

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

GUILHERME HURTADO BATTISTELLA

**INOCULAÇÃO COM *Rhizobium tropici* PARA REDUZIR A ADUBAÇÃO
NITROGENADA NA CULTURA DO FEIJÃO-COMUM**

ARARAS - SP

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

GUILHERME HURTADO BATTISTELLA

**INOCULAÇÃO COM *Rhizobium tropici* PARA REDUZIR A ADUBAÇÃO
NITROGENADA NA CULTURA DO FEIJÃO-COMUM**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Agrônômica, da Universidade Federal de São Carlos, campus Araras, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Gustavo Ferreira da Silva.

ARARAS - SP

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UFSCar, que me deu a oportunidade de desenvolver minha jornada acadêmica, todos os professores que fizeram parte desse caminho, e igualmente a todos os funcionários da manutenção da universidade, que são de igual importância para que nosso ambiente esteja apto para o aprendizado.

Agradeço ao GEPAGRI, grupo do qual orgulhosamente participei por um ano, o qual concede aos seus membros, valiosos ensinamentos complementares às disciplinas.

Agradeço em especial aos professores Gustavo Ferreira da Silva e a professora Juliana Joice Pereira Lima, os quais são responsáveis pelo GEPAGRI e possibilitam uma proximidade muito proveitosa para adquirir conhecimento.

Agradeço à professora Alessandra dos Santos Penha pelo empréstimo da casa de vegetação na qual foi conduzida o experimento.

Agradeço à banca examinadora, novamente professor Gustavo Ferreira da Silva, Juliana Joice Pereira de Lima e Douglas Roberto Bizari, pelo profissionalismo e competência.

Agradeço também ao Enzo Pressato, o qual contribuiu na condução do experimento.

Agradeço minha família, que é minha base, e de onde vem todos os meus princípios, família que me apoiou desde o início da graduação,

Agradeço minha namorada Laís, que me motiva e me ajuda todos os dias.

Agradeço a minha segunda família, República Adatupanos, a qual me recepcionou e foi minha casa durante a graduação, me deu oportunidade de conhecer pessoas maravilhosas e fazer amigos para a vida toda.

RESUMO

O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) destaca-se pela importância nutricional e pelo papel na segurança alimentar, porém apresenta alta demanda por nitrogênio, o que torna a adubação nitrogenada um dos principais custos de produção. A inoculação com bactérias fixadoras de nitrogênio, como *Rhizobium tropici*, surge como alternativa sustentável para reduzir a dependência de fertilizantes minerais. Este trabalho teve como objetivo avaliar a redução da adubação nitrogenada em plantas de feijão inoculadas com *R. tropici*, sem prejudicar o desempenho produtivo. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento de blocos casualizados, com diferentes doses de nitrogênio (0 a 100% da recomendação) associadas à inoculação via semente com *R. tropici* e um tratamento controle sem inoculação. Foram avaliados número de nódulos, massa seca de raiz, componentes de produção, produtividade, eficiência no uso do nitrogênio (EUN) e retorno econômico marginal. As doses intermediárias de N (50–60% da recomendação) proporcionaram os melhores resultados agronômicos, com aumentos expressivos no número de nódulos, desenvolvimento radicular e produção, superando em mais de 200% a produção obtida na dose de 100% de N mineral. A dose que resultou na maior produtividade estimada foi de 52,7% da recomendação, enquanto o maior retorno econômico foi obtido com 52,74% (63,29 kg ha⁻¹). A eficiência no uso do nitrogênio diminuiu progressivamente com o aumento das doses, evidenciando maior aproveitamento nas doses reduzidas. Os resultados demonstram que a inoculação com *R. tropici* permite reduzir em até 50% a adubação nitrogenada no feijoeiro comum, aumentando produtividade, eficiência nutricional e rentabilidade, além de favorecer práticas agrícolas mais sustentáveis.

Palavras-chave: Feijoeiro. Nitrogênio. Fixação biológica de nitrogênio. Nutrição mineral. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is an essential crop for food security due to its nutritional value, but it has high nitrogen demand, making nitrogen fertilization one of the main production costs. Inoculation with nitrogen-fixing bacteria such as *Rhizobium tropici* is a sustainable alternative to reduce the reliance on mineral fertilizers. This study aimed to evaluate the reduction of nitrogen fertilization in bean plants inoculated with *R. tropici* without compromising grain yield. The experiment was conducted in a greenhouse under a randomized block design, with increasing nitrogen doses (0 to 100% of the recommended rate) combined with seed inoculation with *R. tropici*, and a non-inoculated control. Evaluations included nodule number, root dry mass, yield components, grain productivity, nitrogen use efficiency (NUE), and marginal economic return. Intermediate nitrogen doses (50–60% of the recommended rate) yielded the best agronomic performance, with substantial increases in nodulation, root development, and production, surpassing by more than 200% the yield obtained at 100% mineral nitrogen. The optimal dose for maximum productivity was estimated at 52.7%, while the highest economic return occurred at 52.74% (63.29 kg ha⁻¹). Nitrogen use efficiency decreased as nitrogen doses increased, indicating greater efficiency at reduced rates. The results demonstrate that inoculation with *R. tropici* enables up to 50% reduction in nitrogen fertilization in common bean, improving productivity, nutrient efficiency, and profitability, while promoting more sustainable agricultural practices.

Keywords: Bean plant. Nitrogen. Biological nitrogen fixation. Mineral nutrition. Sustainability.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS	9
2.1. Objetivo geral	9
2.2. Objetivos específicos	10
3. REVISÃO DE LITERATURA	10
3.1. Cultura do feijoeiro (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	10
3.2. Nitrogênio no cultivo do feijoeiro-comum	11
3.3. Fixação Biológica de Nitrogênio	12
3.4. <i>Rhizobium tropici</i>	13
3.5. Relação do feijoeiro-comum com os objetivos de desenvolvimento sustentável.....	14
4. MATERIAL E MÉTODOS	15
4.1. Área experimental	15
4.2. Condução do experimento e delineamento experimental.....	15
4.3. AVALIAÇÕES	18
4.3.1. Número de nódulos	18
4.3.2. Matéria seca radicular	18
4.3.3. Componentes de produção	18
4.3.4. Análise de retorno econômico marginal	18
4.3.5. Eficiência no uso do nitrogênio	20
4.4. Análise estatística	21
5. RESULTADOS	21
6. DISCUSSÃO	24
7. CONCLUSÃO	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

1. INTRODUÇÃO

O constante crescimento populacional impõe desafios severos à agricultura mundial, exigindo aumento substancial na produção de alimentos para garantir a segurança alimentar, especialmente por fontes de proteínas vegetais de alto valor biológico (Godfray *et al.*, 2010). Nesse sentido, o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) tem grande destaque na segurança alimentar, pois é um dos alimentos mais tradicionais na alimentação e culinária brasileiras, constituindo, juntamente com o arroz, a base da alimentação da população (Nadeem *et al.*, 2021). Essa cultura tem recebido status de alimento funcional devido ao seu teor proteico (17% a 40%), conteúdo de compostos fenólicos bioativos e grandes quantidades de carboidratos complexos e fibras, além de ser fonte de vitaminas, ferro, fósforo, magnésio, manganês, zinco e cálcio (Lima *et al.*, 2014; Zargar *et al.*, 2017).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de feijão, sendo responsável por 10,52% do total de grãos produzidos, ficando atrás apenas da líder Índia, que é responsável por cerca de 30%. (FAOSTAT, 2025). No contexto nacional, o estado de São Paulo se destaca com produtividade acima da média nacional, especialmente na terceira safra, devido ao alto nível tecnológico e uso de irrigação, estima-se que, na safra 2025/26 no país serão cultivados aproximadamente 2,7 milhões de hectares de feijão, com produção próxima de 3,1 milhões de toneladas de grãos e produtividade média de 1146 kg ha⁻¹ (CONAB, 2025).

Enquanto a primeira e segunda safra, em maioria dependendo do regime pluvial, apresentam produtividade média histórica entre 1100 e 1400 kg ha⁻¹, a terceira safra destaca-se pelo uso de insumos e irrigação controlada, alcançando produtividades médias superiores a 2700 kg ha⁻¹ (CONAB, 2024). No cenário de exportação, embora a produção brasileira seja voltada primordialmente ao abastecimento interno, o país tem consolidado sua posição no mercado externo, com volumes de exportação que, em anos recentes, ultrapassaram a marca de 150 mil toneladas anuais, atendendo a nichos específicos de alta qualidade (CONAB, 2024).

Nos últimos anos os agricultores brasileiros se depararam com um cenário de risco de falta de fertilizantes e aumento da participação destes nos custos de produção, que em alguns casos inviabilizaram a adubação nas doses recomendadas para a cultura. O Brasil é o quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo (Farias, 2021), esse fato coloca o país em uma frágil situação de dependência da importação desses insumos, sobretudo considerando que a maior parte dos solos das regiões produtoras de feijão é naturalmente deficiente em nutrientes.

Dentre os nutrientes exigidos pelo feijoeiro, o N é o mais absorvido (Maia *et al.*, 2017; Sousa *et al.*, 2022), sendo um componente vital para o metabolismo das plantas, atuando na síntese de aminoácidos, que são os blocos de construção das proteínas, bem como na formação

de ácidos nucleicos (DNA e RNA) e clorofila, pigmento essencial para a fotossíntese, dentre outras funções (Luo *et al.*, 2020). Sendo assim, a deficiência de N inibe rapidamente o crescimento e desenvolvimento vegetal (Taiz *et al.*, 2024).

Em condições de clima tropical, como no Brasil, as altas temperatura e umidade, aceleram os processos de decomposição da matéria orgânica e perdas de N, resultando em solos com baixos teores do elemento, o que implica em necessidade de reposição deste nutriente durante os ciclos de cultivo (Martins *et al.*, 2017; Puga *et al.*, 2020). Assim, o uso de fertilizantes nitrogenados é uma prática comum para aumentar a produtividade da cultura, mas é responsável por elevar os custos da produção agrícola e pode gerar danos ao ambiente, uma vez que parte do total aplicado, em média 50%, é perdida (Figueiredo *et al.*, 2016; Nyawade *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2020). Desta forma, a adoção de práticas que otimizem o uso dos fertilizantes pelas plantas passa a ser uma estratégia primordial, pois irá auxiliar na redução dos custos de produção sem afetar a produtividade.

Neste cenário, o uso de bactérias fixadoras de nitrogênio, como *Rhizobium* spp., pode ser uma estratégia viável, pois contribui no fornecimento de N, redução do uso de fertilizantes nitrogenados e, conseqüentemente, minimizando os impactos ambientais da lixiviação de N (Shibata *et al.*, 2017).

