



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS PEDRO II-PI
LICENCIATURA EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

ALANA MARIA DE SOUSA MARTINS

**EFICIÊNCIA DE BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO NO
DESEMPENHO DE FEIJÃO-CAUPI CRIOULO EM PEDRO II-PI**

PEDRO II-PI

2025

ALANA MARIA DE SOUSA MARTINS

EFICIÊNCIA DE BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO NO
DESEMPENHO DE FEIJÃO-CAUPI CRIOULO EM PEDRO II-PI

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para
obtenção do diploma do Curso de
Licenciatura em Ciências Biológicas do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Piauí – IFPI *Campus* Pedro II.

Orientadora: Profa. Dra. Marineide
Rodrigues do Amorim

PEDRO II-PI

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Martins, Alana Maria de Sousa

M386e Eficiência de bactérias promotoras de crescimento no desempenho de feijão-caupi crioulo em Pedro II-PI / Alana Maria de Sousa Martins. - 2025. 63 f.: il. Color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Biológicas) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Pedro II, 2025.

Orientadora : Profa Dra. Marineide Rodrigues do Amorim.

1. Feijão-caupi. 2. Bactérias promotoras do crescimento. 3. Microbiologia agrícola. I.título.

CDD - 570

Elaborado por Wirllanna Naira da Silva Torres CRB 3/1088

ALANA MARIA DE SOUSA MARTINS

EFICIÊNCIA DE BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO NO
DESEMPENHO DE FEIJÃO-CAUPI CRIOULO EM PEDRO II-PI

Trabalho de Conclusão de Curso
(monografia) apresentado como exigência
parcial para obtenção do diploma do
Curso de Licenciatura em Ciências
Biológicas do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
– IFPI *Campus* Pedro II.

APROVADA EM: 29/09/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente:
 MARINEIDE RODRIGUES DO AMORIM
Data: 11/12/2025 17:28:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Marineide Rodrigues do Amorim (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Documento assinado digitalmente:
 RAFAEL DA COSTA ALMEIDA
Data: 11/12/2025 19:56:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rafael Da Costa Almeida
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Documento assinado digitalmente:
 MAYANNA KARLLA LIMA COSTA
Data: 11/12/2025 20:26:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Maynna Karlla Lima Costa
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

PEDRO II-PI

2025

Dedico esta monografia aos meus pais, que sempre foram minha base, meu porto seguro e minha maior inspiração. A vocês, que com tanto amor, paciência e dedicação me ensinaram o valor do esforço, da humildade e da perseverança. Aos meus professores e orientadores, por compartilharem conhecimento e acreditarem no meu potencial. E, de modo especial, a todos que torceram por mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Antônio e Elizabeth que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e ensinando a ter paciência nos momentos em que pensei em desistir. Ao meu irmão, João Antônio que é uma verdadeira inspiração para minha jornada acadêmica.

Sou grata ao meu namorado, Samuel Lopes, por estar sempre ao meu lado, por me ouvir nos momentos em que as coisas pareciam não dar certo, por seus conselhos e por nunca deixar que eu desistisse.

Minha sincera gratidão à minha orientadora, Dra. Marineide Amorim, por mover mundos e fundos para que este trabalho se concretizasse. Cada confronto, cada cobrança e cada palavra contribuíram para meu crescimento. Sei que fiz a escolha certa ao tê-la como orientadora. Admiro profundamente sua força, dedicação e inteligência. Mais que uma orientadora, foi como uma segunda mãe. Espero, um dia, ser ao menos um terço da mulher extraordinária que você é.

Sou grata também aos meus amigos Jon e Yris, que estiveram sempre ao meu lado, apoiando, brigando e tornando os dias da faculdade mais leves e memoráveis. Espero levar essa amizade para além dos muros da instituição que as "três fadas" permaneçam unidas também fora da universidade.

Sou grata também a alguns servidores do IFPI, que, mesmo diante da correria do dia a dia, tiraram um tempo para auxiliar na montagem da casa de vegetação, etapa essencial para a realização deste trabalho. Agradeço também ao Janderson, pela paciência, disponibilidade e pelos ensinamentos essenciais que contribuíram significativamente para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço aos integrantes do Grupo de Pesquisa em Microbiologia Ambiental e Melhoramento Genético, pelo apoio essencial na condução da parte prática deste trabalho.

A todos vocês, minha mais sincera gratidão.

“Só quem se arrisca merece viver o extraordinário”

Felipe ret

RESUMO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) é uma cultura estratégica para a segurança alimentar e a sustentabilidade agrícola no semiárido brasileiro, embora apresente produtividade limitada pela baixa disponibilidade de nutrientes, especialmente nitrogênio. Nesse contexto, bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs) surgem como alternativa sustentável, capazes de estimular o desenvolvimento vegetal por múltiplos mecanismos fisiológicos. Este trabalho avaliou a eficiência de isolados bacterianos na promoção do crescimento de três variedades crioulas de feijão-caupi, cultivadas no município de Pedro II-PI, em condições de casa de vegetação. Foram conduzidos dois ensaios: o primeiro em substrato autoclavado e o segundo em solo natural, com microbiota ativa, avaliando-se comprimento da parte aérea (CPA), comprimento radicular, número de nódulos, massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR). No Ensaio I, isolados como *Enterobacter* sp. (B1, B3, B7), *Pseudomonas* sp. (B2) e *Bacillus subtilis* (B9) promoveram incrementos expressivos em todos os parâmetros, superando as testemunhas, inclusive a nitrogenada. No Ensaio II, apenas B1 (*Enterobacter* sp.) e B9 (*Bacillus subtilis*) mantiveram desempenho superior e consistente, superando inclusive a adubação nitrogenada completa, demonstrando maior robustez ecológica e competitividade rizosférica. Esses resultados evidenciam que a eficácia das BPCPs depende da interação com microrganismos nativos, sendo essencial validar isolados em solos não esterilizados para evitar superestimções. Conclui-se que B1 e B9 apresentam elevado potencial como bioinoculantes para o feijão-caupi, com capacidade de reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos, aumentar a resiliência produtiva e contribuir para sistemas agrícolas mais sustentáveis.

Palavras chave: *Vigna unguiculata*; BPCPs; bioinoculantes; fixação biológica de nitrogênio; sustentabilidade agrícola.

ABSTRACT

Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) is a strategic crop for food security and agricultural sustainability in the Brazilian semiarid region, although its productivity is limited by low nutrient availability, especially nitrogen. In this context, plant growth-promoting bacteria (PGPBs) emerge as a sustainable alternative, capable of stimulating plant development through multiple physiological mechanisms. This study evaluated the efficiency of bacterial strains in promoting the growth of three cowpea landraces grown in the municipality of Pedro II, Piauí, under greenhouse conditions. Two trials were conducted: the first in an autoclaved substrate and the second in natural soil with active microbiota. Shoot length (SPL), root length, nodule number, shoot dry mass (SDM), and root dry mass (RDM) were evaluated. In Trial I, isolates such as *Enterobacter* sp. (B1, B3, B7), *Pseudomonas* sp. (B2) and *Bacillus subtilis* (B9) promoted significant increases in all parameters, outperforming the controls, including nitrogen fertilization. In Trial II, only B1 (*Enterobacter* sp.) and B9 (*Bacillus subtilis*) maintained superior and consistent performance, even surpassing complete nitrogen fertilization, demonstrating greater ecological robustness and rhizosphere competitiveness. These results demonstrate that the effectiveness of BPCPs depends on their interaction with native microorganisms, and it is essential to validate strains in non-sterilized soils to avoid overestimations. We conclude that B1 and B9 have high potential as bioinoculants for cowpea, with the ability to reduce dependence on synthetic fertilizers, increase production resilience, and contribute to more sustainable agricultural systems.

Keywords: *Vigna unguiculata*; BPCPs; bioinoculants; biological nitrogen fixation; agricultural sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Substrato de areia esterilizado em autoclave utilizado como base experimental para avaliação do crescimento de feijão-caupi.....	29
Figura 2 – Etapas do processo de desinfestação superficial das sementes de feijão-caupi antes da inoculação bacteriana	29
Figura 3 – Sementes de feijão-caupi após desinfestação superficial, prontas para inoculação com estirpes bacterianas	29
Figura 4 – Semeadura de sementes de feijão-caupi em copos plásticos individuais contendo substrato autoclavado	31
Figura 5 – Procedimento de inoculação das sementes de feijão-caupi com bactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPR)	31
Figura 6 – Aplicação de solução nutritiva de Hoagland modificada durante o manejo das plantas de feijão-caupi.....	32
Figura 7 – Mensuração da altura da parte aérea (CPA) das plantas de feijão-caupi aos 30 dias após a emergência	33
Figura 8 – Contagem manual do número de nódulos radiculares em plantas de feijão-caupi inoculadas.....	33
Figura 9 – Sistema radicular de feijão-caupi após remoção dos nódulos para análise da biomassa radicular	33
Figura 10 – Amostras de raízes e parte aérea acondicionadas para determinação da massa seca em estufa de circulação forçada.....	33
Figura 11 – Vasos plásticos preenchidos com solo não autoclavado, representando a condição de microbiota ativa no Ensaio II	36
Figura 12 – Semeadura direta de sementes de feijão-caupi em vasos contendo solo com microbiota ativa	36
Figura 13 – Desbaste de plântulas de feijão-caupi aos 15 dias após a emergência, padronizando a densidade por vaso	36
Figura 14 – Condições de cultivo em casa de vegetação durante o Ensaio II com feijão-caupi inoculado com diferentes estirpes bacterianas.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Identificação molecular e similaridade genética de isolados bacterianos.....	28
Tabela 2 – Estrutura experimental do Ensaio I em casa de vegetação.....	30
Tabela 3 – Estrutura experimental do Ensaio II em casa de vegetação.....	35
Tabela 4 – Análise de variância para o comprimento da parte aérea de plantas de feijão-caupi (Ensaio I – substrato esterilizado).....	59
Tabela 5 – Análise de variância para o comprimento da parte aérea de plantas de feijão-caupi (Ensaio II – solo com microbiota ativa).....	59
Tabela 6 – Análise de variância para o comprimento radicular de plantas de feijão-caupi (Ensaio I – substrato esterilizado).....	60
Tabela 7 – Análise de variância para o comprimento radicular de plantas de feijão-caupi (Ensaio II – solo com microbiota ativa).....	60
Tabela 8 – Análise de variância para o número de nódulos radiculares de plantas de feijão-caupi (Ensaio I – substrato esterilizado)	60
Tabela 9 – Análise de variância para o número de nódulos radiculares de plantas de feijão-caupi (Ensaio II – solo com microbiota ativa).....	61
Tabela 10 – Análise de variância para a massa seca da parte aérea (MSPA) de plantas de feijão-caupi (Ensaio I – substrato esterilizado).....	61
Tabela 11 – Análise de variância para a massa seca da raiz (MSR) de plantas de feijão-caupi (Ensaio I – substrato esterilizado).....	61
Tabela 12 – Análise de variância para a massa seca da parte aérea (MSPA) de plantas de feijão-caupi (Ensaio II – solo com microbiota ativa).....	62
Tabela 13 – Análise de variância para a massa seca da raiz (MSR) de plantas de feijão-caupi (Ensaio II – solo com microbiota ativa).....	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comprimento da parte aérea de plantas de feijão-caupi	38
Gráfico 2 – Comprimento da parte aérea de plantas de feijão-caupi	40
Gráfico 3 – Comprimento da raiz de plantas de feijão-caupi	41
Gráfico 4 – Comprimento da raiz de plantas de feijão-caupi	41
Gráfico 5 – Número de nódulos em plantas de feijão-caupi	43
Gráfico 6 – Número de nódulos em plantas de feijão-caupi	43
Gráfico 7 – Massa seca da parte aérea e da raiz de plantas de feijão-caupi	45
Gráfico 8 – Massa seca da parte aérea e da raiz de plantas de feijão-caupi	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	144
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Feijão caupi	16
2.2 Bactérias promotoras do crescimento em plantas (BPCP)	19
2.3 Utilização de bactérias promotoras de crescimento de plantas na agricultura..	22
2.4 Inoculação de leguminosas com BPCP.....	24
3 METODOLOGIA.....	27
3.1 ENSAIO I - SELEÇÃO DE ESTIRPES BACTERIANAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO A PARTIR DA INOCULAÇÃO EM FEIJÃO-CAUPI.	27
3.1.1 Preparo do inoculante	27
3.1.2 Preparo do solo e desinfestação das sementes	28
3.1.3 Tratamentos e delineamento estatístico	29
3.1.4 Cultivo das plantas	30
3.1.5 Avaliações.....	32
3.1.5.1 Parâmetros indicadores de crescimento.....	32
3.2 ENSAIO II - VALIDAÇÃO E SELEÇÃO DE ISOLADOS BACTERIANOS PROMOTORES DE CRESCIMENTO EM FEIJÃO-CAUPI EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO EM COMPETIÇÃO COM OS MICRORGANISMOS NATIVOS.	34
3.2.1 Condução do experimento	34
3.2.2 Tratamentos e delineamento estatístico	34
3.2.3 Preparo do inoculante, Adubação, Plantio, Cultivo	35
3.2.4 Análise estatística	37
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) é uma das principais culturas de leguminosas produzidas no mundo, sendo o Brasil um dos maiores produtores e consumidores dessa leguminosa (Vale *et al.*, 2017). No Nordeste brasileiro, o cultivo do feijão-caupi representa uma importante alternativa socioeconômica, contribuindo tanto para a segurança alimentar quanto para a geração de emprego e renda, especialmente para pequenos agricultores familiares em áreas semiáridas (Dutra *et al.*, 2017; Sena *et al.*, 2020).

Essa cultura apresenta vantagens econômicas, agronômicas e ambientais, pois se adapta bem aos solos do sertão, tolera altas temperaturas e baixa disponibilidade hídrica, além de possuir grãos ricos em proteínas, sendo uma fonte essencial de alimentação humana e animal. Além disso, o feijão-caupi tem a capacidade de se associar a diferentes grupos de bactérias, promovendo a fixação biológica de nitrogênio (FBN) e reduzindo a dependência de fertilizantes químicos (Ndungu *et al.*, 2017). Essa associação é especialmente importante em sistemas de produção de base agroecológica, nos quais o equilíbrio biológico do solo é valorizado como um fator-chave para a sustentabilidade.

Apesar de sua relevância, a produtividade do feijão-caupi no Nordeste é relativamente baixa, com média de 4.108 kg ha⁻¹, devido a fatores como a disponibilidade limitada de nutrientes no solo, especialmente nitrogênio (Marinho *et al.*, 2017; Conab, 2025). No entanto, estudos apontam que essa cultura pode se beneficiar da interação com bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP), que incluem microrganismos simbióticos, endofíticos e de vida livre, capazes de atuar em múltiplos mecanismos de promoção vegetal (Johnson, 2019; Deng *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2021).

Embora o gênero *Bradyrhizobium* seja o principal simbiote do feijão-caupi, ele também pode se associar com bactérias dos gêneros *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter* e *Brevibacillus*, que têm demonstrado potencial para estimular o crescimento vegetal e aumentar a eficiência do uso de nutrientes (Amorim *et al.*, 2022). As BPCPs atuam por diversos mecanismos benéficos, como fixação biológica de nitrogênio (FBN), produção de fitohormônios (auxinas, citocininas), solubilização de fosfatos, indução de resistência sistêmica e antagonismo a fitopatógenos, proteção contra estresses bióticos e abióticos, promovendo assim o crescimento

vegetal e aumentando a produtividade (Khatoon *et al.*, 2022; Lau *et al.*, 2022). Sua aplicação é especialmente relevante em variedades crioulas, que muitas vezes não respondem da mesma forma que os cultivares modernos ao manejo convencional, mas que demonstram interações positivas com microrganismos do solo, valorizando práticas agroecológicas e a biodiversidade funcional dos agroecossistemas.

A utilização dessas bactérias na agricultura pode disponibilizar cerca de 200 kg de nitrogênio por hectare para o feijão-caupi, promovendo maior produtividade e redução da necessidade do uso de fertilizantes químicos (Oliveira *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2018). Essa abordagem sustentável mostra uma solução promissora para mitigar os impactos ambientais causados pelo uso excessivo de fertilizantes nitrogenados, que, ao se infiltrarem no solo, podem contaminar lençóis freáticos e causar toxicidade para animais e seres humanos (Freire, 2016). Além disso, o uso excessivo de insumos sintéticos compromete a saúde do solo e a resiliência dos sistemas agrícolas frente às mudanças climáticas.

Nos últimos anos, uma preocupação crescente com os impactos ambientais gerados pelo uso excessivo de fertilizantes químicos tem impulsionado a busca por práticas agrícolas mais sustentáveis (Costa *et al.*, 2017). Segundo a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), as entregas de fertilizantes ao mercado brasileiro somaram 2,68 milhões de toneladas em abril de 2025. O volume representa um aumento de 16,8% em relação ao mesmo mês de 2024, quando foram entregues 2,29 milhões de toneladas. Essa dependência de insumos sintéticos reforça a necessidade de alternativas ecológicas, como a adoção de bactérias promotoras de crescimento, que oferecem benefícios tanto agrônômicos quanto ambientais, além de reduzir a pegada de carbono das cadeias produtivas.

Ademais, os resultados esperados poderão contribuir com políticas públicas voltadas ao fortalecimento da agricultura familiar, programas de incentivo ao uso de bioinsumos e estratégias de mitigação das mudanças climáticas. A consolidação de práticas baseadas na microbiologia do solo, como a inoculação de BPCPs, fortalece não apenas o desempenho agrônômico das lavouras, mas também promove uma agricultura mais ética, socialmente justa e ambientalmente equilibrada. Nesse sentido, a pesquisa se insere em uma agenda mais ampla de inovação ecológica, reafirmando o papel da ciência no desenvolvimento de soluções concretas para os desafios enfrentados pela agricultura contemporânea.

