

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ESCARIFICAÇÃO EM PLANTIO DIRETO
CONSOLIDADO NA SUCESSÃO MILHETO – FEIJÃO
CAUPI INOCULADO COM BACTÉRIAS
SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO**

**Priscila Martins da Silva
Engenheira Agrônoma**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ESCARIFICAÇÃO EM PLANTIO DIRETO
CONSOLIDADO NA SUCESSÃO MILHETO – FEIJÃO
CAUPI INOCULADO COM BACTÉRIAS
SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO**

Discente: Priscila Martins da Silva

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani

Coorientador: Prof. Dr. Leandro Borges Lemos

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

S586e Silva, Priscila Martins da
Escarificação em plantio direto consolidado na sucessão
milheto - feijão caupi inoculado com bactérias solubilizadoras
de fosfato / Priscila Martins da Silva. -- Jaboticabal, 2026
86 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias,
Jaboticabal

Orientador: Carlos Eduardo Angeli Furlani
Coorientador: Leandro Borges Lemos

1. Feijão-caupi. 2. Bactérias solubilizadoras de fosfato. 3.
Nutrição de plantas. 4. Plantio direto. I. Título.

Impacto potencial desta pesquisa

Esta dissertação está diretamente relacionada à promoção de sistemas agrícolas mais sustentáveis e eficientes, contribuindo para o aumento da disponibilidade de alimentos e para a melhoria da qualidade nutricional das culturas, especialmente do feijão-caupi, que possui elevada importância na alimentação humana. Ao integrar práticas conservacionistas, como o sistema plantio direto, com o uso de bactérias solubilizadoras de fosfato, o estudo favorece a otimização do uso de nutrientes, reduz a dependência de fertilizantes químicos e promove maior sustentabilidade produtiva.

Potential Impact of this Research

This dissertation is directly related to the promotion of more sustainable and efficient agricultural systems, contributing to increased food availability and improved nutritional quality of crops, especially cowpea, which plays an important role in human nutrition. By integrating conservation practices, such as the no-tillage system, with the use of phosphate-solubilizing bacteria, this study promotes more efficient nutrient use, reduces dependence on chemical fertilizers, and enhances overall agricultural sustainability.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

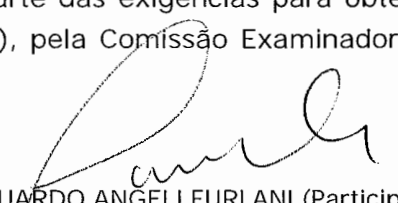
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESCARIFICAÇÃO EM PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO NA SUCESSÃO MILHETO - FEIJÃO CAUPI INOCULADO COM BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO

AUTORA: PRISCILA MARTINS DA SILVA

ORIENTADOR: CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI

COORIENTADOR: COORIENTADOR: LEANDRO BORGES LEMOS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal


Dr. JEAN LUCAS PEREIRA OLIVEIRA (Participação Presencial)
Usina Santa Adélia / Jaboticabal/SP


Prof. Dr. ANDERSON PRATES COELHO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 26 de fevereiro de 2026.

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

PRISCILA MARTINS DA SILVA – Nasceu no dia 4 de dezembro de 2001, no município de Castanhal, estado do Pará. Filha de Edivan Moreira da Silva e Adenise Martins da Silva. Em 2019 iniciou o curso de bacharelado em Agronomia pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), câmpus Capitão Poço. Durante o curso foi bolsista de Iniciação Científica pelo Programa Institucional Voluntário de Iniciação Científica – PIVIC-UFRA (2021/2022) sob a orientação do Prof. Dr. Heráclito Eugênio Oliveira da Conceição e bolsista de Iniciação Científica pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC-UFRA (2022/2023) sob a orientação do Prof. Dr. Michel Sauma Filho. Obteve título de Engenheira Agrônoma no ano de 2024 e, no mesmo ano ingressou no Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, câmpus de Jaboticabal – UNESP/FCAV sob a orientação do Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani e sob a coorientação do Prof. Dr. Leandro Borges Lemos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida, pela saúde e pela força concedida em todos os momentos desta caminhada.

À minha família, pelo amor incondicional, apoio constante, incentivo e compreensão nos momentos de ausência. Obrigada por todo incentivo e por vibrarem a cada conquista alcançada.

Ao meu esposo, Thiago Wenderson, por estar presente em todas as etapas desta trajetória, oferecendo apoio e incentivo, sendo fundamental para a superação dos desafios e para a concretização deste objetivo.

Ao Professor Dr. Carlos Eduardo Furlani, pela orientação, dedicação e contribuições científicas, fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como pelos conselhos transmitidos ao longo dessa trajetória, tanto no âmbito acadêmico quanto pessoal.

Ao Professor Dr. Leandro Lemos, pela coorientação, disponibilidade, dedicação e importantes contribuições ao longo da condução do trabalho, bem como pela amizade construída durante essa trajetória acadêmica.

Aos parceiros de laboratório, Cíntia Oliveira e Hugo Manoel, pela parceria e apoio constante nas atividades de campo. Sem a ajuda e dedicação de vocês, não teria sido possível conduzir e concluir sozinha esse trabalho.

Aos Funcionários do Departamento de Engenharia Rural e Produção Vegetal, em especial ao Professor Dr. Anderson Coelho pelas contribuições e ao Rubens Libório (Faro Fino) por toda alegria durante a condução do experimento.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão – FEPE, por todo comprometimento e profissionalismo ao longo da pesquisa de campo.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal - Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), pela oportunidade de formação acadêmica e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

À Sementes Forte e ao Laboratório Ribersolo, pelo fornecimento de materiais essenciais para a execução do experimento, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimento.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 A cultura do feijão-caupi	3
2.2 A cultura do milho.....	5
2.3 Sistema Plantio Direto (SPD)	7
2.4 Escarificação do solo	11
2.5 Fósforo na agricultura.....	14
2.6 Bactérias solubilizadoras de fosfato.....	16
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1 Descrição da área experimental	20
3.2 Delineamento experimental e tratamentos	22
3.3 Instalação e condução do experimento	23
3.4 Avaliações realizadas	25
3.5 Análise estatística.....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 Qualidade de palhada da cultura do milho	28
4.2 Qualidade de semeadura do feijão-caupi.....	34
4.3 Frações de cobertura do solo	35
4.4 Índice de conteúdo de clorofila.....	36
4.5 Teores foliares e da parte aérea, e acúmulo de nutrientes na parte aérea	38
4.6 Componentes de produção e produtividade	44
4.7 Teores e exportação de nutrientes nos grãos	48
4.8 Qualidade dos grãos de feijão-caupi.....	53
5. CONCLUSÃO.....	58
6. REFERÊNCIAS	59
7. APÊNDICES	72

ESCARIFICAÇÃO EM PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO NA SUCESSÃO MILHETO – FEIJÃO CAUPI INOCULADO COM BACTÉRIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO

RESUMO - O Sistema Plantio Direto pode propiciar aumento a produtividade ao longo dos anos. Entretanto, em algumas áreas pode ocorrer compactação superficial do solo, decorrente principalmente do tráfego de máquinas e da ausência de revolvimento. Nesses casos, o uso esporádico de escarificadores pode ser adotado como alternativa para minimizar esse problema. Associado a isso, o uso de plantas de cobertura e bioinsumos em sistema de sucessão e rotação de culturas, pode auxiliar no aumento de produtividade do sistema de produção. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da escarificação em plantio direto consolidado (25 anos) na sucessão milheto – feijão-caupi inoculado com bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF). O experimento foi conduzido na UNESP-FCAV, em Jaboticabal-SP. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial 3×2 , composto por três sistemas de preparo do solo (sistema plantio direto, escarificação a 15 cm e a 30 cm de profundidade) e dois níveis de inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato (com e sem BSF), realizada apenas na cultura do feijão-caupi. Avaliou-se, no milheto, o acúmulo de biomassa e de nutrientes e, no feijão-caupi, variáveis relacionadas à qualidade de semeadura, características fisiológicas, componentes de produtividade, estado nutricional e qualidade dos grãos. Os resultados indicaram que, para o milheto, não houve efeito significativo dos tratamentos sobre a produção de biomassa e o acúmulo de nutrientes na parte aérea. Para o feijão-caupi, também não foram observadas diferenças na distribuição longitudinal das plântulas. Contudo, na cultura do feijão-caupi, verificou-se efeito significativo do preparo do solo e da inoculação sobre o índice de clorofila no estágio vegetativo V7, além de efeito da inoculação no estágio reprodutivo R2. Os tratamentos também influenciaram os teores de nutrientes na parte aérea e os teores e exportações de macronutrientes nos grãos do feijão-caupi, evidenciando impacto na nutrição da cultura. Por outro lado, os componentes de produção, a produtividade e a qualidade dos grãos do feijão-caupi não foram influenciados pelos tratamentos. Conclui-se que a escarificação apresenta efeitos agrônômicos limitados em sistema plantio direto de longa duração, podendo contribuir para melhorias pontuais nas condições do solo e na resposta das plantas à inoculação microbiana. Assim, seu uso deve ser considerado apenas em situações em que haja necessidade comprovada de correção física do solo.

Palavras-chave: *Bacillus spp.*, manejo do solo, sucessão de culturas, *Vigna unguiculata* L.

SOIL CHISELING IN A LONG-TERM NO-TILLAGE SYSTEM UNDER MILLET–COWPEA SUCCESSION WITH PHOSPHATE-SOLUBILIZING BACTERIA INOCULATION

ABSTRACT – The no-tillage system may promote increases in crop productivity over time. However, in some areas, surface soil compaction may occur, mainly due to machinery traffic and the absence of soil disturbance. In such cases, the occasional use of soil scarifiers may be adopted as an alternative to mitigate this problem. In addition, the use of cover crops and bioinputs within crop succession and rotation systems may contribute to increasing the productivity of agricultural systems. Therefore, this study aimed to evaluate the effect of soil scarification in a consolidated no-tillage system (25 years) under a millet–cowpea succession, with cowpea inoculated with phosphate-solubilizing bacteria (PSB). The experiment was conducted at UNESP–FCAV, Jaboticabal, São Paulo, Brazil. The experimental design was a randomized complete block in a 3 × 2 factorial scheme, consisting of three soil management systems (no-tillage system, scarification at 15 cm, and scarification at 30 cm depth) and two inoculation levels with phosphate-solubilizing bacteria (with and without PSB), applied only to the cowpea crop. In millet, biomass and nutrient accumulation were evaluated, while in cowpea variables related to seeding quality, physiological characteristics, yield components, nutritional status, and grain quality were assessed. The results indicated that, for millet, the treatments had no significant effect on biomass production or nutrient accumulation in the shoot. For cowpea, no differences were observed in the longitudinal distribution of seedlings. However, in cowpea, significant effects of soil management and inoculation were observed on the chlorophyll index at the V7 vegetative stage, as well as an effect of inoculation at the R2 reproductive stage. The treatments also influenced nutrient concentrations in the shoot and the contents and export of macronutrients in cowpea grains, indicating effects on crop nutrition. On the other hand, yield components, grain yield, and grain quality of cowpea were not affected by the treatments. It can be concluded that soil scarification presents limited agronomic effects in long-term no-tillage systems but may contribute to localized improvements in soil conditions and plant responses to microbial inoculation. Therefore, its use should be considered only when there is proven need for physical soil correction.