Estima-se que, as associações simbióticas sejam capazes de fixar até 80% da necessidade de N em áreas agrícolas (Herridge *et al.*, 2008; Mendoza-Suárez *et al.*, 2020), no entanto, há diferenças na capacidade de fixação entre as espécies agrícolas. Nesse processo, as bactérias do gênero *Rhizobium* utilizam a enzima nitrogenase para catalisar a redução do N₂ em amônia (NH₃) (Soumare *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2023). Na cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill], por exemplo, não se faz adubação nitrogenada com nitrogênio, pois a relação simbiótica com as bactérias fixadoras de nitrogênio (geralmente *Bradyrhizobium*) supre a necessidade de N da cultura para completar seu ciclo, alcançando elevadas produtividades. Pesquisas demonstraram que, a soja e o amendoim (*Arachis hypogaea* L.), juntos contribuem com aproximadamente 18,5 Tg ano⁻¹, por meio da fixação biológica de nitrogênio (FBN), em contrapartida, o feijoeiro comum tem potencial de 0,58 Tg ano⁻¹ (Herridge *et al.*, 2008; Rao and Balachandar, 2017).

Desta forma, a substituição total ou parcial da adubação mineral por técnicas de inoculação com *Rhizobium* spp. na cultura do feijoeiro comum ainda é muito complexa, devido às variações em seu impacto na produtividade (Sousa *et al.*, 2022). Sendo a recomendação atual, a utilização da inoculação como medida adicional, mas sem dispensar a adubação nitrogenada mineral. Os estudos com inoculação de feijão com *Rhizobium* spp. têm sido inconclusivos e os

resultados muito variáveis e pouco expressivos. Esse ainda é um desafio. Por outro lado, os dados experimentais mostram respostas acentuadas à adubação nitrogenada (Wutke *et al.*, 2022).

O fornecimento de N às plantas de feijoeiro, por meio da inoculação com *Rhizobium* spp., vem ao encontro com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e seus indicadores estabelecidos pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (ONU/FAO, 2019). Uma vez que, com essa pesquisa busca-se a produção de alimentos de necessidades básicas, com foco no feijão, alimento consumido por grande parte da população e caracterizado por ser uma fonte de proteína vegetal de alta qualidade, auxiliando a garantir a segurança alimentar (ODS 2 – Fome zero e agricultura sustentável); Com as mudanças climáticas que vêm ocorrendo nas últimas décadas a nível global, a redução de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais pode reduzir a contaminação por lixiviação dos lençóis freáticos e a emissão de gases do efeito estufa por volatilização (ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima); Com esse projeto busca-se promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, utilizando a biodiversidade como uma ferramenta biológica para fazer com que o solo, recurso natural não renovável, seja capaz de sustentar a vida ali presente (ODS 15 – Vida terrestre).

Diante do contexto apresentado, esta pesquisa procura responder às seguintes questões: I) a inoculação com *Rhizobium tropici* na cultura do feijoeiro comum é capaz de reduzir a adubação nitrogenada mineral, sem prejudicar o desempenho produtivo? II) Até quanto é possível reduzir a adubação nitrogenada no feijoeiro sem afetar a produtividade, por meio da inoculação com bactéria fixadora de nitrogênio? E III) A inoculação com *R. tropici* é capaz de maximizar a produtividade de grão de feijão?

A fim de responder estas perguntas, este estudo apresenta a hipótese de que plantas de feijoeiro inoculadas com *R. tropici* possuem menor demanda por N fornecido via adubação mineral, apresentando maior produtividade. Uma vez que, parte do N utilizado no desenvolvimento da planta é fornecido por meio de FBN.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a viabilidade da redução da adubação nitrogenada mineral no cultivo do feijoeiro inoculado com *R. tropici*, de modo a não prejudicar a produtividade da planta.

2.2. Objetivos específicos

Em função da inoculação de *R. tropici* na cultura do feijão, avaliar:

- a) Os componentes de produção e a produtividade do feijoeiro;
- b) Quanto é possível reduzir a adubação mineral com N, por meio da inoculação com bactéria fixadora de N.
- c) Se o aumento no custo de produção é condizente com o aumento da receita bruta.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)

As leguminosas possuem um papel essencial no fornecimento de nutrientes para culturas sucessoras, em virtude da decomposição rápida dos seus resíduos e pela fixação biológica do nitrogênio atmosférico (Aita; Giacomini, 2003). O feijão comum é a espécie mais cultivada do mundo entre o gênero *Phaseolus*, onde o Brasil é o maior produtor e consumidor (Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos- DEPEC, 2017).

No Brasil, o feijão é um grão muito consumido pela população de diversas regiões, portanto é um alimento típico e comum no prato dos brasileiros. Por se tratar de um grão tradicional e cultural, o feijão apresenta um grande potencial econômico. No ano de 2024, o valor da produção alcançou aproximadamente R\$12.172.130 e uma quantidade produzida de 3.018.459 toneladas em uma área colhida de 2.631.805 hectares, totalizando uma produtividade média de 1,147 toneladas por hectare. Além disso, o maior produtor do ano foi o Estado do Paraná, enquanto São Paulo teve uma das maiores produtividades. (IBGE, 2024; FAOSTAT, 2025).

No que se diz a respeito da produção, o feijão-comum é cultivado em todas as regiões do Brasil, que costuma variar em cada sistema de produção e diferentes épocas do ano, podendo ser manejados por pequenos, médios ou grandes produtores (Embrapa, 2023).

Segundo Wutke et al. (2022), o feijoeiro é considerado uma planta exigente em nutrientes, devido ao pequeno sistema radicular, portanto estes devem ser adicionados à disposição da planta em tempo e local corretos. Os sistemas de produção, os efeitos climáticos, a sanidade da cultura e até problemas econômicos dos agricultores, são fatores que levam a baixas produtividades (Justino et al., 2025).

O cultivo do feijoeiro é bem variável, o que acaba permitindo que o feijão seja cultivado em diferentes estações e períodos do ano. Na primavera se dá o plantio das águas, no verão, o

plantio da seca, enquanto no outono e inverno o cultivo é realizado utilizando sistemas de irrigação. Os períodos de plantio marcados pelas estações do ano ocorrem nos seguintes meses: águas da chuva entre setembro e novembro; seca entre janeiro e março; plantio irrigado de maio a junho (Embrapa, 2023). Nesta modalidade irrigada (terceira safra), obtêm-se as maiores produtividades médias, estimadas em cerca de 1.732 kg ha⁻¹ para o feijão do grupo cores, podendo alcançar patamares superiores a 4.100 kg ha⁻¹ em regiões de alta tecnologia (CONAB, 2025).

O feijão pode ser afetado por diversas pragas e doenças podendo levar à redução de produção nas lavouras, por isso o manejo fitossanitário adequado é essencial, juntamente com a identificação correta da praga e o diagnóstico com precisão da doença (Canale *et al.*, 2021). Além desses fatores, o manejo da adubação é essencial para atingir altas produtividades de grãos, especialmente no que se refere ao aporte de nitrogênio (Wutke *et al.*, 2022). A aplicação de adubos nitrogenados e fixação biológica de nitrogênio atmosférico, são as principais fontes de nitrogênio para o feijão (Hungria *et al.*, 1991; Martins *et al.*; 2003). A nutrição adequada também contribui para a produção de sementes de melhor qualidade (Kikuti *et al.*, 2006).

3.2. Nitrogênio no cultivo do feijoeiro-comum

O gás de nitrogênio, que constitui 80% da atmosfera, é um nutriente essencial para as plantas realizarem a fotossíntese. Porém, sozinha a planta não é capaz de sintetizar a molécula, e a absorção ocorre por meio das bactérias fixadoras deste composto, através de uma relação de simbiose com a planta, como é o caso dos rizóbios (Pessoa *et al.*, 2000).

De modo geral, a fixação de nitrogênio pelas leguminosas ocorre pela conversão de N₂ em amônio (NH₄) e nitrato (NO₃⁻), onde a absorção por nitrato é a forma mais comum utilizada pelas culturas, devido ao processo de nitrificação que já ocorre no solo (Gomes; Ormeño-Orillo; Hungria, 2015).

Apesar das recomendações de inoculação do feijoeiro, a FBN não é suficiente para atender a demanda da planta (Pias *et al.*, 2022). Isso ocorre devido à incapacidade da leguminosa de fixar nitrogênio suficiente para alcançar produtividades elevadas, por conta de diversos fatores bióticos e abióticos que afetam a FBN e a planta hospedeira, o que acaba influenciando a eficiência da simbiose (Moreira; Siqueira 2006).

O sucesso do feijoeiro depende diretamente das condições que estão disponíveis para a planta. É indicado pelo Boletim 100 que a dose de N para o feijão seja de 50 a 160 kg ha⁻¹, onde o valor estimado pode variar de acordo com o potencial da cultura (Wutke *et al.*, 2022).

Os fertilizantes químicos que contêm nitrogênio, além do alto custo, podem contribuir para a poluição do ambiente (CONAB, 2014). Levando em consideração tal evidência, o uso de insumos biológicos como alternativas aos insumos químicos industrializados vem sendo cada vez mais frequente no setor da agricultura, fornecendo baixo custo econômico e impacto ambiental reduzido (Hungria *et al.*, 2007).

Foi observado no trabalho de Tsai *et al.* (1993), que a nodulação e a fixação biológica de nitrogênio tiveram uma resposta positiva aos aumentos dos teores de fósforo, potássio e enxofre do solo, e quando o feijoeiro passou a receber um balanço adequado de nutrientes não houve inibição, mas um efeito potencializado da adubação nitrogenada sobre a nodulação e fixação do nitrogênio.

Dentre as deficiências de nutrição que ocorrem na cultura de feijão, a do nitrogênio é a mais comum, portanto deve-se repor, por se tratar do nutriente mais absorvido e o mais exportado pelas plantas (Carvalho *et al.*, 2001; Wutke *et al.*, 2022). A escassez desse nutriente afeta também a absorção de nitrato, que possui um papel essencial no desencadeamento de respostas à deficiência de nitrogênio pela planta, isso ocorre devido seu potencial sinalizador (Yie; Tian; Jin, 2022).

Além disso, nenhum déficit nutricional é tão visível quanto a deficiência do nitrogênio. Os sintomas iniciais se originam nas estruturas mais maduras das plantas incluindo: folhas amareladas e cloróticas; menor crescimento foliar; frutos e grãos com teores e tamanhos reduzidos, tal fato se dá pois o nitrogênio move de regiões mais velhas para as mais jovens da planta (Silva *et al.*, 2024).

3.3. Fixação Biológica de Nitrogênio

Embora o gás nitrogênio (N_2) componha cerca de 78% da atmosfera, se encontra indisponível para a absorção direta pelas plantas devido à ligação tripla de alta estabilidade entre os dois átomos de nitrogênio (Taiz *et al.*, 2024). Nesse contexto, se dá a responsabilidade da fixação biológica do nitrogênio (FBN), com o processo natural de conversão de N_2 atmosférico em amônia (NH_3), a qual a planta pode absorver (Moreira; Siqueira 2006). Esse processo diminui a dependência de fertilizantes nitrogenados minerais, com altos custos e impactos ambientais negativos (Smil, 1999; Hungria; Mendes, 2015).