Diante disso, este estudo parte da hipótese de que bactérias promotoras de

crescimento favoreçam o desenvolvimento do feijão-caupi crioulo, ao fixar nitrogênio, solubilizar fosfatos e produzir reguladores de crescimento. Esses mecanismos aumentam a disponibilidade de nutrientes para as plantas, favorecendo seu ciclo de vida e potencializando a produtividade de forma sustentável. Com base nessa premissa, o objetivo desta pesquisa é avaliar a eficiência de bactérias na promoção do crescimento do feijão-caupi crioulo, considerando sua adaptação às condições edafoclimáticas do Nordeste e seu potencial como cultura estratégica para a soberania alimentar em sistemas de base agroecológica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Feijão caupi

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) é uma leguminosa de grãos pertencente à família Fabaceae, amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais do mundo. Trata-se de uma cultura herbácea, vascular e anual, com formas silvestres e domesticadas, e genoma relativamente pequeno, estimado em aproximadamente 620 megapares de bases (Mbp) (Boukar *et al.*, 2019). Essa característica genômica favorece os estudos de melhoramento molecular e seleção assistida por marcadores, contribuindo para o desenvolvimento de cultivares adaptadas a diferentes ambientes.

Seu cultivo é caracterizado pela elevada plasticidade fenotípica e adaptabilidade a condições edafoclimáticas adversas, sendo capaz de se desenvolver em solos de baixa fertilidade, sob altas temperaturas e em ambientes com escassez hídrica (Marinho *et al.*, 2017; Sena *et al.*, 2020). Essa rusticidade confere à cultura um papel estratégico em sistemas produtivos de base familiar e agroecológica, sobretudo em regiões semiáridas.

Os grãos e folhas do feijão-caupi constituem uma fonte nutricional significativa, sendo ricos em proteínas, carboidratos complexos, vitaminas (como tiamina, niacina e folato) e minerais essenciais (ferro, zinco, cálcio, magnésio). Entre suas vantagens nutricionais e funcionais, destacam-se os teores elevados de antioxidantes naturais, fibras alimentares, compostos fenólicos e ácidos graxos poli-insaturados, além do baixo teor de lipídios totais, o que o torna um alimento adequado para dietas saudáveis (Mohammed *et al.*, 2018; Osipitan *et al.*, 2021).

A porção aérea da planta — composta por folhas, vagens verdes, grãos imaturos e maduros — possui ampla aplicação na alimentação humana e animal, podendo ser consumida in natura ou processada em formas como farinha e pasta, sendo amplamente utilizada na culinária tradicional e na alimentação escolar em programas públicos de segurança alimentar (Osipitan *et al.*, 2021).

Uma das características agronômicas mais relevantes do feijão-caupi é sua capacidade de estabelecer simbioses promíscuas com bactérias fixadoras de nitrogênio, apresentando variabilidade nos níveis de eficiência simbiótica. Isso permite a formação de nódulos radiculares com diversas estirpes de rizóbios, contribuindo para a fixação biológica de nitrogênio (FBN) e reduzindo significativamente a necessidade de adubação nitrogenada mineral. Os principais gêneros rizobianos associados ao feijão-caupi incluem *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Rhizobium* e *Sinorhizobium* (Hara *et al.*, 2021).

Além dos rizóbios, o feijão-caupi interage com diversos microrganismos benéficos presentes na rizosfera, entre os quais se destacam as rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (RPCPs). Essas bactérias exercem efeitos benéficos por meio de múltiplos mecanismos: produção de fitohormônios (auxinas, citocininas, giberelinas), síntese de ACC-desaminase (que reduz o estresse por etileno), solubilização de fosfatos insolúveis, produção de sideróforos e compostos antimicrobianos, além da ativação de mecanismos de defesa da planta por indução de resistência sistêmica (Amorim *et al.*, 2022; Glick, 2014).

Essas RPCPs colonizam ativamente a rizosfera, atraídas pelos exsudatos radiculares ricos em aminoácidos, ácidos orgânicos e açúcares, que funcionam como fonte de carbono e sinalizadores moleculares. A estreita interação com o sistema radicular melhora não apenas o desenvolvimento vegetativo e a eficiência de uso de nutrientes, mas também aumenta a resiliência da planta a estresses abióticos, como déficit hídrico e salinidade, e bióticos, como patógenos fúngicos, bacterianos e nematoides (Cardoso; Nogueira, 2007).

Estudos de isolamento e sequenciamento molecular evidenciam a presença de diversos grupos bacterianos com potencial biotecnológico nos nódulos e na rizosfera do feijão-caupi, destacando-se os gêneros *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Paenibacillus* e *Pseudomonas* (Patil *et al.*, 2017; Leite *et al.*, 2017). Esses microrganismos são promissores como bioinsumos agrícolas e vêm sendo estudados em estratégias integradas de manejo biológico do solo, com efeitos

positivos sobre a produtividade e sustentabilidade do agroecossistema.

O feijão-caupi tem origem no continente africano, que ainda hoje responde por mais de 95% da produção mundial (Nyaga; Njeru, 2020). Sua domesticação ocorreu há mais de 3.000 anos, e muitas de suas cultivares modernas possuem ciclo de crescimento curto (60–80 dias), favorecendo sua introdução em sistemas agrícolas de rotação ou cultivo intercalar (Kyei-Boahen *et al.*, 2017). Atualmente, é cultivado em mais de 100 países, incluindo regiões da Europa, América Latina, Sudeste Asiático e América do Norte (Mohamed *et al.*, 2018). No Brasil, foi introduzido no século XVI pelos colonizadores portugueses no estado da Bahia, consolidando-se como uma das principais leguminosas da agricultura nacional, especialmente nas regiões Nordeste, Norte e Centro-Oeste (Longo, 2025).

No contexto brasileiro, o feijão-caupi é amplamente cultivado sob dois regimes hídricos distintos: irrigado e de sequeiro. Embora o sistema irrigado possibilite maior controle ambiental e produtividade, sua adoção ainda é limitada devido aos altos custos e restrições de infraestrutura. Por outro lado, o cultivo de sequeiro predomina entre pequenos e médios produtores, especialmente em áreas semiáridas, sendo compatível com práticas de baixo impacto ambiental (Boukar *et al.*, 2019).

O cultivo do feijão-caupi tem se expandido em regiões como o Cerrado e a Caatinga, impulsionado por sua rusticidade, custo acessível, ciclo curto e aceitação comercial. No entanto, a produtividade média no Nordeste ainda é baixa, com valores de aproximadamente $328 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, o que contrasta com o potencial produtivo das cultivares disponíveis (Boukar *et al.*, 2019). Esse baixo rendimento está relacionado a fatores como: deficiências nutricionais do solo (especialmente de nitrogênio e fósforo), falhas na simbiose rizóbica, chuvas irregulares, temperaturas elevadas em cultivares sensíveis, além de ataques de insetos-praga, doenças fúngicas, viroses e fitonematoides (Andrade Júnior *et al.*, 2018; Cardoso *et al.*, 2017).

Apesar desses desafios, programas de melhoramento genético têm alcançado progressos significativos, com a seleção de genótipos adaptados às condições do semiárido. Cultivares como ITO7K-181-55 e IT97K-556-4M apresentaram produtividades superiores a $1.000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ em cultivo de sequeiro, evidenciando o potencial da cultura quando associada a práticas de manejo integrado do solo, uso de biofertilizantes, controle biológico e monitoramento

fitossanitário (Carvalho *et al.*, 2021).

Diante da crescente valorização da agricultura sustentável, torna-se fundamental investir em pesquisas que aprofundem o conhecimento sobre a microbiota associada ao feijão-caupi, especialmente sobre os mecanismos moleculares que regulam as interações planta-microrganismo e sua contribuição para a resiliência agroecológica. Estudos como os de Martinez-Hidalgo e Hirsch (2017) apontam que a compreensão funcional da microbiota pode orientar o desenvolvimento de tecnologias bioativas mais eficientes, capazes de promover o crescimento vegetal e reduzir a dependência de insumos químicos.

2.2 Bactérias promotoras do crescimento em plantas (BPCP)

As bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs) constituem um grupo diverso de microrganismos benéficos que habitam diferentes compartimentos do ambiente vegetal, como a filosfera, os tecidos internos (em interações endofíticas) e principalmente a rizosfera, onde estabelecem relações não patogênicas com o hospedeiro vegetal (Hungria *et al.*, 2010). Essas associações podem promover o crescimento e o desenvolvimento das plantas por diferentes mecanismos, de forma direta ou indireta, sem causar danos fisiológicos ao organismo vegetal (Basu *et al.*, 2017; Niu *et al.*, 2018).

Funcionalmente, as BPCPs podem ser classificadas em quatro categorias principais: biofertilizantes, bioestimuladores, biopesticidas e biorremediadores. Essa classificação está relacionada à forma como as bactérias interagem com o solo, a planta e outros organismos do ambiente, contribuindo para práticas agrícolas sustentáveis e de menor dependência de insumos químicos (Shah *et al.*, 2018).

As BPCPs classificadas como biofertilizantes atuam principalmente no aumento da biodisponibilidade de nutrientes essenciais às plantas. Entre os principais mecanismos, destacam-se a fixação biológica de nitrogênio (FBN) — que transforma o N_2 atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas — e a solubilização de fosfatos insolúveis presentes no solo. Esses processos são fundamentais para suprir as deficiências de nitrogênio e fósforo, elementos frequentemente limitantes em solos tropicais. Entre os microrganismos com maior destaque nessa categoria encontram-se os gêneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*,

Azospirillum, *Bacillus* e *Pseudomonas* (Shah *et al.*, 2018).

Dentre esses, os gêneros *Bradyrhizobium* e *Rhizobium* apresentam ampla ocorrência em nódulos radiculares de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*), onde contribuem de forma significativa para o fornecimento parcial ou total de nitrogênio à planta, impactando positivamente a produtividade da cultura (Leite *et al.*, 2017; Marinho *et al.*, 2017; Rocha *et al.*, 2020; Nyaga; Njeru, 2020). Nesse contexto, destacam-se também as ações do Programa Nacional de Bioinsumos, instituído pelo governo brasileiro em 2020, cujo objetivo é ampliar o uso de bioinoculantes no país. Dentre os 268 produtos biológicos registrados nos últimos 20 anos, uma parcela expressiva é composta por cepas dos gêneros *Bacillus* e *Pseudomonas* (Araújo, 2022), o que evidencia o interesse crescente por esses microrganismos.

Por outro lado, as BPCPs que atuam como bioestimuladores promovem o crescimento vegetal por meio da produção e liberação de fitormônios, tais como ácido indolacético (AIA), citocininas, giberelinas e etileno. Esses hormônios vegetais participam de processos fisiológicos como a divisão e o alongamento celular, a diferenciação de tecidos, o crescimento de raízes e caules, além da mobilização e transporte de nutrientes ao longo da planta (Larcher, 2006). A modulação desses hormônios pelas bactérias ocorre em sinergia com fatores abióticos e pode ser decisiva para a adaptação das plantas a condições de estresse.

As BPCPs com ação como biopesticidas possuem a capacidade de suprimir fitopatógenos por diversos mecanismos. Elas produzem sideróforos, compostos de alta afinidade por ferro, que limitam o acesso desse micronutriente vital aos patógenos. Além disso, sintetizam antibióticos naturais e enzimas hidrolíticas, além de compostos voláteis orgânicos com ação antifúngica e antibacteriana. Tais mecanismos envolvem antibiose, competição por nutrientes, indução de resistência sistêmica e produção de reguladores de crescimento secundários (Romeiro, 2007). Dessa forma, essas bactérias contribuem não apenas para a proteção direta das plantas, mas também para o equilíbrio biológico do solo.

Outra categoria funcional relevante são as BPCPs com atuação como biorremediadoras, ou seja, aquelas que auxiliam na degradação, imobilização ou transformação de poluentes ambientais, como metais pesados, resíduos industriais e agrotóxicos. Elas podem remover ou neutralizar esses contaminantes presentes no solo, na água ou até mesmo no ar, por meio de reações enzimáticas que envolvem a oxidação ou redução de espécies químicas tóxicas (Rabani *et al.*, 2022;

Hou *et al.*, 2020; Thiagarajan *et al.*, 2020). Um dos mecanismos amplamente relatados é a fitoextração mediada por microrganismos, que consiste na associação entre plantas e bactérias para absorção de metais pesados, sem prejuízo ao ambiente ou à planta hospedeira (Nguyen *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020).

Considerando todas essas funções, o crescente interesse por práticas agrícolas sustentáveis, com redução do uso de fertilizantes e defensivos químicos, tem impulsionado o número de pesquisas voltadas ao estudo das BPCPs (Garcia *et al.*, 2017). Dentre os gêneros mais investigados, destacam-se *Bacillus* (Liu *et al.*, 2020), *Paenibacillus* (Khan *et al.*, 2020), *Herbaspirillum* (Silva *et al.*, 2020), *Burkholderia* e *Pseudomonas* (Pagnani *et al.*, 2020), todos com potencial biotecnológico comprovado em experimentos laboratoriais e em ambiente controlado.

O gênero *Bacillus*, em especial, destaca-se por sua elevada abundância na rizosfera e por apresentar versatilidade funcional. Essas bactérias atuam na FBN não simbiótica, solubilizam fosfatos, produzem AIA e secretam enzimas extracelulares com propriedades antifúngicas, como quitinases e proteases (Saharan, 2011; Radhakrishnan *et al.*, 2017). Quando combinadas com bactérias do gênero *Pseudomonas*, a produção de metabólitos secundários é ainda mais diversificada, incluindo compostos com propriedades antifúngicas, antibacterianas, antivirais, anti-helmínticas e até antitumorais (Goswami *et al.*, 2016). O fertilizante bacteriano Alinit, o primeiro do gênero comercializado, é composto por cepas de *Bacillus spp.* e demonstrou capacidade de aumentar a produtividade vegetal em até 40% (Kilian *et al.*, 2000).

Apesar de todo o potencial ecológico, agrônômico e econômico dessas bactérias, ainda existem desafios consideráveis para sua aplicação em larga escala. A variabilidade no modo de ação entre as diferentes estirpes, a baixa sobrevivência no campo, dificuldades na formulação de produtos biológicos com estabilidade e a baixa reprodutibilidade dos resultados obtidos em laboratório ou casa de vegetação em condições de campo são obstáculos recorrentes (Parnell *et al.*, 2016; Steffen *et al.*, 2018).

Diante disso, é fundamental o avanço das pesquisas multidisciplinares, associando microbiologia, engenharia de processos, biotecnologia e ciência do solo, para o desenvolvimento de formulações mais eficazes, resistentes às condições ambientais e com maior tempo de prateleira. Como apontado por Vejan *et al.* (2016),

o sucesso do uso das BPCPs em larga escala depende de um esforço integrado entre ciência, políticas públicas e transferência de tecnologia, visando o fortalecimento de uma agricultura mais eficiente, resiliente e ambientalmente segura.

2.3 Utilização de bactérias promotoras de crescimento de plantas na agricultura

A adubação nitrogenada é uma prática amplamente utilizada na agricultura intensiva, sendo essencial para alcançar altos níveis de produtividade. No entanto, essa técnica apresenta custos ambientais e econômicos consideráveis. A produção industrial de fertilizantes nitrogenados exige elevado consumo energético, majoritariamente derivado de fontes fósseis não renováveis, como gás natural e carvão mineral, o que contribui para a emissão de gases de efeito estufa e para o esgotamento de recursos naturais (Ahlgren *et al.*, 2010).

Além disso, a eficiência de utilização do nitrogênio (N) pelas plantas é relativamente baixa, estimando-se que apenas 30 a 50% do N aplicado ao solo seja absorvido pelas culturas. O restante é perdido por meio de processos como lixiviação, volatilização e desnitrificação (Vieira, 2017; Gilabe, 2018), resultando na contaminação de aquíferos por nitratos e na liberação de compostos como óxido nitroso, amônia e óxidos de nitrogênio, que comprometem a qualidade ambiental, a saúde humana e os ecossistemas terrestres e aquáticos.

Diante desse cenário, têm sido desenvolvidas alternativas tecnológicas para reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos e mitigar seus impactos. Uma estratégia promissora é a utilização de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs), especialmente na cultura do feijão-caupi (*Vigna unguiculata*). Essas bactérias atuam estimulando o crescimento das raízes laterais e adventícias, o que amplia a área de absorção de água e nutrientes, aumentando a eficiência no uso dos recursos do solo (Moreira; Araújo, 2013).

O uso de BPCPs favorece a diminuição da aplicação de fertilizantes e defensivos químicos, reduzindo custos de produção e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Bastos *et al.*, 2019). Além disso, essas bactérias apresentam elevada tolerância a condições ambientais adversas, como solos salinos, áridos ou com baixa fertilidade, o que reforça seu potencial de uso em regiões com baixa aptidão agrícola (Ravanbakhsh *et al.*, 2017; Safari *et al.*, 2018).

Historicamente, o uso de inoculantes microbiológicos concentrou-se em

bactérias simbióticas dos gêneros *Rhizobium* e *Bradyrhizobium*, capazes de estabelecer associações mutualísticas com leguminosas e realizar a fixação biológica de nitrogênio (FBN) nos nódulos radiculares (Murray, 2011). Entretanto, estudos mais recentes demonstraram que diversas bactérias não simbióticas ou de vida livre também possuem a capacidade de fixar N_2 atmosférico.

