-inoculação em V4 foram positivos e podem aumentar a produção do grão de maneira mais econômica e sustentável, visto que o preço do inoculante é inferior ao do adubo mineral e reduz o uso desse insumo químico que possui um ciclo produtivo bastante poluidor.

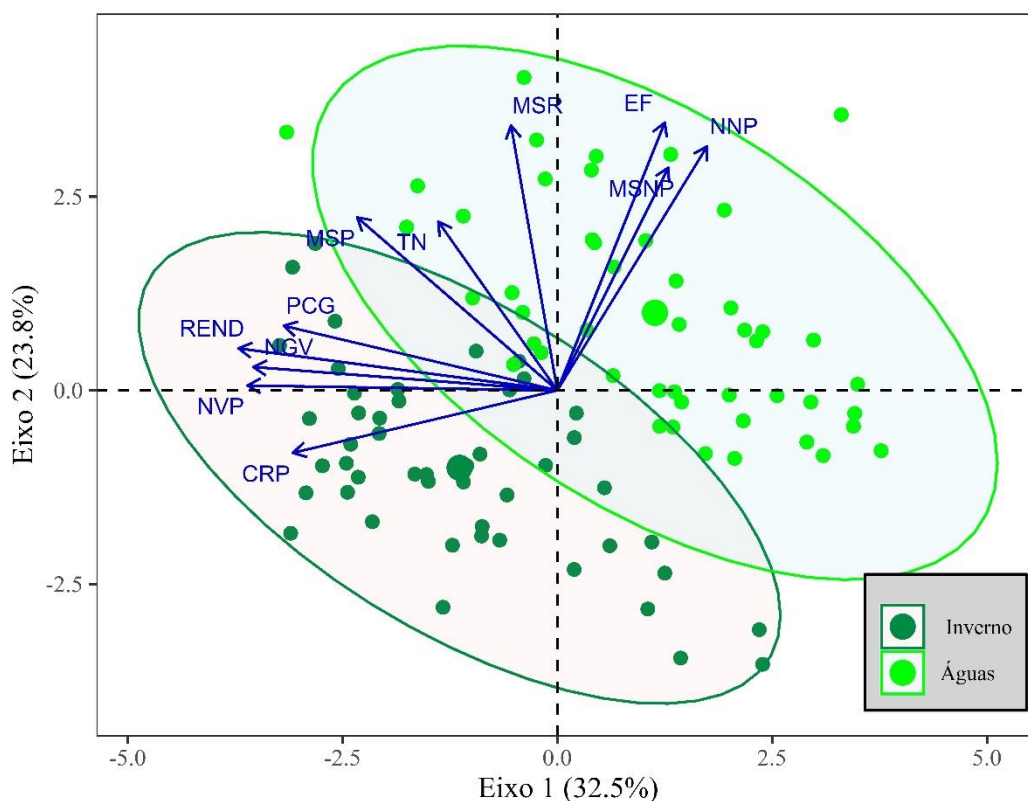
4.4 Análise dos Componentes Principais (PCA)

A análise de componentes principais (PCA) é uma ferramenta padrão na avaliação exploratória moderna, e é usada com o objetivo de identificar a base mais significativa para expressar um determinado conjunto de dados, por meio de ordenação das amostras com base nas distâncias euclidianas entre elas (KURITA, 2019).

O resultado das análises das variáveis submetidas nesse estudo foi plotado no mapa de plano bidimensional (Figura 15), com variação de 56,3 %, sendo 23,8% no eixo 1 e 32,5% no eixo 2. Os dados foram classificados de acordo com a safra de cultivo, inverno 2023 ou águas

2023/2024. Ademais, para garantir a semelhança foram inseridas as elipses de segurança para os dados.

Figura 15 - Mapa de análises dos componentes principais (PCA) para as características nodulares, morfofisiológicas e agronômicas das plantas de feijão cultivadas nas safras de inverno (2023) e águas (2023/2024).