A FBN é realizada exclusivamente por microrganismos diazotróficos, que podem ter vida livre, porém estabelecem relações simbióticas com as plantas (Scherlach *et al.*, 2013). O processo é mediado pela enzima nitrogenase, que catalisa a redução de N_2 em NH_3 com alto consumo de energia

na forma de ATP (Hoffman et al., 2014). Para que a simbiose seja efetiva, ocorre uma troca molecular complexa: a planta hospedeira libera flavonoides que induzem as bactérias a sintetizarem fatores Nod, resultando na formação de nódulos radiculares (Oldroyd, 2013). Dentro dessas estruturas especializadas, a planta fornece carboidratos provenientes da fotossíntese para as bactérias e mantém um ambiente com baixos níveis de oxigênio livre, essencial para preservar a atividade da nitrogenase, enquanto recebe, em troca, o nitrogênio fixado (Udvardi; Poole, 2013).

3.4. *Rhizobium tropici*

O *R. tropici* é uma bactéria diazotrófica, que se distingue de outras espécies do gênero por sua grande estabilidade genética e capacidade de manter os plasmídeos simbióticos mesmo em condições de estresse (Martínez-Romero et al., 1991). Tal fato a torna uma bactéria interessante como alternativa às grandes quantidades de fertilizantes nitrogenados sintéticos que são utilizados.

A bactéria *R. tropici* é a mais resistente às temperaturas elevadas (Ferreira et al., 2000). O feijoeiro quando em simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium*, pode contribuir para a redução no uso de fertilizantes nitrogenados. O aumento da produtividade por meio da FBN, mostra a possibilidade de rendimento de até 1600 kg ha⁻¹ (Dobereiner; Duque, 1980).

O pH do solo é um dos principais fatores que limitam a simbiose FBN-leguminosa (Hungria; Vargas, 2000). Além disso, vários fatores do solo influenciam a FBN, entre eles, a toxicidade por alumínio e manganês, deficiência de cálcio, fósforo e micronutrientes podem afetar negativamente a simbiose (Zhu et al., 2023).

O nitrogênio mineral em excesso pode diminuir drasticamente a eficiência simbiótica. Porém, quando aplicado em quantidades menores, possibilita o crescimento dos nódulos e maior FBN, fazendo com que a dosagem seja crucial na obtenção de uma cultura promissora (Franco; Dobereiner, 1968).

O grupo *Rhizobium* é composto por bactérias capazes de fixar nitrogênio atmosférico no solo e conseqüentemente disponibilizá-lo para a planta, por meio de uma simbiose, já que a bactéria é beneficiada com suprimentos fornecidos pela planta, enquanto esta recebe o nitrogênio que foi fixado pelo *R. tropici* (Gomes; Ormeño-Orillo; Hungria, 2015).

A inoculação de *R. tropici* no feijoeiro é capaz de aumentar o teor de N nas folhas, acúmulo de biomassa e componentes de produção (Oliveira; Pelá; Pelá., 2017). Embora o Boletim 100 aponte que a estratégia é inconclusiva na cultura do feijoeiro, muito disso pode ser justificado pela baixa sobrevivência da bactéria *Rhizobium* sob condições de estresse. Porém,

o *R. tropici* se mostra com um diferencial por ter elevada estabilidade genética e alta tolerância às condições climáticas, dando-o vantagens competitivas de sobrevivência em relações à população nativa do solo (Hungria et al., 2000). Dessa forma, há uma lacuna referente ao manejo de bactérias fixadoras de N e adubação nitrogenada na cultura do feijoeiro comum.

3.5. Relação do feijoeiro-comum com os objetivos de desenvolvimento sustentável

Aproximadamente 963 milhões de pessoas estão em situação de fome no mundo e a tendência é aumentar cada vez mais devido à desigualdade social, sendo este, um fator que contribui fortemente para a desnutrição (FAO, 2018).

O feijoeiro possui um papel importante, sendo base da dieta de milhões de pessoas no Brasil e representa a principal fonte de proteína vegetal para a população de baixa renda na América Latina e na África. Diante do crescimento da população mundial, a cultura se faz necessária para garantir a segurança alimentar (Broughton et al., 2003).

Com o crescimento populacional, vem junto o aumento da demanda, e esta tem que ser suprida, mas sem dissociar a produção com a sustentabilidade e preservação ambiental, com isso, se faz necessário o manejo estratégico que diminua o uso de fertilizantes nitrogenados industriais, os quais, se aplicados em grandes quantidades podem causar a contaminação do lençol freático, e também emissão de gases do efeito estufa na atmosfera (Hungria; Nogueira; Araujo, 2013).

As vitaminas e os micronutrientes possuem grande importância para o desenvolvimento e crescimento dos seres vivos (Asensi-Fabado; Munné-Bosch, 2010). A carência destes, pode afetar de forma negativa a qualidade de vida, possibilitando o aumento de deficiências nutricionais, doenças físicas e mentais e até mesmo a taxa de mortalidade (Qaim *et al.*, 2007).

Levando em consideração que a maioria dos nutrientes não são sintetizados pelos seres humanos, a alimentação se faz necessária para a via de obtenção nutricional (Fairweather-Tait; Cashman 2015). Portanto, a agricultura é fundamental para fornecer maior parte de nutrientes e compostos para a sobrevivência humana (Saltzman *et al.*, 2013).

Baseado nesses fatos, em 2015 a Organização das Nações Unidas (ONU) criou uma proposta de metas para serem estabelecidas até o ano de 2030. Esse acordo foi realizado entre seus países integrantes, para a implementação de políticas públicas no que se diz a respeito do desenvolvimento sustentável. O Brasil é um país membro do acordo, definido pelo Decreto nº 8.892/2016 (Embrapa, 2025).

Portanto, é de suma importância que as empresas agrícolas, agrônomos e produtores sejam contribuidores dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS). Dentre os 17 objetivos, destaque-se os seguintes ODS: 2- fome zero e agricultura sustentável; 3- saúde e bem estar; 12- consumo e produção responsáveis; 13- ação contra a mudança global do clima (Medeiros *et al.*, 2018; Kiill *et al.*, 2018; Palhares *et al.*, 2018; Cuadra *et al.*, 2018).

Nesse cenário, a pesquisa busca validar o uso da inoculação de *R. tropici* visando conciliar o aumento da produção com a sustentabilidade. A substituição parcial de fertilizantes pela FBN permite manter o rendimento de produção reduzindo significativamente a contaminação do meio ambiente (Pelegrin *et al.*, 2009).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, no Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, localizada no município de Araras (SP), em Latossolo Vermelho distrófico. O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cwa, que significa clima mesotérmico com inverno seco, com precipitação média anual de 1.384 mm e temperatura média anual de 21,6° C. Os dados de temperatura e umidade no interior da casa de vegetação estão apresentados na Figura 1.

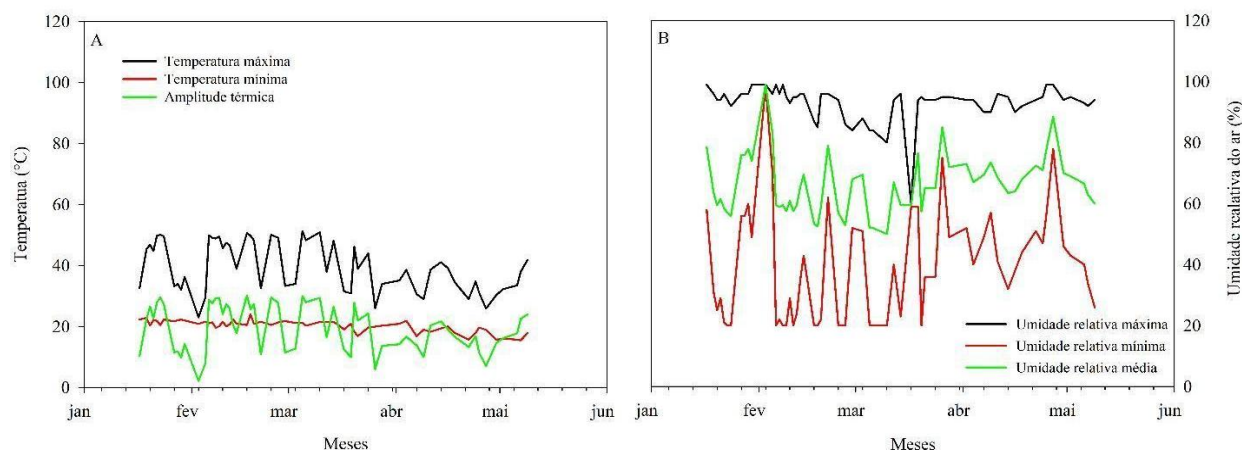


Figura 1: Temperatura do ar (A - máxima, mínima e amplitude térmica) e umidade relativa (B - máxima mínima e média) dentro da casa de vegetação, durante a condução do experimento.

4.2. Condução do experimento e delineamento experimental

O experimento foi conduzido em vasos plásticos com volume de 12L, em delineamento de blocos casualizados, com três repetições. Os tratamentos foram constituídos por diferentes combinações de dose de nitrogênio, via adubo mineral (ureia - 40% de N), associado com

inoculação com *R. tropici* na semente de feijão. Cada parcela experimental foi composta por um vaso com três plantas. A constituição de cada tratamento está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Tratamentos testados combinando doses de adubação mineral nitrogenada e inoculação com *R. tropici* na semente de feijão.

Tratamento	Inoculação com	Doses de N	N na	N em
	<i>R. tropici</i>		semeadura	Cobertura
	UFC mL ⁻¹	% da DR	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
1	3 x 10 ⁹	0	0	0
2	3 x 10 ⁹	10	12	0
3	3 x 10 ⁹	20	20	4
4	3 x 10 ⁹	30	20	16
5	3 x 10 ⁹	40	20	28
6	3 x 10 ⁹	50	20	40
7	3 x 10 ⁹	60	20	52
8	3 x 10 ⁹	70	20	64
9	3 x 10 ⁹	80	20	76
10	3 x 10 ⁹	90	20	88
11	3 x 10 ⁹	100	20	100

N: nitrogênio; UFC: unidade formadora de colônia; DR: dose recomendada pelo boletim 100 (Wutke et al., 2022).