Entre essas, destacam-se os gêneros *Azospirillum*, *Azoarcus*, *Azotobacter*, *Bacillus polymyxa*, *Burkholderia*, *Gluconacetobacter* e *Herbaspirillum*, os quais podem atuar em associação com bactérias rizobianas infectantes no feijão-caupi, promovendo ganhos adicionais na nutrição nitrogenada da planta (Deng *et al.*, 2011). Mayhood e Mirza (2021) observaram a presença de bactérias não rizobianas em nódulos radiculares em proporções variáveis, entre menos de 0,1% e cerca de 40%, o que evidencia a importância desses microrganismos no microbioma da planta e seu potencial para uso como inoculantes tanto em leguminosas quanto em espécies não leguminosas (Boddey *et al.*, 1986).

O sucesso da associação entre feijão-caupi e bactérias fixadoras não simbióticas depende de condições favoráveis à colonização do interior da planta, onde os microrganismos endofíticos podem realizar a fixação eficiente de N_2 e disponibilizar o nitrogênio diretamente para as células vegetais. Essa interação é influenciada por diversos fatores bioquímicos e ambientais e pode resultar em respostas distintas no crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura (Bourassa *et al.*, 2017; Marinho *et al.*, 2014; Marinho *et al.*, 2017).

Para aumentar a eficiência agrônômica dos inoculantes microbianos, diferentes estratégias têm sido exploradas. Entre elas, destaca-se a coinoculação, que consiste na aplicação conjunta de mais de uma estirpe bacteriana com efeitos complementares sobre o crescimento vegetal (Hungria *et al.*, 2015; Fukami *et al.*, 2018). Também são empregadas diferentes formas de inoculação, como via semente, sulco, pulverização foliar ou fertirrigação (Hungria *et al.*, 2015; Fukami *et al.*, 2016), além da inoculação suplementar em fases distintas do desenvolvimento da planta, como floração e formação de grãos (Moretti *et al.*, 2018).

Uma abordagem inovadora no uso de bactérias promotoras de crescimento de plantas é a aplicação de moléculas sinalizadoras do metabolismo secundário microbiano, como flavonoides, lipoquitoligossacarídeos (LCOs) e compostos voláteis orgânicos (VOCs). Os flavonoides secretados pelas raízes induzem a produção de LCOs por bactérias simbióticas, iniciando a formação de nódulos para

fixação de nitrogênio. Já os VOCs, como álcoois e terpenos, atuam à distância estimulando o crescimento vegetal e a tolerância a estresses. Essas moléculas facilitam a comunicação planta-microrganismo, aumentando a eficiência da colonização e dos efeitos benéficos dos inoculantes, sendo uma estratégia promissora para potencializar a agricultura sustentável sem recorrer à modificação genética (Marks *et al.*, 2013; Marks *et al.*, 2015).

Além das estratégias de inoculação, diversos fatores edáficos e biológicos influenciam diretamente a eficácia dos inoculantes, incluindo a densidade celular do inóculo, a capacidade de colonização das bactérias na rizosfera, a multiplicação e distribuição do inóculo no solo, a presença de microrganismos antagônicos, o estado fisiológico da planta, a composição dos exsudatos radiculares e parâmetros ambientais como pH, temperatura e umidade do solo (Lopes *et al.*, 2021).

Dessa forma, a aplicação de BPCPs representa uma alternativa estratégica para a substituição parcial ou total da adubação nitrogenada convencional, com ganhos econômicos, ecológicos e agronômicos. O avanço da pesquisa aplicada, o desenvolvimento de formulações microbianas mais eficientes e estáveis, e o incentivo por políticas públicas e programas de extensão rural são fundamentais para a adoção ampla e efetiva dessa tecnologia em sistemas agrícolas tropicais.

2.4 Inoculação de leguminosas com BPCP

Os inoculantes biológicos são produtos formulados a partir de microrganismos benéficos capazes de promover o crescimento vegetal e melhorar a eficiência no uso de nutrientes. Esses microrganismos incluem, principalmente, bactérias fixadoras de nitrogênio, fungos micorrízicos e bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs), que atuam por diferentes mecanismos. Conforme definido pela legislação brasileira (Brasil, 2011), os inoculantes à base de bactérias fixadoras de nitrogênio devem conter uma concentração mínima de $1,0 \times 10^9$ UFC/dose para garantir sua eficácia na simbiose com leguminosas.

Na cultura da soja (*Glycine max*), os inoculantes biológicos já estão consolidados como uma tecnologia de alto impacto agronômico e econômico. O uso de estirpes de *Bradyrhizobium* spp. promove significativa nodulação e fixação de nitrogênio, gerando uma economia de aproximadamente sete bilhões de dólares por ano no Brasil (Moretti *et al.*, 2018).

A coinoculação com *Azospirillum brasilense* tem sido amplamente estudada, sendo eficaz na promoção do crescimento radicular e na absorção de nutrientes, resultando em nodulação mais precoce e abundante (Chibeba *et al.*, 2015; Hungria *et al.*, 2015). Estudos recentes (Henning; Leite, 2023; Mesquita; Silva, 2023) reforçam que a atuação sinérgica entre *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* contribui para o aumento da eficiência fotossintética, maior biomassa vegetal e melhor desempenho produtivo. Além disso, coinoculações com outras BPCPs, como *Bacillus subtilis* e *B. mycoides*, também têm se mostrado promissoras, especialmente no estímulo ao enraizamento e na indução de resistência a estresses.

No feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris*), a inoculação com *Rhizobium tropici* é amplamente recomendada por sua eficiência na nodulação, aumento da biomassa e absorção de nitrogênio (Pinto *et al.*, 2007). A coinoculação de *Rhizobium phaseoli* com *Pseudomonas* sp. tem promovido melhorias significativas na absorção de nitrogênio e fósforo na cultura, além de estimular o crescimento da parte aérea e radicular (Stajkovic *et al.*, 2011).

De forma semelhante, o uso combinado de *Rhizobium* e *Bacillus subtilis* resultou em aumentos expressivos na massa seca da parte aérea, número de nódulos e desenvolvimento radicular (Lazzaretti; Melo, 2005). Estudos de Souza; Ferreira (2017), Hungria *et al.* (2013) e Steiner *et al.* (2019) destacam que a coinoculação de *Rhizobium* spp. com *Azospirillum brasilense* melhora a biomassa total das plantas e a eficiência da FBN, com benefícios evidentes mesmo em condições de baixa fertilidade do solo.

No grão-de-bico (*Cicer arietinum*), a inoculação com *Rhizobium leguminosarum* pode elevar a produtividade em até 35%, segundo Schubert *et al.* (2011). Esses efeitos positivos se devem à capacidade da bactéria de estabelecer simbiose eficiente com a planta, promovendo alta taxa de nodulação e fixação de nitrogênio. Em lentilhas (*Lens culinaris*), a inoculação com rizóbios tem efeitos similares, promovendo aumentos na produção de sementes e no crescimento vegetal, como demonstrado por Muhammed *et al.* (2021).

Na cultura do feijão-caupi (*Vigna unguiculata*), os efeitos da inoculação com rizóbios e coinoculantes também têm sido amplamente estudados. No Brasil, quatro estirpes de *Bradyrhizobium* estão autorizadas para uso como inoculantes dessa cultura: SEMIA 6461 (=UFLA 3-84), SEMIA 6462 (=BR3267), SEMIA 6463 (=INPA 03-11B) e SEMIA 6464 (=BR3262) (Zilli *et al.*, 2009; Marinho *et al.*, 2014, 2017).

A inoculação com essas estirpes promove não apenas maior nodulação, mas também ganhos na absorção de nitrogênio e produtividade. Raklami *et al.* (2019) destacam que a utilização de estirpes nativas e adaptadas às condições edafoclimáticas locais contribui para melhores respostas agronômicas, mesmo sob condições de estresse hídrico e baixa fertilidade.

Bacillus subtilis é outro microrganismo com ampla aplicabilidade agrícola. Seus efeitos incluem a melhora da viabilidade de sementes e da digestão-assimilação de nutrientes, o estímulo ao crescimento das plantas e a indução de resistência a estresses abióticos (Soto, 2017). Chagas *et al.* (2017) e Ibanhes Neto *et al.* (2021) demonstraram seu potencial na promoção do crescimento do feijão-caupi e de outras leguminosas.

A coinoculação de *Bradyrhizobium* com *Bacillus subtilis* no feijão-caupi foi capaz de aumentar em até 61% os índices de clorofila, melhorando o desempenho fotossintético da cultura (Araújo *et al.*, 2010). Esse resultado está associado à atuação sinérgica entre as bactérias, influenciada por sinais moleculares específicos entre os genótipos bacterianos e da planta hospedeira (Hungria *et al.*, 2013).

Outros microrganismos promissores incluem estirpes de *Microvirga vignae*, como BR 3299, que apresentaram bom desempenho na promoção do crescimento do feijão-caupi (Radl *et al.*, 2014), além de *Paraburkholderia* spp., que demonstraram elevado potencial para FBN e estímulo ao crescimento vegetal (Hassen *et al.*, 2020).

Além dos efeitos nutricionais, muitas BPCPs atuam no controle biológico de fitopatógenos e pragas. Algumas espécies de BPCPs, como *Bacillus subtilis*, *B. mycoides*, *Pseudomonas putida* e *Rhizobium etli*, têm sido reconhecidas por sua capacidade de suprimir nematoides-das-galhas e estão disponíveis no mercado como bioinoculantes comerciais (Santos, 2024).

A associação de fungos benéficos, como *Trichoderma* spp., com rizóbios também tem sido estudada. Cadore (2018) demonstrou que a coinoculação de *Bradyrhizobium* com *Trichoderma* não interfere na nodulação da soja e ainda potencializa o crescimento da cultura. No feijão, é capaz de proteger a planta contra *Sclerotinia scleroporium* e as raízes do *Fusarium* e *Rhizoctonia solani* (Zaidi *et al.*, 2014; Lobo Junior *et al.*, 2019)

Dessa forma, o uso de inoculantes e coinoculantes representa uma estratégia tecnicamente viável e ecologicamente apropriada para a intensificação sustentável

da agricultura. Essa tecnologia favorece pequenos e médios produtores ao proporcionar ganhos produtivos, redução de custos com insumos sintéticos e resiliência frente às mudanças climáticas. Ao integrar nutrição vegetal, promoção de crescimento e controle biológico, os microrganismos promotores de crescimento consolidam-se como ferramentas essenciais para a transição agroecológica (Ferreira, 2017) e para o fortalecimento da sustentabilidade dos sistemas agrícolas brasileiros.

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida em duas etapas complementares. A primeira etapa consistiu em um ensaio preliminar conduzido em condições controladas, com areia estéril, para a seleção de isolados bacterianos com maior potencial de promoção do crescimento vegetal. A segunda etapa envolveu a validação desses isolados em solo natural, não esterilizado, com o objetivo de observar sua atuação em competição com a microbiota nativa. Ambas as fases foram conduzidas em ambiente de casa de vegetação, utilizando delineamentos estatísticos adequados para garantir rigor experimental.

3.1 ENSAIO I - SELEÇÃO DE ESTIRPES BACTERIANAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO A PARTIR DA INOCULAÇÃO EM FEIJÃO-CAUPI.

3.1.1 Preparo do inoculante

Os isolados bacterianos utilizados neste experimento foram previamente isolados e caracterizados por Amorim *et al.* (2022), conforme especificado na Tabela 1, com base em critérios fenotípicos e genotípicos associados à promoção de crescimento vegetal. Para reativação, os isolados foram cultivados em meio de cultura YM (Yeast Extract Mannitol), conforme protocolo de Vincent (1970), composto por extrato de levedura (0,4 g), manitol (5,0 g), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,2 g), KH_2PO_4 (0,5 g), NaCl (0,1 g) e pH ajustado para 6,8. As culturas foram incubadas a 28 ± 2 °C sob agitação constante (150 rpm) por 48 horas, sendo posteriormente avaliada a pureza por repicagem em placas de Petri contendo o mesmo meio sólido.

Tabela 1. Identificação molecular e similaridade genética de isolados bacterianos obtidos de nódulos de feijão-caupi, baseada em sequências parciais do gene 16S rRNA (análise BLASTn – GenBank).

Isolado	Alinhamento mais significativo pelo NCBI, Genbank	Nº Acesso (Cepa de Referência do GenBank)	identidade (%)
BSF 04	<i>Enterobacter sp.</i>	NR_117679.1	99,71
SMI 05	<i>Priestia megaterium</i>	NR_116873.1	99,86
SAA 02	<i>Rhizobium sp.</i>	NR_102511.1	100,00
SCS 05	<i>Pseudomonas sp.</i>	NR_116904.1	99,12
AS 01	<i>Enterobacter sp.</i>	NR_102794.2	99,70
AL 06	<i>Enterobacter sp.</i>	NR_117679.1	99,85
AC 03	<i>Pseudomonas sp.</i>	NR_156986.1	100,00
ZMI 01	<i>Bacillus subtilis</i>	NR_102783.2	99,86
VSA 03	<i>Brevibacillus agri</i>	NR_113767.1	99,71

Fonte: Amorim et al. (2022).

A solução contendo dois litros de meio de cultura foi distribuída em oito frascos erlenmeyer de 250 ml, nos quais uma alíquota de cada isolado bacteriano foi repicado assepticamente. Os frascos foram então incubados em agitador orbital do tipo Shaker, à temperatura constante de 28 °C, com rotação de 220 rpm, durante 72 horas, até que se observasse a turvação do meio, indicativa do crescimento bacteriano. Após o período de incubação, os cultivos bacterianos foram armazenados sob refrigeração em câmara B.O.D. A 4 °C, permanecendo em condições ideais para posterior utilização nos ensaios experimentais.

3.1.2 Preparo do solo e desinfestação das sementes

Como substrato foi utilizada areia grossa, lavada com água corrente, peneirada em malha de 3 mm e submetida à autoclavagem (1 h a 121 °C) por três dias consecutivos com intervalo de 24 horas entre as autoclavagens, a fim de garantir esterilização eficiente (Figura 1). As sementes de feijão-caupi foram selecionadas quanto à uniformidade e ausência de danos mecânicos. Em seguida, foram desinfestadas com álcool 70% (5 minutos), imersas em hipoclorito de sódio a 2% (3 minutos), enxaguadas sete vezes com água destilada autoclavada e deixadas para secagem à temperatura ambiente, conforme protocolo de Vincent (1970) (Figura 2 e 3).

Figura 1. Substrato de areia esterilizado em autoclave utilizado como base experimental para avaliação do crescimento de feijão-caupi.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 2. Etapas do processo de desinfestação superficial das sementes de feijão-caupi antes da inoculação bacteriana.



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 3. Sementes de feijão-caupi após desinfestação superficial, prontas para inoculação com isolados bacterianos.



Fonte: Autoria própria (2024).

3.1.3 Tratamentos e delineamento estatístico

O delineamento experimental foi do tipo inteiramente casualizado (DIC), adotando-se um esquema fatorial triplo ($3 \times 9 \times 3 + 3$), totalizando 108 unidades experimentais (Tabela 2). Os fatores considerados foram: três cultivares crioulas de feijão-caupi cultivadas na região de Pedro II-PI, nove isolados bacterianos

promotores de crescimento, e três repetições. Foram incluídas três testemunhas: uma testemunha absoluta (TA) sem adição de nitrogênio e sem inoculação bacteriana; e duas testemunhas nitrogenadas, que receberam 50% (50 kg ha⁻¹) e 100% (100 kg ha⁻¹) da dose recomendada de nitrogênio, respectivamente, na forma de ureia. Cada unidade experimental foi representada por um copo plástico com capacidade para 750 mL contendo areia autoclavada e inoculado ou adubado conforme o tratamento.

Tabela 2. Estrutura experimental do Ensaio I em casa de vegetação no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Pedro II-PI: delineamento fatorial com três cultivares crioulas de feijão-caupi, nove isolados bacterianas promotoras de crescimento e três testemunhas experimentais.

Cultura	Tratamento	Cultura	Tratamento	Cultura	Tratamento
F1	Iso 1º	F2	Iso 1º	F 3	Iso 1º
F1	Iso 2º	F2	Iso 2º	F3	Iso 2º
F1	Iso 3º	F2	Iso 3º	F3	Iso 3º
F1	Iso 4º	F2	Iso 4º	F3	Iso 4º
F1	Iso 5º	F2	Iso 5º	F3	Iso 5º
F1	Iso 6º	F2	Iso 6º	F3	Iso 6º
F1	Iso 7º	F2	Iso 7º	F3	Iso 7º
F1	Iso 8º	F2	Iso 8º	F3	Iso 8º
F1	Iso 9º	F2	Iso 9º	F3	Iso 9º
F1	TN	F2	TN	F3	TN
F1	TN 50%	F2	TN 50%	F3	TN 50%
F1	TA	F2	TA	F3	TA

Fonte: Autoria própria (2024).

Legenda: F1 – Feijão 1, F2 – Feijão 2, F3 – Feijão 3, Iso – Isolado, TN – Testemunha Nitrogenada, TN 50% – Testemunha 50% de Adubação Nitrogenada, TA – Testemunha Absoluta.

3.1.4 Cultivo das plantas

O cultivo das plantas foi conduzido em copos plásticos com capacidade de 750 mL, preenchidos com 0,7 dm³ de areia previamente esterilizada em autoclave e

com pH ajustado para 6,5, garantindo condições adequadas de cultivo. Para o estabelecimento inicial, foram semeadas três sementes de feijão-caupi por unidade experimental e adicionado 2 mL do inoculante bacteriano em cada semente (Figura 4 e 5). Aos 15 dias após a emergência (DAE), realizou-se o desbaste, mantendo-se uma única planta vigorosa por copo, a fim de padronizar o estande por tratamento.