CRP – Comprimento da raiz principal; NNP- Número de nódulos por planta; MSNP – Massa seca de nódulos por planta; MSP – Massa seca parte aérea; MSR – Massa seca de raiz; TN – Teor de nitrogênio foliar; EF – Estande Final; NVP – Número de vargem por planta; NGV -Número de grãos por vargem; PCG – Peso de cem grãos; REND – Rendimento de grãos.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Diante do mapa acima (Figura 15), juntamente com as demais avaliações presentes nesse estudo, é possível realizar algumas inferências em relação ao comportamento das variáveis nas diferentes épocas de cultivo. Em concordância com os resultados das análises nodulares e morfofisiológicas realizadas em R7, a PCA indicou uma melhor avaliação dessas características na safra das águas, na qual as plantas de feijão foram submetidas a condições ótimas de temperatura e umidade em todo o seu período vegetativo. Nota-se também a falta de expressividade dos dados relacionados as variáveis agronômicas, reflexo do estresse hídrico sofrido por essas plantas na fase reprodutiva. De acordo com Mladenov *et al.* (2023), a falta de água nos estádios reprodutivos reduz a fotossíntese e diminui a eficiência do

abastecimento dos grãos, o que prejudica o rendimento. Estudos anteriores também relataram uma redução de 60–99% no rendimento do feijão exposto ao estresse hídrico durante os estágios de floração e pós-floração (MANJERU *et al.*, 2007; AMBACHEW *et al.*, 2015) valores superiores aos encontrados nessa pesquisa.

Em contra partida, a safra de inverno se mostrou pouco responsiva nas avaliações nodulares e morfofisiológicas, devido ao acúmulo termal sofrido em seus primeiros estádios. No entanto, a ocorrência de boas condições de temperatura e a disponibilidade hídrica fornecida pelo emprego da irrigação, proporcionaram bons rendimentos, superiores a safra das águas que apresentou bons resultados nas variáveis avaliadas em R7. A pouca sobreposição das elipses de segurança atestam essa relação. Nota-se ainda, que o retardo no desenvolvimento vegetativo, não foi um fator determinante do rendimento quanto o estresse hídrico na fase reprodutiva. Comportamento explicado pela característica de compensação e pela tolerância aos níveis de estresse termal e hídrico (VIEIRA, 2000).

Ao analisar o comportamento das variáveis pode-se confirmar a teoria supracitada. As variáveis agronômicas: rendimento (REND); número de vargens por plantas (NVP) e número de grãos por vargens (NGP) apresentam tendências relacionadas, com crescimento e direção padronizada, validando a inferência relacionada a contribuição e relação entre elas. Destaca-se que o NVP e NGP são fatores diretamente ligados ao REND, além de serem características genotípicas da cultivar, podem estar associadas as práticas de manejo e fatores ambientais (MLADENOV *et al.*, 2023), como por exemplo a redução do estande final (EF). A ocorrência desse fator promove a auto compensação, característica fisiológica do feijoeiro em ajustar o NVP para maximizar o rendimento mesmo em situação adversas (KÝYMAZ & BEYAZ, 2019).

As características nodulares (NNP e MSN) tenderam ao oposto das agronômicas, visualmente apresentaram pouca relação com baixa sobreposição entre as elipses de confiança. Porém vale destacar, que a PCA se trata de uma análise exploratória em que se devem levar em consideração os conhecimentos teóricos acerca do assunto estudado para chegar a uma inferência.

Apesar da temperatura e disponibilidade hídrica serem fatores determinantes do rendimento, a nutrição das plantas é fundamental, sendo o nitrogênio altamente demandado pelo feijoeiro, a sua deficiência acarretaria em baixos níveis de rendimento, como se observa nos resultados da testemunha (T9), com obtenção apenas de 932,75 kg por hectare de grãos de feijão.

Logo, de acordo com os resultados gerados pela PCA, nota-se que o rendimento dos grãos foi influenciado pelo número de vargens por planta e números de grãos por vargens, que por sua vez, foram afetadas pelas safras de cultivo, que ocasionou o comportamento diferenciado para cv. BRS estilo, explicados pelas condições de temperatura e disponibilidade hídrica. Também é possível observar que as variáveis: massa seca da parte aérea (MSPA) e teor de nitrogênio (TN) apresentam comportamentos semelhantes em níveis de variação com boa sobreposição das elipses de confiança, indicando que os tratamentos a base de inoculantes garantiu a nutrição de N, quando se comparado a testemunha, independente das condições adversas sofridas nas diferentes épocas de cultivo. Os resultados se mostraram ainda mais satisfatórios quando se comparados aos rendimentos dos tratamentos co-inoculados (Figura 14).