A recomendação de adubação nitrogenada foi baseada na dose 120 kg ha⁻¹ (semeadura mais cobertura), conforme recomendação de Wutke et al. (2022), estimando uma produtividade de 3 - 4 t ha⁻¹ de grãos. Para os tratamentos que receberam mais de 20 kg ha⁻¹ de N, foi fornecido 20 kg ha⁻¹ na semeadura e o excedente em cobertura, sendo realizada entre V3 (primeira folha trifoliolada) e V4 (terceira folha trifoliolada formada) e, posteriormente, a segunda, no estágio R5 (pré-florescimento ou início da fase reprodutiva) (Wutke et al., 2022). O tratamento 3 recebeu uma adubação de cobertura; e os tratamentos 4 a 12 receberam as duas adubações de cobertura. Os demais nutrientes foram fornecidos em quantidades iguais para todos os tratamentos, seguindo a recomendação de Wutke et al. (2022).

A inoculação com *R. tropici* foi realizada via semente, utilizando as cepas 4077 e 4088 na concentração de 3 x 10⁹ UFC por mL do produto, na dosagem de 2,5 mL do produto por 1 kg de semente de feijão, conforme recomendação do fabricante

A cultivar utilizada foi a BRS Estilo, pertencente ao grupo carioca, com hábito de crescimento indeterminado (tipo II), arquitetura de planta ereta, ciclo normal (85 – 95 dias), floração média de 44 dias, massa de 1000 grãos igual a 260 gramas. Essa cultivar apresenta resistência moderada à antracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*) e ferrugem (*Uromyces appendiculatus*); suscetível ao crestamento bacteriano (*Xanthomonas campestris* pv. *phaseoli*), mancha angular (*Phaseoisariopsis griseola*), mosaico dourado (Vírus do mosaico-dourado do feijoeiro), murcha de Fusarium (*Fusarium oxysporum* f. sp. *phaseoli*) e murcha de Curtobacterium (*Curtobacterium flaccumfaciens* pv. *flaccumfaciens*) (EMBRAPA, 2014).

O solo utilizado foi previamente submetido à análise laboratorial para caracterização química e granulométrica, sendo os resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Características químicas e granulométricas do solo.

Atributos	Valor	Atributos	Valor
pH (CaCl ₂)	5,2	V (%)	52
P _{res} (mg dm ⁻³)	17	B (mg dm ⁻³)	0,16
S (mg dm ⁻³)	6	Cu (mg dm ⁻³)	5,3
K (mmol _c dm ⁻³)	2,6	Fe (mg dm ⁻³)	18
Ca (mmol _c dm ⁻³)	26	Mn (mg dm ⁻³)	79,3
Mg (mmol _c dm ⁻³)	12	Zn (mg dm ⁻³)	1,2
Al (mmol _c dm ⁻³)	0,4	Areia (g dm ⁻³)	160
H+Al (mmol _c dm ⁻³)	38	Silte (g dm ⁻³)	101
M.O. (g kg ⁻¹)	30	Argila (g dm ⁻³)	739

No fundo de cada vaso, antes de colocar o solo, foram posicionados discos de tecido não tecido (TNT) a fim de evitar a perda de solo pelo orifício de drenagem. Posteriormente, o solo foi peneirado para a retirada de torrões e impurezas, sendo então acondicionado nos vasos, totalizando 10 kg por unidade experimental.

A semeadura foi realizada em 4 de fevereiro de 2025, utilizando 8 sementes por vaso. Nove dias após a semeadura (DAS) foi realizado o desbaste, mantendo-se apenas as três plantas mais vigorosas em cada vaso.

A primeira adubação de cobertura ocorreu em 21 de fevereiro (no estágio fenológico entre V3 e V4), utilizando ureia e cloreto de potássio (KCl), como fonte de nitrogênio e potássio, respectivamente. A quantidade de N aplicada foi conforme a especificação de cada tratamento, apresentado na Tabela 1. Foi utilizado a dose de 80 kg ha⁻¹ de K₂O (40 kg ha⁻¹ na semeadura e 40 kg ha⁻¹ em cobertura), sendo aplicada a mesma dose em todos os tratamentos. Em 14 de

março realizou-se a segunda adubação nitrogenada de cobertura, seguindo as especificidades de cada tratamento, utilizando ureia como fonte.

As irrigações foram realizadas uma vez ao dia, de maneira uniforme em todos os vasos, foram utilizadas lâminas de 3,5 mm nos dias iniciais (até o estágio V3), chegando até a 8mm em dias de maior temperatura e estágio de desenvolvimento mais avançado (V4 a R8). O manejo fitossanitário foi realizado com o inseticida acetamiprido e bifentrina na dose de 75 e 150 g ha⁻¹ do ingrediente ativo, respectivamente. Foram realizadas duas aplicações ao longo do ciclo do feijoeiro, para o manejo da mosca-branca (*Bemisia tabaci*), sendo a primeira feita em 17 de fevereiro de 2025 e a segunda em 03 de março de 2025.

4.3. AVALIAÇÕES

4.3.1. Número de nódulos

No estágio R6 da planta, foi retirada uma planta de cada unidade experimental para determinação do número de nódulos. O sistema radicular de cada planta foi cuidadosamente lavado e, posteriormente, foi determinado o número de nódulos por planta, mediante contagem.

4.3.2. Matéria seca radicular

Utilizando a mesma planta usada para avaliação do número de nódulos, foi determinada a massa seca da parte aérea e das raízes. Para isso, as amostras foram colocadas em sacos de papel e secas em estufa de aeração forçada a 60°C até atingir massa constante, para determinação da fitomassa seca em g planta⁻¹.

4.3.3. Componentes de produção

Após a maturação dos grãos, foram avaliados o número de vagens por planta e número de grãos por vagem. A produtividade foi avaliada por meio da colheita dos grãos de cada unidade experimental, sendo os valores corrigidos para 13% de umidade e o resultado expresso em g planta⁻¹.

4.3.4. Análise de retorno econômico marginal

Com base nos resultados obtidos da produção por planta e do custo de produção de cada tratamento, foram realizadas extrapolações para 1 hectare, afim de determinar a receita bruta de cada tratamento. Considerou-se uma população de 240 mil plantas por hectare.

Os custos analisados foram baseados na quantidade de adubo, inoculantes e inseticidas, tendo como base os preços vigentes na região de São Paulo no ano de 2025 (Tabela 3).

Tabela 3. Composição dos custos de produção estimados em 1 hectare para o cultivo de feijoeiro manejado com diferentes níveis de adubação nitrogenada associada à inoculação via semente com *Rhizobium tropici*.

Porcentagem da dose de N recomendada	Adubação nitrogenada	Adubação com demais nutrientes	Inoculante	Inseticida	Custo final
0	0,00	12030,00	30,00	216,00	12276,00
10	540,00	12030,00	30,00	216,00	12816,00
20	1080,00	12030,00	30,00	216,00	13356,00
30	1620,00	12030,00	30,00	216,00	13,896,00
40	2160,00	12030,00	30,00	216,00	14436,00
50	2700,00	12030,00	30,00	216,00	14976,00
60	3240,00	12030,00	30,00	216,00	15,516,00
70	3780,00	12030,00	30,00	216,00	16056,00
80	4320,00	12030,00	30,00	216,00	16596,00
90	4860,00	12030,00	30,00	216,00	17136,00
100	5400,00	12030,00	30,00	216,00	17676,00

Para avaliar a relação entre o investimento em nitrogênio e o retorno financeiro proporcionado pela produtividade do feijoeiro, foi realizada uma análise econômica parcial. O tratamento sem aplicação de nitrogênio (0% da dose recomendada) foi utilizado como tratamento-referência. Para cada dose de N, calculou-se o acréscimo de custo de produção, obtido multiplicando-se a quantidade de fertilizante aplicada pelo seu custo unitário. A produtividade obtida por planta (g planta⁻¹) foi extrapolada para kg ha⁻¹, permitindo o cálculo da receita bruta com base no preço médio do feijão (saca de 60 kg, nota 8 a 8,5) praticado em maio de 2025 no município de Itapeva (CEPEA, 2025). Para cada nível de N, determinou-se o acréscimo de receita bruta em relação ao tratamento-referência.

Assim, a análise consistiu na comparação entre os incrementos de receita e de custo decorrentes das doses de N. Na Tabela 4 estão apresentados os valores extrapolados para 1 ha de custo de produção, produtividade e receita bruta.

Tabela 4. Valores estimados para 1 hectare dos custos de produção, produtividade de grãos e receita bruta de feijoeiro cultivado com diferentes níveis de adubação nitrogenada associada à inoculação via semente com *Rhizobium tropici*.

Porcentagem da dose de N recomendada	Custo de produção (R\$ ha ⁻¹)	Produtividade (kg ha ⁻¹)	Receita bruta (R\$ ha ⁻¹)	Incremento no custo de produção (R\$ ha ⁻¹)	Incremento na produtividade (kg ha ⁻¹)	Incremento na receita bruta (R\$ ha ⁻¹)
0	12276,00	432,41	2019,35	0	0	0
10	12816,00	730,77	3412,71	540,00	298,36	1393,36
20	13356,00	1068,75	4991,08	1080,00	636,34	2971,73
30	13,896,00	1505,20	7029,27	1620,00	1072,79	5009,92
40	14436,00	1852,15	8649,52	2160,00	1419,74	6630,17
50	14976,00	2220,72	10370,77	2700,00	1788,31	8351,42
60	15,516,00	2412,86	11268,07	3240,00	1980,45	9248,72
70	16056,00	1802,79	8419,01	3780,00	1370,38	6399,66
80	16596,00	1196,07	5585,63	4320,00	763,66	3566,28
90	17136,00	908,88	4244,49	4860,00	476,47	2225,14
100	17676,00	752,78	3515,50	5400,00	320,37	1496,15

4.3.5. Eficiência no uso do nitrogênio

A eficiência no uso do nitrogênio (EUN) foi determinada como a quantidade de nitrogênio necessária para produzir uma unidade de grãos, expressa em kg de N por kg de grãos. Para isso, as doses de nitrogênio aplicadas (0, 12, 24, 36, 48, 60, 72, 84, 96, 108 e 120 kg ha⁻¹) foram divididas pela produtividade extrapolada para kg ha⁻¹, conforme equação 1:

$$Eficiência\ no\ uso\ do\ nitrogênio\ (EUN) = \frac{Dose\ de\ nitrogênio\ aplicada\ (kg\ ha^{-1})}{Produtividade\ de\ grãos\ (kg\ ha^{-1})} \quad (1)$$

Para relacionar o desempenho agrônomico à viabilidade financeira do uso do nitrogênio, os valores de EUN foram apresentados conjuntamente com os dados do acréscimo no custo de produção (calculado conforme descrito no item 4.3.3.). As curvas ajustadas da EUN (kg N kg⁻¹ de grãos) e do aumento no custo de produção (R\$ ha⁻¹) foram representadas simultaneamente, permitindo avaliar o ponto em que o aumento no requerimento de N por unidade produzida passa a ser acompanhado por custos crescentes, integrando assim a perspectiva agrônômica e econômica do uso do nutriente.