Durante todo o período experimental, as plantas foram irrigadas diariamente com solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), modificada para atender às exigências de leguminosas e formulada sem a adição de nitrogênio. A solução foi aplicada na proporção de 1 mL por kg de substrato, sete vezes por semana, visando garantir o suprimento equilibrado dos demais nutrientes (Figura 6). O experimento foi conduzido sob condições controladas em ambiente de crescimento, com temperatura média de 28 ± 2 °C, fotoperíodo de 12 horas de luz e umidade relativa variando entre 60% e 70%.

As plantas permaneceram em cultivo por 30 dias após a semeadura (DAS), período durante o qual foram realizadas as avaliações morfofisiológicas, conforme descrito nos parâmetros indicadores de crescimento vegetal.

Figura 4. Semeadura de sementes de feijão-caupi em copos plásticos individuais contendo substrato autoclavado.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 5. Procedimento de inoculação das sementes de feijão-caupi com bactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPR).



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 6. Aplicação de solução nutritiva de Hoagland modificada durante o manejo das plantas de feijão-caupi.



Fonte: Autoria própria (2024).

3.1.5 Avaliações

3.1.5.1 Parâmetros indicadores de crescimento

As variáveis morfofisiológicas utilizadas para avaliar o crescimento das plantas incluíram altura da parte aérea, comprimento da raiz, número de nódulos e biomassa seca. A altura das plantas foi determinada com o auxílio de uma régua milimetrada, medindo-se desde a base do caule até a inserção da folha trifoliolada mais desenvolvida (folha +1) (Figura 7).

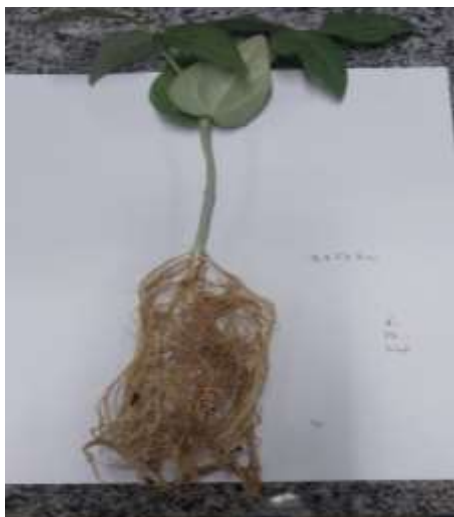
O comprimento da raiz principal foi mensurado do colo da planta até o ápice radicular, também utilizando régua graduada. O número total de nódulos presentes no sistema radicular foi contado manualmente após a lavagem cuidadosa das raízes em água corrente (Figura 8 e 9).

Para a determinação da biomassa seca, as plantas foram cuidadosamente separadas em parte aérea (caule) e sistema radicular. Cada fração foi acondicionada individualmente em sacos de papel identificados e submetida à secagem em estufa de circulação de ar forçada, a 65 °c, até atingirem massa constante (Figura 10).

Após a secagem, as amostras foram pesadas em balança analítica para obtenção da massa seca total da raiz e do caule. Esses dados permitiram a

quantificação precisa do crescimento vegetal promovido pelos diferentes tratamentos aplicados.

Figura 7. Mensuração da altura da parte aérea (CPA) das plantas de feijão-caupi aos 30 dias após a emergência.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 8. Contagem manual do número de nódulos radiculares em plantas de feijão-caupi inoculadas.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 9. Sistema radicular de feijão-caupi após remoção dos nódulos para análise da biomassa radicular.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 10. Amostra de parte aérea acondicionadas para determinação da massa seca em estufa de circulação forçada.



Fonte: Autoria própria (2024).

3.2 ENSAIO II - VALIDAÇÃO E SELEÇÃO DE ISOLADOS BACTERIANOS

PROMOTORES DE CRESCIMENTO EM FEIJÃO-CAUPI EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO EM COMPETIÇÃO COM OS MICRORGANISMOS NATIVOS.

3.2.1 Condução do experimento

O segundo experimento teve como objetivo avaliar a eficácia de estirpes bacterianas previamente selecionadas no Ensaio I quanto à promoção do crescimento do feijão-caupi crioulo, sob condições de solo não esterilizado, contendo microbiota nativa. Essa abordagem permitiu verificar a capacidade competitiva das bactérias inoculadas em relação aos microrganismos do solo, bem como avaliar seu potencial de atuação complementar à adubação nitrogenada mineral.

Para a condução do ensaio, amostras de solo foram coletadas em cinco transectos distribuídos em uma área com histórico de cultivo de feijão-caupi, no município de Pedro II - Piauí. As amostras foram homogeneizadas para formar um composto representativo, o qual foi utilizado como substrato sem esterilização, a fim de preservar a comunidade microbiana nativa. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, situada na área experimental do Instituto Federal do Piauí (IFPI), campus Pedro II, localizado nas coordenadas geográficas 4°26'56.1"S e 41°27'28.7"W.

3.2.2 Tratamentos e delineamento estatístico

Os tratamentos do segundo experimento consistiram na inoculação dos cinco isolados bacterianos mais promissores identificados no Ensaio I, aplicados a três cultivares de feijão-caupi crioulo provenientes do município de Pedro II-PI. A seleção desses isolados foi baseado na performance anterior em promover o crescimento vegetal, com ênfase na sua capacidade de interação simbiótica, estimulação morfofisiológica e compatibilidade genotípica com os cultivares testados.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), estruturado em esquema fatorial 3×10 , sendo o primeiro fator representado pelas três cultivares de feijão-caupi crioulo e o segundo fator composto pelas cinco estirpes bacterianas selecionadas, além de três tratamentos controle (incluindo testemunhas absolutas e nitrogenadas). Cada combinação experimental foi repetida três vezes, totalizando 72 unidades experimentais (Tabela 3).

Tabela 3. Estrutura experimental do Ensaio II em casa de vegetação no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Pedro II-PI: delineamento fatorial em solo natural com três cultivares crioulas de feijão-caupi, cinco isolados bacterianos selecionados e testemunhas nitrogenadas e absolutas.

Cultura	Tratamento	Cultura	Tratamento	Cultura	Tratamento
F1	Iso 1º	F2	Iso 1º	F3	Iso 1º
F1	Iso 2º	F2	Iso 2º	F3	Iso 2º
F1	Iso 3º	F2	Iso 3º	F3	Iso 3º
F1	Iso 4º	F2	Iso 4º	F3	Iso 4º
F1	Iso 5º	F2	Iso 5º	F3	Iso 5º
F1	TN	F2	TN	F3	TN
F1	TN 50%	F2	TN 50%	F3	TN 50%
F1	TA	F2	TA	F3	TA

Fonte: Autoria própria (2024).

Legenda F1 – Feijão 1, F2 – Feijão 2, F3 – Feijão 3, Iso – Isolado, TN – Testemunha Nitrogenada, TN 50% - Testemunha 50% de Adubação Nitrogenada, TA – Testemunha Absoluta.

3.2.3 Preparo do inoculante, Adubação, Plantio, Cultivo

Para o preparo dos inoculantes, cada isolado bacteriano previamente selecionado foi cultivado individualmente em meio líquido YM, conforme o protocolo descrito no ensaio I. Após atingir a fase de turvação adequada, as culturas foram mantidas sob refrigeração até o momento da inoculação.

O experimento foi conduzido em vasos plásticos com capacidade de 3,5 litros, preenchidos com 15 dm³ de solo coletado em áreas cultivadas com feijão-caupi no município de Pedro II-PI (Figura 11). O solo não foi esterilizado, de modo a preservar sua microbiota natural, permitindo a avaliação da competitividade dos isolados inoculados frente aos microrganismos nativos.

As sementes utilizadas foram submetidas à desinfestação superficial com álcool etílico a 70% por 1 minuto, seguidas de imersão em solução de hipoclorito de sódio a 2–2,5% por 3 minutos, e enxaguadas em água destilada estéril por sete vezes consecutivas.

Após o preparo, três sementes foram semeadas por vaso (Figura 12) e adicionado 2 mL do inoculante bacteriano em cada semente, sendo realizado

desbaste aos 15 dias após a emergência (DAE), mantendo-se apenas uma planta por vaso (Figura 13). Todas as unidades experimentais foram irrigadas diariamente com solução nutritiva de hoagland modificada, isenta de nitrogênio, na proporção de 1 ml por kg de solo, durante sete dias por semana. As testemunhas seguiram o mesmo manejo nutricional, mas não receberam inoculação bacteriana.

As plantas permaneceram sob cultivo em casa de vegetação por um período mínimo de 30 dias, sob condições controladas de temperatura, fotoperíodo e umidade relativa (Figura 14). Durante esse período e ao final do experimento, foram realizadas avaliações dos parâmetros de crescimento conforme descrito no item

Figura 11. Vasos plásticos preenchidos com solo não autoclavado, representando a condição de microbiota ativa no Ensaio II.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 12. Semeadura direta de sementes de feijão-caupi em vasos contendo solo com microbiota ativa.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 13. Desbaste de plântulas de feijão-caupi aos 15 dias após a emergência, padronizando a densidade por vaso.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 14. Condições de cultivo em casa de vegetação durante o Ensaio II com feijão-caupi inoculado com diferentes isoaldos bacterianos.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.4 Análise estatística

Os dados obtidos em cada etapa experimental foram inicialmente submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, com o objetivo de verificar a distribuição dos resíduos. Para as variáveis que atenderam ao critério de normalidade ($p > 0,05$), procedeu-se à análise de variância (ANOVA) pelo teste F, adotando-se um nível de significância de 5%.

As análises estatísticas foram realizadas no ambiente R Studio (versão 4.5.1), com posterior comparação entre as médias por meio do teste de Tukey, também ao nível de 5% de probabilidade, a fim de identificar diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

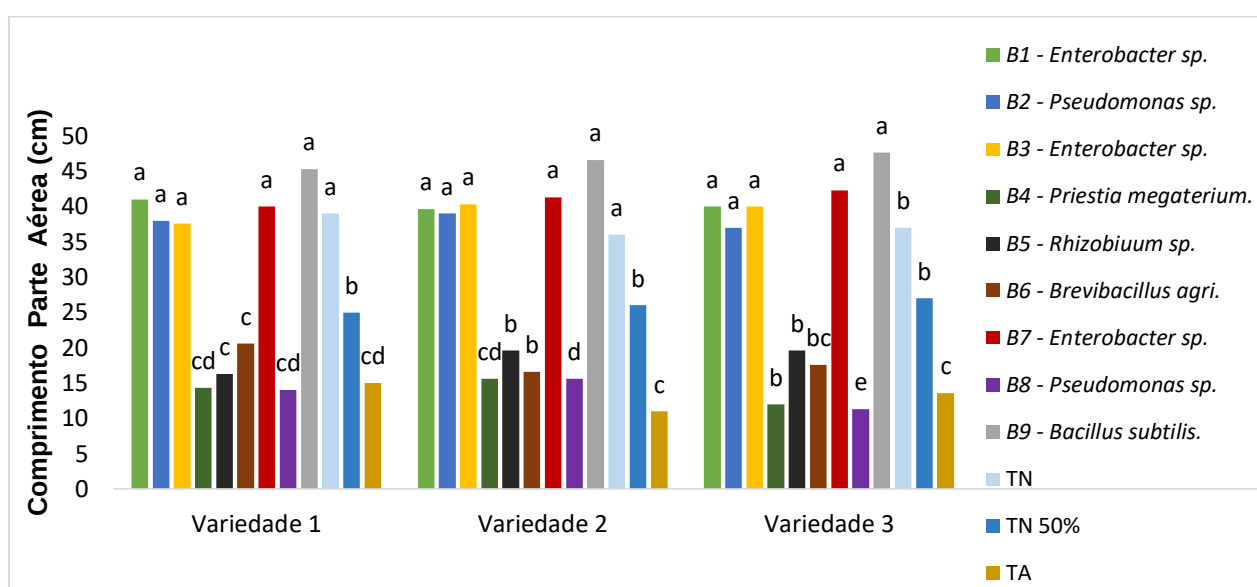
Os efeitos dos isolados bacterianos sobre o crescimento do feijão-caupi foram avaliados em diferentes parâmetros morfológicos e fisiológicos ao longo de dois experimentos (Ensaio I e II) conduzidos em condições controladas. Para tal, foram observados variáveis como comprimento da parte aérea, comprimento da raiz, número de nódulos, biomassa seca e resposta comparativa às testemunhas com e sem adubação nitrogenada, os quais permitiram discutir a eficiência de cada isolado na promoção do crescimento das cultivares de feijão-caupi.

A análise de variância (ANOVA) para o comprimento da parte aérea (CPA) evidenciou a forte influência tanto do genótipo das plantas quanto dos isolados bacterianos, bem como da interação entre ambos, confirmando a importância dos fatores bióticos e genéticos na regulação do crescimento vegetal. No Ensaio I (Tabela 4 – Anexo A), conduzido em solo autoclavado, verificou-se um efeito amplo dos isolados bacterianos: B1 (*Enterobacter* sp.), B2 (*Pseudomonas* sp.), B3 (*Enterobacter* sp.), B7 (*Enterobacter* sp.) e B9 (*Bacillus subtilis*) promoveram incrementos expressivos de CPA em todas as variedades, superando de forma consistente as testemunhas TA e TN 50%, e em alguns casos alcançando valores equivalentes ou superiores à testemunha nitrogenada (TN), conforme o gráfico 1.

Tais resultados demonstram que, na ausência de microbiota residente, os mecanismos intrínsecos de promoção do crescimento desses microrganismos se manifestam de maneira eficiente, sem interferência da competição ou antagonismo

natural do solo (Gráfico 1) (Otieno *et al.*, 2015; Santos; Santos, 2022).

Gráfico 1. Comprimento da parte aérea de plantas de feijão-caupi inoculadas com isolados de bactérias promotoras de crescimento vegetal. As médias foram submetidas à análise de variância e comparadas por meio do teste de Tukey, considerando 5% de probabilidade ($p < 0,05$). As letras a, b, c, d e e indicam diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. As testemunhas diferem em relação à dose de adubação nitrogenada: Testemunha Nitrogenada (TN), Testemunha com 50% da dose recomendada (TN 50%) e Testemunha Absoluta (TA).



Fonte: Autoria própria (2025).

Do ponto de vista fisiológico, esses efeitos podem ser atribuídos a múltiplos mecanismos diretos e indiretos. Entre os diretos, destacam-se a síntese de ácido indolacético (AIA), regulador central do alongamento celular e da diferenciação tecidual, e a solubilização de fósforo, essencial para o metabolismo energético e síntese de biomoléculas. Adicionalmente, a fixação biológica de nitrogênio (FBN) associativa fornece N em formas assimiláveis, reduzindo a dependência de fertilizantes minerais (Santos; Santos, 2022).

Entre os mecanismos indiretos, a produção de sideróforos e antibióticos confere vantagem competitiva às bactérias inoculadas, ao mesmo tempo em que cria um ambiente rizosférico mais equilibrado, reduzindo a pressão de microrganismos patogênicos (Otieno *et al.*, 2015). Esses resultados estão em consonância com a visão atual de que PGPRs (plant growth-promoting

rhizobacteria) atuam em rede de mecanismos redundantes, garantindo maior robustez na promoção de crescimento.

O destaque para *Pseudomonas* (B2) no Ensaio I é coerente com a literatura, que descreve esse gênero como altamente versátil e metabolicamente ativo, com capacidade de sintetizar ACC deaminase — enzima que reduz os níveis de etileno, hormônio frequentemente associado ao estresse vegetal (Santoyo *et al.*, 2019; Kumari, 2016). Além disso, *Pseudomonas* apresenta elevada competência para solubilizar fosfatos (Duiff *et al.*, 1997), o que pode ter contribuído para o maior acúmulo de biomassa aérea.

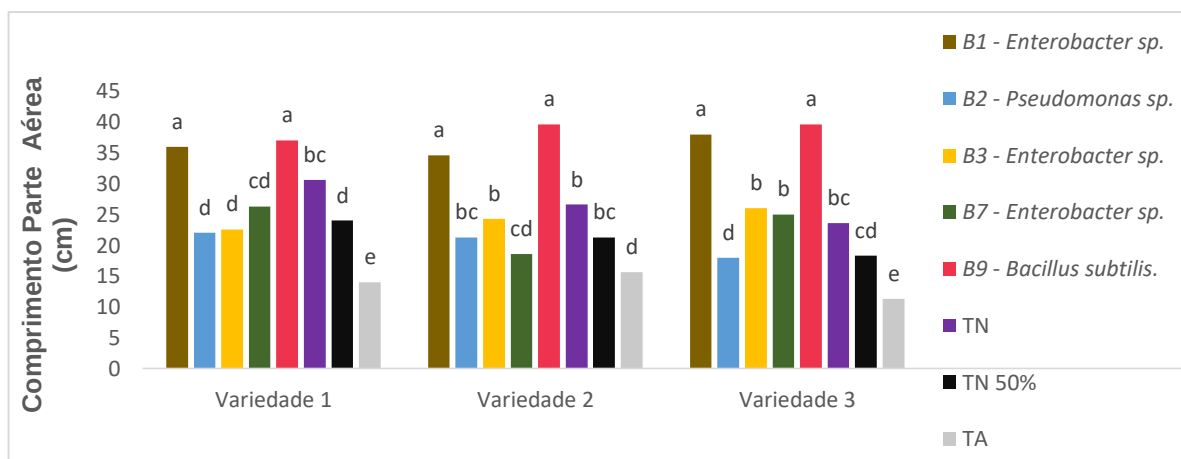
O desempenho de *Pseudomonas* (B2) no Ensaio I é particularmente relevante, já que esse gênero é amplamente reconhecido por sua plasticidade metabólica e ecológica. Além da produção de AIA e sideróforos, muitas estirpes sintetizam a enzima ACC deaminase, que degrada o precursor imediato do etileno, reduzindo os níveis desse hormônio em condições de estresse, o que favorece o crescimento radicular e aéreo em cenários de salinidade ou déficit hídrico (Santoyo *et al.*, 2019; Kumari, 2016).