Visto isso, de acordo com o resultado da PCA discutido acima, baseado no rendimento obtido para o tratamento que recebeu a reinoculação em cobertura no estágio V4, com co-inoculação a base de *R. tropici* e *A. brasilense*, pode-se inferir que demanda de nitrogênio da cultura de feijão foi suprida pela FBN com a técnica empregada. Mas que os fatores abióticos influenciam diretamente as variáveis, sendo o estresse hídrico limitante do rendimento do feijoeiro.

5 CONCLUSÃO

- O acúmulo termal nas primeiras fases do desenvolvimento vegetativo influencia o processo de nodulação do feijoeiro e as características morfofisiológicas.

- O uso da tecnologia de irrigação para o controle hídrico, juntamente com condições ideais de temperatura nas fases reprodutivas são capazes de superar o atraso causado pelo estresse termal e garantir bons níveis de rendimento. Ao passo que plantas de feijão com bons níveis de desenvolvimento vegetativo, submetidas ao estresse hídrico em fase reprodutiva apresentam perdas significativas de rendimento.

- O uso da técnica de reinoculação e co-inoculação de *R. tropici* e *A. brasiliense* apresentou melhoras nas características nodulares e morfofisiológicas das plantas de feijão, o que indica a boa nutrição fornecida pelo processo de fixação biológica de nitrogênio.

- A técnica de reinoculação de células rizobianas associada ao *Azospirillum* no estágio V4, complementando a inoculação feita nas sementes, proporciona produtividades significativas semelhantes à adubação em cobertura com 80 kg ha⁻¹ de N.

- A técnica de reinoculação + co-inoculação em V4 garantiu aumento de 8,7% do rendimento do feijão comum em relação a técnica de aplicação de adubo nitrogenado, mostrando que é possível reduzir o seu uso, utilizando uma prática mais econômica e sustentável.

- Sugere-se estudos para avaliação da capacidade de nodulação em diferentes condições de temperaturas e umidade, bem como o desenvolvimento das plantas de feijão expostas aos efeitos adversos.

REFERÊNCIAS

- AHEMAD, M.; KIBRET, M. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective. **Journal of King Saud University - Science**, v. 26, n. 1, p. 1-20, 2014.
- ALMEIDA, Q. R.; TEIXEIRA, I. R.; SILVA, G. C.; ROCHA, E. C.; KIKUTI H. Reinoculation of topdressing *Rhizobium tropici* combined or not with *Azospirillum brasilense* in common bean. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, ed. 73419, 2022.
- AMBACHEW, D.; MEKBIB, F.; ASFAW, A.; BEEBE, S.E.; BLAIR, M.W. Trait associations in common bean genotypes grown under drought stress and field infestation by BSM Bean fly. **Crop J**, v. 3, p. 305–316, 2015.
- AMBROSANO, E. J.; WUTKE, E. B.; BULISANI, E. A.; CANTARELLA, H. Feijão. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, Â. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico/Fundação - IAC, p. 194-195, 1997.
- ANDRAUS, M. P.; CARDOSO, A. A.; FERREIRA, E. P. B. Differences in nodulation and grain yield on common bean cultivars with different growth cycles. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 47, n. 9, p. 1148-1161, 2016.
- ANPII—Associação Nacional dos Produtores e Importadores de Inoculantes. Levantamento do uso de Inoculantes no Brasil. **VIII Congresso Brasileiro de Soja**, Goiânia, 2018.
- BARRADAS, C. A.; BODDEY, L. H.; HUNGRIA, M. Seleção de cultivares de feijão e estirpe de *Rhizobium* para nodulação precoce e senescência tardia dos nódulos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, p. 169-179, 1989.
- BARROS, R. L. N.; OLIVEIRA, L. B.; MAGALHÃES, W. B.; PIMENTEL, C. Growth and yield of common bean as affected by seed inoculation with rhizobium and nitrogen fertilization. **Experimental Agriculture**, v. 54, n. 1, p. 16-30, 2018.
- BETTIOL, J.V.T. **Produção sustentável do feijão comum: inoculação, coinoculação e adubação mineral em cultivares de ciclo precoce**. 2019. 51p. Dissertação (Mestrado) Produção Vegetal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária UNESP, Jaboticabal, 2019.
- BRASIL. Instrução Normativa SDA nº 13, de 24 de março de 2011. Aprova as normas sobre especificações, garantias, registro, embalagem e rotulagem dos inoculantes destinados à agricultura, bem como as relações dos micro-organismos autorizados e recomendados para produção de inoculantes no Brasil, na forma dos Anexos I, II e III, desta Instrução Normativa. **Diário Oficial da União**, 25 mar. 2011. Seção 1, p. 3. Disponível em: <osagropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-sda-13-de-24-032011inoculantes.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2023.
- CAIXETA, L. C.; VEIGA, A. D.; VEIGA, P. O. A.; ANDRADE, M. J. B.; REIS, M. C. S. Co-inoculação de *Rhizobium*, *azospirillum* e *Trichoderma* na cultura do feijoeiro comum. In: JORNADA CIENTIFICA E TECNOLÓGICA, 8, SIMPOSIO DA PÓS-GRADUAÇÃO DO IFSULDEMINAS, 5, 2016, Passos. **Anais**. Passos: [s.n.], 2016.