Keywords: *Bacillus* spp., soil management, crop succession, *Vigna unguiculata* L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área experimental.	20
Figura 2. Precipitação pluvial (mm) e temperaturas máxima e mínima do ar (°C), registradas durante o ciclo do milho, no período de 15/11/2024 a 20/01/2025, em Jaboticabal, SP.	21
Figura 3. Precipitação pluvial (mm) e temperaturas máxima e mínima do ar (°C), registradas durante o ciclo do feijão-caupi, no período de 17/02/2025 a 13/05/2025, em Jaboticabal, SP.....	21
Figura 4. Croqui da área experimental.	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química do solo na camada de 0,00 – 0,20 m.	22
Tabela 2. Tratamentos avaliados.....	23
Tabela 3. Produção de matéria verde (MV) e matéria seca (MS) e relação carbon/nitrogênio (REL. C/N) do milho em função dos preparos do solo.....	29
Tabela 4. Teores de nutrientes na parte aérea do milho — nitrogênio (TNM), fósforo (TPM), potássio (TKM), cálcio (TCaM), magnésio (TMgM) e enxofre (TSM) em função dos preparos do solo.	31
Tabela 5. Acúmulo de nitrogênio (ANM), fósforo (APM), potássio (AKM), cálcio (ACaM), magnésio (AMgM) e enxofre (ASM) na parte aérea do milho em função dos preparos do solo.	33
Tabela 6. Distribuição longitudinal de plantas normal (DLP NORMAL), múltiplo (DLP MÚLTIPLO) e falho (DLP FALHO), em função dos preparos de solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.....	34
Tabela 7. Fração de cobertura do solo nos estádios V5 (FC1), V7 (FC2), R2 (FC3) e R4 (FC4), em função dos preparos de solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.	36
Tabela 8. Índice de clorofila nos estádios V5 (ICF1), V7 (ICF2), R2 (ICF3) e R4 (ICF4), em função dos preparos de solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.....	37
Tabela 9. Teores foliares de nitrogênio (TFN), fósforo (TFP), potássio (TFK), cálcio (TFCa), magnésio (TFMg) e enxofre (TFS) em função dos preparos do solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.	39
Tabela 10. Teores de nutrientes na parte aérea — nitrogênio (TPAN), fósforo (TPAP), potássio (TPAK), cálcio (TPACa), magnésio (TPAMg) e enxofre (TPAS) em função dos preparos do solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.....	40
Tabela 11. Acúmulo de nitrogênio (APAN), fósforo (APAP), potássio (APAK), cálcio (APACa), magnésio (APAMg) e enxofre (APAS) na parte aérea em função dos preparos do solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.	43

Tabela 12. Massa seca da parte área do feijão-caupi (MSFC), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de cem grãos (MCG) e produtividade dos grãos (PG) em função dos preparos de solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.....	45
Tabela 13. Teores de nitrogênio (TNG), fósforo (TPG), potássio (TKG), cálcio (TCaG), magnésio (TMgG) e enxofre (TSG) nos grãos, em função dos preparos do solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.	48
Tabela 14. Exportação de nitrogênio (EXGN), fósforo (EXGP), potássio (EXGK), cálcio (EXGCa), magnésio (EXGMg) e enxofre (EXGS) nos grãos, em função dos preparos do solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.	51
Tabela 15. Rendimento de peneiras (RP14, RP13, RP12, RP11 e RP≥12) em função dos preparos de solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.	53
Tabela 16. Teor de proteína bruta (TPB), tempo de cozimento (TC), tempo máximo de hidratação (TMH) e relação de hidratação (RH) em função dos preparos de solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato. ...	55

1. INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) é uma significativa fonte de proteínas, calorias, vitaminas e minerais essenciais para a nutrição básica das populações de diversos países, sobretudo em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento. Seus grãos são um dos elementos essenciais na alimentação brasileira, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, onde a produção representa cerca de 90% do total nacional (Conab, 2024).

De maneira geral, o feijão-caupi apresenta custo de produção altamente competitivo em comparação a outras culturas, fator que tem impulsionado o interesse de produtores em várias regiões do Brasil. Dessa forma, a cultura tem se expandido para a região Centro-Sul do Brasil, servindo como alternativa durante o período de entressafra, em sucessão às culturas de soja, milho e arroz, alcançando elevada produtividade e retorno econômico satisfatório.

Os sistemas conservacionistas, como o Sistema Plantio Direto (SPD), fundamentam-se em três princípios básicos: (i) ausência de revolvimento do solo, limitada apenas à linha de semeadura; (ii) manutenção contínua de cobertura vegetal sobre a superfície do solo; e (iii) diversificação de culturas via rotação e sucessão. Além disso, por eliminar operações de preparo do solo, o SPD demanda menor quantidade de mão de obra e menor tempo de uso de equipamentos, resultando na redução dos custos de produção quando comparado ao sistema de plantio convencional.

No entanto, a compactação superficial do solo em SPDS tem sido frequentemente relatada no Brasil (Silva et al., 2014; Moraes et al., 2016; Drescher et al., 2017), sendo um elemento que pode restringir o desenvolvimento das culturas agrícolas e, consequentemente, impactar sua produtividade.

Ao identificar a compactação, são empregados práticas de manejo que visam romper a camada compactada e que mobilizem o mínimo possível a camada superficial, buscando preservar a maior quantidade de palha na superfície do solo. O manejo ocasional, incluindo a escarificação e a subsolagem, tem sido sugerido como uma alternativa para lidar com a compactação do solo em sistemas plantio direto (Seki et al., 2015).

Outro fator importante para alcançar boas produtividades, é a quantidade de nutrientes disponíveis no solo, especialmente a quantidade disponível de fósforo. Para

manter a produtividade dos grãos, o fósforo é um dos nutrientes mais limitantes. Quando há deficiência de fósforo nos solos, ocorre comprometimento de processos vitais como fotossíntese e respiração das plantas, resultando em baixo crescimento e produtividade morfológica.

Devido à pedogênese e elevado grau de intemperismo, os solos agrícolas tropicais brasileiros são reconhecidos pela alta capacidade de fixação de fósforo, e apresentam altas concentrações de óxidos de Al e Fe, o que favorece os processos de indisponibilidade desse nutriente. A fim de contornar a disponibilidade limitada de fósforo nos solos, são importadas e aplicadas grandes quantidades de fertilizantes fosfatados para manter a produtividade das culturas, o que coloca o Brasil em uma situação de vulnerabilidade devido à grande dependência da importação de fertilizantes químicos.

Dessa forma, é imprescindível buscar novas alternativas para atender à demanda de fósforo pelas plantas, com o intuito de aprimorar os sistemas agrícolas. Os microrganismos desempenham papel crucial nos ciclos biogeoquímicos, especialmente no ciclo do fósforo, e, por esse motivo, têm sido considerados como tecnologia complementar aos fertilizantes químicos fosfatados.

As bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF) atuam na disponibilização de formas orgânicas e inorgânicas de fósforo por meio de diversos mecanismos fisiológicos e bioquímicos. Entre os principais, destacam-se: (a) acidificação do meio, resultante da extrusão de íons H^+ e/ou de ácidos orgânicos; (b) complexação de cátions metálicos; (c) redução de metais, diminuindo sua capacidade de ligação ao fósforo; (d) liberação de enzimas fosfatases, responsáveis pela mineralização de compostos orgânicos; e (e) solubilização indireta de fosfatos mediada pelo estímulo à produção de ácidos orgânicos pelas plantas (Krishnaraj et al., 2014).

As ações da atividade bacteriana no ciclo do fósforo estão sendo cada vez mais registradas, e essas espécies são conhecidas como bactérias solubilizadoras de fosfato. Atualmente, há poucos produtos agrícolas registrados no MAPA que utilizam microrganismos solubilizadores de fosfato na formulação de bioinoculantes. Entre esses produtos destaca-se o inoculante SolubPhos®, composto pelas cepas BRM 119 (*Bacillus megaterium*) (Oliveira et al., 2009) e BRM 2084 (*Bacillus subtilis*) (Abreu et al., 2017), ambas reconhecidas pela capacidade de solubilizar fosfatos e aumentar a disponibilidade de fósforo no solo.

Diante disso, tornam-se relevantes estudos que investiguem diferentes sistemas de preparo de solo em sucessão milheto – feijão-caupi associados à inoculação com bactérias solubilizadoras de fósforo, como alternativa para aprimorar os sistemas agrícolas.

Parte-se da hipótese de que a escarificação em áreas sob sistema plantio direto consolidado há 25 anos, aliada à utilização dessas bactérias, possa potencializar o desempenho produtivo em sistemas de sucessão de culturas.

Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes sistemas de preparo do solo em área de plantio direto consolidado — plantio direto, escarificação a 15 cm e a 30 cm de profundidade — na sucessão milheto–feijão-caupi, com inoculação da cultura do feijão-caupi com bactérias solubilizadoras de fosfato.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do feijão-caupi

Originário do continente africano, o feijão-caupi vem sendo cultivado no Brasil desde o século XVI. Diferentemente das cultivares de feijão mais difundidas no país, que pertencem à espécie *Phaseolus vulgaris*, essa leguminosa é classificada como *Vigna unguiculata* (L.) Walp (Senar, 2024).

O feijão-caupi foi introduzido no Brasil inicialmente pelo estado da Bahia, por meio dos colonizadores portugueses, a partir de onde se difundiu para diversas regiões do território nacional (Embrapa, 2024). A cultura do feijão-caupi apresenta elevada relevância socioeconômica para a agricultura das regiões Norte e Nordeste do Brasil, constituindo uma das principais fontes de proteína de baixo custo para a alimentação humana. Essa leguminosa possui elevado valor nutricional, com teor médio de proteínas entre 23 e 25%, além de carboidratos, fibras alimentares, vitaminas e minerais. Apresenta ainda baixo teor de lipídios, em torno de 2%, o que contribui para sua importância na dieta alimentar (Embrapa Meio-Norte, 2003). Além disso, a cultura desempenha papel significativo na geração de emprego e renda para a população dessas regiões (Oliveira et al., 2019).

Nos últimos anos, a cultura do feijão-caupi apresentou expressiva expansão para outras regiões do Brasil, sendo conduzida principalmente por médios e grandes produtores em sistemas que utilizam tecnologias semelhantes às aplicadas no cultivo da soja (Freire Filho et al., 2017). Entre essas tecnologias destacam-se a mecanização

completa, abrangendo desde a semeadura até a colheita; o manejo avançado da fertilidade do solo; o uso de sistemas de irrigação complementar de alto desempenho, como o pivô central; além da adoção de cultivares geneticamente melhoradas.

Em contrapartida, nas áreas tradicionais de produção, como nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, o cultivo é predominantemente realizado por pequenos agricultores, que geralmente optam por cultivares de porte prostrado. Essas cultivares, por apresentarem ciclo mais longo, possibilitam, em muitos casos, a realização de mais de uma colheita dentro do mesmo ciclo produtivo.

Embora o cultivo do feijão-caupi tenha avançado para mais regiões, sua produtividade ainda é considerada baixa, variando entre 300 e 900 kg ha⁻¹, dependendo da safra e do sistema agrícola adotado. Segundo Cardoso e Ribeiro (2006), esse desempenho limitado está associado, sobretudo, ao baixo nível tecnológico empregado na produção e à utilização de cultivares tradicionais de reduzido potencial produtivo. Além disso, a baixa fertilidade de solos, a ausência de adubação adequada, a escolha incorreta da época de plantio, as perdas ocasionadas por pragas e doenças e a escassez de insumos constituem fatores adicionais que comprometem o rendimento da cultura (Kyei-Boahen et al., 2017).

O lançamento de novas cultivares pela Embrapa tem contribuído para a transformação do cenário produtivo e comercial do feijão-caupi. Entre elas, destacam-se as cultivares BRS Guariba (2004) e BRS Tumucumaque (2008), que representam cerca de 80% das exportações destinadas ao Oriente Médio, Ásia e Europa (Conac, 2016).

A cultura tem demonstrado progressiva valorização no mercado interno, ao mesmo tempo em que consolida sua presença no comércio internacional. Em 2019, o Brasil exportou aproximadamente 43 mil toneladas do grão, destinadas a 40 países distribuídos pela Europa, Ásia, África, América do Norte e Oriente Médio (Senar, 2024).

Estudos conduzidos por Almeida et al. (2021), ao avaliarem diferentes doses de fósforo em duas cultivares de feijão-caupi (BRS-Guariba e BR 17 Gurguela) nos anos agrícolas de 2011 e 2012, em Teresina, Piauí, Brasil, registraram produtividades variando entre 792 e 827 kg ha⁻¹ para a primeira cultivar e entre 1.400 e 1.407 kg ha⁻¹ para a segunda. Em outro trabalho, Almeida et al. (2017) avaliaram a produtividade do feijão-caupi em Uberaba, Minas Gerais, considerando três épocas de semeadura (14 de dezembro, 14 de janeiro e 14 de fevereiro de 2012). Os autores observaram que,

para a cultivar BRS-Guariba, a produtividade dos grãos foi de 1.373, 1.746 e 3.168 kg ha⁻¹, respectivamente.

2.2 A cultura do milheto

O milheto (*Pennisetum glaucum* L.), ocupa atualmente a sexta posição entre os cereais mais produzidos no mundo, ficando atrás apenas de arroz, trigo, milho, cevada e sorgo. Sua importância tem aumentado não só como planta de cobertura e forrageira, mas também como relevante fonte de segurança alimentar, definida pela FAO como condição na qual todas as pessoas, em todos os momentos, têm acesso físico, social e econômico a alimentos suficientes, seguros e nutritivos, capazes de atender às necessidades dietéticas para uma vida ativa e saudável. Especialmente em regiões sujeitas a severos déficits hídricos, como diversos países da Ásia e da África (FAO, 2023).

O milheto obteve destaque internacional em 2023, quando a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) instituiu o Ano Internacional do Milheto. A iniciativa teve como propósito fomentar a produção sustentável e resiliente dessa cultura, evidenciar sua relevância nutricional e ressaltar seu potencial no enfrentamento dos desafios impostos pelas mudanças climáticas (FAO, 2023).

Trata-se de uma espécie anual de metabolismo fotossintético C4, caracterizado por maior eficiência no uso da luz, da água e na fixação de carbono em condições de altas temperaturas, pertencente à família Poaceae e ao gênero *Pennisetum* (Brunken, 1977). Originário de regiões tropicais semiáridas do continente africano, foi posteriormente difundido para a Ásia, onde se encontram os principais centros de diversidade genética da espécie (Kumar & Niomey, 1989). Devido à sua elevada adaptabilidade, apresenta capacidade de se desenvolver em condições extremas de clima e solo (Kumar et al., 2018), o que possibilitou sua expansão para diferentes regiões do mundo, consolidando-se como importante recurso na alimentação humana e animal (Dias-Martins et al., 2018).