A solubilização de fosfatos, por sua vez, aumenta a disponibilidade de P, elemento crítico para leguminosas como o feijão-caupi, que frequentemente se desenvolvem em solos de baixa fertilidade. A elevada competência para solubilizar fosfatos, pode ter contribuído para o maior acúmulo de biomassa aérea (Duiff *et al.*, 1997). Esses mecanismos explicam a superioridade de B2 em solo estéril e reforçam seu potencial em biofertilização.

No entanto, o Ensaio II (Tabela 5 – Anexo A), conduzido em solo não autoclavado, evidenciou uma resposta mais seletiva. Apenas B1 (*Enterobacter* sp.) e B9 (*Bacillus subtilis*) mantiveram efeito consistente, superando todas as testemunhas, inclusive a TN, mesmo diante da competição da microbiota residente (Gráfico 2). Esse resultado indica que a eficácia de inoculantes em campo depende menos do potencial fisiológico isolado da estirpe e mais de sua capacidade de competir, persistir e interagir funcionalmente com a comunidade microbiana nativa (Bashan *et al.*, 2013).

Gráfico 2. Comprimento da parte aérea de plantas de feijão-caupi inoculadas com isolados de bactérias promotoras de crescimento vegetal. As médias foram submetidas à análise de variância e comparadas por meio do teste de Tukey, considerando 5% de probabilidade ($p < 0,05$). As letras a, b, c, d e e indicam

diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. As testemunhas diferem em relação à dose de adubação nitrogenada: Testemunha Nitrogenada (TN), Testemunha com 50% da dose recomendada (TN 50%) e Testemunha Absoluta (TA).

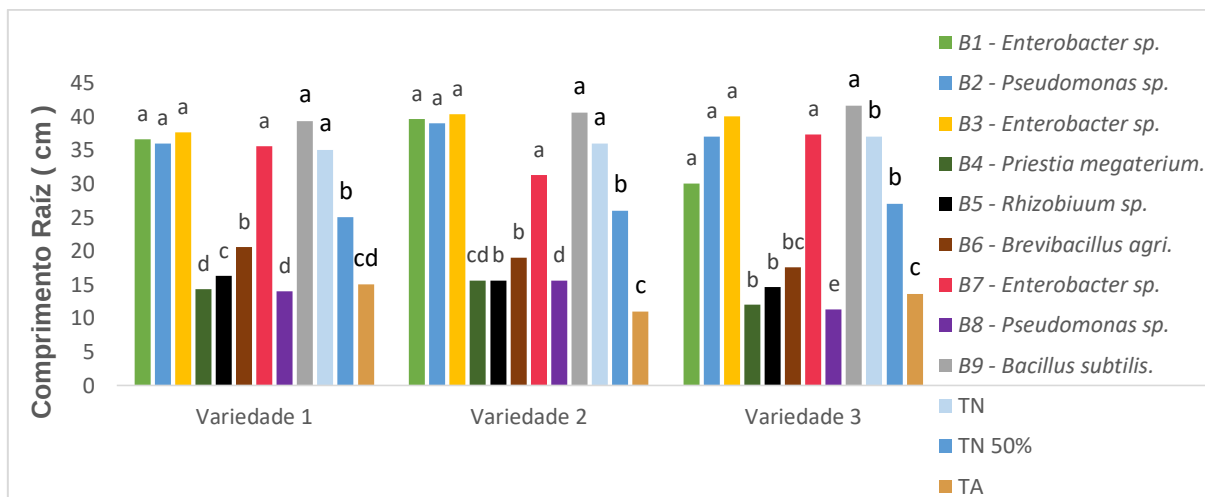


Fonte: Autoria própria (2025)

Do ponto de vista agrônomo, essa constatação tem grande relevância. A performance de B1 e B9, superior inclusive à adubação nitrogenada completa, evidencia que sua ação vai além do fornecimento de N, englobando efeitos sistêmicos como maior ramificação radicular, modulação hormonal e maior eficiência no uso de nutrientes. Isso posiciona esses isolados como candidatas robustas para formulações comerciais de inoculantes, capazes de reduzir a dependência de insumos químicos, cortar custos de produção e diminuir impactos ambientais da adubação nitrogenada intensiva (Bashan *et al.*, 2013; Vasques *et al.*, 2024).

A resposta do sistema radicular reforça esse quadro. No Ensaio I (Tabela 6 – Anexo A), tanto variedade quanto bactéria apresentaram efeitos altamente significativos, enquanto a interação não foi estatisticamente relevante. Os isolados B1, B2, B3, B7 e B9 promoveram incremento expressivo no comprimento radicular em todas as variedades, superando as testemunhas (Gráfico 3).

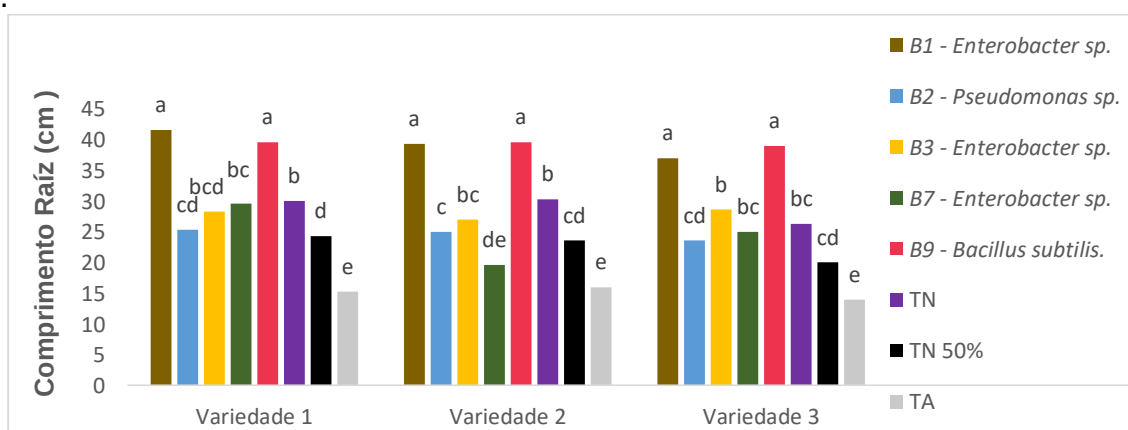
Gráfico 3. Comprimento da parte da raiz de plantas de feijão-caupi inoculadas com isolados de bactérias promotoras de crescimento vegetal. As médias foram submetidas à análise de variância e comparadas por meio do teste de Tukey, considerando 5% de probabilidade ($p < 0,05$). As letras a, b, c, d e e indicam diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. As testemunhas diferem em relação à dose de adubação nitrogenada: Testemunha Nitrogenada (TN), Testemunha com 50% da dose recomendada (TN 50%) e Testemunha Absoluta (TA).



Fonte: Autoria própria (2025).

Já no Ensaio II (Tabela 7 – Anexo A), conduzido em solo com microbiota ativa, todos os fatores — variedade, bactéria e interação — foram altamente significativos, com coeficiente de variação mais baixo (6,37%) e resíduos normalmente distribuídos, o que atesta a robustez estatística do modelo. Nesse ensaio, novamente B1 (*Enterobacter* sp.) e B9 (*Bacillus subtilis*) B1 e B9 novamente se destacaram, superando significativamente TA, TN e TN 50% (Gráfico 4).

Gráfico 4. Comprimento da parte da raiz de plantas de feijão-caupi inoculadas com isolados de bactérias promotoras de crescimento vegetal. As médias foram submetidas à análise de variância e comparadas por meio do teste de Tukey, considerando 5% de probabilidade ($p < 0,05$). As letras a, b, c, d e e indicam diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. As testemunhas diferem em relação à dose de adubação nitrogenada: Testemunha Nitrogenada (TN), Testemunha com 50% da dose recomendada (TN 50%) e Testemunha Absoluta (TA)



Fonte: Autoria própria (2025)

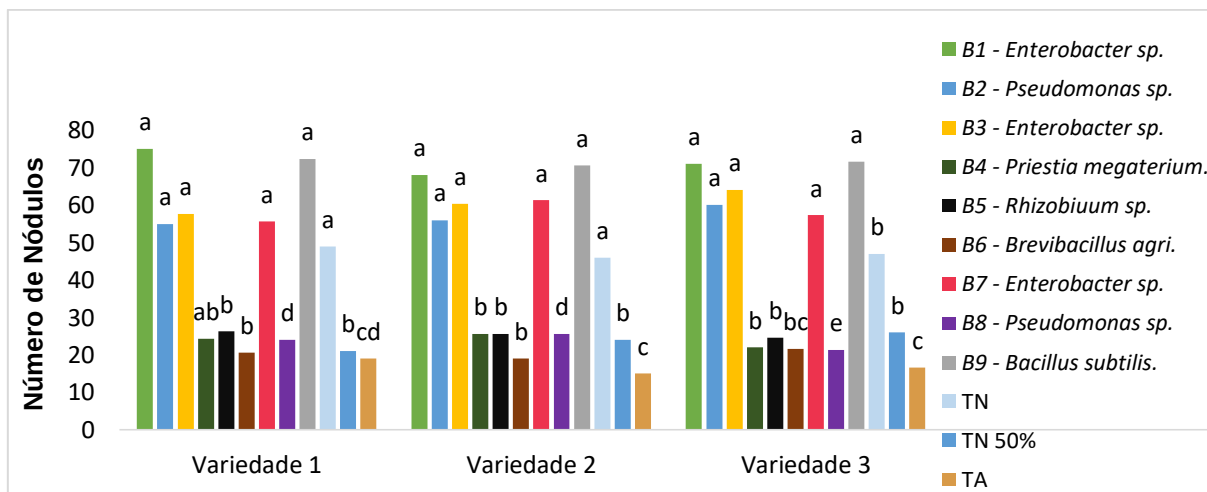
Esse padrão está em consonância com a literatura, que descreve PGPRs

como moduladores do sistema radicular por meio da produção de AIA, fosfatases e sideróforos, estimulando tanto o alongamento quanto a ramificação radicular (Gupta *et al.*, 2015). No caso de *Bacillus subtilis*, o efeito pode ser atribuído à produção de VOCs e a formação de biofilmes que aumentam a colonização e a estabilidade da interação planta–microrganismo, garantindo efeito prolongado (Ajijah *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2021). Já *Enterobacter* spp. combinam colonização endofítica eficiente e mobilização de nutrientes, fatores que resultam em maior equilíbrio nutricional e em plantas com vigor superior (Jha *et al.*, 2011).

O maior desenvolvimento radicular observado em B1 e B9 é particularmente relevante, pois raízes mais longas e ramificadas ampliam a capacidade da planta em explorar o solo, absorver nutrientes e resistir a estresses hídricos — fatores críticos para a agricultura de sequeiro predominante em regiões semiáridas onde o feijão-caupi é cultivado. Essa ligação entre vigor radicular e desempenho agrônômico reforça a aplicabilidade desses inoculantes em contextos de baixa fertilidade e condições edafoclimáticas adversas (Bashan *et al.*, 2013).

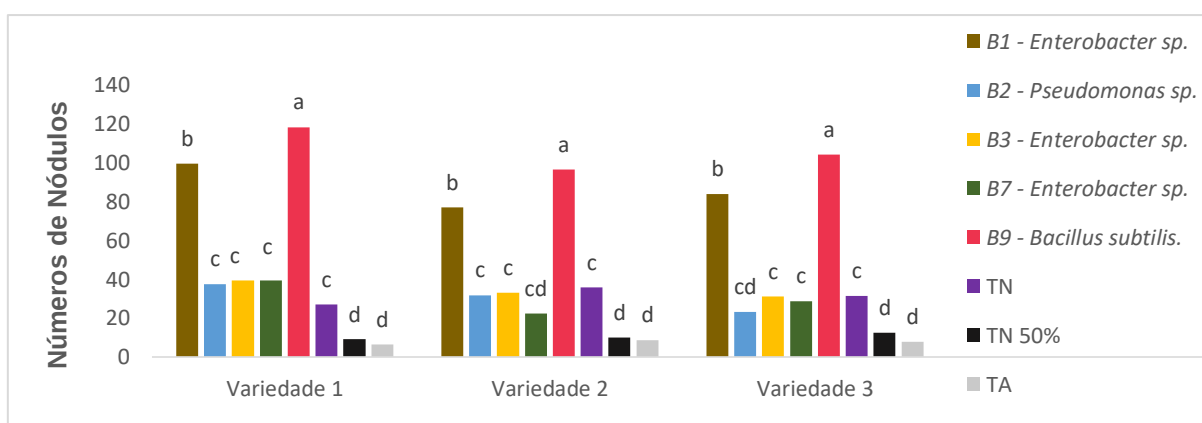
A nodulação apresentou comportamento distinto entre os ensaios. No Ensaio I (Tabela 8 – Anexo A), variedade e bactéria foram significativas, mas não a interação. Nesse contexto, B1, B2, B3, B7 e B9 se destacaram, promovendo maior número de nódulos (Gráfico 5). Já no Ensaio II (Tabela 9 – Anexo A), todos os fatores — variedade, bactéria e interação — foram altamente significativos, sugerindo que, em solos com microbiota ativa, a nodulação é modulada por interações complexas entre o genótipo da planta e os isolados bacterianos. Nesse ensaio, observou-se que somente B9 se destacou na promoção de número de nódulos (Gráfico 6).

Gráfico 5. Quantidade de nódulos de plantas de feijão-caupi inoculadas com isolados de bactérias promotoras de crescimento vegetal. As médias foram submetidas à análise de variância e comparadas por meio do teste de Tukey, considerando 5% de probabilidade ($p < 0,05$). As letras a, b, c, d e e indicam diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. As testemunhas diferem em relação à dose de adubação nitrogenada: Testemunha Nitrogenada (TN), Testemunha com 50% da dose recomendada (TN 50%) e Testemunha Absoluta (TA).



Fonte: Autoria própria (2025).

Gráfico 6. Quantidade de nódulos de plantas de feijão-caupi inoculadas com isolados de bactérias promotoras de crescimento vegetal. As médias foram submetidas à análise de variância e comparadas por meio do teste de Tukey, considerando 5% de probabilidade ($p < 0,05$). As letras a, b, c, d e e indicam diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. As testemunhas diferem em relação à dose de adubação nitrogenada: Testemunha Nitrogenada (TN), Testemunha com 50% da dose recomendada (TN 50%) e Testemunha Absoluta (TA).



Fonte: Autoria própria (2025).

A presença de *Enterobacter* spp. como indutores de nodulação é um achado relevante, visto que evidências recentes indicam que esse gênero contém genes tradicionalmente associados a rizóbios, capazes de mediar processos de infecção radicular e formação de nódulos (Deng *et al.*, 2020). Esse achado redefine a compreensão tradicional da simbiose rizobiana e aponta para o papel de

microrganismos não clássicos na nodulação. De forma semelhante, Zhao *et al.* (2018) identificaram *Enterobacter*, *Pseudomonas* e *Bacillus* em nódulos de soja, ampliando a visão sobre a diversidade funcional da microbiota nodular.