CARDILLO, B. E.; DA SILVA, O.; SOARES, B. L.; MARTINS, F. A. D.; RUFINI, M.; SILVA, J. S.; FERREIRA NETO, G. G.; DE ANDRADE, M. J. B.; MOREIRA, F. M. S. Nodulation and yields of common bean are not affected either by fungicides or by the method of inoculation. **Agronomy Journal**, v. 111, p. 694-701, 2019.

CARVALHO, R. H.; JESUS, E. C.; FAVERO, V. O.; STRALIOTTO, R.; ARAÚJO, A. P. The coinoculation of *Rhizobium* and *Bradyrhizobium* increases the early nodulation and development of common beans. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 860-864, 2020.

CHIORATO, A. F., CARBONELL, S. A. M., GONÇALVES, J. G. R., SILVA, D. A. D., BENCHIMOL-REIS, L. L., CARVALHO, C. R. L., ... & SANTOS, N. C. B. D. IAC Sintonia: new carioca common bean cultivar. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, 18(03), 338-342, 2018.

CLIMATE-DATA.ORG. **Temperaturas e precipitações médias**: clima em Goiás. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/goias/goias-879942/>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

COELHO, G. F.; BONFIM, A. C.; MENDES, I. C.; VALE, H. M. M.; JUNIOR, F. B. R. **A inoculação do feijoeiro no Brasil: alternativas para aumentar a produtividade utilizando microrganismos promotores do crescimento vegetal**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, p. 1-48, 2021.

COELHO, J. D. FEIJÃO: Banco do Nordeste. **Caderno Setorial ETENE**, v. 8, n. 332, p. 8, 2023.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v. 8, safra 2022/23, décimo segundo levantamento, setembro 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>> Acesso em: 02 mai. 2023.

CONINCK, T.; VAN DAMME, E. J. M. Review: The multiple roles of plant lectins. **Plant Science**, v. 313, e111096, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168945221002922>. Acesso em: 13 maio 2024.

COSTA, B. G. P., AMÂNCIO, B. C. S., BOAS, L. V. V., BASTOS, L. D. S., DOMICIANO, D., MARCHIORI, P. E. R. Waterlogging effects upon the phenological phases of common bean cultivar BRSMG-Uai. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, e009520, 2020.

DARTORA, J.; GUIMARÃES, V. F.; MARINI, D.; SANDER, G. Adubação nitrogenada associada à inoculação com *Azospirillum brasilense* e *Herbaspirillum seropedicae* na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.1023-1029, 2013.

DE VRIES, W. ZHANG, S. Efeitos de corretivos de solo na acidez do solo e rendimentos de culturas em solos ácidos: Uma meta-análise mundial. **Journal of Environmental Management**, v. 345, n. 118531, 2016.

DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A. L. **Produção de feijão**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 385 p.