É uma gramínea anual caracterizada por porte elevado, hábito de crescimento ereto e ciclo médio de, aproximadamente, 130 dias. Na matéria seca, apresenta teor de proteína bruta entre 7 e 12% (Salton & Kichel, 1998). O milheto apresenta elevada taxa de crescimento e alta produção de matéria seca, características que favorecem a formação rápida e abundante de cobertura do solo, além de conferir eficiente supressão de plantas daninhas (Netto, 1998). A altura do colmo pode ser superior a 3,0 m e tem

potencial de atingir 1,5 m aos 50 a 55 dias após a emergência. Trata-se de uma espécie pouco exigente quanto às condições edáficas, destacando-se pela boa adaptação a solos de baixa fertilidade, bem como pela tolerância ao déficit hídrico e a temperaturas elevadas.

Essas características têm favorecido a expansão do cultivo do milheto como planta de cobertura em áreas sob sistema de plantio direto, sobretudo no Cerrado, onde predominam condições climáticas adversas. Nessa região, recomenda-se a utilização de elevada densidade de semeadura, superior a 20 kg ha⁻¹, a fim de garantir elevada produção de matéria seca (Pereira-Filho et al., 2003).

O milheto, quando utilizado como cultura de cobertura, forma uma camada densa de biomassa sobre o solo, o que contribui para a redução da erosão hídrica e para a prevenção da lixiviação de contaminantes em direção às camadas mais profundas, protegendo, assim, os lençóis freáticos (Misiunas & Kojienė, 2016). Além disso, seu sistema radicular vigoroso favorece a melhoria da estrutura do solo, reduzindo a compactação e aumentando a capacidade de retenção de nutrientes (Liu et al., 2015).

Coelho et al. (2012) destacam a elevada capacidade de extração de potássio pelas plantas de milheto, evidenciando a relevância desse nutriente nos processos de ciclagem em sistemas de produção agrícola. Enquanto o nitrogênio pode ser suprido parcialmente por meio da fixação biológica, não existem fontes renováveis de potássio no ciclo biogeoquímico, o que torna sua reposição dependente integralmente de depósitos minerais finitos. Nesse contexto, o milheto apresenta alto potencial de uso, uma vez que sua elevada eficiência na absorção e redistribuição de potássio contribui para a manutenção da fertilidade do solo e para o uso mais racional dos nutrientes no sistema.

De acordo com a FAO, em 2018 a produção mundial de grãos de milheto alcançou 31.019.370 toneladas, cultivadas em uma área de 33.560.087 hectares, resultando em produtividade média de 0,924 t ha⁻¹ (FAO, 2020). Nesse período, a Índia destacou-se como o maior produtor global, responsável por 37,52% da produção, seguida por Níger (12,43%), Sudão (8,53%) e Nigéria (7,22%), que, em conjunto, representaram cerca de 65,71% da produção mundial.

Em nível nacional, o milheto tem apresentado, nos últimos anos, expansão da área cultivada, especialmente nas regiões do Cerrado, em razão de seu elevado potencial como cultura de cobertura no SPD (Miranda, 2019).

O sucesso do milheto como planta de cobertura está associado à sua elevada tolerância à seca, à alta adaptabilidade a solos de baixa fertilidade e à grande capacidade de extração de nutrientes, decorrente de seu sistema radicular profundo e vigoroso. Além disso, a cultura apresenta elevada produção de biomassa, tanto de massa verde quanto de matéria seca, contribuindo para a formação de palhada e para a ciclagem de nutrientes no sistema. Os nutrientes absorvidos pela planta permanecem na palhada após sua dessecação, sendo posteriormente reciclados e liberados gradativamente no solo para as culturas subsequentes. Em condições favoráveis de cultivo, o potencial produtivo do milheto pode atingir cerca de 60 t ha⁻¹ de massa verde e até 20 t ha⁻¹ de matéria seca (Embrapa, 2022).

Outra vantagem do milheto é a lenta decomposição de sua palhada, em função da maior relação C/N, liberando lentamente os nutrientes absorvidos pela planta, tornando-os disponíveis para as culturas subsequentes (Chagas, 2004).

2.3 Sistema Plantio Direto (SPD)

O SPD passou a ser inserido na região Sul do Brasil na década de 1970, com o propósito de identificar práticas de manejo do solo capazes de reduzir a erosão em áreas de cultivo sucessivo (Kochhann & Denardin, 2000). Sua adoção se expandiu rapidamente entre os agricultores, alcançando as regiões do Cerrado e se consolidando na década de 1990, especialmente com a migração de produtores do Sul (Vilas Boas et al., 2007).

Calcula-se que o sistema de plantio direto seja adotado em mais de 150 milhões de hectares em escala global (Kassam et al., 2015) e em mais de 33 milhões de hectares no Brasil (Febrapd, 2022).

O SPD é caracterizado como uma prática de manejo conservacionista, voltada à preservação física e química do solo. Seus princípios fundamentais incluem a mínima ausência de revolvimento do solo (restrito apenas às linhas ou sulcos de semeadura), a manutenção da cobertura permanente do solo e a adoção de rotação de culturas com uso de plantas de cobertura (Fagundes et al., 2019). Os resíduos culturais mantidos sobre a superfície do solo devem proporcionar cobertura mínima de 50% ou, alternativamente, atingir o equivalente a 6 t ha⁻¹ de matéria seca (Fávero et al., 2001). Esse nível de cobertura é considerado um dos requisitos essenciais para o êxito do SPD.

O SPD passou a ser reconhecido como uma tecnologia agrícola moderna somente após o avanço das pesquisas científicas conduzidas nos Estados Unidos e na Europa, que demonstraram a viabilidade do controle químico de plantas daninhas, substituindo a necessidade de cultivos mecânicos entre as linhas (Derpsch, 1998).

Um dos principais desafios no uso de herbicidas no SPD era a baixa eficiência desses produtos quando aplicados sobre a palhada, uma vez que os herbicidas pré-emergentes foram originalmente desenvolvidos para condições de solo sem cobertura vegetal. Contudo, o uso de herbicidas torna-se uma prática indispensável para a condução adequada de cultivos nesse sistema.

Os herbicidas desempenham papel fundamental na formação da palhada, a qual constitui um dos pilares do SPD. A aplicação de herbicidas contribui de maneira eficiente para a dessecação da vegetação presente e, conseqüentemente, para a produção e manutenção da cobertura vegetal necessária à implementação adequada do sistema.

Entre as principais vantagens desse sistema, quando comparado ao sistema de preparo convencional (SPC), destacam-se a redução das perdas de solo por erosão, maior retenção de água e manutenção da umidade por períodos prolongados, diminuição do escoamento superficial, melhor controle de plantas espontâneas, menor compactação do solo, redução dos custos com operações e uso de maquinário, incremento nos teores de matéria orgânica e elevação da produtividade (Mottet et al., 2015).

O conhecimento detalhado do tipo de solo é um requisito fundamental para a adoção do SPD, assim como a identificação e eliminação prévia de camadas adensadas ou compactadas. O nivelamento da superfície e a correção da acidez do solo também devem ser realizados antes da implantação do sistema, uma vez que, após sua adoção, não há revolvimento do solo (Silva et al., 2000).

Nesse contexto, torna-se necessário um preparo inicial convencional, conduzido de forma criteriosa e eficiente, para assegurar as condições estruturais adequadas ao estabelecimento e ao pleno desenvolvimento do SPD, garantindo sua longevidade e funcionalidade ao longo dos anos.

A eficiência do SPD varia conforme o tipo de solo, uma vez que solos arenosos e argilosos apresentam limitações distintas que influenciam a sustentabilidade do sistema. Em solos arenosos, a baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, a rápida decomposição da palhada e a menor estabilidade estrutural dificultam a

manutenção de um ambiente favorável ao desenvolvimento radicular (Silva et al., 2020).

Já os solos argilosos, são mais suscetíveis à compactação, especialmente sob tráfego em condições úmidas, o que favorece a formação de camadas adensadas que restringem a infiltração de água e o aprofundamento das raízes (Moraes et al., 2014). Além disso, a formação de crostas superficiais e a necessidade de elevada quantidade de palhada reforçam a importância de rotações com espécies de sistema radicular agressivo para manutenção da estrutura física. Assim, compreender os desafios específicos de cada tipo de solo é essencial para o correto estabelecimento e funcionamento do SPD.

Segundo a Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (Febrapdp, 2024), o SPD representa a alternativa mais adequada para o avanço da agricultura moderna, por aliar aumento da capacidade produtiva à conservação ambiental. Essa prática contribui para a produção sustentável de alimentos, fibras e energia, além de gerar riquezas e divisas para o país.

Esse sistema tem se consolidado como alternativa às limitações associadas ao preparo convencional do solo, que, devido ao revolvimento intenso, ocasiona perdas de matéria orgânica, uma vez que o revolvimento aumenta a aeração do solo e a exposição da matéria orgânica à atividade microbiana, acelerando sua decomposição e mineralização, além de compactação e processos erosivos. Em contrapartida, o SPD favorece a manutenção de resíduos vegetais sobre a superfície, o que contribui para a melhoria da estrutura do solo por meio da ação radicular, reduz a compactação, além de aumentar a infiltração de água e a retenção de nutrientes (Passos; Alvarenga; Santos, 2018).

Silveira et al. (2020) evidenciaram que o SPD reduz de forma significativa a erosão do solo, considerada uma das principais limitações da agricultura convencional, sobretudo em áreas com maior declividade. A manutenção da cobertura com resíduos culturais e plantas de cobertura protege a superfície contra o impacto das chuvas, preserva a estrutura do solo e reduz o escoamento superficial. Além disso, Imbana et al. (2021) destacam que a presença contínua de cobertura vegetal e a ausência de revolvimento do solo favorecem o acúmulo de carbono, sendo que o uso de leguminosas pode intensificar esse efeito em curto prazo.

O sucesso do sistema depende diretamente da adequada produção de palhada, de sua permanência sobre a superfície do solo e do manejo eficiente para evitar a

compactação. Quando a compactação ocorre em áreas sob SPD, sua correção deve priorizar práticas que dispensem o preparo convencional com máquinas agrícolas. Entre as alternativas mais utilizadas, destaca-se a rotação de culturas, que possibilita a exploração do solo por espécies com sistemas radiculares mais profundos e vigorosos e com maior diversidade. Contudo, na ausência de resultados satisfatórios com essa prática, podem ser adotadas intervenções mecânicas esporádicas (Andrade et al., 2018).

Como alternativa complementar ao preparo ocasional, o uso de plantas de cobertura desempenha papel central na melhoria da qualidade do solo, sobretudo em SPD, destacando-se espécies como milheto (*Pennisetum glaucum*), braquiária (*Urochloa spp.*), crotalária (*Crotalaria spp.*). Essas espécies contribuem para maior agregação do solo e aumento da diversidade biológica, além de possuírem sistemas radiculares capazes de penetrar em camadas compactadas, adicionar carbono orgânico e elevar a resistência do solo à compactação (Blanco-Canqui et al., 2011). Adicionalmente, auxiliam na mitigação da compactação e na redução da incidência de doenças de solo (Chaer & Mendes, 2022). Dessa forma, o uso de plantas de cobertura pode diminuir a necessidade do preparo ocasional, favorecendo a regeneração natural da estrutura do solo.

Evidências recentes apontam que a rotação de culturas, aliada ao uso de plantas de cobertura com sistemas radiculares profundos, como gramíneas e leguminosas, favorece a regeneração da estrutura do solo após intervenções de mobilização, prolongando os efeitos positivos do preparo ocasional (Blanco-Canqui & Lal, 2020). Assim, a integração dessas práticas conservacionistas contribui para a construção de sistemas agrícolas mais resilientes.

Diversos estudos brasileiros têm demonstrado que intervenções mecânicas esporádicas em áreas sob SPD podem promover melhorias físicas temporárias, mas, de modo geral, não resultam em incrementos consistentes de produtividade. Drescher et al. (2011) observaram que práticas como escarificação e aração auxiliaram na redução da compactação e no aumento da porosidade do solo; contudo, tais efeitos apresentaram curta duração, limitando-se a aproximadamente dois anos, após os quais ocorreu a reconsolidação natural do solo. Resultados semelhantes foram relatados por Moraes (2013), ao avaliar um Latossolo muito argiloso sob SPD consolidado. O autor verificou que a escarificação anual reduziu a resistência do solo à penetração apenas por períodos inferiores a 22 meses, sem refletir em aumento de produtividade para a

cultura da soja, reforçando que o tempo de adoção do SPD exerce maior influência sobre a qualidade física do solo do que o revolvimento mecânico pontual.

Fidalski et al. (2015), avaliando intervenções ocasionais e a incorporação de calcário em SPD de longo prazo, também constataram que a redução da densidade do solo promovida pelo revolvimento desapareceu em poucos meses, sem impactos positivos no rendimento de milho, aveia e soja. Em conjunto, esses estudos indicam que intervenções mecânicas esporádicas podem aliviar temporariamente a compactação, mas raramente resultam em benefícios agrônômicos duradouros, especialmente quando o SPD está bem consolidado e associado a rotações de culturas adequadas.