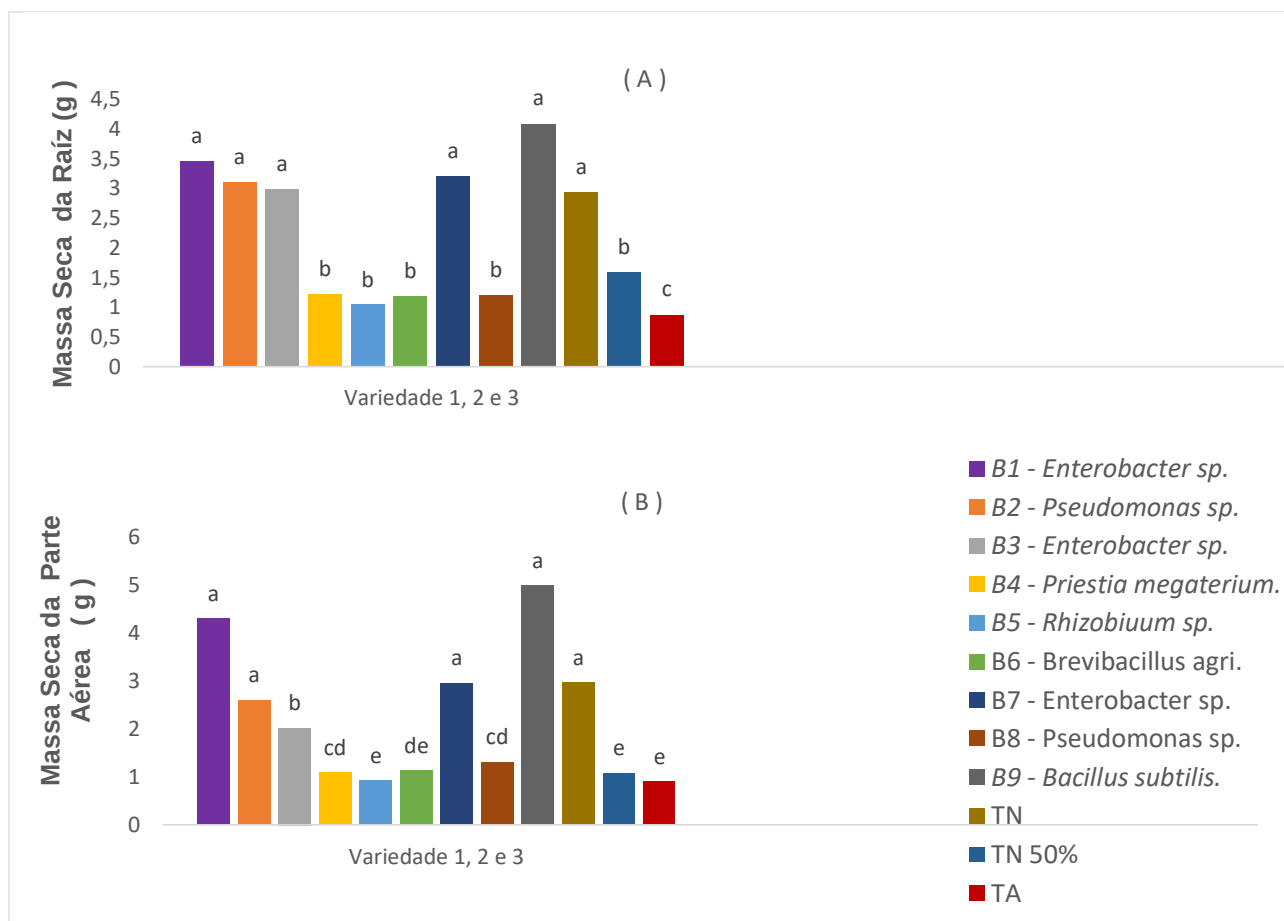
Pseudomonas (B2) também apresentou desempenho expressivo. Além da produção de reguladores de crescimento, cepas de *Pseudomonas* podem liberar flavonoides, moléculas sinalizadoras cruciais para a ativação da simbiose rizobiana e da atividade da nitrogenase (Andrade *et al.*, 1998). Além disso, isolados desse gênero podem modular vias hormonais ligadas a auxinas e citocininas, regulando de forma positiva a formação e funcionalidade dos nódulos (Ahemad; Khan, 2012). Embora *B. subtilis* (B9) não forme nódulos diretamente, sua influência indireta, por meio da modulação hormonal e da formação de biofilmes, favorece a instalação de rizóbios e o desenvolvimento nodular (Araújo *et al.*, 2010).

Do ponto de vista prático, a promoção da nodulação por isolados não tradicionais confirma a possibilidade de expandir o uso de microrganismos para além dos rizóbios clássicos. Esse resultado é particularmente relevante para sistemas de agricultura familiar e agroecológica, onde a redução da dependência de fertilizantes nitrogenados pode gerar ganhos econômicos e ambientais expressivos (Jaramillo *et al.*, 2013; Oliveira-Longatti *et al.*, 2014).

Os resultados de biomassa seca confirmam a integração dos efeitos observados nas variáveis CPA, raiz e nodulação. No Ensaio I (Tabela 10 e 11 – Anexo A; Gráfico 7- A e B), variedade, bactéria e interação apresentaram efeitos significativos tanto para MSPA quanto para MSR. Os isolados B1, B2, B3, B7 e B9 proporcionaram incrementos expressivos, superando TA e TN 50%, e, em algumas combinações, sendo equivalentes ou superiores à TN. O destaque para B1, com os maiores valores de MSPA, pode ser atribuído à sua capacidade de estimular a arquitetura radicular e promover maior absorção de água e nutrientes e sustentando maior crescimento aéreo (Bashan *et al.*, 2013; Gupta *et al.*, 2015).

Gráfico 7. Massa seca da raiz e massa seca da parte aérea de plantas de feijão-caupi inoculadas com isolados de bactérias promotoras de crescimento vegetal. As médias foram submetidas à análise de variância e comparadas por meio do teste de Tukey, considerando 5% de probabilidade ($p < 0,05$). As letras a, b, c, d e e indicam diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. As testemunhas diferem em relação à dose de adubação nitrogenada: Testemunha Nitrogenada (TN),

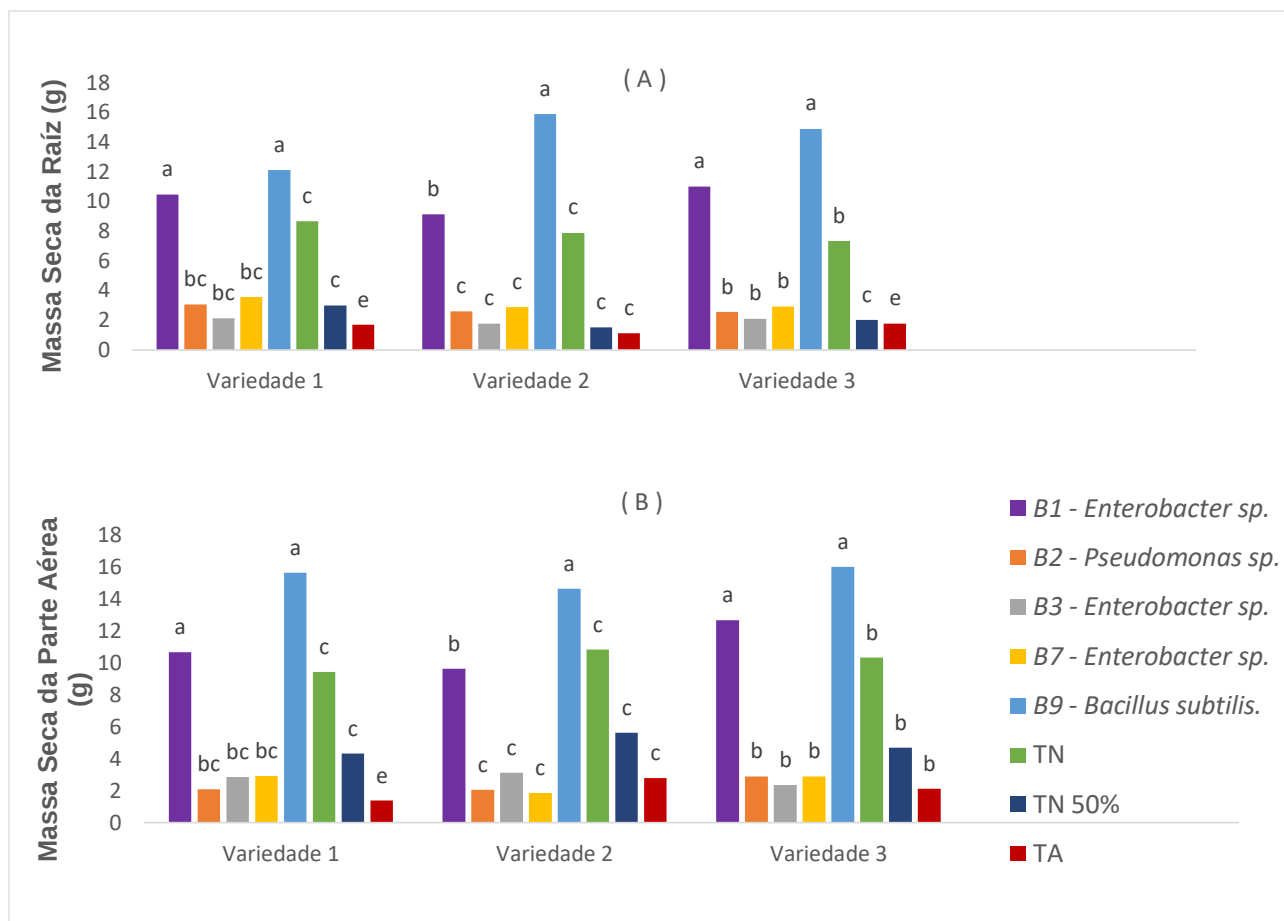
Testemunha com 50% da dose recomendada (TN 50%) e Testemunha Absoluta (TA).



No Ensaio II (Tabela 12 e 13 – Anexo A; Gráfico 8- A e B), apenas B1 e B9 mantiveram desempenho superior em condições de microbiota ativa, destacando-se em relação às testemunhas, superando inclusive a TN. Essa robustez decorre de sua multifuncionalidade, incluindo produção de fitormônios, sideróforos, solubilização de fósforo e formação de biofilmes rizosféricos estáveis (Ajjah *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2021). No caso de *B. subtilis*, sua capacidade de esporulação garante persistência em ambientes adversos, assegurando eficiência em campo.

Gráfico 8. Massa seca da raiz e massa seca da parte aérea de plantas de feijão-caupi inoculadas com isolados de bactérias promotoras de crescimento vegetal. As médias foram submetidas à análise de variância e comparadas por meio do teste de Tukey, considerando 5% de probabilidade ($p < 0,05$). As letras a, b, c, d e e indicam diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. As testemunhas diferem em relação à dose de adubação nitrogenada: Testemunha Nitrogenada (TN),

Testemunha com 50% da dose recomendada (TN 50%) e Testemunha Absoluta (TA).



A biomassa seca, como variável integradora, confirma que a ação dessas bactérias vai além da substituição parcial de fertilizantes: trata-se de um estímulo fisiológico amplo que envolve raízes, parte aérea e nodulação, refletindo em maior produtividade potencial. O fato de B1 e B9 terem superado a TN no Ensaio II confirma que a inoculação com esses isolados não apenas substitui parcialmente o fertilizante nitrogenado, mas também gera ganhos adicionais pela ação integrada de mecanismos fisiológicos. Em termos práticos, isso significa menor dependência de adubação sintética, maior resiliência produtiva a estresses abióticos e maior sustentabilidade em sistemas produtivos decorrente de menor impacto ambiental (Costa *et al.*, 2013).

Os resultados obtidos nos dois ensaios demonstram que a ação dos isolados bacterianos se manifesta de forma integrada nos diferentes parâmetros avaliados. CPA, raiz, nodulação e biomassa seca estão interligados em um ciclo de retroalimentação positiva: raízes mais vigorosas aumentam a absorção de nutrientes

e favorecem a nodulação; nódulos mais numerosos ampliam a fixação de N; e ambos sustentam maior crescimento aéreo e acúmulo de biomassa total.

A comparação entre os ensaios destaca um ponto central: em solo autoclavado (Ensaio I), múltiplos isolados expressaram seu potencial, mas em solo com microbiota ativa (Ensaio II), apenas os mais competitivos — *Enterobacter* sp. (B1) e *Bacillus subtilis* (B9) — mantiveram desempenho consistente. Esse achado reforça a necessidade de validar bioinoculantes em condições próximas à realidade agrícola, evitando superestimações comuns em estudos conduzidos apenas em ambientes estéreis (Bashan *et al.*, 2013; Costa *et al.*, 2013).

Do ponto de vista prático, a utilização de isolados como B1 e B9 representa uma alternativa estratégica para o manejo sustentável do feijão-caupi. Seus efeitos consistentes em diferentes parâmetros confirmam que são candidatos promissores para formulações comerciais, com potencial de reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados, diminuir custos de produção e mitigar impactos ambientais. Além disso, a capacidade desses microrganismos de atuar em múltiplos mecanismos fisiológicos aumenta a resiliência da cultura a estresses abióticos, como seca e baixa fertilidade, aspectos cruciais para o semiárido nordestino (Bashan *et al.*, 2013; Hashem *et al.*, 2019; Patel *et al.*, 2023).

No entanto, persiste uma lacuna na literatura e neste estudo: a avaliação funcional dos nódulos formados. Embora o número de nódulos seja maior com inoculação, não se sabe se todos apresentam atividade nitrogenase equivalente àquela promovida por rizóbios clássicos. Pesquisas futuras devem focar não apenas na quantidade, mas na qualidade funcional dos nódulos, bem como na persistência de estirpes introduzidas em condições de campo a longo prazo, contribuindo para o avanço no uso seguro e eficaz de bioinoculantes em sistemas produtivos tropicais (Deng *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2018; Jaramillo *et al.*, 2013).

5 CONCLUSÃO

O presente estudo evidenciou que a inoculação com bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCPs) exerce efeitos expressivos e integrados sobre o desenvolvimento do feijão-caupi crioulo, refletidos em variáveis morfofisiológicas como comprimento da parte aérea, crescimento radicular, nodulação e acúmulo de biomassa seca. Os resultados demonstraram que a eficácia dos inoculantes é

determinada pela interação entre o genótipo vegetal, o isolado bacteriano e as condições microbiológicas do solo, destacando a importância de avaliar sua performance em contextos contrastantes.

No Ensaio I, conduzido em substrato autoclavado, múltiplos isolados — em especial *Enterobacter* sp. (B1, B3, B7), *Pseudomonas* sp. (B2) e *Bacillus subtilis* (B9) — apresentaram incrementos consistentes em todos os parâmetros analisados, superando inclusive a adubação nitrogenada completa. Esse resultado confirma o potencial intrínseco dessas bactérias em expressar mecanismos clássicos de promoção do crescimento, como a produção de ácido indolacético (AIA), a fixação associativa de nitrogênio, a solubilização de fósforo, a síntese de sideróforos e a modulação hormonal.

Em contraste, no Ensaio II, realizado em solo com microbiota ativa, apenas B1 (*Enterobacter* sp.) e B9 (*Bacillus subtilis*) mantiveram desempenho superior e consistente, inclusive em relação à testemunha nitrogenada. Esse achado revela que, em condições de campo, a eficácia dos inoculantes depende não apenas do potencial fisiológico do isolado, mas sobretudo de sua robustez ecológica, persistência e competitividade frente à microbiota nativa — atributos essenciais para formulações comerciais aplicáveis em sistemas produtivos reais.

Assim, B1 e B9 configuram-se como candidatos estratégicos para o desenvolvimento de bioinoculantes comerciais, com potencial de substituir parcial ou totalmente a adubação nitrogenada, reduzir custos de produção e mitigar impactos ambientais. Sua multifuncionalidade metabólica e resiliência ecológica reforçam sua aplicabilidade em sistemas de base agroecológica, especialmente em cenários de baixa disponibilidade hídrica e nutricional, característicos do semiárido nordestino.

Como perspectiva, recomenda-se a continuidade de pesquisas em campo, contemplando múltiplos ciclos de cultivo e diferentes condições edafoclimáticas, de modo a validar os resultados obtidos em ambiente controlado. Também se torna essencial aprofundar os estudos moleculares para elucidar os mecanismos de ação dos isolados, bem como avaliar a qualidade funcional dos nódulos formados, em especial sua atividade nitrogenase. Além disso, a investigação da viabilidade desses isolados em formulações comerciais deve considerar aspectos de estabilidade e competitividade frente à microbiota nativa.

A disseminação de tecnologias baseadas em B1 e B9 no âmbito da agricultura familiar, aliada a políticas públicas de incentivo ao uso de bioinsumos,

poderá fortalecer um modelo agrícola mais resiliente, sustentável e socialmente justo. Em síntese, este estudo reafirma a relevância da ciência e da biotecnologia como ferramentas estratégicas para a construção de sistemas produtivos capazes de conciliar produtividade, conservação ambiental e desenvolvimento socioeconômico regional.

Todavia, persiste a necessidade de aprofundar investigações quanto à qualidade funcional dos nódulos formados, sobretudo em relação à atividade da nitrogenase, bem como avaliar a persistência desses isolados em diferentes condições edafoclimáticas ao longo de múltiplos ciclos de cultivo. Estudos futuros devem integrar análises fisiológicas, moleculares e de desempenho agrônomo, de forma a consolidar o uso seguro e eficaz desses microrganismos como ferramentas estratégicas para a promoção de uma agricultura mais sustentável, produtiva e ambientalmente equilibrada.

REFERÊNCIAS

- AHEMAD, M.; KHAN, M. S. Alleviation of fungicide-induced phytotoxicity in greengram (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) using fungicide-tolerant and plant growth promoting *Pseudomonas* strain. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 19, n. 4, p. 451-459, 2012. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3730946/>. Acesso em: 28 jan. 2026.
- AHLGREN, S. *et al.* Nitrogen fertiliser production based on biogas: energy input, environmental impact and land use. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 18, p. 7181–7184, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410006668>. Acesso em: 28 jan. 2026.
- AJIJAH, N. *et al.* Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) with Biofilm-Forming Ability: A Multifaceted Agent for Sustainable Agriculture. **Diversity**, Basel, v. 15, n. 1, 112, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-2818/15/1/112>. Acesso em: 28 jan. 2026.
- ALMEIDA N. *et al.* Inoculação com *Rhizobium tropici* e adubação nitrogenada aumentam a produção de grão-de-bico? **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, p. e016520, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/3P7QJ3M7mKLqHmhtQPZVB6L/>. Acesso em: 28 jan. 2026.
- AMORIM, M.R. *et al.* Cowpea nodules host a similar bacterial community regardless of soil properties. **Applied Soil Ecology**, v. 172, p. 104354, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139321004777>. Acesso em: 28 jan. 2026.
- ANDRADE, G. *et al.* Plant mediated interactions between *Pseudomonas fluorescens*, *Rhizobium leguminosarum* and arbuscular mycorrhizae on pea. **Letters Applied Microbiology**, Oxford, v. 26, p. 311-316, 1998. Disponível em: <https://academic.oup.com/lambio/article/26/4/311/6708032>. Acesso em: 28 jan. 2026.
- AQUINO, D. J. P. A. *et al.* Bactérias endofíticas promotoras de crescimento de plantas em milho e sorgo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia. v. 49, p. 1 - 9, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/56241>. Acesso em: 28 jan. 2026.
- ARAÚJO, A. **A agricultura de base biológica no Brasil**. Diário do Comércio, 12 jan. 2022. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/opiniaio/a-agricultura-de-base-biologica-no-brasil/>. Acesso em: 20 jan 2025.
- ARAÚJO, A. S. F. *et al.* Coinoculação rizóbio e *Bacillus subtilis* em -caupi e leucena: efeito sobre a nodulação, a fixação de N₂ e o crescimento das plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, p.182-185, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/SMH6RxfmTcsVmdvb4w8kLbt/?lang=pt>. Acesso em: 28 jan. 2026.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. Entregas de fertilizantes crescem 10,7% no primeiro quadrimestre de 2025 e refletem preparação para safra recorde. **Info Conews MT**, 2025. Disponível em: <https://infoconewsmt.com.br/entregas-de-fertilizantes-crescem-107-no-primeiro-quadrimestre-de-2025-e-refletem-preparacao-para-safra-recorde/>. Acesso em: 06 jun. 2025.