4.4. Análise estatística

Os dados foram testados quanto à normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e homocedasticidade por meio do teste de Hartley. Os dados foram submetidos à análise de variância, com níveis de significância de 5% de probabilidade de erro e as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Os dados também foram submetidos a análise de regressão polinomial. Os resultados da análise de retorno econômico marginal e da EUN foram avaliados apenas por modelos de regressão, para estimar o comportamento dos acréscimos de receita e custo em função das doses aplicadas.

5. RESULTADOS

A aplicação de nitrogênio em diferentes doses nas plantas de feijoeiro inoculadas com *R. tropici*, apresentou diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) em todas as variáveis agrônomicas testadas. Os resultados evidenciaram que, de modo geral, a associação da inoculação via semente com *R. tropici* com as doses de 50% e 60% da adubação nitrogenada recomendada, proporcionaram maior número de nódulos, massa seca de raiz, número de vagens por planta, número de grãos por vagens e produção (Figura 2). Comparativamente ao manejo da adubação com 100%, a aplicação de 50% e 60% da adubação recomendada aumentou em aproximadamente 122%, 28%, 77%, 74% e 207% o número de nódulos, massa seca de raiz, número de vagens por planta, número de grãos por vagens e produção, respectivamente.

Para variável número de nódulos, por meio da equação de ajuste a dose de 53,1% da dose recomendada de nitrogênio é a que resultaria em maior valor dessa variável (10,8 nódulos por planta). Para a massa seca de raiz, a dose com melhor resultado foi de 64,5%, resultando em 0,491 g planta⁻¹. O maior número de vagens por planta e grãos por vagem será obtido com as doses de 56,4% e 49,5%, respectivamente, produzindo em média 6,6 vagens por planta e 5,16 grãos por vagem. Já em relação a produção de grãos, o melhor desempenho será com a dose de 52,7% da recomendação de adubação nitrogenada, resultando em 8,34 g planta⁻¹ de grãos (Figura 2).

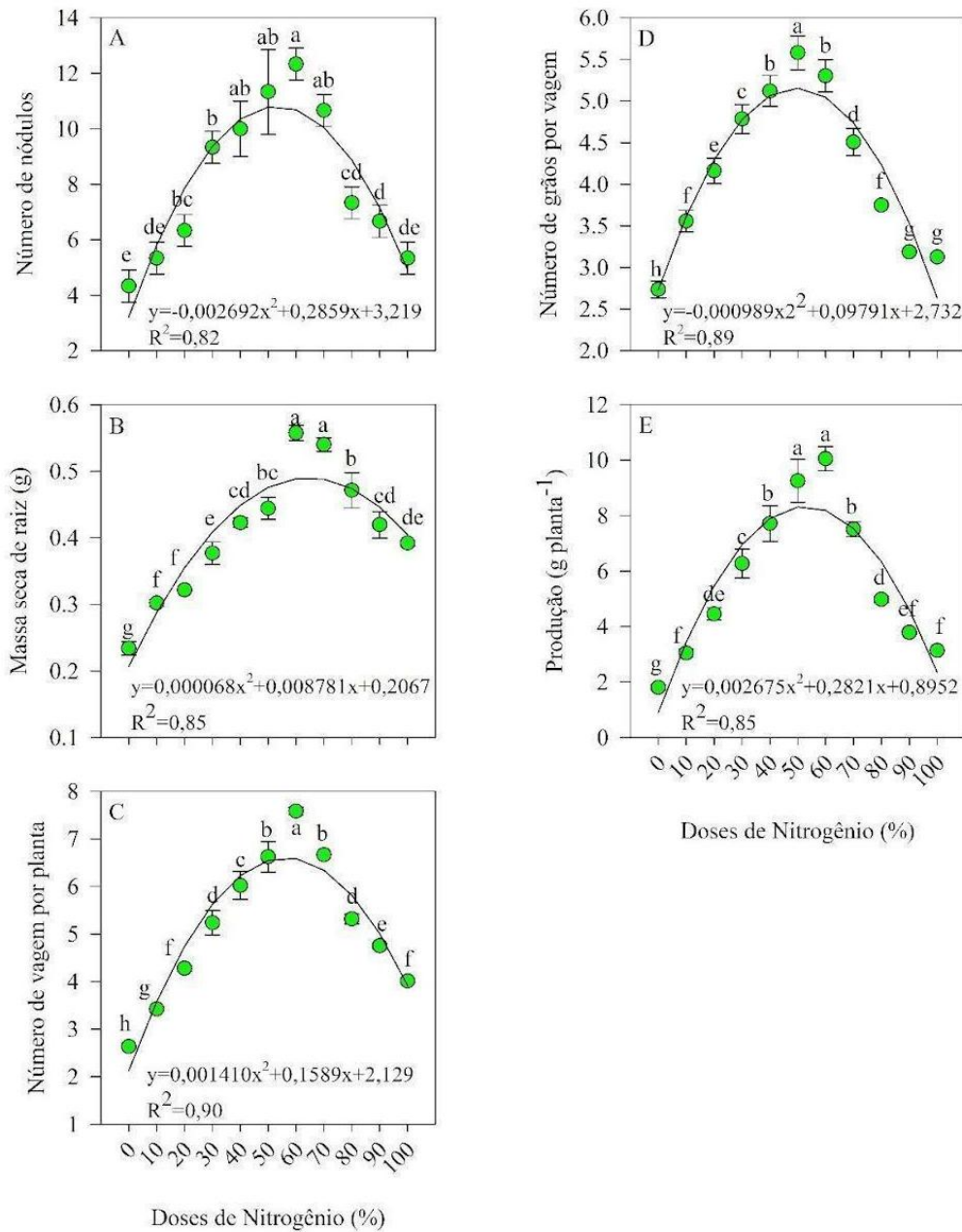


Figura 2. Número de nódulos (A), massa seca de raiz (B), número de vagens por planta (C), número de grãos por vagem (D) e produção de grãos (E) de plantas de feijão cultivadas com diferentes porcentagens da recomendação nitrogenada e com inoculação via semente com *Rhizobium tropici*. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Em relação à análise de retorno econômico marginal, os dados seguiram o modelo quadrático observado nas outras variáveis, atingindo o ponto ótimo de aumento de receita bruta na dose de 52,74% de N (63,29 kg ha⁻¹), com retorno de R\$ 7321,43 por hectare de receita bruta (Figura 3).

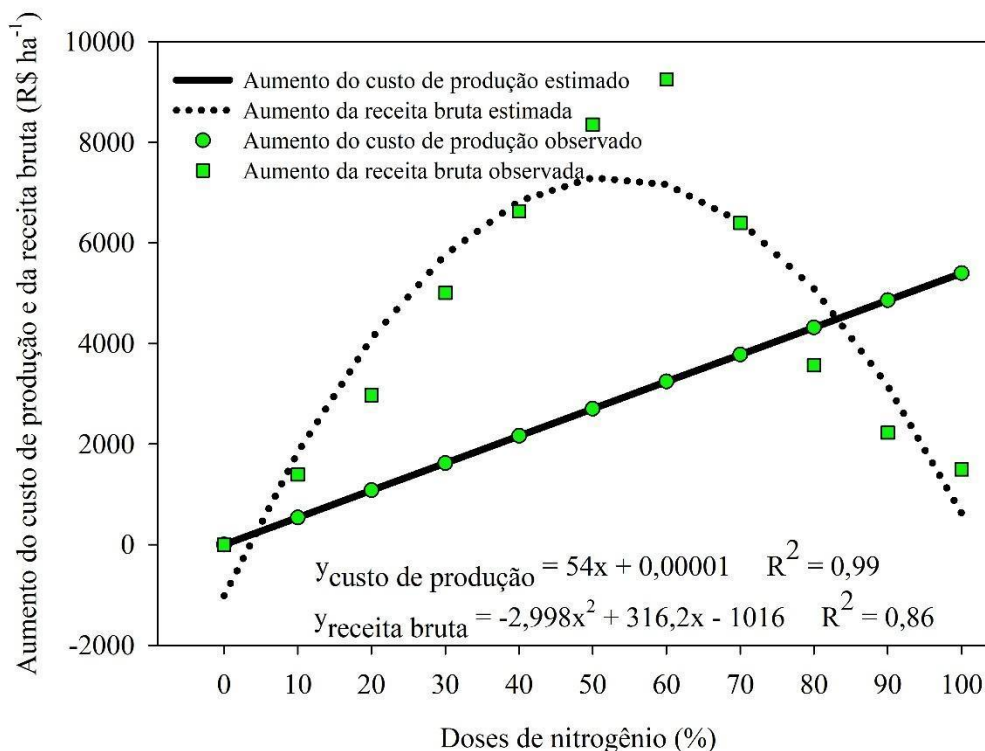


Figura 3. Retorno econômico marginal, expresso pelo aumento no custo de produção (R\$ ha⁻¹) e da receita bruta obtida (R\$ ha⁻¹) de plantas de feijão cultivadas com diferentes porcentagens da recomendação nitrogenada e com inoculação via semente com *Rhizobium tropici*.

Esse resultado indica que não apenas é possível reduzir em até aproximadamente 50% a necessidade de fertilização nitrogenada, como também esse manejo pode proporcionar ganhos produtivos superiores aos observados no sistema convencional.

Já a eficiência no uso do nitrogênio (EUN) também apresentou resposta quadrática às doses crescentes de N (Figura 4). A equação ajustada indica redução progressiva da EUN com o incremento das doses nitrogenadas. Cabe ressaltar que, as doses entre 12 e 72 kg ha⁻¹ de N (correspondente à 10 a 60% da dose recomendada) apresentaram respostas semelhantes, no entanto, as maiores doses exigiram bem mais nitrogênio para produzir 1 kg de grãos de feijão. Comparando a dose de 60 e 72 kg ha⁻¹ (50 e 60% da dose recomendada, respectivamente) com a dose 120 kg ha⁻¹ (100% da dose recomendada, respectivamente), o nitrogênio foi melhor aproveitado nas menores doses o equivalente a 5,88 e 5,30 vezes, respectivamente (Figura 4). Acima desse ponto, a adição suplementar de N elevou a produção de grãos em magnitude proporcionalmente inferior ao incremento da dose, refletindo baixa eficiência agrônômica do nutriente e inoculação com *R. tropici*.