2.4 Escarificação do solo

A escarificação do solo consiste em uma prática de manejo voltada à melhoria de sua estrutura, promovendo maior permeabilidade, aeração e capacidade de retenção de água e nutrientes em solos compactados. Essa técnica contribui para a redução da densidade do solo, favorecendo o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, podendo resultar em ganhos de produtividade das culturas (Souza, 2021).

Além de seu uso na agricultura, a escarificação do solo também é aplicada em áreas de reflorestamento, projetos de restauração de ambientes degradados e em atividades de mineração, com o objetivo de minimizar impactos ambientais e restabelecer a capacidade produtiva do solo (Pellens et al., 2018).

O preparo mínimo do solo por meio da escarificação é considerado uma prática que provoca alterações mais restritas na estrutura do solo, auxiliando na mitigação localizada da compactação, no incremento da porosidade e na redução da densidade (Nagahama et al., 2016). Essa prática é considerada conservacionista porque mobiliza apenas faixas estreitas do solo, sem provocar inversão das camadas, além de manter a maior parte da palhada na superfície. Dessa forma, caracteriza-se como um revolvimento limitado, que busca corrigir limitações físicas específicas sem comprometer os princípios do manejo conservacionista.

Por demandar menor revolvimento, essa técnica reduz as perdas por erosão e exige menor uso de máquinas e implementos comprado ao convencional, o que resulta em ganhos de capacidade produtiva do solo e diminuição do consumo de combustíveis.

Esse tipo de equipamento atua em profundidades de 20 a 30 cm, promovendo menor revolvimento superficial do solo por meio do uso de hastes, sem ocasionar o tombamento da leiva e garantindo a permanência da maior parte da palhada na superfície (Cortez et al., 2011). A escarificação em áreas sob SPD também pode favorecer a redistribuição da matéria orgânica (MO), deslocando parte do conteúdo presente nas camadas superficiais para níveis mais profundos. Esse processo contribui para o aumento dos teores de MO até aproximadamente 20 cm de profundidade no solo (Camara & Klein, 2005).

A escarificação é amplamente utilizada como prática de manejo, inclusive em áreas sob SPD consolidado, devido à sua eficácia na mitigação da compactação do solo. Solos compactados apresentam elevada resistência mecânica à penetração radicular, o que limita o aprofundamento das raízes e pode comprometer o desenvolvimento das culturas, sobretudo em condições de déficit hídrico. Nessa perspectiva, a escarificação favorece o crescimento radicular em maiores profundidades, ampliando a capacidade das plantas de explorar o solo em busca de água para atender suas necessidades fisiológicas (Abreu; Reichert; Reinert, 2004).

A principal diferença entre escarificação e subsolagem está na profundidade e na intensidade do revolvimento do solo. Enquanto a escarificação atua de forma mais superficial, geralmente entre 20 e 30 cm, rompendo camadas compactadas com menor mobilização de solo, a subsolagem atua em maiores profundidades, acima de 35–40 cm, promovendo a ruptura de camadas adensadas. Diferentemente da escarificação, que pode ser utilizada como prática de preparo ou manejo ocasional do solo, a subsolagem não é considerada um sistema de preparo, sendo empregada especificamente como operação mecânica para a correção de compactação em camadas mais profundas do solo, geralmente com maior demanda energética e maior perturbação estrutural.

Apesar dos diversos benefícios proporcionados pelo SPD, a adoção desse manejo pode favorecer a ocorrência de compactação, resultando em aumento da densidade do solo, redução da porosidade e menor capacidade de infiltração de água (Mioranza et al., 2015). Para mitigar os efeitos negativos da compactação em áreas sob o sistema implantado ou consolidado, algumas estratégias têm sido recomendadas, entre elas a escarificação mecânica (Seki et al., 2015).

Diversos estudos têm investigado a escarificação mecânica, com foco em seus efeitos sobre a compactação do solo e na durabilidade desses resultados, por tratar-se

de uma prática temporária realizada por meio de implementos agrícolas, como o escarificador (Reis et al., 2022). Girardello et al. (2014) verificaram que o uso de escarificadores mecânicos promoveu redução nos valores de resistência do solo à penetração. De forma semelhante, Drescher et al. (2016), ao avaliarem a persistência desse efeito em sistema de plantio direto, observaram diminuição da resistência do solo à penetração por um período de até 18 meses após a intervenção.

A escarificação quando realizada de forma adequada, pode proporcionar diversas vantagens. Do ponto de vista econômico, destaca-se pela redução do tempo de trabalho por área comparado ao sistema convencional, menor consumo de combustível, diminuição da necessidade de mão de obra e pela menor demanda de aquisição de equipamentos. Sob a perspectiva conservacionista, contribui para menor desestruturação do solo, redução da erosão e manutenção de matéria orgânica na superfície. No entanto, apesar desses benefícios, a prática não substitui integralmente a ação da grade e do arado, os quais promovem maior desagregação do solo e ampliam a área de contato entre solo e semente (Mechione, 2023).

A escarificação pode exercer efeitos diretos e indiretos, tanto em curto quanto em longo prazo, sobre os fatores que influenciam a formação de agregados, uma vez que expõe o solo superficial à superfície, submetendo-o a diferentes ciclos de umedecimento e secagem (Paustian et al., 1997). Contudo, o uso inadequado de máquinas agrícolas pode resultar em sérios prejuízos, como a desestruturação do solo e alterações indesejáveis em suas propriedades físicas, destacando-se a compactação, especialmente quando o preparo é realizado sob condições inadequadas de umidade.

Cabe destacar que a escarificação não é uma prática indicada para todos os tipos de solo ou condições de cultivo. Quando utilizada de forma inadequada ou excessiva, pode provocar efeitos adversos, como aumento da compactação, perdas de nutrientes e intensificação da erosão, com reflexos negativos na produtividade agrícola (Reichert et al., 2010). Assim, sua adoção deve ser criteriosa, considerando as características edáficas e as práticas de manejo em uso, de modo a minimizar impactos negativos e potencializar os benefícios produtivos e ambientais.

Diante desse contexto, evidencia-se a necessidade de ampliar os estudos em condições de campo, a fim de determinar níveis ou estados de compactação que afetam o rendimento das culturas, bem como definir o momento adequado e as práticas mecânicas mais eficientes para mitigar os efeitos da compactação.

2.5 Fósforo na agricultura

O fósforo é um macronutriente fundamental para o desenvolvimento e a produtividade das plantas. Esse elemento participa de diversos processos metabólicos, como a divisão celular, a regulação de vias metabólicas e o crescimento vegetal, além de ser indispensável no fornecimento de energia bioquímica por meio do ATP (Song et al., 2019).

Para o adequado desenvolvimento do feijão-caupi, concentrações de fósforo no solo próximas de 10 mg kg^{-1} são consideradas suficientes para suprir as demandas da cultura (Araújo et al., 2018). Em função das características químicas dos solos e do comportamento do fósforo no meio, as recomendações de adubação geralmente variam entre 20 e $60 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ (Embrapa, 2003). Em termos de exportação de nutrientes, estima-se que o feijão-caupi remova aproximadamente 44% do fósforo total acumulado na planta por ocasião da colheita (Sampaio e Brasil, 2009).

No feijão-caupi, o fósforo exerce efeito positivo sobre a produtividade de vagens e grãos, além de favorecer o desenvolvimento radicular e o processo de nodulação (Karikari et al., 2015). De acordo com Melo (2016), embora a cultura não apresente elevada demanda de fósforo, esse nutriente é considerado o principal fator limitante para a produção de seus grãos. Como grande parte dos solos das regiões produtoras no Brasil possui baixos teores de fósforo disponível, a adubação química tem sido adotada como estratégia pelos agricultores para elevar a produtividade.

Quando presente em níveis adequados, o fósforo favorece o desenvolvimento radicular e eleva o potencial produtivo da cultura, promovendo maior acúmulo de massa seca da parte aérea, incremento no número de vagens e aumento da massa de 100 grãos (Fageria et al., 2015).

De acordo com o Boletim 100 – *Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo* (Wutke et al., 2022), as doses de fósforo indicadas para o feijão-caupi variam em função do teor de P-resina no solo e da produtividade esperada, geralmente situada entre 1,0 e $1,5 \text{ t ha}^{-1}$. Em solos com baixo teor de fósforo ($< 16 \text{ mg dm}^{-3}$), recomenda-se a aplicação de 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Para teores considerados médios ($16\text{--}40 \text{ mg dm}^{-3}$), a dose recomendada é de 40 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Já em solos cujo teor de P-resina é superior a 40 mg dm^{-3} , não se indica a adubação fosfatada no plantio, em razão do elevado teor do nutriente já acumulado no sistema (Wutke et al., 2022).

Apesar da cultura não exigir elevada demanda desse nutriente, as leguminosas apresentam maior exigência de fósforo em comparação a outras culturas, em grande parte devido às características de seu sistema radicular, o qual explora um volume de solo relativamente reduzido (Haling et al., 2016).

Além disso, o fósforo é considerado um elemento decisivo para o desenvolvimento das leguminosas, especialmente do feijão, por influenciar diretamente a maturação precoce, o enchimento de grãos e a formação do sistema radicular. Em condições de baixa disponibilidade desse nutriente, as plantas tendem a apresentar sintomas de deficiência, resultando em menor potencial produtivo (Mitran et al., 2018).

O fósforo no solo pode ser encontrado em quatro formas principais. A forma fixada corresponde ao fósforo ligado de maneira estável a nutrientes como Fe, Ca e Al, sendo considerada não lábil e variando de acordo com as propriedades de cada tipo de solo. A forma imobilizada se refere ao fósforo presente em compostos orgânicos, indisponível diretamente para as plantas, mas passível de ser convertido em formas inorgânicas assimiláveis por meio da mineralização da matéria orgânica. Já a forma adsorvida consiste no fósforo retido nas partículas do solo, especialmente nos coloides de argila e matéria orgânica, que, embora não esteja prontamente disponível, pode ser liberada gradualmente por meio de trocas iônicas com as raízes. Por fim, a fração assimilável corresponde ao fósforo dissolvido na solução do solo, facilmente absorvido pelas plantas e considerado a principal fonte desse nutriente para o crescimento vegetal (Kehrwald, 2025).

A disponibilidade do nutriente no solo está intimamente relacionada ao pH. Em condições de acidez, a eficiência de aproveitamento desse nutriente pode ser igual ou inferior a 30% (Van de Wiel et al., 2016). Por outro lado, em solos com pH próximo à neutralidade e em equilíbrio, a utilização do fósforo pode alcançar até 100%, embora ainda possam ocorrer perdas decorrentes de outros fatores (Kehrwald, 2025).

A deficiência de fósforo afeta diretamente o crescimento vegetal e, por consequência, a produtividade das culturas, uma vez que esse nutriente é essencial para processos metabólicos como fotossíntese e respiração (Carstensen et al., 2018). Em condições de ausência ou baixa disponibilidade de fósforo, os sintomas manifestam-se inicialmente em folhas mais velhas, que adquirem coloração escura devido à mobilidade do nutriente na planta (Prado, 2021). Do ponto de vista morfológico, observa-se a formação de folhas menores e estreitas (Meng et al., 2021). Essas alterações fisiológicas e morfológicas resultam em queda de produtividade

(Malhotra et al., 2018) e, no caso das leguminosas, em redução da fixação biológica de nitrogênio (Liu et al., 2018).

Estima-se que grande parte da produção mundial de alimentos dependa de P (Wellmer & Scholz, 2017). No entanto, a maioria dos solos apresenta, em sua condição natural, baixos teores de fósforo disponível, o que torna necessária a aplicação de fertilizantes fosfatados para atender às exigências nutricionais das culturas (López-Arredondo et al., 2014). Essa prática, entretanto, tem levado a um novo cenário, em que os solos acumulam elevados teores de fósforo total — muitas vezes em excesso —, mas com baixa disponibilidade da forma assimilável pelas plantas.

Nas últimas cinco décadas, estima-se que aproximadamente 50% do fósforo aplicado na agricultura tenha permanecido retido no solo. No Brasil, projeções indicam que, dos 45,7 milhões de toneladas de fósforo incorporados desde a década de 1960, cerca de 22,8 milhões de toneladas ainda permanecem fixados (Withers et al., 2018).

O aumento do uso de fertilizantes fosfatados para suprir a demanda das culturas representa uma prática ambientalmente arriscada e que eleva significativamente os custos de produção. Em 2023, aproximadamente 57% dos fertilizantes fosfatados usados no Brasil foram importados, evidenciando a dependência do país em relação ao mercado externo (Insper Agro Global, 2025).

Diante da baixa disponibilidade de fósforo nos solos e da reduzida eficiência desses insumos, torna-se necessário propor alternativas viáveis e sustentáveis capazes de atender às exigências nutricionais das plantas nesse cenário de incerteza quanto à sua disponibilidade (Rawat et al., 2021).

Uma das estratégias alternativas para mitigar a escassez de nutrientes e ampliar a disponibilidade de fósforo no solo consiste no uso de resíduos orgânicos, prática considerada essencial para a manutenção e incremento da produtividade (Pantano et al., 2016). Nesse processo, os microrganismos do solo exercem papel central, tornando o fósforo acessível às plantas por meio de mecanismos como solubilização, quelatização e mineralização (Lima et al., 2024).