EMBRAPA. **Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos**. Brasília: Embrapa Arroz e Feijão, 2018. 59p.

FAGERIA, N.K.; STONE, L.F.; SANTOS, A.B.; CARVALHO, M.C.S. **Nutrição mineral do feijoeiro**. Brasília: Embrapa. 394p, 2015.

FAO. FAOSTAT. **Fertilizer by nutriente**. 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/RFN>. Acesso em: 18 março 2023.

FERNANDEZ, GCJ; MILLER JÚNIOR, JC. Yield component analysis in five cowpea cultivars. **American Society for Horticultural Science Journal**, 110: 553-559, 1985.

FERNANDEZ-GÖBEL, TF, DEANNA, R., MUÑOZ, NB, ROBERT, G., ASURMENDI, S., & LASCANO, R. Sinalização sistêmica redox e respostas de tolerância induzida durante a interação soja-*Bradyrhizobium japonicum*: envolvimento do receptor do fator nod e autorregulação da nodulação. **Frontiers in plant science** , v. 10, p. 141, 2019.

FERREIRA, C. M.; BARRIGOSI, J. A. F. (ed.). **Arroz e feijão: tradição e segurança alimentar**. Brasília, DF: Embrapa; Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2021.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D.A. **ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portugues)**. R package version 1.2.2. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>>. Acessado em 12 de março de 2024.

FERREIRA, E. P. B. Desempenho agrônomo e economicidade do feijão-comum inoculado com *Rhizobium* e *Azospirillum*. In: OLIVEIRA, L. F. C.; SILVEIRA, P. M.; OLIVEIRA, M. G. C.; FARIA, A. L. D. (ed.). **Embrapa GTEC Feijão 6 toneladas: ciclo 2011 a 2017**. 2. ed. [S.l.]: Syngenta, p. 47-48, 2018.

FERREIRA, E.P.B.; SILVA, O.F.; WANDER, A.E. Economics of rhizobia and azospirilla co- inoculation in irrigated common bean in commercial and family farming. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.55, ed. 01532, 2020.

FAIZ, M., AHMED, I., HASSAN, SMU, NIAZI, AK, KHOKHAR, MF, FAROOQ, MA, & ARSHAD, M. Antibióticos induziram mudanças no metabolismo do nitrogênio e enzimas antioxidantes no feijão-mungo (*Vigna radiata*). **Science of The Total Environment**, v.873, n. 162449, 2023.

GALINDO, F. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; LUDKIEWICZ, M. G. Z.; ROSA, POLIANA, A. L.; TRITAPEPE, C. A. Technical and economic viability of coinoculation with *Azospirillum brasilense* in soybean cultivars in the Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 51-56, 2018.

GARCIA, N. F. S.; ARF, O.; PORTUGAL, J. R.; PERES, A. R.; RODRIGUES, M.; PENTEADO, M. S. Doses and application methods of *Azospirillum brasilense* in irrigated upland rice. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n. 11, p.990-995, 2016.

GARÉ, L. M. **Reinoculação de *Rhizobium tropici* no desenvolvimento e produtividade do feijoeiro em sistema de plantio direto em fase inicial e consolidado**. Dissertação (Mestrado em Agronomia), 56 f. Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2020.

GOOGLE EARTH. Google Earth Pro. 2023. Disponível em:

<<https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: 17 abr. 2023.

GUIMARÃES, R. A. M., BRAZ, A. J. B. P., SIMON, G. A., FERREIRA, C. J. B., BRAZ, G. B. P., & DA SILVEIRA, P. M. Resposta de cultivares de feijoeiro a adubação nitrogenada em diferentes estádios fenológicos. **Global Science and Technology**, v. 10, n. 1, 2017.

HORÁCIO, E. H., ZUCARELI, C., GAVILANES, F. Z., YUNES, J. S., DOS SANTOS SANZOVO, A. W., & ANDRADE, D. S. Co-inoculation of rhizobia, azospirilla and cyanobacteria for increasing common bean production. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 41, n. 5, p. 2015-2028, 2020.