BASHAN, Y. *et al.* Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 378, p. 1–33, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11104-013-1956-x.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2026.

BASTOS, R. L. G. *et al.* Utilização de bactérias promotoras de crescimento em mudas de bananeira sob irrigação salina. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 13, n. 5, p. 3619, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/12500>. Acesso em: 28 jan. 2026.

BASU, S.; RABARA, R.; NEGI, S. An alternative strategy using biofertilizers. I: Plant growth promoting bacteria. **Plant Gene**, Netherlands. Towards a better greener future, v. 12, p. 43-49, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/plant-gene/vol/12/p/43-49>. Acesso em: 28 jan. 2026.

BODDEY, R. M. *et al.* Effect of inoculation of *Azospirillum* spp. on nitrogen accumulation by field-grown wheat. **Plant and Soil**, v. 95, n. 1, p. 109-121, 1986. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF0237885>. Acesso em: 28 jan. 2026.

BOUKAR, O. *et al.* Cowpea (*Vigna unguiculata*): Genetics, genomics and breeding. **Plant Breeding**, v. 138, n. 4, p. 415-424, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/14350623/vol/138/issue/4>. Acesso em: 28 jan. 2026.

BOURASSA, D. V. *et al.* The Lipopolysaccharide Lipid A Long-Chain Fatty Acid Is Important for *Rhizobium leguminosarum* Growth and Stress Adaptation in Free-Living and Nodule Environments. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 30, n. 2, p.161-175, 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28054497/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

BRITO, M. E. B. *et al.* **Produção e manejo do feijão-caupi**. Circular Técnica EMBRAPA Semiárido, n. 103, p. 1–8, 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/224358/1/Feijao-caupi-Parametros-produtivos-biometricos-fisiologicos-2021.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2026.

CARVALHO, M.; HALECKI, W. Modeling of cowpea (*Vigna Unguiculata*) yield and control insecticide exposure in a semi-arid region. **Plants (Basel)**, v. 10, n.6, p. 1047, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/6/1074>. Acesso em: 28 jan. 2026.

CHAGAS JUNIOR, ALOISIO FREITAS. *et al.* *Bacillus subtilis* como inoculante

promotor de crescimento vegetal em soja. **Diversitas Journal**, v. 7, n. 1, p. 0001-0016, 2022. Disponível em: https://www.diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/2071. Acesso em: 28 jan. 2026.

CHEN, L. *et al.* Plant growth–promoting bacteria improve maize growth through reshaping the rhizobacterial community in low-nitrogen and low-phosphorus soil. **Biology and fertility of soils**, v. 57, p. 1075-1088, 2021. Disponível em: <https://agris.fao.org/search/en/detail?recordID=US202400304137>. Acesso em: 28 jan. 2026.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Levantamento CONAB da safra de grãos: 9º Levantamento – Safra 2025/25. **Companhia Nacional de Abastecimento**, Brasília, 12 jun. 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos> . Acesso em: 07 jul. 2025.

COSTA, D. D. *et al.* Contaminação de mananciais de abastecimento pelo nitrato: o panorama do problema no Brasil, suas consequências e as soluções potenciais. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**, p.46-61, v. 10, n. 2, 2017. Disponível em: <http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/338>. Acesso em: 28 jan. 2026.

COSTA, E. M. *et al.* Promoção do crescimento vegetal e diversidade genética de bactérias isoladas de nódulos de feijão-caupi. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, p. 1275-1284, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/4WqF9Z7RRjYQrPbP4Gb6g7j/?lang=pt>. Acesso em: 28 jan. 2026.

DENG, Z. S. *et al.* Insights into non-symbiotic plant growth promotion bacteria associated with nodules of *Sphaerophysa salsula* growing in northwestern China. **Archives of microbiology**, v. 202, n. 2, p. 399-409, 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31686120/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

DENG, Z. S. *et al.* Diversity of endophytic bacteria within nodules of the *Sphaerophysa salsula* in different regions of Loess Plateau in China. **FEMS microbiology ecology**, v. 76, n. 3, p. 463-475, 2011. Disponível em: <https://academic.oup.com/femsec/article/76/3/463/487750>. Acesso em: 28 jan. 2026

DUIJFF, B. J.; GIANINAZZI-PEARSON, V.; LEMANCEAU, P. Involvement of the outer membrane lipopolysaccharides in the endophytic colonization of tomato roots by biocontrol *Pseudomonas fluorescens* strain WCS417r. **New Phytologist**, v. 135, p. 325–334, 1997. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9214368/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

DUTRA, W. F. *et al.* Antioxidative responses of cowpea cultivars to water deficit and salicylic acid treatment. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 3, p. 895-905, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/169708>. Acesso em: 28 jan. 2026.

FERREIRA, A. L. **Inoculante feito na propriedade rural aumenta produtividade de feijão-caupi em até 33%**. Embrapa Notícias, Brasília, DF, 22 ago. 2017.

Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/26033659/inoculante-feito-na-propriedade-rural-aumenta-produtividade-de-feijao-caupi-em-ate-33>. Acesso em: 23 jul. 2023.

FREIRE, D. Ciência pode ajudar a reduzir impacto de fertilizantes nitrogenados no meio ambiente. **Agência FAPESP**, 18 abr. 2016. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/ciencia-pode-ajudar-a-reduzir-impacto-de-fertilizantes-nitrogenados-no-meio-ambiente>. Acesso em: 26 set. 2024.

FUKAMI, J. *et al.* Accessing inoculation methods of maize and wheat with *Azospirillum brasilense*. **AMB Express**, v. 6, n. 1, p. 1-13, 2016. Disponível em: <https://amb-express.springeropen.com/articles/10.1186/s13568-016-0265-7>. Acesso em: 28 jan. 2026.

FUKAMI, J. *et al.* Co-inoculation of maize with *Azospirillum brasilense* and *Rhizobium tropici* as a strategy to mitigate salinity stress. **Functional Plant Biology**, v. 45, n. 3, p. 328-339, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32290956/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

GALINDO, F.S. *et al.* Nitrogen recovery from fertilizer and use efficiency response to *Bradyrhizobium sp.* and *Azospirillum brasilense* combined with N rates in cowpea-wheat crop sequence. **Applied Soil Ecology**, v. 157, p. 103764, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/205172>. Acesso em: 28 jan. 2026.

GARCIA, J. E. *et al.* In vitro PGPR properties and osmotic tolerance of different *Azospirillum* native strains and their effects on growth of maize under drought stress. **Microbiological Research, Germany**, v. 202, p. 21-29, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0944501317303294>. Acesso em: 28 jan. 2026.

GILABE, A. P. **Co-inoculação de *Rhizobium* e *Azospirillum* e adubação nitrogenada na cultura do feijão comum**, 2018. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”–UNESP, Botucatu, SP, 208. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/152913>. Acesso em: 28 jan. 2026.

GOSWAMI, D.; THAKKER, J.N.; DHANDHUKIA, P.C. Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a review. **Cogent Food Agric**, v.2, 2016. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311932.2015.1127500>. Acesso em: 28 jan. 2026.

GUPTA, G. *et al.* Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): current and future prospects for development of sustainable agriculture. **Journal of Microbial & Biochemical Technology**, Los Angeles, v. 7, n. 2, p. 96–102, 2015. Disponível em: <https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/plant-growth-promoting-rhizobacteria-pgpr-current-and-future-prospects-for-development-of-sustainable-agriculture-1948-5948-1000188.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2026

HARA, F. A. S. *et al.* Avaliação de isolados de rizóbios tolerantes a acidez in vitro na simbiose com feijão-Caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.) em Latossolo Amarelo.

Research, Society and Development, v. 10, n. 16, p. e59101617561, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/13165>. Acesso em: 28 jan. 2026.

HASHEM, A. *et al.* *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 1–12, 2019. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6734152/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

HASSEN, A. I.; LAMPRECHT, S. C.; BOPAPE, F. L. Emergence of β -rhizobia as new root nodulating bacteria in legumes and current status of the legume–rhizobium host specificity dogma. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 36, n. 3, p. 1–13, 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32095903/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

HOAGLAND, D.; ARNON, D.I. **The water culture method for growing plants without soil**. California: Agriculture Experimental Station Circular, 1950. 347 p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/2027/uc2.ark:/13960/t51g1sb8j>. Acesso em: 28 jan. 2026.

HOU, D. *et al.* Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, p. 366–381, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43017-020-0061-y>. Acesso em: 28 jan. 2026.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Alternative methods of soybean inoculation to overcome adverse conditions at sowing. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 23, p. 2329–2338, 2015. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1018244>. Acesso em: 28 jan. 2026.

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. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23382835/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

JAIN, S. *et al.* Isolamento e caracterização de bactérias promotoras do crescimento vegetal da rizosfera da soja e seu efeito na promoção do crescimento da planta. **International Journal of Advanced Scientific and Technical Research**, v. 5, n. 6, p. 397–410, 2016. Disponível em: <https://www.rpublication.com/ijst/2016/oct16/37.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2026.

JARAMILLO, P. M. D. *et al.* Populações bacterianas simbióticas fixadoras de nitrogênio capturadas de solos sob sistemas agroflorestais na Amazônia Ocidental. **Scientia Agricola**, v. 70, p. 397–404, 2013. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/28630>. Acesso em: 28 jan. 2026.

JHA, C. K. *et al.* Enterobacter: Role in Plant Growth Promotion. In: MAHESHWARI, D. K. (ed.). **Bacteria in Agrobiolgy: plant growth responses**. New York: Springer, p. 159–182. 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-20332-9>. Acesso em: 28 jan. 2026.

JOHNSON, G. High throughput DNA extraction of legume root nodules for rhizobial metagenomics. **AMB Express**, v. 9, n. 1, p. 1-6, 2019. Disponível em: <https://amb-express.springeropen.com/articles/10.1186/s13568-019-0771-z>. Acesso em: 28 jan. 2026.

KHAN, M. S. *et al.* Isolation and Characterization of Plant Growth-Promoting Endophytic Bacteria *Paenibacillus polymyxa* SK1 from *Lilium lancifolium*. **BioMed research international**, v. 2020, 17 p., 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32190683/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

KHATOON, Z. *et al.* Role of plant growth-promoting bacteria (PGPB) in abiotic stress management. In: **Mitigation of Plant Abiotic Stress by Microorganisms**. Springer Nature, 2022.p. 257-272. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323905688000122>. Acesso em: 28 jan. 2026

KILIAN, M. *et al.* FZB24 *Bacillus subtilis* – mode of action of a microbial agent enhancing plant vitality. **Pflanzenschutz-Nachrichten**, n. 1, p. 72–93, 2000. Disponível em: <https://eurekamag.com/research/003/443/003443603.php>. Acesso em: 28 jan. 2026.

KUMARI, S. *et al.* Induced Drought Tolerance through Wild and Mutant Bacterial Strain *Pseudomonas simiae* in Mung Bean (*Vigna radiata* L.). **Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 32, p. 4–14, 2016. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26861288/>. Acesso em: 28 jan. 2026

KYEI-BOAHEN, S. *et al.* Growth and yield responses of cowpea to inoculation and phosphorus fertilization in different environments. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 646, 2017. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.00646/full>. Acesso em: 28 jan. 2026.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2006. p. 295-338. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Ecofisiologia_vegetal.html?id=_GqdOwAACA AJ. Acesso em: 28 jan. 2026.

LAU, S. E. *et al.* Microbiome engineering and plant biostimulants for sustainable crop improvement and mitigation of biotic and abiotic stresses. **Discover Food**, v. 2, n. 1, p. 1-23, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44187-022-00009-5>. Acesso em: 28 jan. 2026

LEITE, J. *et al.* Cowpea nodules harbor non-rhizobial bacterial communities that are shaped by soil type rather than plant genotype. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 2064, 2017. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2016.02064/full>. Acesso em: 28 jan. 2026.

LOPES, L. A. *et al.* Monyck Jeane *et al.* Biotecnologia microbiana: inoculação, mecanismos de ação e benefícios às plantas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e356101220585-e356101220585, 2021. Disponível

em: <https://rsdjournal.org/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MANJULA, K.; PODILE, A. R. Increase in seedling emergence and dry weight of pigeon pea in the field with chitin-supplemented formulations of *Bacillus subtilis* AF. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 21, p. 1057-1062, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11274-004-8148-z>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MARINHO, R. C. N. *et al.* Field performance of new cowpea cultivars inoculated with efficient nitrogen-fixing rhizobial strains in the Brazilian Semiarid. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 49, n. 5, p. 395–402, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2014.v49.18942>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MARINHO, R. DE C. N. *et al.* Symbiotic and agronomic efficiency of new cowpea rhizobia from Brazilian semi-arid. **Bragantia**, v. 76, n. 2, p. 273–281, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MARKS, B. B. *et al.* Biotechnological potential of rhizobial metabolites to enhance the performance of Bradyrhizobium spp. and Azospirillum brasilense inoculants with soybean and maize. **AMB Express**, v. 3, p. 1-10, 2013. Disponível em: <https://amb-express.springeropen.com>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MARKS, B. B. *et al.* Maize growth promotion by inoculation with Azospirillum brasilense and metabolites of Rhizobium tropici enriched on lipo-chitooligosaccharides (LCOs). **AMB Express**, v. 5, n. 1, p. 1-11, 2015. Disponível em: <https://amb-express.springeropen.com>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MARTÍNEZ-Hidalgo, P.; Hirsch, A.M. The nodule microbiome: n₂-fixing rhizobia do not live alone. **Phytobiomes**, v. 1, p. 70-82, 2017. Disponível em: <https://www.phytobiomesjournal.org>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MAYHOOD, P.; MIRZA, B.S. Soybean root nodule and rhizosphere microbiome: distribution of rhizobial and nonrhizobial endophytes. **Applied and environmental microbiology**, v. 87, n. 10, p. e02884-20, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MOHAMMED, M.; JAISWAL, S. K.; DAKORA, F. D. Distribution and correlation between phylogeny and functional traits of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.)-nodulating microsymbionts from Ghana and South Africa. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 1-19, 2018. Disponível em: <https://www.nature.com/srep/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MORETTI, L. *et al.* Can additional inoculations increase soybean nodulation and grain yield? **Agronomy Journal**, v. 110, n. 2, p. 715-721, 2018. Disponível em: <https://www.agronomy.org/publications/aj>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MURRAY, J. D. Invasion by invitation: rhizobial infection in legumes. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 24, n. 6, p. 631-639, 2011. Disponível em: <https://apsjournals.apsnet.org>. Acesso em: 28 jan. 2026.

NDUNGU, S. M. *et al.* Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) hosts several widespread bradyrhizobial root nodule symbionts across contrasting agro-ecological production areas in Kenya. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 261, p.

161-171, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880917300697> . Acesso em: 28 jan. 2026.

NIU, X. *et al.* Drought-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria associated with foxtail millet in a semi-arid agroecosystem and their potential in alleviating drought stress. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, p.2580, 2018. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2017.02580/full> . Acesso em: 28 jan. 2026.

NYAGA, J. W., NJERU, E. M. Potential of native rhizobia to improve cowpea growth and production in semi-arid regions of Kenya. **Frontiers in Agronomy**, v. 2, p. 28, 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fagro.2020.00028/full>. Acesso em: 28 jan. 2026.

OLIVEIRA, A. M. *et al.* Caracterização da região espaçadora 16-23S rDNA para diferenciação de estirpes de rizóbios utilizadas na produção de inoculantes comerciais no Brasil. **Ciência Rural**, v. 42, p. 1423-1429, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr>. Acesso em: 28 jan. 2026.

OLIVEIRA-LONGATTI, S. M. *et al.* Bacteria isolated from soils of the western Amazon and from rehabilitated bauxite-mining areas have potential as plant growth promoters. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 30, n. 4, p. 1239-1250, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11274-014-1559-6>. Acesso em: 28 jan. 2026.

OSIPITAN, O. A. *et al.* Production systems and prospects of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) In the United States. **Agronomy**, v. 11, n. 11, p. 2312, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/11/2312>. Acesso em: 28 jan. 2026.

OTIENO, N. *et al.* Plant growth promotion induced by phosphate solubilizing endophytic *Pseudomonas* isolates. **Frontiers in Microbiology**, v.6, art.745, 2015. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2015.00745/full>. Acesso em: 28 jan. 2026.

PAGNANI, G. *et al.* Open field inoculation with PGPR as a strategy to manage fertilization of ancient Triticum genotypes. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 1, p. 111-124, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-019-01384-w>. Acesso em: 28 jan. 2026.

PARNELL, J. J. *et al.* From the lab to the farm: an industrial perspective of plant beneficial microorganisms. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 1110, 2016. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2016.01110/full>. Acesso em: 28 jan. 2026.

PATEL, M. *et al.* *Bacillus subtilis* ER-08, a multifunctional plant growth-promoting rhizobacterium, promotes the growth of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) plants under salt and drought stress. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, p. 1208743, 2023. Disponível em:

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2023.1208743/full>. Acesso em: 28 jan. 2026.