2.6 Bactérias solubilizadoras de fosfato

Entre os macronutrientes essenciais para o desenvolvimento vegetal, o fósforo se destaca como um dos principais fatores limitantes da produção agrícola, sobretudo em função de sua baixa disponibilidade nos solos cultivados. Para contornar essa restrição, alternativas biotecnológicas têm sido empregadas com o objetivo de

aumentar a eficiência de uso do nutriente. Nesse contexto, diversas bactérias presentes na rizosfera, especialmente as bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF), vêm sendo utilizadas como biofertilizantes. Espécies como *Bacillus subtilis* e *Bacillus megaterium* atuam na solubilização do fósforo retido e imobilizado nas partículas do solo e também na mineralização de P de compostos orgânicos, disponibilizando-o para absorção pelas plantas e, conseqüentemente, promovendo incremento na produtividade (Inual et al., 2009).

Os solubilizadores de fósforo, quando utilizados em escala comercial, constituem de inoculantes já aplicados em diferentes regiões do Brasil, com expressiva relevância tanto para a rentabilidade dos produtores quanto para a preservação ambiental. Por se tratar de um insumo biológico, não causa impactos negativos ao solo e pode ser aplicado diretamente no momento do plantio ou incorporado às sementes. No entanto, essa prática deve ser realizada em ambiente sombreado e o plantio deve ocorrer imediatamente após a inoculação, ou no máximo em até 24 horas, uma vez que o contato prolongado do inoculante com fertilizantes e produtos químicos pode comprometer sua eficiência (Oliveira et al., 2020).

O fósforo no solo pode ocorrer em duas formas principais: orgânica (Po) e inorgânica (Pi). A fração orgânica está associada a resíduos em decomposição, como restos vegetais, cuja mineralização é mediada por microrganismos, resultando na liberação de Pi para o solo (Bini & Lopez, 2016). A biomassa microbiana de Po constitui a fonte mais rapidamente acessível para as plantas, especialmente em solos com deficiência de fósforo. Nessa condição, os microrganismos desempenham papel fundamental ao absorver e imobilizar o nutriente, promovendo sua liberação gradual ao solo (Withers et al., 2018).

Os microrganismos endofíticos, em sua maioria bactérias e fungos, colonizam diferentes tecidos vegetais, como galhos, raízes e folhas, sem provocar danos relevantes ao hospedeiro. Esses organismos utilizam a planta como fonte de nutrientes e proteção, e, em contrapartida, podem sintetizar substâncias bioativas, incluindo antibióticos e enzimas, que contribuem para a defesa e o desenvolvimento vegetal (Challis & Hapwood, 2003).

Esses microrganismos apresentam relevância para a agricultura não apenas pela sua capacidade de disponibilizar nutrientes, mas também pelo potencial de atuação como agentes de biocontrole e vetores genéticos. Ademais, são capazes de sintetizar moléculas biologicamente ativas, como toxinas, antibióticos e outros

compostos de interesse biotecnológico, desempenhando papel significativo na manutenção da sobrevivência e no desenvolvimento do hospedeiro (Abreu, 2014).

De acordo com Batista et al. (2016) e Diniz et al. (2016), a associação de microrganismos solubilizadores aos fertilizantes pode promover, de forma progressiva e contínua, o aumento da atividade enzimática microbiana e a intensificação da ciclagem de nutrientes no solo. Esse processo indica a existência de efeito residual do fósforo, cuja liberação é catalisada pela ação desses microrganismos.

As bactérias solubilizadoras de fosfato apresentam caráter multifuncional, atuando não apenas no ciclo do fósforo, mas também na promoção do crescimento vegetal por meio da síntese e liberação de fitohormônios (Ahmad et al., 2018). Dentre esses reguladores, destaca-se a auxina, diretamente associada à divisão e diferenciação celular, influenciando o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, favorecendo a absorção de fósforo pelas plantas (Timofeeva, Galyamova & Sedykh, 2022). A inoculação com BSF tem sido relacionada ao aumento da produção de auxina e à formação de raízes finas e laterais, resultando na expansão do sistema radicular e na maior aquisição de nutrientes, especialmente do fósforo, cuja mobilidade no solo é naturalmente limitada (Sousa et al., 2021).

A coinoculação de BSF com bactérias fixadoras de nitrogênio tem demonstrado efeitos benéficos em leguminosas. Essa interação promoveu aumento no número de nódulos radiculares, maior acúmulo de nitrogênio e fósforo, estímulo ao crescimento radicular e da parte aérea, refletindo em elevação da produtividade (Kaschuk et al., 2022). Em feijão-mungo, a combinação entre *Rhizobium* e BSF resultou em maior nodulação e melhor estado nutricional (Ahmad et al., 2018), enquanto em soja a coinoculação proporcionou incrementos no crescimento, rendimento e qualidade dos grãos, possibilitando ainda a redução de 50% da adubação nitrogenada e de 25% da adubação fosfatada (Shome, Barman & Solaiman, 2022).

As pesquisas envolvendo BSF têm sido conduzidas em diferentes grupos de plantas, incluindo leguminosas, cereais e gramíneas. No caso do milho, Sousa et al. (2021) avaliaram o efeito de linhagens de *Bacillus* em duas condições experimentais: inicialmente em solução nutritiva e, posteriormente, em campo, associadas à adubação fosfatada (com e sem suplementação de P). O estudo buscou identificar a capacidade dessas linhagens em produzir moléculas relacionadas ao ácido indolacético (AIA), bem como seus efeitos sobre o desenvolvimento radicular, acúmulo de biomassa, absorção de nutrientes e rendimento de grãos. Os resultados demonstraram que as linhagens

B2084, B119 e B32 apresentaram melhor desempenho em sistema hidropônico, enquanto B116 e B119 se destacaram em campo, promovendo maior produtividade e acúmulo de fósforo nos grãos. Esses achados reforçam o potencial dessas bactérias tanto na síntese de moléculas semelhantes ao AIA quanto na solubilização de fosfatos, resultando em melhorias nas características agronômicas da cultura.

Em leguminosas, particularmente na soja, pesquisas com inoculação microbiana evidenciaram que isolados bacterianos contribuem para o aumento das concentrações de nitrogênio, fósforo e magnésio, além de promoverem elevação no índice de clorofila e no acúmulo de matéria seca (Reis et al., 2022).

Em pesquisa conduzida com o feijoeiro comum em Jaboticabal, São Paulo, Souza et al. (2023) avaliaram o efeito de diferentes doses de bactérias em associação à aplicação de P_2O_5 . Os resultados indicaram que a inoculação com BSF na dose de 192 mL ha^{-1} promoveu a exportação de $15,28 \text{ kg ha}^{-1}$ de P, enquanto a dose de 159 mL ha^{-1} resultou em incremento de 389 kg ha^{-1} na produtividade, correspondendo a um aumento de 12% em relação ao manejo sem inoculação. Entretanto, para a cultura do feijão-caupi ainda não há registros de estudos que explorem de forma aprofundada a dinâmica e a complexidade da ação dessas bactérias em condições de campo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área experimental

O experimento foi realizado em área agrícola experimental da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, no município de Jaboticabal - SP no período de novembro de 2024 a maio de 2025. Inicialmente, cultivou-se o milho de novembro de 2024 a janeiro de 2025 e, em sucessão o feijão-caupi de fevereiro a maio de 2025. A área é próxima das coordenadas geodésicas de latitude $21^{\circ}14'56''$ S e longitude $48^{\circ}16'48''$ W, apresentando altitude local de 560 m com 4% de declividade média.

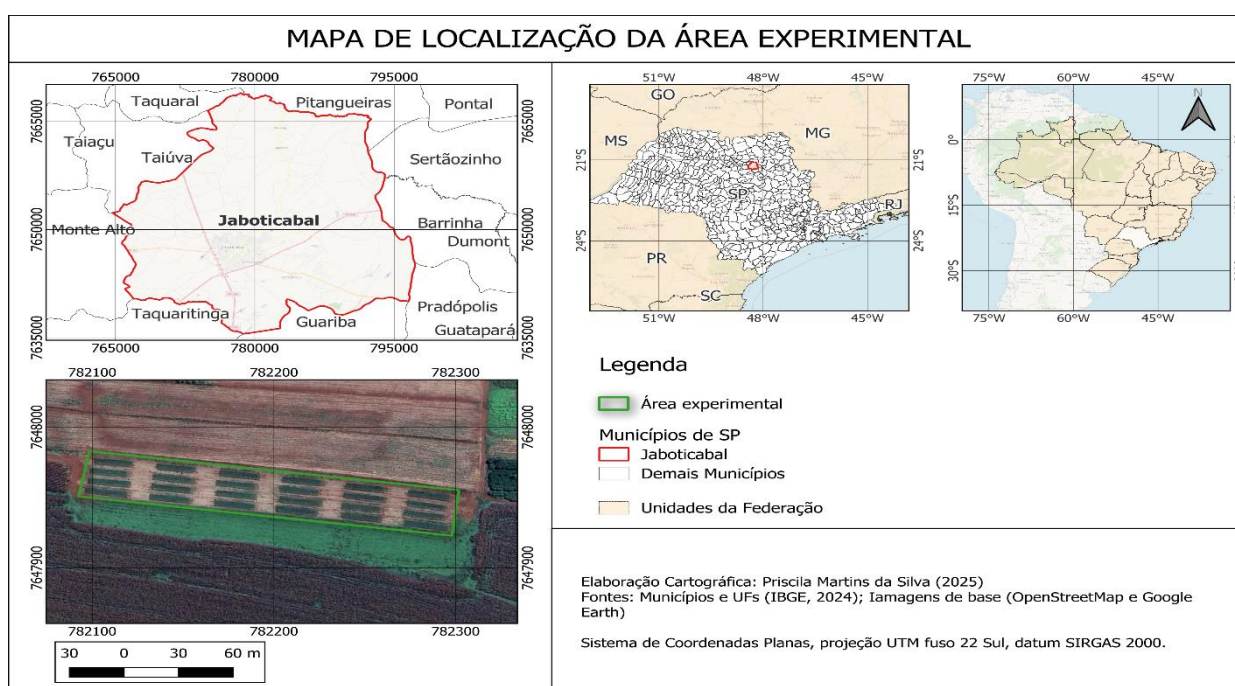


Figura 1. Mapa de localização da área experimental.

O clima da região é classificado como Aw tropical com inverno seco, chuvas de verão, temperatura média anual de 22°C e precipitação média anual de 1.425 mm (Álvares et al., 2013). Os dados climáticos foram registrados durante todo o período experimental (Figura 2 e 3). Durante a condução do milho, as temperaturas médias máxima e mínima foram de $31,1$ e $20,1$ $^{\circ}\text{C}$, respectivamente, com precipitação acumulada de 571,4 mm. No cultivo do feijão-caupi, as temperaturas médias máxima e mínima foram de $30,5$ e $19,1$ $^{\circ}\text{C}$, respectivamente, e a precipitação acumulada foi de

262 mm, sendo um valor abaixo das necessidades hídricas que variam de 300 mm a 400 mm durante o ciclo (Embrapa, 2021).

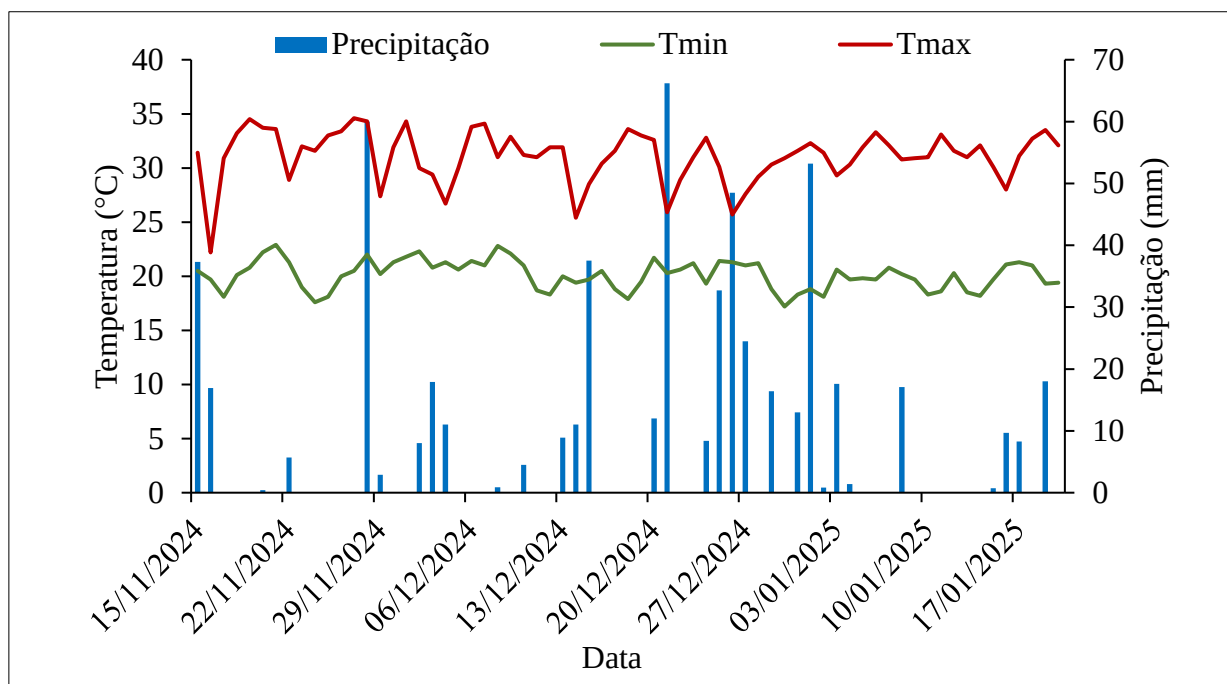


Figura 2. Precipitação pluvial (mm) e temperaturas máxima e mínima do ar (°C), registradas durante o ciclo do milho, no período de 15/11/2024 a 20/01/2025, em Jaboticabal, SP.