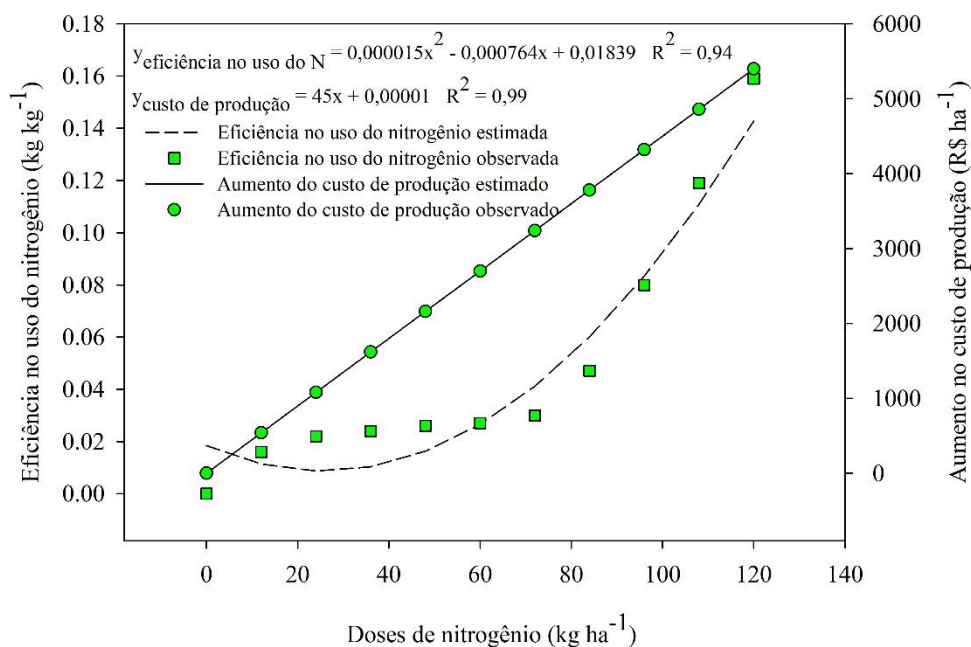


Figura 4. Eficiência no uso do nitrogênio, expresso por kg de adubo mineral necessário para produção de 1 kg de grãos de feijão, e aumento no custo de produção (R\$ ha⁻¹) de plantas de feijão cultivadas com diferentes porcentagens da recomendação nitrogenada e com inoculação via semente com *Rhizobium tropici*.

A análise conjunta da EUN com o aumento do custo de produção demonstra forte divergência entre as curvas de EUN e de custo incremental; enquanto a EUN decresce com o aumento das doses de N, o custo de produção aumenta continuamente (Figura 4). Essa resposta evidencia que, nas condições do presente estudo, o uso de N mineral acima das menores doses avaliadas reduz substancialmente a eficiência fisiológica e econômica do insumo, mesmo na presença de inoculação com *R. tropici*, sugerindo que a contribuição biológica do N fixado pode ter sido suficiente para suprir grande parte da demanda da cultura.

De forma geral, a inoculação com *R. tropici* associada a doses intermediárias de N promoveu melhorias simultâneas em nodulação, desenvolvimento radicular, formação de estruturas reprodutivas e produtividade final, demonstrando a viabilidade da prática como alternativa para otimização do uso de insumos (Figura 2 e 3).

6. DISCUSSÃO

Os resultados encontrados neste trabalho corroboram a hipótese de que a inoculação com *R. tropici* pode reduzir a necessidade de adubação nitrogenada mineral no feijoeiro comum, sem comprometer a produtividade de grãos. Esses achados contribuem com o que já vem sendo relatado na literatura, na qual se destaca que a FBN é um mecanismo essencial para

reduzir a dependência de insumos externos em leguminosas (Mendoza-Suárez et al., 2020; Hungria et al., 2013), apesar de apresentar resultados contrastantes no que diz respeito ao feijoeiro-comum (Wutke et al., 2022).

O comportamento quadrático nas variáveis de nodulação (Figura 2A) evidencia a possibilidade da diminuição da dose de adubo nitrogenado, demonstrando que a relação de simbiose *Rhizobium*-feijoeiro tem um incentivo inicial com as doses menores, fornecendo o nutriente necessário para o desenvolvimento da planta jovem antes que a FBN esteja totalmente estabelecida e gerando resultados, explicando o aumento inicial na curva de regressão (Tsai et al., 1993). Em contrapartida, o nitrogênio mineral, disponível em altas concentrações no solo, atua inibindo o processo de simbiose (Tsai et al., 1993). O processo de FBN exige grande gasto de energia para a planta, sendo assim, com o nitrogênio facilmente disponível no solo para absorção, o investimento do feijoeiro com a simbiose é reduzido, conseqüentemente diminuindo a formação de novos nódulos e desenvolvimento dos mesmos. Outro fator que pode ter sido determinante no comportamento quadrático é o de acidificação do solo, frequentemente observado em solos manejados com ureia na adubação com ureia, com o efeito da nitrificação, o qual libera considerável quantidade de H⁺ no solo (Wang et al., 2023).

O fato de as doses intermediárias (50–60% da recomendação) terem proporcionado os melhores resultados, sugere que a presença de uma quantidade moderada de N mineral é fundamental para o estabelecimento inicial da cultura e desenvolvimento da parte aérea, mas, quando em excesso, pode inibir a nodulação e a atividade simbiótica. Esse fenômeno já foi descrito por Karavidas et al., 2023, que destacam que altas doses de N reduzem a formação de nódulos e a eficiência da simbiose, ao passo que doses moderadas atuam de forma complementar à FBN.

Os incrementos observados no número de nódulos e na massa seca de raiz demonstram que a associação entre adubação parcial e a inoculação potencializou a formação de um sistema radicular mais robusto (Figura 2A e 2B). Esse resultado é importante, já que raízes mais desenvolvidas aumentam a absorção de água e nutrientes, garantindo maior estabilidade produtiva mesmo em condições de variação de solo e clima. Estudos como o de Soares et al. (2016) apontam que plantas de feijão inoculadas em condições de N reduzido apresentaram maior eficiência no uso do nutriente, confirmando os achados do presente trabalho. Cabe ressaltar que, o feijoeiro-comum apresenta sistema radicular pouco desenvolvido e, normalmente, mais de 80% das raízes se concentram na camada superficial do solo (0,00 – 0,20 m) (Riyaz et al., 2024); e esse incremento superior a 22% na massa seca de raiz na dose ótima

de 64,5%, comparado à dose 100% (Figura 2B), pode garantir vantagens no desenvolvimento e no potencial produtivo da cultura.

Diante do exposto, a inibição da FBN causada pelas elevadas doses de N tem um impacto direto nos componentes de produção e produtividade. Todas essas variáveis apresentaram comportamento quadrático (Figura 2). Isso evidencia que mesmo com a dose total de N recomendada, o nutriente fica prontamente disponível no solo para a planta, porém não tem a mesma eficiência que a FBN funcionando em seu máximo potencial. Também, como relatado por Tsai et al. (1993), na fase crítica de demanda de N pelo feijoeiro (período reprodutivo) o fornecimento de N via adubação mineral não conseguiu igualar o resultado obtido pela FBN, ocasionando redução na produtividade.

A produtividade obtida com cerca de 50% da dose de N foi mais que o dobro daquela registrada no manejo convencional (100% da dose mineral) (Figura 2E). Esse resultado é particularmente relevante do ponto de vista agrônomo e econômico, já que a adubação nitrogenada é um dos insumos que mais influenciam a produção de feijão no Brasil (Wutke et al., 2022). A redução de até 50% no uso de N mineral, aliada ao incremento produtivo, representa ganhos diretos ao agricultor, além de benefícios ambientais pela menor emissão de gases de efeito estufa e redução de riscos de lixiviação de nitrato (Nyawade et al., 2020).

Outro aspecto importante é que, embora a inoculação e o manejo reduzido de N tenham apresentado desempenho superior, a substituição total da adubação nitrogenada ainda não se mostrou viável. O tratamento sem N mineral (0%) resultou em produtividade bastante inferior, reforçando a necessidade de equilíbrio entre FBN e fertilização mineral para a cultura do feijão. Essa constatação vai ao encontro das recomendações de Wutke et al. (2022), que destacam que a inoculação deve ser vista como tecnologia complementar, e não como uma substituta integral da adubação.

No que diz respeito à análise de retorno econômico marginal, o maior retorno sobre capital investido (ROI) foi com a dose de 52,74% de nitrogênio (63,29 kg ha⁻¹) (Figura 3), ou seja, essa foi a dose em que proporcionalmente cada real investido resultou no maior retorno financeiro. Tal resultado mostra que financeiramente, é mais vantajoso não atingir a produtividade máxima, mas sim a eficiência máxima.

A principal contribuição do trabalho se dá pela comprovação da viabilidade econômica na redução da adubação nitrogenada utilizando inoculação com *R. tropici* para se beneficiar do efeito simbiótico causado. Tal fato pode ser explicado pela lei dos retornos decrescentes, uma vez que o ganho em produtividade com doses acima de 63,29 kg ha⁻¹ de N foi cada vez menor, sendo superior ao custo da dose extra de adubo.

Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo confirmam a viabilidade técnica e econômica da prática de reduzir em até 50% a adubação nitrogenada no feijoeiro comum quando associado à inoculação com *R. tropici*. Essa estratégia contribui para a sustentabilidade da cadeia produtiva, promovendo menores custos, maior eficiência no uso de nutrientes e menor impacto ambiental.

No entanto, por se tratar de um estudo conduzido em ambiente protegido, recomenda-se a validação em condições de campo, em múltiplas safras e ambientes, a fim de confirmar a robustez agrônômica e econômica da redução da adubação nitrogenada para aplicação em escala comercial. Além disso, os resultados podem diferir em função de cultivares e fontes de nitrogênio.

7. CONCLUSÃO

A inoculação via semente com *R. tropici* na cultura do feijoeiro-comum reduz a necessidade de adubo nitrogenado mineral sem afetar a produção de grãos. É possível reduzir a adubação nitrogenada em até 50%, obtendo maiores respostas produtivas, econômicas e de eficiência no uso do nitrogênio.