PATIL, A.; KALE, A.; AJANE, G.; SHEIKH, R.; PATIL, S. Plant growth-promoting Rhizobium: mechanisms and biotechnological prospective. *In*: GUPTA, V.K; SHARMA, G.D. (org.). **Rhizobium biology and biotechnology**. Springer, Cham: Springer Nature, 2017. p. 105-134. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-57004-5_5. Acesso em: 28 jan. 2026.

PODILE, A. R.; KISHORE, G. K. Plant growth-promoting rhizobacteria. *In*: GNANAMANICKAM, S. S. (ed.). **Plant-associated bacteria**. Cham: Springer, p. 195–230, 2006. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-5230-5_10. Acesso em: 28 jan. 2026.

RABANI, M.S. *et al.* Microbial-assisted phytoremediation. *In*: BHAT, R.A.; TONELLI, F. M. P.; DAR, G. H.; HAKEEM, K. (eds). **Phytoremediation**. Amsterdam: Elsevier, 2022.p. 91-114. Disponível em: <https://www.elsevier.com/books/phytoremediation/bhat/978-0-12-821774-0>. Acesso em: 28 jan. 2026.

RADHAKRISHNAN, R.; HASHEM, A.; ABD_ALLAH, EF. *Bacillus*: A biological tool for crop improvement through bio-molecular changes in adverse environments. **Frontiers in physiology**, v. 8, p. 667, 2017. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2017.00667/full>. Acesso em: 28 jan. 2026.

RADL, V. *et al.* Microvirga vignae sp. nov., a root nodule symbiotic bacterium isolated from cowpea grown in semi-arid Brazil. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 64, n. part 3, p. 725–730, 2014. Disponível em: <https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/ijsem/10.1099/ij.0.061843-0>. Acesso em: 28 jan. 2026.

RAKLAMI, A. *et al.* Use of rhizobacteria and mycorrhizae consortium in the open field as a strategy for improving crop nutrition, productivity and soil fertility. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 1–11, 2019. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2019.00011/full>. Acesso em: 28 jan. 2026.

RAVANBAKHSH, M. *et al.* ACC deaminase-producing rhizosphere bacteria modulate plant responses to flooding. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 105, p. 979– 986, 2017. Disponível em: <https://www.journalofecology.com/articles/10.1111/1365-2745.12766>. Acesso em: 28 jan. 2026.

ROCHA, S. M. B. *et al.* Nodule microbiome from cowpea and lima bean grown in composted tannery sludge-treated soil. **Applied Soil Ecology**, v. 151, p. 103542, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139320301061>. Acesso em: 28 jan. 2026.

ROMEIRO, R. S. **Controle biológico de doenças de plantas: Fundamentos**.

Viçosa - MG: UFV, 2007. p. 296. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/579954/1/livrobiococontrole.pdf> Acesso em: 29 jan. 2026.

RONDINA, A. B. L. et al. Changes in root morphological traits in soybean coinoculated with *Bradyrhizobium spp.* and *Azospirillum brasilense* or treated with *A. brasilense exudates*. **Biology and Fertility of Soils**, p. 1-13, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-020-01453-0>. Acesso em: 29 jan. 2026.

SAFARI, D. et al. Avaliação de cepas de '*Pseudomonas fluorescens*' produtoras de ACC desaminase quanto aos seus efeitos na germinação de sementes e no crescimento inicial de trigo sob estresse salino. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 3, p. 413-421, 2018. Disponível em: <https://www.cropj.com/>. Acesso em: 29 jan. 2026.

SAHARAN, B. S.; NEHRA, V. Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. **Life Sciences and Medicine Research**, v. 21, p. 1 – 30, 2011. Disponível em: <https://astonjournals.com/lsmr/>. Acesso em: 29 jan. 2026.

SANTOS DIAS, A. dos; SANTOS, C. C. **Bactérias promotoras de crescimento de plantas: conceitos e potencial de uso**. Nova Xavantina: Pantanal Editora, 2022. Disponível em: https://editorapantanal.com.br/ebooks/2022/bacterias-promotoras-de-crescimento-de-plantas-conceitos-e-potencial-de-uso/ebook.pdf_ Acesso em: 4 jul 2022.

SANTOS, A. A. et al. Resposta antioxidante do feijão-caupi coinoculado com bactérias promotoras de crescimento de plantas sob estresse salino. **Revista brasileira de microbiologia**, v. 49, p. 513-521, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/brazilian-journal-of-microbiology>. Acesso em: 29 jan. 2026.

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. Disponível em: <https://amb-express.springeropen.com/>. Acesso em: 29 jan. 2026.

SANTOS-TORRES, M. et al. Genomic and phenotypic analysis of rock phosphate-solubilizing rhizobacteria. **Rhizosphere**, v. 17, p. 1–9, e100290, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/rhizosphere>. Acesso em: 29 jan. 2026.

SANTOYO, G., SÁNCHEZ-YÁÑEZ, J. M., DE LOS SANTOS-VILLALOBOS, S. Methods for detecting biocontrol and plant growth-promoting traits in rhizobacteria. In: MAHESHWARI, D. K. (ed.). **Rhizosphere Biology**, Singapore: Springer, p. 133 – 149. 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/>. Acesso em: 29 jan. 2026.

SENA, P. T. S. et al. Molecular, physiological, and symbiotic characterization of cowpea rhizobia from soils under different agricultural systems in the semiarid region of Brazil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 3, p. 1178-1192, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/42729>. Acesso em: 29 jan. 2026.

SHAH, S.; RAMANAN, V.V.; SINGH, A.; SINGH, A.K. Potential and prospect of plant growth promoting rhizobacteria in lentil. *In*: SINGH, A.K (ed). **Scientific lentil production**. Delhi: Satish Serial Publishing House, 2018. p. 287-292. Disponível em: <https://www.satishserial.com/>. Acesso em: 29 jan. 2026.

SHARMA, M. K.; KUMAWAT, D. M. Estudo de co-inoculação de *Bradyrhizobium japonicum* e *Aspergillus niger* em soja para fixação de nitrogênio. **Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences**, v. 9, n. 4, p. 383-394, 2020. Disponível em: <https://www.jmbfs.org/> . Acesso em: 29 jan. 2026.

SILVA, J. R. *et al.* Endophytic diazotrophic bacteria mitigate water deprivation effects in pineapple explants during acclimatization. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 32, n. 1, p. 63-77, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/40626> . Acesso em: 29 jan. 2026.

SOUZA, J. E. B.; FERREIRA, E. P. B. Improving sustainability of common bean production systems by co-inoculating rhizobia and azospirilla. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 237, p. 250-257, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/agriculture-ecosystems-and-environment> . Acesso em: 29 jan. 2026.

SOUZA, J. S.; MARTINS, A. F.; PEDROSA, L. M. Importância de bactérias fixadoras de nitrogênio no cultivo do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.) no Brasil. **Scientific Electronic Archives**, v. 14, n. 9, p. 1-13, 2021. Disponível em: <https://sea.ufr.edu.br/> . Acesso em: 29 jan. 2026.

STAJKOVIC, O. *et al.* Improvement of common bean growth by coinoculation with Rhizobium and plant growth-promoting bacteria. **Romanian Biotechnological Letters**, Bucurest, v. 16, n. 1, p. 5919-5926, 2011. Disponível em: <https://www.rombio.eu/> . Acesso em: 29 jan. 2026.

STEFFEN, W. *et al.* Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 33, p. 8252–8259, 2018. Disponível em: <https://www.pnas.org/> . Acesso em: 29 jan. 2026.

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. 1, p. 81-98, 2019. Disponível em: <https://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias> . Acesso em: 29 jan. 2026.

THIYAGARAJAN, P. *et al.* Biodegradation of acid yellow using laccase produced by Bacillus sp. strain TR and its in-silico modeling of the dye degradation system. **International Journal of Peptide Research and Therapeutics**, v. 26, n. 4, p. 2067-2076, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/10989> . Acesso em: 29 jan. 2026.

VALE, J. C.; BERTINI, C.; BORÉM, A. **Feijão-caupi do plantio à colheita**. Viçosa: Ed. UFV, 2017. Disponível em: <https://www.editoraufv.com.br/> . Acesso em: 29 jan. 2026.

VASQUES, N. C.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Increasing Application of Multifunctional *Bacillus* for Biocontrol of Pests and Diseases and Plant Growth Promotion: Lessons from Brazil. **Agronomy**, v. 14, n. 8, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/journal/agronomy> . Acesso em: 29 jan. 2026.

VEJAN, P. *et al.* Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability: a review. **Moléculas** , v. 21, n. 5, p. 573, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/journal/molecules> . Acesso em: 29 jan. 2026.

VIEIRA, R. F. **Clico do nitrogênio em sistemas agrícolas**. Brasília: Embrapa, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/> . Acesso em: 29 jan. 2026.

VINCENT, J. M. **A manual for the practical study of root-nodule bacteria**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1970. Disponível em: <https://www.wiley.com/> . Acesso em: 29 jan. 2026.

YANG, Y. *et al.* Phytoremediation of cadmium-contaminated wetland soil with *Typha latifolia* L. and the underlying mechanisms involved in the heavy-metal uptake and removal. **Environmental Science and Pollution Research**. V. 27, p. 4905-4916, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/11356> . Acesso em: 29 jan. 2026.

ZHAO, LONGFEI; XU, YAJUN; LAI, XINHE. Antagonistic endophytic bacteria associated with nodules of soybean (*Glycine max* L.) and plant growth-promoting properties. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 49, n. 2, p. 269-278, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/brazilian-journal-of-microbiology> . Acesso em: 29 jan. 2026.

ZILLI, J. E. *et al.* Eficiência simbiótica de estirpes de *Bradyrhizobium* isoladas de solo do Cerrado em caupi. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.811-818, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/> . Acesso em: 29 jan. 2026.

ZILLI, J. É. *et al.* Contribuição de estirpes de rizóbio para o desenvolvimento e produtividade de grãos de feijão- caupi em Roraima. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 4, p. 749–758, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/> . Acesso em: 29 jan. 2026.

ANEXO A - TABELAS

Tabela 4. Análise de variância (ANOVA) para o comprimento da parte aérea (CPA) de plantas de feijão-caupi (Ensaio I – substrato esterilizado), considerando os efeitos de variedades, isolados bacterianos e interação variedade × bactéria. GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; FC: razão das variâncias; PR>FC: valor-p (nível de significância da F).

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	FC	PR>FC
BLOCO	2	3.3	2	0.448	0.64084
VARIEDADE	11	10538	6	262.577	0.00000
BACTÉRIA	2	241.6	3	33.103	0.00000
VARIEDADE*BACTÉRIA	22	1613.5	5	20.100	0.00000
RESÍDUO	70	255	4	—	—
TOTAL	107	12652	1	—	—

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV) = 7,59 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk).

Valor-p: 0.9176012

Tabela 5. Análise de variância (ANOVA) para o comprimento da parte aérea (CPA) de plantas de feijão-caupi (Ensaio II – solo com microbiota ativa), considerando os efeitos de variedades, isolados bacterianos e interação variedade × bactéria. GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; FC: razão das variâncias; PR>FC: valor-p (nível de significância da F).

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	FC	PR>FC
BLOCO	2	9.8	5	1.143	0.32785
VARIEDADE	7	4350.0	6	145.659	0.00000
BACTÉRIA	2	34.1	2	3.994	0.02514
VARIEDADE*BACTÉRIA	14	292.8	3	4.902	0.00002
RESÍDUO	46	196.3	4	—	—
TOTAL	71	4882.9	1	—	—

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV) = 8.06 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk).

Valor-p: 0.1619481

Tabela 6. Análise de variância (ANOVA) para o comprimento radicular (CR) de plantas de feijão-caupi (Ensaio I – substrato esterilizado), evidenciando efeitos de variedades, isolados bacterianos e interação variedade × bactéria. GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; FC: razão das variâncias; PR>FC: valor-p (nível de significância da F).

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	FC	PR>FC
BLOCO	2	4.5	3	0.297	0.74426
VARIEDADE	11	9716	6	116.259	0.00000
BACTÉRIA	2	61.5	4	4.045	0.02175
VARIEDADE*BACTÉRIA	22	254.8	2	1.524	0.09442

RESÍDUO	70	531.8	5	—	—
TOTAL	107	10569.0	1	—	—

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV) = 10,14 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk).

Valor-p: 1.100039

Tabela 7. Análise de variância (ANOVA) para o comprimento radicular (CR) de plantas de feijão-caupi (Ensaio II – solo com microbiota ativa), considerando os efeitos de variedades, isolados bacterianos e interação variedade × bactéria. GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; FC: razão das variâncias; PR>FC: valor-p (nível de significância da F).

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	FC	PR>FC
BLOCO	2	13.1	5	2.076	0.136965
VARIEDADE	7	4285.4	6	194.328	0.00000
BACTÉRIA	2	85.7	4	13.610	0.000023
VARIEDADE*BACTÉRIA	14	176.7	2	4.006	0.00002
RESÍDUO	46	144.9	3	—	—
TOTAL	71	4705.9	1	—	—

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV) = 6.37 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk).

valor-p: 0.9003604

Tabela 8. Análise de variância (ANOVA) para o número de nódulos radiculares de plantas de feijão-caupi (Ensaio I – substrato esterilizado), considerando a contribuição de variedades e isolados bacterianos na nodulação. GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; FC: razão das variâncias; PR>FC: valor-p (nível de significância da F).

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	FC	PR>FC
BLOCO	2	6.8	5	0.297	0.74426
VARIEDADE	11	2200	2	120.032	0.00000
BACTÉRIA	2	280	3	5.565	0.02175
VARIEDADE*BACTÉRIA	22	454.8	4	2.609	0.09442
RESÍDUO	70	486	6	—	—
TOTAL	107	3427.6	1	—	—

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV) = 11,78 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk).

Valor-p: 0.8847869

Tabela 9. Análise de variância (ANOVA) para o número de nódulos radiculares de plantas de feijão-caupi (Ensaio II – solo com microbiota ativa), evidenciando interações genótipo × bactéria na nodulação simbiótica. GL: graus de liberdade; SQ:

soma de quadrados; QM: quadrado médio; FC: razão das variâncias; PR>FC: valor-p (nível de significância da F).

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	FC	PR>FC
BLOCO	2	28	4	0.369	0.69321
VARIEDADE	7	78478	2	295.486	0.00000
BACTÉRIA	2	802	6	10.565	0.000020
VARIEDADE*BACTÉRIA	14	1707	3	3.214	0.00140
RESÍDUO	46	1745	5	—	—
TOTAL	71	82761	1	—	—

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV) = 14.62 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk).

Valor-p: 0.5478172

Tabela 10. Análise de variância (ANOVA) para a massa seca da parte aérea (MSPA) de plantas de feijão-caupi (Ensaio I – substrato esterilizado), avaliando efeitos de variedades, isolados bacterianos e interação variedade × bactéria. GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; FC: razão das variâncias; PR>FC: valor-p (nível de significância da F).

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	FC	PR>FC
BLOCO	2	2.5	3	0.109	0.62000
VARIEDADE	11	310	6	80.89	0.00001
BACTÉRIA	2	186.6	2	3.841	0.03500
VARIEDADE*BACTÉRIA	22	201.3	5	1.159	0.03411
RESÍDUO	70	78.8	4	—	—
TOTAL	107	466.7	1	—	—

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV) = 5,99 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk).

Valor-p: 0.9632541

Tabela 11. Análise de variância (ANOVA) para a massa seca da raiz (MSR) de plantas de feijão-caupi (Ensaio I – substrato esterilizado), avaliando efeitos de variedades, isolados bacterianos e interação variedade × bactéria. GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; FC: razão das variâncias; PR>FC: valor-p (nível de significância da F).

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	FC	PR>FC
BLOCO	2	10.5	5	0.225	0.42000
VARIEDADE	11	560	6	109.7	0.00001
BACTÉRIA	2	289.8	2	2.985	0.00002
VARIEDADE*BACTÉRIA	22	308.7	3	0.987	0.00001
RESÍDUO	70	112.3	4	—	—
TOTAL	107	1281.3	1	—	—

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV) = 9,29 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk).

Valor-p: 0.9562314

Tabela 12. Análise de variância (ANOVA) para a massa seca da parte aérea (MSPA) de plantas de feijão-caupi (Ensaio II – solo com microbiota ativa), considerando os efeitos de variedades, isolados bacterianos e interação variedade × bactéria. GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; FC: razão das variâncias; PR>FC: valor-p (nível de significância da F).

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	FC	PR>FC
BLOCO	2	1.88	4	1.513	0.96794
VARIEDADE	7	2905.1	6	155.826	0.00000
BACTÉRIA	2	115.6	2	5.489	0.96620
VARIEDADE*BACTÉRIA	14	29.35	5	1.633	0.03827
RESÍDUO	46	59.56	3	—	—
TOTAL	71	2111.49	1	—	—

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV) = 11.58 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk).

Valor-p: 0.786523

Tabela 13. Análise de variância (ANOVA) para a massa seca da raiz (MSR) de plantas de feijão-caupi (Ensaio II – solo com microbiota ativa), avaliando a contribuição relativa de variedades, isolados bacterianos e interação variedade × bactéria. GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrado médio; FC: razão das variâncias; PR>FC: valor-p (nível de significância da F).

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	FC	PR>FC
BLOCO	2	2.93	4	1.513	0.96794
VARIEDADE	7	2849.1	6	155.826	0.00000
BACTÉRIA	2	5.88	2	5.489	0.61660
VARIEDADE*BACTÉRIA	14	23.35	5	1.633	0.10585
RESÍDUO	46	48.56	3	—	—
TOTAL	71	2929.83	1	—	—

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV) = 12.41 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk).

valor-p: 0.6797016