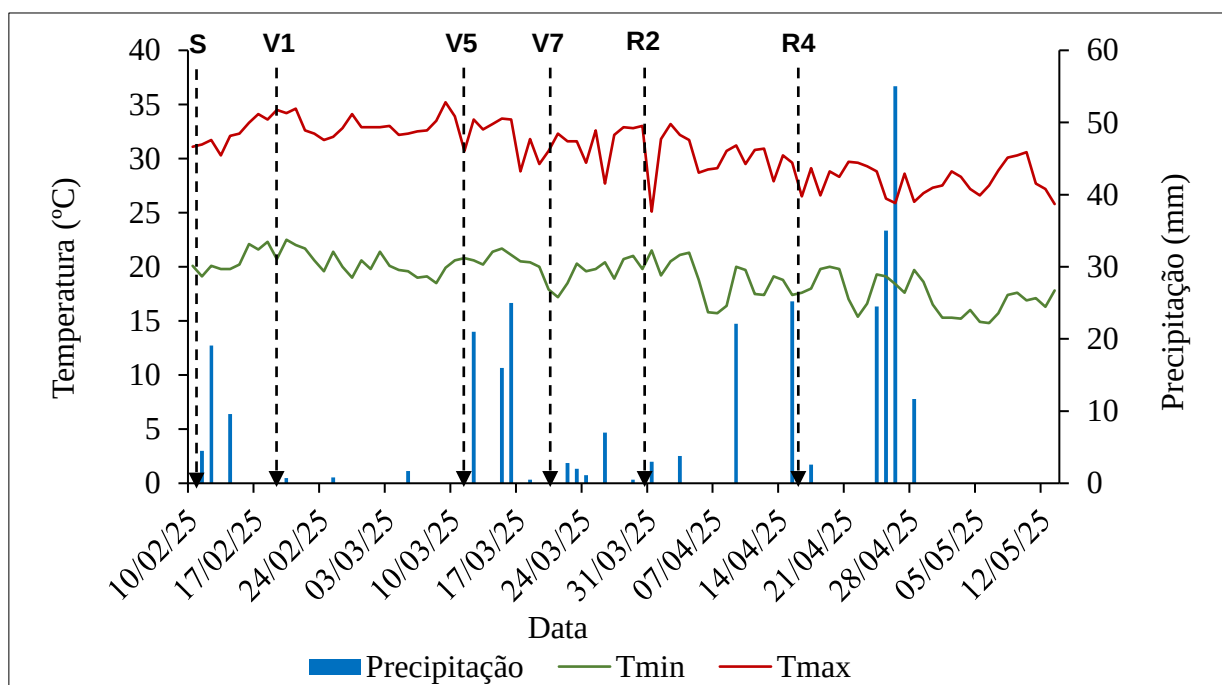


Figura 3. Precipitação pluvial (mm) e temperaturas máxima e mínima do ar (°C), registradas durante o ciclo do feijão-caupi, no período de 10/02/2025 a 13/05/2025, em Jaboticabal, SP.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo vermelho eutroférico típico, textura argilosa, A moderado, caulinitico-oxídico (LVef) (Andrioli; Centurion,

1999) com distribuição de partículas: areia: 20%; silte: 29%; e argila: 51% (Mechione et al., 2024). A área do experimento é utilizada há mais de vinte e cinco anos em sistema plantio direto e durante esse período vem sendo adotado consórcio, sucessão e rotação de diversas espécies, tanto para produção de grãos quanto para produção de cobertura do solo. As principais culturas cultivadas nos últimos anos para a produção de grãos foram o milho e a soja.

Antes da implantação do feijão-caupi, foram coletadas dez amostras simples de solo na camada de 0,00 – 0,20 m, as quais foram homogeneizadas para compor uma amostra composta, com o objetivo de avaliar a fertilidade do solo e auxiliar nas recomendações de adubação. As amostras foram encaminhadas para laboratório de análises de solos, onde foram determinados os atributos químicos, cujos resultados encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química do solo na camada de 0,00 – 0,20 m.

Camada	P	S	MO	pH	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB
(m)	mg dm ⁻³		g dm ⁻³	CaCl ²			mmolc dm ⁻³			
	42	6	24	5,9	6,1	45	16	1	22	67,3
0,00 - 0,20	B	Cu	Fe	Mn	Zn		CTC		V	m
			mg dm ⁻³				mmolc dm ⁻³		%	
	0,36	3,65	12	22	2,9		89,4		75	1

MO: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca de cátions; SB: soma de bases; V: saturação por bases; m: saturação por Al.

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

Para a cultura do milheto, o delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, composto por três tratamentos correspondentes aos sistemas de preparo do solo (sistema plantio direto, escarificação a 15 cm de profundidade e escarificação a 30 cm de profundidade), com oito repetições. Já para a cultura do feijão-caupi, cultivado em sucessão ao milheto, adotou-se delineamento em blocos ao acaso em esquema fatorial 3 × 2, sendo três sistemas de preparo do solo (sistema plantio direto, escarificação a 15 cm de profundidade e escarificação a 30 cm de profundidade) e dois níveis de inoculação com o solubilizador de fósforo comercial SolubPhos® (com e sem inoculação), totalizando seis tratamentos e quatro repetições, com vinte e quatro unidades experimentais.

As parcelas experimentais foram dimensionadas com 7 m de largura por 20 m de comprimento, sendo separadas por carreadores de 15 m. No total, foram estabelecidas 24 unidades experimentais. Cada unidade foi composta por oito fileiras

de milho, espaçadas a 0,45 m, seguidas em sucessão por nove fileiras de feijão-caupi, também espaçadas a 0,45 m. A área útil de cada parcela correspondeu a três fileiras centrais de feijão-caupi, com 5 m de comprimento cada. A área total do experimento foi de 5460 m².

Tabela 2. Tratamentos avaliados

Tratamentos	Descrição
P1B1	Sistema plantio direto com inoculação
P1B2	Sistema plantio direto sem inoculação
P2B1	Escarificação a 15 cm de profundidade com inoculação
P2B2	Escarificação a 15 cm de profundidade sem inoculação
P3B1	Escarificação a 30 cm de profundidade com inoculação
P3B2	Escarificação a 30 cm de profundidade sem inoculação

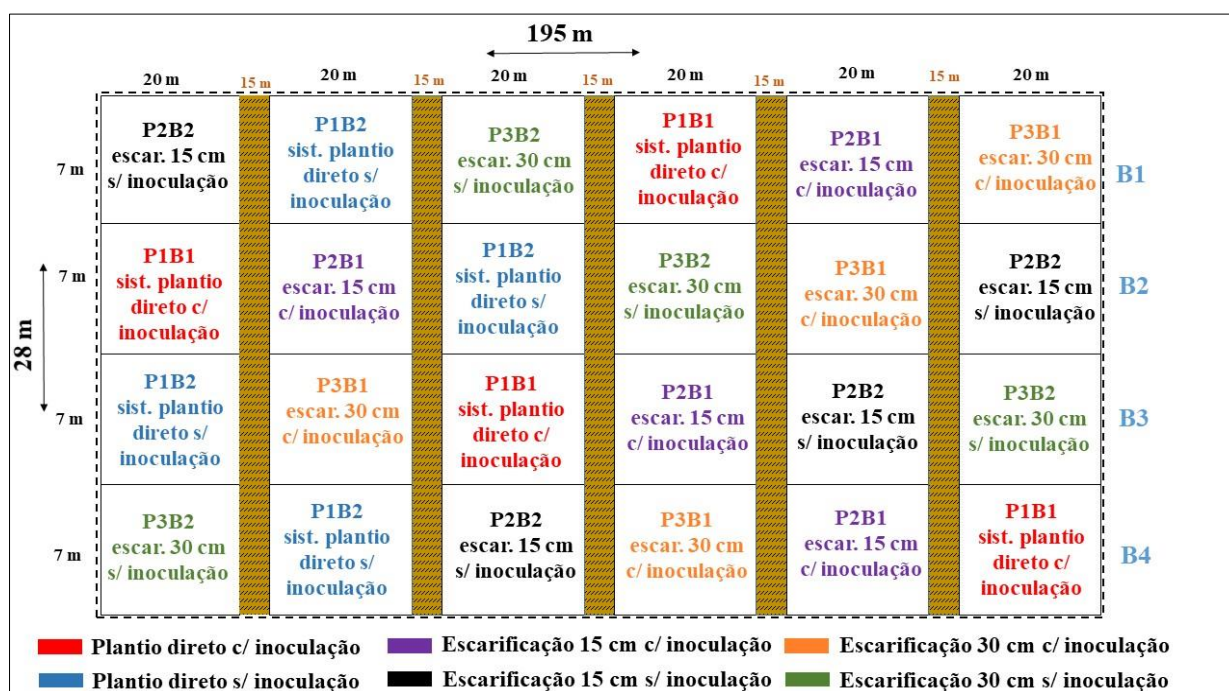


Figura 4. Croqui da área experimental.

3.3 Instalação e condução do experimento

Para o processo mecanizado de preparo do solo e semeadura foi utilizado um trator (4x2 TDA). Para a escarificação do solo nos tratamentos que receberam intervenção antes do plantio do milho, utilizou-se o escarificador AST/MATIC 450, com sete hastes espaçadas de 0,40 m, largura útil de 280 cm, peso de 2115 kg equipado com discos de corte de palha e rolo destorroador.

Para a semeadura da cultura do milho foram utilizadas sementes da cultivar ADR-300. Para a semeadura, no dia 14/11/24 foi utilizada semeadora-adubadora de arrasto, de 4 linhas, configurada para quatro fileiras espaçadas por 0,45 m. No dia 20/01/2025, aos 60 dias após a emergência (DAE), realizou-se o manejo do milho utilizando um triturador de restos culturais, visando à manutenção da palhada no sistema de plantio direto.

Em sucessão foi utilizado feijão-caupi da cultivar BRS Guariba, que possui como características hábito de crescimento indeterminado — no qual o crescimento vegetativo ocorre simultaneamente à emissão de flores e vagens, permitindo que a planta continue seu desenvolvimento ao longo do ciclo —, ciclo de 65 a 75 dias, porte semi-ereto e grupo comercial branco (Neves et al., 2011). A semeadura foi realizada com densidade de 11,6 sementes m^{-1} . As sementes foram tratadas com e sem inoculação do solubilizador de fósforo comercial SolubPhos®, com dose de 200 mL ha^{-1} , formulado com as cepas *Bacillus subtilis* - CNPMS B2084 (BRM034840) e *Bacillus megaterium* - CNPMS B119 (BRM033112) com concentração de 4×10^9 células viáveis mL^{-1} . As doses seguiram a recomendação técnica comercial, aplicadas na semente cerca de vinte e quatro horas antes da semeadura visando maior eficiência do produto. Para a semeadura no dia 10/02/2025, foi utilizada semeadora-adubadora de arrasto, de 9 linhas, com disco pneumático de dosagem de sementes, configurada para nove fileiras espaçadas por 0,45 m.

Não foi realizada adubação de base e cobertura, uma vez que o solo da área experimental apresentou elevados níveis de fertilidade (Tabela 1). De acordo com as recomendações de Wutke et al. (2022), para a cultura do feijão-caupi, nessas condições não se faz necessário o fornecimento adicional de nutrientes por meio de adubação de base e cobertura.

Para o manejo de plantas daninhas, utilizou-se o herbicida Dual Gold® em aplicação pré-emergente, enquanto os demais herbicidas empregados no manejo foram aplicados em pós-emergência das plantas daninhas. O manejo fitossanitário da cultura foi conduzido com base no monitoramento periódico da área experimental e nas recomendações técnicas para o feijão-caupi. Durante o ciclo, foram registradas ocorrências de vaquinha (*Cerotoma arcuata*) e vaquinha-verde-amarela (*Diabrotica speciosa*). Para o controle dessas pragas, realizou-se a aplicação de Platinum Neo® na dose de 200 mL ha^{-1} , associada a 300 mL ha^{-1} de Priori Xtra® e 100 mL ha^{-1} de Ampligo® e 250 g ha^{-1} de Sperto®, visando também ao manejo de pulgões e lagartas.

Não foi realizada irrigação complementar durante o cultivo do milho e do feijão-caupi. Entretanto, no caso do feijão-caupi, devido à escassez de precipitação na fase inicial de desenvolvimento, tornou-se necessária a aplicação emergencial de água, aproximadamente aos 15 DAS (após a semeadura), utilizando-se caminhão-pipa para irrigação de salvamento em lâminas de 9 mm.