HUNGRIA, M.; DE BRUIJN, F. . Biological nitrogen fixation. In: DE BRUIJN, F.J.; SMIDT, H.; COCOLIN, L.; SAUER, M.; DOWLING, D.; THOMASHOW, L.. (Org.). **The good microbes in medicine, food production, biotechnology, bioremediation and agriculture**. 1ed.London: John Wiley & Sons, v. 1, p. 1-12, 2023.

HUNGRIA, M.; KASCHUK, G. Regulation of N₂ fixation and NO₃⁻/NH₄⁺ assimilation in nodulated and N-fertilized *Phaseolus vulgaris* L. exposed to high temperature stress.**Environmental and Experimental Botany**, v. 98, n. 16, p. 32-39, 2014.

HUNGRIA, M.; MENDES, I.C.; MERCANTE, F.M. **Tecnologia de fixação biológica do nitrogênio com o feijoeiro: viabilidade em pequenas propriedades familiares e em propriedades tecnificadas**. Londrina: Embrapa Soja, n. 338, 30p., 2013.

HUNGRIA, M.; VARGAS, M. AT. Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. **Field crops research**, v. 65, n. 2-3, p. 151-164, 2000.

IAPAR. INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Principais características das cultivares de feijão com sementes disponíveis no mercado**. 2011. Disponível em: <<http://www.iapar.br/pagina-1363.html>>. Acessado em: 30 jan. 2023.

IMPA, S. M., PERUMAL, R., BEAN, S. R., SUNOJ, V. J., & JAGADISH, S. K.. Water deficit and heat stress induced alterations in grain physico-chemical characteristics and micronutrient composition in field grown grain sorghum. **Journal of Cereal Science**, v. 86, p. 124-131, 2019.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 25 de abril de 2024.

KASSAMBARA and MUNDT. Facto extra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. **R package version 1.0.7**. (2020) Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>> acessado em: 16/09/2024.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L.F.; AIDAR, H. **Fundamentos para uma agricultura sustentável, com ênfase na cultura do feijoeiro**. 1.ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009. 452p.

KURITA, Takio. Principal component analysis (PCA). **Computer vision: a reference guide**, p. 1-4, 2019.

- KÝYMAZ, S.; BEYAZ, R. Morpho-Physiological responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars to drought stress. **Legume Research-An International Journal**, v. 42, n. 4, p. 505-511, 2019.
- LISBOA, C.C.; OLIVEIRA, J.R.; LIMA, F.R.D.; SILVA, E.A.; SILVA, C.A.; MARQUES, J. J. G.S. Lixiviação de nitrato e amônio em Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 2, e5658, 2019.
- LOURENÇO, A. E. ; TEIXEIRA, I. R. ; ROCHA, E. C. ; SILVA, G. C. ; REIS, E. F. ; SANTOS, F. L. ; SILVA, G. R. ; LISBOA, C. F. ; KIKUTI, H. SILVA, A. G. Potential of Reinoculation Using *R. tropici* Applied under Cover to Increase Bean Yield. **Sustainability**, v. 15, p. 16452, 2023.
- MANJERU, P.; MADANZI, T.; MAKEREDZA, B.; NCIIZAH, A.; SITHOLE, M. Effects of water stress at different growthstages on components and grain yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In **Proceedings of the 8th African Crop Science Society Conference, El-Minia, Egypt**, v. 31, p. 299–303, 2007.
- MARCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants 3.ed London: **Elsevier**, 643p , 2012.
- MESSINA, V. Nutritional and health benefits of dried beans. **The American Journal of Clinical Nutrition**. Vol. 100. p. 437S-42S. 2014.
- MLADENOV, P.; AZIZ, S.; TOPALOVA, E.; RENAUT, J.; PLANCHON, S.; RAINA, A.; TOMLEKOVA, N. Physiological responses of common bean genotypes to drought stress. **Agronomy**, v. 13, p. 1022, 2023.
- MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo** 2.ed. Lavras: Ufla, 729p., 2006.
- MOREIRA, L. P. Nodulation, contribution of biological N₂ fixation, and productivity of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) inoculated with rhizobia isolates. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n.35, p. 644-651, 2017.
- MORETTI, L.G.; LAZARINI, E.; BOSSOLANI, J.W.; PARENTE, T.L.; CAIONI, S.; ARAUJO, R.S.; HUNGRIA, M. Can additional inoculation increase soy bean nodulation and grain yield?. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 57, p. 715-721, 2018.
- NASCIMENTO, G.H.; MORAES, L.C.; MOREIRA, S.G.; MARTINS, PIMENTEL, G.V. Fator de fertilização associado ao índice de suficiência de nitrogênio para a adubação de cobertura nitrogenada em feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 51, p. 1-9, e69160, 2021.
- OLIVEIRA FJ. **Análise uni e multivariada aplicadas em cultivares de feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.)**. Tese de Doutorado. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco. 136 p. 1996.
- OLIVEIRA, C. A. B.; PELÁ, G. M.; PELÁ, A. Inoculação com *Rhizobium tropici* e adubação foliar com molibdênio na cultura do feijão comum. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 1, p. 43-50, 2017.