8. DECLARAÇÃO SOBRE O USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial generativa (IA), especificamente o modelo Gemini Pro (Google), com o objetivo de auxiliar na redação, organização e/ou revisão do texto científico. Todo o conteúdo gerado por IA foi cuidadosamente revisado e validado pelos autores, que assumem total responsabilidade pela precisão, originalidade e integridade das informações apresentadas. Nenhuma decisão analítica, interpretação de dados ou conclusão científica foi realizada exclusivamente por ferramentas de IA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Crop residue decomposition and nitrogen release in single and mixed cover crops. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 4, p. 601-612, 2003. 10.1590/S0100-06832003000400004
- ALLAN, R. P. L.; S. M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. 9. ed. Rome: FAO, 1998.
- ASENSI-FABADO, M. A.; MUNNÉ-BOSCH, S. Vitamins in plants: occurrence, biosynthesis and antioxidant function. *Trends in Plant Science*, v. 15, n. 10, p. 582-592, 2010. 10.1016/j.tplants.2010.07.003
- BOJÓRQUEZ-ARMENTA, Y. D. J.; MORA-ROMERO, G. A.; LÓPEZ-MEYER, M.; MALDONADO-MENDOZA, I. E.; CASTRO-MARTÍNEZ, C.; ROMERO-URÍAS, C. D. L. A.; MARTÍNEZ-ÁLVAREZ, J. C. Evaluation of *Bacillus* spp. isolates as potential biocontrol agents against charcoal rot caused by *Macrophomina phaseolina* on common bean. *Journal of General Plant Pathology*, v. 87, p. 377-386, 2021. 10.1007/s10327-021-01019-4
- BROUGHTON, W. J.; HERNANDEZ, G.; BLAIR, M.; BEEBE, S.; GEPTS, P.; VANDERLEYDEN, J. Beans (*Phaseolus* spp.) – model food legumes. *Plant and Soil*, v. 252, n. 1, p. 55-128, 2003. 10.1023/A:1024146710611
- CANALE, M. C.; RIBEIRO, L. P.; CASTILHOS, R. V.; WORDELL, F. A. Pragas e doenças do feijão: diagnose, danos e estratégias de manejo. *Boletim Técnico*, n. 197, 2021.
- CARVALHO, M. A. C.; ARF, O.; SÁ, M. E.; BUZETTI, S.; SANTOS, N. C. B.; BASSAN, D. A. Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield and seed quality under the influence of nitrogen split and sources. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 617-624, 2001. 10.1590/S0100-06832001000300010
- CATALDO, D. A.; MAROON, M.; SCHRADER, L. E.; YOUNGS, V. L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 6, n. 1, p. 71-80, 1975. 10.1080/00103627509366547
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2025/26 – 2º levantamento. Brasília, DF: Conab, 2025. 95 p.

Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 27 nov. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Indicadores da Agropecuária. Safras 2013/2014 - Grãos. Séries Históricas: Feijão total (Safras 1, 2, 3).

Brasília, DF: Conab, 2014. Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/FeijaoTotalSerieHist.xls>. Acesso em: 28 out. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2024/25: 5º levantamento. Brasília: Conab, 2025. Disponível em:

<https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 15 fev. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2023/24: 12º levantamento. Brasília: Conab, 2024. v. 11, n. 12.

Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 15 dez. 2025.

CUADRA, S. V.; HEINEMANN, A. B.; BARIONI, L. G.; MOZZER, G. B.; BERGIER, I. Ação contra a mudança global o clima: contribuições da Embrapa. [S. l.: s. n.], 2018.

DOBEREINER, J.; DUQUE, F. F. Contribuição da pesquisa em fixação biológica do nitrogênio para o desenvolvimento do Brasil. Curso sobre fixação biológica do nitrogênio, p. 23, 1980.

EMBRAPA. Agência Embrapa de Informação Tecnológica: Ageitec - Produção. 2023.

Disponível em: <https://www.embrapa.br/agenica-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/producao>. Acesso em: 07 nov. 2025.

EMBRAPA. Catálogo de cultivares de feijão comum: 2014-2015. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2014.

EMBRAPA. O que são ODS. Portal Embrapa, 2025. Disponível em:

<https://www.embrapa.br/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods/o-que-sao-ods>. Acesso em: 01 nov. 2025.

FAIRWEATHER-TAIT, S.; CASHMAN, K. Minerals and trace elements. *In*: Nutrition for the primary care provider. [S. l.]: Karger Publishers, 2015. p. 45-52.

FAO. Regional Overview of Food Security and Nutrition in Europe and Central Asia. Budapest: FAO, 2018. 110 p.

FAOSTAT. Crops and livestock products. 2025. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em: 27 nov. 2025.

FARIAS, P. I. V.; FREIRE, E.; CUNHA, A. L. C. da; POLIDORO, J. C.; ANTUNES, A. D. S. Input assurance for Brazilian food production. *Fertilizer Focus*, v. 38, n. 1, 2021.

FERREIRA, A. N.; ARF, O.; CARVALHO, M. A. C.; ARAÚJO, R. S.; SÁ, M. E.; BUZETTI, S. *Rhizobium tropici* strains for inoculation of the common bean. *Scientia Agricola*, v. 57, n. 3, p. 507-512, 2000. 10.1590/S0103-90162000000300021

FIGUEIREDO, M. A. D.; OLIVEIRA, D. P.; SOARES, B. L.; MORAIS, A. R. D.; MOREIRA, F. M. D. S.; ANDRADE, M. J. B. D. Nitrogen and molybdenum fertilization and inoculation of common bean with *Rhizobium* spp. in two oxisols. *Acta Scientiarum - Agronomy*, v. 38, n. 1, p. 85-92, 2016. 10.4025/actasciagron.v38i1.26661

FRANCO, A. A.; DOBEREINER, J. Interference of calcium and nitrogen in symbiotic nitrogen fixation of two bean varieties (*Phaseolus vulgaris* L.). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 3, p. 223-227, 1968. 10.1590/S1678-3921.pab1968.v3.17941

GODFRAY, H. C. J. *et al.* Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, v. 327, n. 5967, p. 812-818, 2010. 10.1126/science.1185383

GOMES, D. F.; ORMEÑO-ORILLLO, E.; HUNGRIA, M. Biodiversity, symbiotic efficiency, and genomics of *rhizobium tropici* and related species. *Biological Nitrogen Fixation*, v. 74, 2015. 10.1002/9781119053095.ch74

GOOD, A. G.; BEATTY, P. H. Fertilizing nature: a tragedy of excess in the commons. *PLoS Biology*, v. 9, n. 8, e1001124, 2011. 10.1371/journal.pbio.1001124

HERRIDGE, D. F.; PEOPLES, M. B.; BODDEY, R. M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil*, v. 311, n. 1-2, p. 1-18, 2008. 10.1007/s11104-008-9668-3

HOFFMAN, B. M.; LUKOYANOV, D.; YANG, Z. Y.; DEAN, D. R.; SEEFELDT, L. C. Mechanism of nitrogen fixation by nitrogenase: the next stage. *Chemical Reviews*, v. 114, n. 8, p. 4041-4062, 2014. 10.1021/cr400641x

HUNGRIA, M. Metabolismo do carbono e do nitrogênio nos nódulos. *In*: HUNGRIA, M.; ARAUJO, R. S. (ed.). *Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola*. Brasília: Embrapa, 1994. p. 249–283.

HUNGRIA, M.; BARRADAS, C. A.; WALLSGROVE, R. M. Nitrogen fixation, assimilation and transport during the initial growth stage of *Phaseolus vulgaris* L. *Journal of Experimental Botany*, v. 42, n. 7, p. 839-844, 1991. 10.1093/jxb/42.7.839

HUNGRIA, M.; MENDES, I. C. Nitrogen fixation with soybean: the perfect symbiosis? *In*: DE BRUIJN, F. J. (ed.). *Biological nitrogen fixation*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. v. 2, p. 1009-1024. 10.1002/9781119053095.ch100

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Co-inoculation of soybeans and common beans with rhizobia and azospirilla: strategies to improve sustainability. **Biology and Fertility of Soils**, v. 49, n. 7, p. 791-801, 2013. 10.1007/s00374-012-0771-5

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 80 p.

HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T. Environment factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. *Field Crops Research*, v. 65, p. 151-164, 2000. 10.1016/S0378-4290(99)00084-2

IBGE. Produção Agropecuária: produção de feijão. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/feijao/br>. Acesso em: 25 out. 2025.

JUSTINO, L. F.; HEINEMANN, A. B.; MATTA, D. H.; STONE, L. F.; GONÇALVES, P. A. O.; SILVA, S. C. Characterization of common bean production regions in Brazil using machine learning techniques. *Agricultural Systems*, v. 224, 104237, 2025. 10.1016/j.agsy.2024.104237

KANNOJIA, P.; CHOUDHARY, K. K.; SRIVASTAVA, A. K.; SINGH, A. K. PGPR bioelicitors: induced systemic resistance (ISR) and proteomic perspective on biocontrol. *In*: PGPR amelioration in sustainable agriculture. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2019. p. 67-84.

KIIL, L. H. P.; KATO, H. C. G de A.; CALEGARIO, F. F. Saúde e bem estar: contribuições da Embrapa. [S. l.: s. n.], 2018.

KIKUTI, H.; ANDRADE, M. J.; KIKUTI, A. L. P.; PEREIRA, C. E. Effect of green manure on quality of seeds of genotypes of beans. *Revista Ciência Agronômica*, v. 37, n. 1, p. 37-43, 2006.

LI, X.; LI, Z.; WEI, Y.; CHEN, Z.; XIE, S. Identification and characterization of the TetR family transcriptional regulator Nfft in *Rhizobium johnstonii*. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 90, n. 4, e01851-23, 2024. 10.1128/aem.01851-23

LIMA, P. F. de; COLOMBO, C. A.; CHIORATO, A. F.; YAMAGUCHI, L. F.; KATO, M. J.; CARBONELL, S. A. M. Occurrence of isoflavonoids in Brazilian common bean germplasm (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 62, n. 40, p. 9699-9704, 2014. 10.1021/jf5033312. 10.1021/jf5033312

LUO, L.; ZHANG, Y.; XU, G. How does nitrogen shape plant architecture? *Journal of Experimental Botany*, v. 71, n. 15, p. 4415-4427, 2020. 10.1093/jxb/eraa187

MAIA, S. C. M.; SORATTO, R. P.; LIEBE, S. M.; ALMEIDA, A. Q. de. Criteria for topdressing nitrogen application to common bean using chlorophyll meter. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 52, n. 7, p. 512-520, 2017. 10.1590/s0100-204x2017000700005

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Potafós, 1997.

MARTÍNEZ-ROMERO, E.; SEGOVIA, L.; MERCANTE, F. M.; FRANCO, A. A.; GRAHAM, P.; PARDO, M. A. *Rhizobium tropici*, a novel species nodulating *Phaseolus vulgaris* L. beans and *Leucaena* sp. trees. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, v. 41, n. 3, p. 417-426, 1991. 10.1099/00207713-41-3-417

MARTINS, L. M. V.; XAVIER, G. R.; RANGEL, F. W.; RIBEIRO, J. R. A.; NEVES, M. C. P.; MORGADO, L. B.; RUMJANEK, N. G. Contribution of biological nitrogen fixation to

cowpea: a strategy for improving grain yield in the semi-arid region of Brazil. *Biology and Fertility of Soils*, v. 38, n. 6, p. 333-339, 2003. 10.1007/s00374-003-0668-4

MARTINS, M. R.; SANT'ANNA, S. A. C.; ZAMAN, M.; SANTOS, R. C.; MONTEIRO, R. C.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C. P.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Strategies for the use of urease and nitrification inhibitors with urea: impact on N₂O and NH₃ emissions, fertilizer-¹⁵N recovery and maize yield in a tropical soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 247, p. 54-62, 2017. 10.1016/j.agee.2017.06.021

MEDEIROS, C. A. B.; BUENO, Y. M.; SÁ, T. D. de A.; VIDAL M. C.; ESPÍNDOLA, J. A. A. Fome zero e agricultura sustentável: contribuições da Embrapa. [S. l.: s. n.], 2018.