3.4 Avaliações realizadas

Durante a condução do experimento, inicialmente foram realizadas avaliações no milho, para determinação do acúmulo de biomassa e atributos nutricionais da palhada. Em seguida, no feijão-caupi, avaliaram-se qualidade de semeadura, atributos fisiológicos, nutricionais e produtivos das plantas, bem como atributos qualitativos dos grãos.

Massa verde do milho (MV, em kg ha⁻¹): De cada parcela foram coletados 0,90 m² da parte aérea das plantas de milho. A coleta foi realizada no estágio reprodutivo de emissão de panícula, por meio de corte rente ao solo. Em seguida, o material vegetal foi pesado em balança digital, obtendo-se o valor da massa verde.

Massa seca do milho (MS, em kg ha⁻¹): Após a obtenção da massa verde, o material vegetal foi submetido à secagem em estufa de circulação forçada de ar, a 65 °C, até atingir peso constante. Em seguida, realizou-se a pesagem em balança analítica, determinando-se a massa seca.

Relação C/N (REL C/N): Posteriormente ao item anterior, palhada foi moída e preparada para determinação dos teores de C e N totais (%) (Embrapa, 1999).

Teor e acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S na parte aérea do milho (TNM, TPM, TKM, TCaM, TMgM, TSM em g kg⁻¹ e ANM, APM, AKM, ACaM, AMgM, ASM em kg ha⁻¹): as amostras obtidas no item anterior (massa seca da parte aérea) foram moídas em moinho tipo Willey e a determinação do teor de P seguiu metodologia de Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). O acúmulo de P foi obtido pelo produto do teor de P e a massa seca da parte aérea.

Distribuição longitudinal das plântulas de feijão-caupi (DLP, em %): A distribuição longitudinal na fileira de semeadura foi determinada logo após a estabilização da emergência, medindo-se a distância entre todas as plântulas existentes na área útil de 5 m de cada parcela experimental.

Os espaçamentos entre plântulas (X_i) foram avaliados conforme classificação adaptada de Kurachi et al. (1989), determinando-se o percentual de espaçamentos correspondentes às classes normais ($0,5 X_{ref} < X_i < 1,5 X_{ref}$), múltiplos ($X_i \leq 0,5 X_{ref}$) e falhos ($X_i \geq 1,5 X_{ref}$), baseado em espaçamento de referência (X_{ref}) de acordo com a regulação da semeadora-adubadora. A semeadora foi regulada para distribuir $11,6$ sementes m^{-1} no espaçamento de $0,45$ m. Desta forma foi considerado X_{ref} : $0,0862$ m, e foram considerados para o espaçamento como normais o espaço entre plântulas de $0,0431$ a $0,1293$ m, duplos os valores inferiores a $0,0431$ m e falhos os acima de $0,1293$ m.

Índice de conteúdo de clorofila (ICC): As avaliações foram realizadas com o clorofilômetro portátil Falker (ClorofilLog CFL2060), foram efetuadas leituras aos 23, 33, 42 e 58 DAE (dias após emergência), referentes aos estádios V5, V7, R2 e R4 (Campos et al., 2000), respectivamente. As mensurações foram efetuadas no terceiro trifólio completamente expandido a partir do ápice. Em cada parcela, selecionaram-se aleatoriamente três plantas da área útil, realizando-se uma leitura por folíolo em cada folha trifoliolada, totalizando nove leituras por unidade experimental.

Fração de cobertura do solo (FC, em %): A determinação foi realizada por meio do aplicativo móvel Canopeo® (Patrignani & Ochsner, 2015). Em cada parcela foram efetuadas leituras aos 23, 33, 42 e 58 DAE (dias após emergência), referentes aos estádios V5, V7, R2 e R4 (Campos et al., 2000), respectivamente. O Canopeo® é um aplicativo desenvolvido em linguagem Matlab, que estima a fração de cobertura do solo pelo dossel da cultura a partir da análise de comprimentos de onda da faixa espectral RGB.

Teor foliar de N, P, K, Ca, Mg e S (TFN, TFP, TFK, TFCa, TFMg e TFS em $g\ kg^{-1}$): Foram coletadas dez amostras foliares com pecíolo no florescimento pleno, no terço médio de cinco plantas, de acordo com metodologia descrita por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). As folhas foram lavadas (água com detergente a 1%) e, posteriormente, condicionadas em estufa de circulação de ar forçada sob temperatura de 65 a $70^{\circ}C$ até massa constante. Depois de secas, foram moídas em moinho tipo Willey e a determinação do teor dos nutrientes seguiu método descrito por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

Matéria seca da parte aérea do feijão-caupi (MSFC, em $g\ planta^{-1}$): Foram coletadas durante o florescimento pleno cinco plantas consecutivas na área útil de cada parcela. Em seguida, as plantas foram lavadas (água com detergente a 1%) e, posteriormente,

condicionadas em estufa de circulação de ar forçada a 65 a 70°C até massa constante para posterior pesagem.

Teor e acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S na parte aérea do feijão-caupi (TPAN, TPAP, TPAK, TPACa, TPAMg e TPAS em g kg⁻¹ e APAN, APAP, APAK, APACa, APAMg, APAS kg ha⁻¹): as amostras obtidas no item anterior (massa seca da parte aérea) foram moídas em moinho tipo Willey e a determinação do teor seguiu metodologia de Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). O acúmulo dos nutrientes foi obtido pelo produto do teor e a massa seca da parte área.

Número de vagens por planta (NVP, em unidade): Foi obtida por meio de contagem do número total de vagens de cinco plantas.

Número de grãos por vagem (NGP, em unidade): Foi obtida por meio do número total de grãos oriundos das cinco plantas e dividindo o resultado pelo número total de vagens.

Massa de cem grãos (MCG, em g): Foi obtida por meio de contagem de cem grãos, que tiveram suas massas determinadas e ajustadas para 13% de teor de umidade.

Produtividade (PROD, em kg ha⁻¹): A colheita foi realizada por meio de arranquio manual das plantas de sete linhas de 5 m de cada parcela. Após a secagem foi realizada trilha mecanizada. Para obtenção da produtividade foi padronizada a umidade dos grãos para 13% de teor de umidade.

Teor (TNG, TPG, TKG, TCaG, TMgG e TSG em g kg⁻¹) **e exportação de N, P, K, Ca, Mg e S** (EXGN, EXGP, EXGK, EXGCa, EXGMg e EXGS em kg ha⁻¹): A determinação do teor dos nutrientes nos grãos seguiu a metodologia proposta por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). Enquanto que a exportação foi calculada em função dos dados de produtividade e dos teores do nutriente nos grãos.

Rendimento de peneira (RP, em %): os grãos foram classificados em tamanho pela passagem com agitação manual em conjunto de peneiras de crivos oblongos 11/64" x 3/4 (4,37 x 19,05 mm), 12/64" x 3/4 (4,76 x 19,05 mm), 13/64" x 3/4 (5,16 x 19,05 mm) e 14/64" x 3/4 (5,56 x 19,05 mm), sendo denominadas RP11, RP12, RP13 e RP14, respectivamente. O percentual de grãos retidos foi calculado pela relação entre o peso dos grãos retidos em cada peneira e o peso da amostra total para cada tratamento. O somatório do percentual de grãos retidos nas peneiras RP12, RP13 e RP14 resulta no valor de RP_{≥12}.

Tempo para máxima hidratação dos grãos (TMH, em horas): Foram determinadas utilizando amostras de 50 g de grãos de cada tratamento, sobre volume inicial de 200

mL de água. De uma em uma hora, até 12 horas, foi quantificado o volume de água não absorvido pelos grãos. Ao final do tempo previsto para a hidratação, as amostras foram novamente pesadas. O tempo para máxima hidratação foi determinado pelo estudo de regressão linear entre o tempo (horas) e a capacidade de hidratação (mL).

Relação de hidratação (RH): A relação de hidratação foi determinada pela razão entre a massa final e a massa inicial dos grãos das amostras utilizadas na avaliação descrita acima.

Teor de proteína bruta (TPB, em %): Foi determinada utilizando a fórmula (AOAC, 1995): $PB = 6,25 \times N$, em que N é o teor de nitrogênio nos grãos determinado por digestão sulfúrica e método semi-micro-Kjeldahl.

Tempo de cozimento (TC, em minutos): Foi determinado com o auxílio de um cozedor que consta basicamente de 25 estiletes verticais com peso de cada unidade de 90 gramas e ponta de 1 mm de diâmetro. A ponta fica apoiada no grão de feijão durante o cozimento e quando o grão se encontra cozido, a ponta penetra-o deslocando o estilete. O tempo final para cozimento da amostra foi obtido quando $50\% + 1$, ou seja, 13 estiletes forem deslocados. Durante a condução do teste a temperatura da água foi mantida a 96 °C.

3.5 Análise estatística

Os dados referentes as avaliações no milheto e no feijão-caupi foram submetidos à estatística descritiva e mediante a constatação da normalidade (Jarque-Bera) e homogeneidade (Cochran, Bartlett e Hartley), foi aplicada à análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$), e as médias comparadas pelo teste Tukey ($P < 0,05$), para F significativo. A análise foi realizada por meio do software SpeedStat (Carvalho et al. 2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Qualidade de palhada da cultura do milheto

A produtividade de massa de matéria verde (MV) e de massa de matéria seca (MS) do milheto não apresentou diferenças significativas entre os sistemas de preparo do solo (Tabela 3). O Teste F indicou ausência de efeito estatístico ($p > 0,05$), mostrando

que o desenvolvimento da cultura foi semelhante no sistema plantio direto (SPD) e nas escarificações realizadas a 15 e 30 cm de profundidade.

Tabela 3. Produção de matéria verde (MV) e matéria seca (MS) e relação carbon/nitrogênio (REL. C/N) do milho em função dos preparos do solo.

Preparo	MV	MS	REL. C/N
	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	-----
SPD	56.472	10.456	24,32a
ESC15	56.347	10.084	17,81b
ESC30	60.944	10.959	18,97b
Valor F			
Preparo	0,41ns	0,23ns	13,06**
DMS	15056	3367	3,55
CV (%)	19,87	24,51	13,33

** : significativos a $p < 0,01$. ns: não significativo. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação. SPD: sistema plantio direto. ESC 15: escarificação a 15 cm. ESC30: escarificação a 30 cm.

Nascimento et al. (2019) ao avaliarem o cultivo de milho em área sob plantio direto com e sem escarificação a 30 cm de profundidade, verificaram desempenho superior para o sistema com escarificação. Resultados semelhantes foram relatados por Teixeira et al. (2012), Pereira et al. (2016) e Chieza et al. (2017), que observaram aumento na produção de fitomassa de plantas de cobertura quando a escarificação proporcionou melhorias nas condições físicas do solo, favorecendo o crescimento radicular e a absorção de nutrientes.

No entanto, em áreas com histórico de plantio direto consolidado, os efeitos da escarificação tendem a ser menos expressivos, uma vez que a estrutura do solo já se encontra estabilizada, o que ocorre na área estudada, pois já possui mais de 25 anos sob sistema plantio direto. De acordo com Reichert et al. (2009), em sistemas de plantio direto consolidados, a escarificação promove apenas efeitos transitórios na melhoria das propriedades físicas, com rápida recomposição da densidade e perda do benefício inicial. Dessa forma, ainda que a escarificação a 30 cm tenha resultado em ligeiro aumento nos valores médios de biomassa, tal incremento não foi suficiente para se traduzir em diferenças estatisticamente significativas.

Para a relação carbono/nitrogênio (REL. C/N), os preparos de solo apresentaram efeito significativo ($p < 0,01$), sendo o plantio direto o tratamento com os maiores valores, aproximadamente 24,32:1 (Tabela 3). Com relação ao manejo da palhada, os resíduos vegetais podem ser classificados como de decomposição rápida ou lenta. De

modo geral, materiais com relação C/N superior a 25 tendem a promover maior imobilização de nitrogênio e apresentar decomposição mais lenta, enquanto resíduos com relação C/N inferior a 25 favorecem maior mineralização de N e decomposição mais acelerada (Cantarella et al., 2007).

No SPD, a prioridade deve ser a produção de material vegetal com maior relação C/N, pois isso reduz a velocidade de decomposição da cobertura, contribuindo para a manutenção da umidade do solo e para a estabilidade da atividade microbiana (Foloni et al., 2016). A relação C/N exerce forte influência sobre as taxas de decomposição e mineralização da palhada, já que a disponibilidade de nitrogênio regula o crescimento e a atividade dos microrganismos responsáveis pela degradação do carbono orgânico (Cantarella, 2007).

De acordo com os dados da Tabela 4, observa-se que os preparos de solo apresentaram efeito significativo ($p < 0,01$) apenas para o teor de nitrogênio na matéria seca (TNM), sendo que a escarificação a 15 cm resultou nos maiores valores. A ordem dos teores dos macronutrientes foi a seguinte: $K > N > P > Ca > Mg > S$.