PASTOR-BUEIS, R., JIMÉNEZ-GÓMEZ, A., BARQUERO, M., MATEOS, P. F., & GONZÁLEZ-ANDRÉS, F. Yield response of common bean to co-inoculation with *Rhizobium* and *Pseudomonas* endophytes and microscopic evidence of different colonised spaces inside the nodule. **European Journal of Agronomy**, v. 122, p. 126187, 2021.

PERES, A.R.; RODRIGUES, R.A.F.; ARF, O.; PORTUGAL, J.R.; CORSINI, D.C.D.C. Co inoculation of *Rhizobium tropici* and *Azospirillum brasilense* in common beans grown under two irrigation depths. **Revista Ceres**, v.63, p. 198-207, 2016.

PERES, J. G. **Evaluation of the FAO Penman-Monteith model to estimate the reference evapotranspiration at the climatic conditions of Sao Paulo state, Brazil**. 106 f. 1994.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental** 13.ed. Piracicaba: Nobel, 1990. 468p

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022. Disponível em: < <https://www.R-project.org/> >.

RAMIRES, R. V.; BRASIL, M. S.; LIMA, S. F.; SIMON, C. A.; ALVAREZ, R. C. F.; CONTARDI, L. M. Inoculação com rizóbio associado ao manejo de nitrogênio em feijão comum. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 14, n. 1, p. 49-57, 2018.

REIS, C. E. C. Avaliação de inseticidas no controle de aphid craccivora (hemiptera: aphididae) em feijão caupi (*Vigna unguiculata*). Monografia. 26 f. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia goiano. Bacharelado em Agronomia, Posse – GO, 2023.

REZENDE, A. A.; PACHECO, M. T. B.; SILVA, V. S. N.; FERREIRA, T. A. P. C. Nutritional and protein quality of dry brazilian beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Food Science and Technology**, v. 38, n. 3, p. 421-427, 2018.

RIBEIRO, B. B. A.; TEIXEIRA, I. R.; SILVA, G. C. ; BRAVO, T. E. P. ; CUNHA, N. M. B.; BENÍCIO NETO, M. R. ; ALVES, G. P.C. ; SBROGGIO FILHO, A. M. ; REIS, E. F.. Reinoculation in topdressing of *Rhizobium tropici*, *Azospirillum brasilense*, and the Micronutrients Mo/Co in Common Bean. **Agronomy-Basel**, v. 14, p. 1368-1, 2024.

ROSOLEM, C. A.; MARUBAYASHI, O. M. Seja o doutor de seu feijoeiro. **Informações Agronômicas**, n. 68, 18p., 1994.

SACHS, M., SPRICK, R. S., PEARCE, D., HILLMAN, S. A., MONTI, A., GUILBERT, A. A., ... & COOPER, A. I. Understanding structure-activity relationships in linear polymer photocatalysts for hydrogen evolution. **Nature communications**, n. 9(1), 4968p., 2018.

SALES, L. Z. S. **Momentos de reinoculação de *Rhizobium tropici* no feijoeiro na implantação de sistema de plantio direto**. 2020. 63f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2020.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. **AMB Express**, v. 9, n. 1, 2019.

SCHOSSLER, J. H.; MEERT, L.; RIZZARDI, D. A.; MICHALOVICZ, L. Componentes de rendimento e produtividade do feijoeiro comum submetido à inoculação e co-inoculação com estirpes de *Rhizobium tropici* e *Azospirillum brasilense*. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 17, n. 1, p. 10-15, 2016.