MENDOZA-SUÁREZ, M. A.; GEDDES, B. A.; SÁNCHEZ-CAÑIZARES, C.; RAMÍREZ-GONZÁLEZ, R. H.; KIRCHHELLE, C.; JORRIN, B.; POOLE, P. S. Optimizing *Rhizobium*-legume symbioses by simultaneous measurement of rhizobial competitiveness and N₂ fixation in nodules. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 117, n. 18, p. 9822-9831, 2020. 10.1073/pnas.1921225117

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

NADEEM, M. A.; YEKEN, M. Z.; SHAHID, M. Q.; HABYARIMANA, E.; YILMAZ, H.; ALSALEH, A.; HATIPOĞLU, R.; ÇIFTÇI, Y.; NAWAZ, S.; COSTA, P. M. A.; BALOCH, F. S. Common bean as a potential crop for future food security: an overview of past, current and future contributions in genomics, transcriptomics, transgenics and proteomics. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, v. 35, n. 1, p. 759-787, 2021. 10.1080/13102818.2021.1920462

NYAWADE, S. O.; KARANJA, N. N.; GACHENE, C. K.; GITARI, H. I.; SCHULTE-GELDERMANN, E.; PARKER, M. Optimizing soil nitrogen balance in a potato cropping system through legume intercropping. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 117, n. 1, p. 43-59, 2020. 10.1007/s10705-020-10054-0

OLDROYD, G. E. D. Speak, friend, and enter: signalling systems that promote beneficial symbiotic associations in plants. *Nature Reviews Microbiology*, v. 11, n. 4, p. 252-263, 2013. 10.1038/nrmicro2990

OLIVEIRA, C. A. B.; PELÁ, G. M.; PELÁ, A. Inoculation with *Rhizobium tropici* and foliar fertilization with molybdenum in the common bean crop. *Revista de Agricultura Neotropical*, v. 4, supl. 1, p. 43-50, 2017. 10.32404/rean.v4i5.2193

PALHARES, J. C. P.; OLIVEIRA, V. B. V.; FREIRE JUNIOR, M.; CERDEIRA, A.; PRADO, H. A. Consumo e produção responsáveis: contribuições da Embrapa. [S. l.: s. n.], 2018.

PELEGRIN, R.; MERCADANTE, F. M.; OBTUSO, I. M. N.; OBTUSO, A. A. Response of common bean crop to nitrogen fertilization and rhizobium inoculation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 1, p. 219-226, 2009. 10.1590/S0100-06832009000100023

PESSOA, A. C. S.; RIBEIRO, A. C.; CHAGAS, J. M.; CASSINI, S. T. A. Molybdenum leaf concentration and nutrient accumulation by common beans "Ouro Negro" in response to leaf molybdenum application. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24, n. 1, p. 75-84, 2000. 10.1590/S0100-06832000000100010

PIAS, O. H. C.; WELTER, C. A.; TIECHER, T.; CHERUBIN, M. R.; FLORES, J. P. M.; ALVES, L. A.; BAYER, C. Common bean yield responses to nitrogen fertilization in Brazilian no-till soils: A meta-analysis. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 46, e0220022, 2022. 10.36783/18069657rbcs20220022

PUGA, A. P.; GRUTZMACHER, P.; CERRI, C. E. P.; RIBEIRINHO, V. S.; ANDRADE, C. A. de. Biochar-based nitrogen fertilizers: Greenhouse gas emissions, use efficiency, and maize yield in tropical soils. *Science of The Total Environment*, v. 704, 135375, 2020. 10.1016/j.scitotenv.2019.135375

QAIM, M.; STEIN, A.; MEENAKSHI, J. Economics of biofortification. *Agricultural Economics*, v. 37, p. 119-133, 2007. 10.1111/j.1574-0862.2007.00239.x

RAO, D. L. N.; BALACHANDAR, D. Nitrogen inputs from biological nitrogen fixation in Indian agriculture. *In: The Indian Nitrogen Assessment*. Elsevier, 2017. p. 117-132. 10.1016/B978-0-12-811836-8.00008-2

RIYAZ, I.; SHAFI, S.; ZAFFAR, A.; WANI, M. A.; ZARGAR, S. M.; DJANAGUIRAMAN, M.; MIR, R. R.; SOFI, P. A. Differential spatial plasticity response in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) root architecture under water stress is driven by increased root

diameter, surface area and volume at deeper layers. *Discover Plants*, v. 1, n. 1, art. 6, 2024. 10.1007/s44372-024-00006-1

SALTZMAN, A.; BIROL, E.; BOUIS, H. E.; BOY, E.; MOURA, F. F. de; ISLAM, Y.; PFEIFFER, W. H. Biofortification: progress toward a more nourishing future. *Global Food Security*, v. 2, n. 1, p. 9-17, 2013. 10.1016/j.gfs.2012.12.003

SCHERLACH, K.; GRAUPNER, K.; HERTWECK, C. Molecular bacteria-fungi interactions: effects on environment, food, and medicine. *Annual Review of Microbiology*, v. 67, p. 375-397, 2013. 10.1146/annurev-micro-092412-155702

SHIBATA, H.; GALLOWAY, J. N.; LEACH, A. M.; CATTANEO, L. R.; CATTELL NOLL, L.; ERISMAN, J. W.; GU, B.; JU, X.; KIMURA, M.; WINIWARTER, W.; BLEEKER, A. Nitrogen footprints: regional realities and options to reduce nitrogen loss to the environment. *Ambio*, v. 46, n. 2, p. 129-142, 2017. 10.1007/s13280-016-0815-4

SMIL, V. Detonator of the population explosion. *Nature*, v. 400, n. 6743, p. 415, 1999. 10.1038/22672

SILVA, G. C.; ARAUJO, M. E. V.; ALMEIDA, V. F. R.; ARAÚJO, R. S. L.; LOURENÇO, A. C. E.; LISBOA, C. F.; SILVA, P. V. A.; SILVA, A. G. Nitrogen fertilization management in common bean and castor bean intercropping systems. *Australian Journal of Crop Science*, v. 14, n. 5, p. 842-851, 2020. 10.21475/ajcs.20.14.05.p2414b

SILVA, M. H.; SILVA, M. A. A.; DUARTE, E. R.; BONETTI, R. A. T.; PALUDETTO, A.; MIYASHIRO, C. F. A relação do nitrogênio com o desenvolvimento das plantas e suas formas de disponibilidade. *Revista Científica Multidisciplinar*, v. 5, n. 1, p. 01-09, 2024. 10.47820/recima21.v5i1.4762

SILVEIRA, P. M.; BRAZ, A. J. B. P; KLIEMANN, H. J.; ZIMMERMANN, F. J. P. Nitrogen fertilization of common bean grown under no-tillage system after several cover crops. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 40, p. 377-381, 2005. 10.1590/S0100-204X2005000400009

SOUMARE, A.; DIEDHIOU, A. G.; THUITA, M.; HAFIDI, M.; OUHDOUCH, Y.; GOPALAKRISHNAN, S.; KOUISNI, L. Exploiting biological nitrogen fixation: a route towards a sustainable agriculture. *Plants*, v. 9, n. 8, p. 1011, 2020. 10.3390/plants9081011.

SOUSA, W. S.; SORATTO, R. P.; PEIXOTO, D. S.; CAMPOS, T. S.; SILVA, M. B. da; 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, n. 3, art. 52, 2022. 10.1007/s13593-022-00784-6. 10.1007/s13593-022-00784-6

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 7ª. ed. Porto Alegre: Artmed, 2024. 864p.

TSAI, S. M.; BONETTI, R.; AGBALA, S. M.; ROSSETTO, R. Minimizing the effect of mineral nitrogen on biological nitrogen fixation in common bean by increasing nutrient levels. *Plant and Soil*, v. 152, p. 131-138, 1993. 10.1007/BF00016342

UDVARDI, M.; POOLE, P. S. Transport and metabolism in legume-rhizobia symbioses. *Annual Review of Plant Biology*, v. 64, p. 781-805, 2013. 10.1146/annurev-arplant-050312-120239

UNITED NATIONS (UN). United Nations Statistics Division. *The Sustainable Development Goals Report 2019*. New York: UN, 2019. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/goal-11/>. Acesso em: 02 de dezembro de 2025.

UNKOVICH, M.; HERRIDGE, D.; PEOPLES, M.; CADISCH, G.; BODDEY, B.; GILLER, K.; ALVES, B.; CHALK, P. *Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems*. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research, 2008. 258 p.

VAN LENTEREN, J. C.; BOLCKMANS, K.; KÖHL, J.; RAVENSBERG, W. J.; URBANEJA, A. Biological control using invertebrates and microorganisms: plenty of new opportunities. *BioControl*, v. 63, n. 1, p. 39-59, 2018. 10.1007/s10526-017-9801-4

VOGELS, G. D.; VAN DER DRIFT, C. Differential analyses of glyoxylate derivatives. *Analytical Biochemistry*, v. 33, n. 1, p. 143-157, 1970. 10.1016/0003-2697(70)90448-3

YIE, J. Y.; TIAN, W. H.; JIN, C. W. Nitrogen in plants: from nutrition to the modulation of abiotic stress adaptation. *Stress Biology*, v. 2, n. 4, 2022. 10.1007/s44154-021-00030-1

WANG, Z.; TAO, T.; WANG, H.; CHEN, J.; SMALL, G. E.; JHONSON, D.; CHEN, J.; ZHANG, Y.; ZHU, Q.; ZHANG, S.; SONG, Y.; KATTGE, J.; GUO, P.; SUN, X. Forms of

nitrogen inputs regulate the intensity of soil acidification. *Global Change Biology*, V. 29, N. 14, P. 4044-4055, 2023. 10.1111/gcb.16746

WUTKE, E. B.; CHIORATO, A. F.; ESTEVES, J. A. F.; CARBONELL, S. A. M.; AMBROSANO, E. J.; LEMOS, L. B.; SORATTO, R. P.; ARF, O.; CANTARELLA, H. Feijão (*Phaseolus vulgaris*). In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JR, D.; BOARETTO, R. M.; VAN RAIJ, B. (ed.). Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas: IAC, 2022.

ZARGAR, S. M.; MAHAJAN, R.; NAZIR, M.; NAGAR, P.; KIM, S. T.; RAI, V.; AGRAWAL, G. K.; RAKWAL, R. Common bean proteomics: present status and future strategies. *Journal of Proteomics*, v. 169, p. 239-248, 2017. 10.1016/j.jprot.2017.03.019

ZHU, Y-G.; PENG, J. J.; CHEN, C.; XIONG, C.; LI, S.; GE, A.; WANG, E.; LIESACK, W. Harnessing biological nitrogen fixation in plant leaves. *Trends in Plant Science*, v. 28, n. 12, p. 1391-1405, 2023. 10.1016/j.tplants.2023.05.009