SILVA NETO, M.L.; SMIDERLE, O.J.; SILVA, K.; FERNANDES JÚNIOR, P.I.; XAVIER, G.J.; ZILLI, J.E. Compatibilidade do tratamento de sementes de feijão-caupi com fungicidas e inoculação com estirpes de *Bradyrhizobium*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.1, p.80-87, 2013.

SILVA, F. C. D. S. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 245p, 2009.

SILVA, V. M.; NARDELI, A. J.; MENDES, N. A. C.; ROCHA, M. M.; WILSON, L.; YOUNG, S. D.; BROADLEY, M. R.; WHITE, P. J.; REIS, A. R. Agronomic biofortification of cowpea with zinc: Variation in primary metabolism responses and grain nutritional quality among 29 diverse genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 162, p. 378-387, 2021.

SORATTO, R. P.; FERNANDES, A. M.; SANTOS, L. A.; JOB, A. L. G. Nutrient extraction and exportation by common bean cultivars under diferents fertilization levels: I-Macronutrients. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 37, p. 1027-1042, 2013.

SOUSA, W. S.; SORATTO, R. P.; PEIXOTO, D. S.; CAMPOS, T. S.; SILVA, M. B.; SOUZA, A.G. V.; TEIXEIRA, I. R.; GITARI, H. I. Effects of Rhizobium inoculum compared with mineral nitrogen fertilizer on nodulation and seed yield of common bean: a meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, e52, 2022.

SOUSA, W.S.; TEIXEIRA, I.R.; CAMPOS, T.S.; SILVA, G.C.; SILVA, M.B.; MOREIRA, S.G. Supplementary reinoculation in topdressing of in common bean crop: effects on nodulation, morphology, and grain yield. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, 2021.

SOUZA, J. E. B.; FERREIRA, E. P. de B. Improving sustainability of common bean production systems by co-inoculating rhizobia and azospirilla. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 237, p. 250-257, 2017.

STEINER, F.; FERREIRA, H. C. P.; ZUFFO, A. M. Can co-inoculation of *Rhizobium tropici* and *Azospirillum brasilense* increase common bean nodulation and grain yield? **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 18, p. 81-98, 2019.

TEIXEIRA, I. R.; LOPES, P. R.; SOUZA, W. S.; TEIXEIRA, G. C.S. Response of common beanto Rhizobium reinoculation in topdressinn. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, p. 274–282, 2022.

THAL, B.; BRAUN, H-P.; EUBEL, H. Proteomic analysis dissects the impact of nodulation and biological nitrogen fixation on *Vicia faba* root nodule physiology. **Plant Molecular Biology**, v. 97, p. 233-251, 2018.

VANLAUWEA, B.; HUNGRIA, M.; KANAMPIUA, F.; GILLERC, K.E. The role of legumes in the sustainable intensification of African smallholder agriculture: Lessons learnt and challenges for the future. **Agricultura, Ecosystemas e Meio Ambiente**, v. 284, 2019.

VIEIRA, C. O. **Memórias de meio século de estudos sobre a cultura do feijão**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 214 p., 2000.

VIEIRA, C. Perspectiva da cultura do feijão e de outras leguminosas de grãos no país e no mundo. In: ZIMMERMANN, M. J. O. (ed.). **Cultura do feijoeiro**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa de Potassa e Fósforo, cap. 1, p. 3-19, 1998.

VIEIRA, C.; JUNIOR, T. J. P.; BORÉM, A. **Feijão**. 2. ed. Viçosa: Ed. UFV, 600 p., 2006.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York, 2016.

ZAFAR, M. Effect of plant growth-promoting rhizobacteria on growth, nodulation and nutrient accumulation of lentil under controlled conditions. **Pedosphere**, v. 22, n. 22, p. 848-859, 2012.

ZHENG, M.; ZHOU, Z.; LUO, Y.; ZHAO, P.; MO, J. Global pattern and controls of biological nitrogen fixation under nutrient enrichment: A meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 25, n. 9, p. 3018-3030, 2023.