O teor de N no milheto varia conforme o estágio de desenvolvimento da planta. Marcante et al. (2011) observaram redução gradual desse teor ao longo do ciclo, sendo mais elevado nas fases iniciais de crescimento. No presente estudo, embora as plantas tenham sido coletadas no estágio reprodutivo de emissão de panícula (fase em que os teores de N tendem a ser menores) os valores encontrados permanecem dentro da faixa considerada adequada para a cultura ($4-20 \text{ g ha}^{-1}$), conforme relatado pelos autores. Além disso, esses valores também se enquadram nos padrões descritos por Malavolta et al. (1997) para gramíneas em geral.

A escarificação a 15 cm mostrou-se mais eficiente por atuar diretamente na zona de maior concentração das raízes absorventes do milheto, reduzindo a resistência mecânica do solo, aumentando a infiltração de água e favorecendo a exploração radicular. Essas condições resultam em maior absorção de nutrientes, especialmente nitrogênio (Tabela 4).

Para o teor de fósforo (TPM), o nutriente apareceu como o terceiro macronutriente mais concentrado (Tabela 5), comportamento diferente do relatado por Marcante et al. (2011), que observaram o P entre os elementos de menor teor no milheto. Prado (2008) destaca que o teor ideal de fósforo para o pleno crescimento das culturas situa-se entre 0,3% e 0,5% ($3-5 \text{ g kg}^{-1}$), embora esses valores possam variar conforme a espécie e as condições ambientais. No caso específico do milheto,

Marcante et al. (2011) indicam como faixa adequada valores entre 1,1 e 2,2 g kg⁻¹. Os teores observados no presente estudo ficaram acima desse intervalo, indicando a boa disponibilidade de P no solo da área experimental (Tabela 1).

O teor de potássio (TKM) foi de aproximadamente 48,7 g kg⁻¹ (Tabela 4), valor que se encontra dentro da faixa considerada adequada para gramíneas, conforme descrito por Malavolta et al. (1997). De modo geral, o milho apresenta elevada concentração e capacidade de acumular potássio, especialmente a cultivar ADR300 utilizada neste estudo, reconhecida por sua alta responsividade a esse nutriente.

Tabela 4. Teores de nutrientes na parte aérea do milho — nitrogênio (TNM), fósforo (TPM), potássio (TKM), cálcio (TCaM), magnésio (TMgM) e enxofre (TSM) em função dos preparos do solo.

Preparo	TEOR DE NUTRIENTES DA PARTE AÉREA MILHETO (g kg ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
SPD	18,93ab	5,16	48,43	4,31	2,80	2,65
ESC15	21,15a	5,55	49,74	4,75	3,06	2,70
ESC30	17,76b	4,90	48,14	4,30	2,84	2,69
Valor F						
Preparo	7,75**	1,16ns	0,13ns	1,87ns	1,18ns	0,24ns
DMS	2,29	1,13	8,79	0,694	0,484	0,197
CV (%)	9,07	16,53	13,77	11,9	12,76	5,61

** : significativos a $p < 0,01$. ns: não significativo. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação. SPD: sistema plantio direto. ESC 15: escarificação a 15 cm. ESC30: escarificação a 30 cm.

O teor de cálcio na matéria seca (TCaM) foi de aproximadamente 4,5 g kg⁻¹ (Tabela 4). A movimentação do Ca na planta ocorre basicamente de forma unidirecional pelo xilema, da raiz para a parte aérea, sendo sua redistribuição entre órgãos extremamente limitada. Isso ajuda a explicar a boa concentração observada, já que, ao contrário de nutrientes móveis como N e P, o Ca não é remobilizado para outros tecidos (Prado, 2008). Além disso, a maior parte do cálcio na planta encontra-se em formas pouco solúveis, ligadas à parede celular, o que reduz sua susceptibilidade à redistribuição ou à perda durante o ciclo. Esses valores também se encontram dentro da faixa adequada para a cultura de 4-6 g ha⁻¹ (Marcante et al., 2011).

O teor de enxofre na matéria seca (TSM) foi de aproximadamente 2,9 g kg⁻¹ (Tabela 4), sendo o macronutriente de menor concentração entre os avaliados. O S apresenta baixa sensibilidade a variações de pH e umidade do solo no que se refere à absorção, e as plantas não realizam consumo de luxo desse elemento, ou seja, não

acumulam quantidades além de sua necessidade metabólica (Prado, 2008). A mobilidade do enxofre dentro da planta também é limitada, caracterizando-o como um nutriente pouco móvel. Nesse sentido, Oliveira et al. (1995), estudando a cultura do feijoeiro, observaram que apenas cerca de 27% do S absorvido pelas folhas foi redistribuído para outros órgãos, evidenciando a baixa remobilização do nutriente.

Apesar da menor concentração geral, os valores obtidos se encontram dentro da faixa considerada adequada para a cultura, que varia de 1,6 a 3,8 g kg⁻¹, conforme Marcante et al. (2011). O teor observado também se encontra acima dos relatados por Cazetta et al. (2005) e Teixeira et al. (2005), que variaram entre 1,5 e 1,6 g kg⁻¹.

Braz et al. (2004) observaram maiores concentrações de macronutrientes na palhada de milho entre 52 e 55 dias após a emergência; após esse período, inicia-se a translocação dos nutrientes das folhas para as estruturas reprodutivas, o que reduz gradualmente os teores na parte aérea. Apesar disso, mesmo com a coleta realizada aos 60 (DAE), os teores de todos os macronutrientes (Tabela 4) permaneceram dentro da faixa considerada adequada para a cultura (Marcante et al., 2011).

Não houve respostas significativas dos preparos de solo para o acúmulo de nutrientes na parte aérea do milho para nenhum dos macronutrientes avaliados (Tabela 5). A ordem de acúmulo dos macronutrientes foi a seguinte: K > N > P > Ca > Mg > S, acompanhando o mesmo padrão observado para os teores.

A acumulação de nutrientes por plantas de cobertura, como o milho, seguida de sua devolução ao solo por meio da decomposição da palhada, contribui para diminuir a dependência de fertilizantes minerais. O nitrogênio (ANM) foi o segundo macronutriente mais acumulado pelo milho (Tabela 5). Esse acúmulo favorece a qualidade da espécie como planta de cobertura (Padovan et al., 2012). Em gramíneas C₄, cuja fisiologia é altamente eficiente na assimilação de CO₂, o N desempenha papel central na expansão foliar e na formação de tecidos estruturais. Dessa forma, o elevado acúmulo de N observado contribui para o vigor vegetativo e para o crescimento da planta, refletindo sua capacidade de sustentar alta produção de biomassa.

O fósforo (APM) foi o terceiro macronutriente mais acumulado (Tabela 5), mesmo considerando sua baixa mobilidade no solo. Esse resultado contrasta com os achados de Cavalcante et al. (2012), que relataram baixos acúmulos de P. No presente estudo, a elevada concentração de P no solo (Tabela 1) favoreceu o desenvolvimento das plantas e se refletiu no maior acúmulo do nutriente na parte aérea.

O potássio (AKM) foi o nutriente mais acumulado, com média de 512,49 kg ha⁻¹ (Tabela 5). Torres e Pereira (2008) também observaram o elevado potencial do milho em ciclar potássio nos sistemas agrícolas. Esses resultados reforçam a alta capacidade de extração de K pela cultura (Coelho et al., 2012).

Tabela 5. Acúmulo de nitrogênio (ANM), fósforo (APM), potássio (AKM), cálcio (ACaM), magnésio (AMgM) e enxofre (ASM) na parte aérea do milho em função dos preparos do solo.

Preparo	ACÚMULO DE NUTRIENTES PARTE AÉREA MILHETO (kg ha ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
SPD	198,87	53,87	507,20	45,03	29,47	27,71
ESC15	214,58	56,50	499,23	48,49	31,34	27,54
ESC30	196,00	53,28	531,04	47,14	31,34	29,33
Valor F						
Preparo	0,24ns	0,09ns	0,11ns	0,11ns	0,09ns	0,16ns
DMS	76	20,8	187	19,4	13,4	9,03
CV (%)	28,59	29,07	27,82	29,63	29,74	24,48

ns: não significativo. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação. SPD: sistema plantio direto. ESC 15: escarificação a 15 cm. ESC30: escarificação a 30 cm.

O acúmulo de cálcio (ACaM) foi um dos menores entre os macronutrientes, seguido pelo magnésio (AMgM) (Tabela 5). Esse comportamento pode estar relacionado ao elevado acúmulo de N no milho, que tende a reduzir a proporção de Ca e Mg acumulados — resultado compatível com a fisiologia dessas gramíneas de crescimento acelerado. O maior aporte de N intensifica a produção de biomassa e favorece a ocorrência de diluição fisiológica (Ribeiro & Pereira, 2011), na qual Ca e Mg não são absorvidos na mesma proporção em que aumenta a massa da planta, resultando em menor acúmulo relativo desses nutrientes.

O enxofre (ASM) foi o nutriente de menor acúmulo entre todos os avaliados (Tabela 5), resultado fisiologicamente coerente com o papel desse elemento nas gramíneas e com sua dinâmica no solo. O S é demandado em quantidades bem inferiores às dos demais macronutrientes, além de depender, em grande parte, da mineralização da matéria orgânica para tornar-se disponível às plantas, o que contribui para os menores valores observados.

4.2 Qualidade de semeadura do feijão-caupi

Os resultados referentes à qualidade de semeadura do feijão-caupi (Tabela 6) indicam que os diferentes preparos de solo e a inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato não exerceram influência significativa sobre a distribuição longitudinal de plantas.

Tabela 6. Distribuição longitudinal de plantas normal (DLP NORMAL), múltiplo (DLP MÚLTIPLO) e falho (DLP FALHO), em função dos preparos de solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.

Preparo	DLP NORMAL	DLP MÚLTIPLO	DLP FALHO
----- % -----			
SPD	69,80	1,71	28,49
ESC15	62,44	1,22	36,34
ESC30	68,70	2,57	27,72
Inoculação			
Com	71,37	0,79	27,84
Sem	63,26	2,88	33,86
Valor F			
Preparo (P)	1,36ns	0,55ns	1,71ns
Inoculação (I)	3,76ns	3,83ns	2,04ns
P x I	0,75ns	0,03ns	0,66ns
DMS	14,46	3,69	14,60
CV (%)	26,33	246,20	58,01

ns: não significativo. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação. SPD: sistema plantio direto. ESC 15: escarificação a 15 cm. ESC30: escarificação a 30 cm.

A ausência de respostas estatísticas entre os tratamentos corrobora observações de outros autores, que também não verificaram efeito do sistema de preparo do solo na uniformidade de deposição de sementes (Santos et al., 2011; Gonçalves, 2019). De forma semelhante, Mechione et al. (2024), ao avaliar intervenções com escarificação em diferentes profundidades em área de plantio direto de longa duração, não observaram diferenças significativas na distribuição longitudinal de plantas de milho.

Os coeficientes de variação observados para os espaçamentos falhos e duplos apresentaram-se elevados, ultrapassando valores geralmente considerados aceitáveis. De acordo com Judice (2000), coeficientes de variação superiores a 30 % são classificados como altos; entretanto, tal comportamento pode ser interpretado como natural para essas variáveis, uma vez que o desejável é que haja baixa ocorrência e,

portanto, alta variabilidade relativa de falhas e duplos entre parcelas. Em determinadas unidades experimentais, a ausência total de espaçamentos falhos e/ou duplos intensificou essa variação e contribuiu para o aumento do CV.

Altos coeficientes de variação para essas mesmas variáveis também foram relatados por outros autores, com valores frequentemente superiores a 25 %, reforçando que essa oscilação é comum em experimentos de semeadura e não compromete a interpretação dos resultados (Arcoverde et al., 2016; Ferreira et al., 2019; Queiroz, 2019).

A distribuição longitudinal de plântulas é um indicador direto da qualidade de semeadura, pois permite identificar falhas e variações no espaçamento que podem comprometer o estande inicial da cultura. Em áreas de plantio direto consolidado submetidas à intervenção mecânica, essa variável ganha ainda mais relevância, uma vez que evidencia se a escarificação foi capaz de melhorar as condições físicas do solo a ponto de garantir emergência mais uniforme e estabelecimento adequado das plantas.

4.3 Frações de cobertura do solo

A ausência de diferenças significativas para fração de cobertura do solo (FC) (Tabela 7), estimada pelo aplicativo Canopeo®, indica que os tratamentos de preparo do solo e de inoculação com BSF não resultaram em variações expressivas no fechamento do dossel durante os estádios fenológicos avaliados. Esse comportamento sugere que, independentemente do manejo utilizado, as plantas apresentaram crescimento e expansão foliar semelhantes, refletindo um padrão uniforme de interceptação de radiação e de desenvolvimento vegetativo inicial.

O Canopeo®, baseado na análise de imagens RGB para determinar a proporção de pixels verdes em relação ao total da área enquadrada (Patrignani; Ochsner, 2015), mostra-se eficiente na detecção de diferenças de vigor vegetativo em estádios iniciais, quando o dossel ainda se encontra em fase de formação. No entanto, à medida que ocorre o fechamento quase completo da cobertura, o método tende a perder sensibilidade para distinguir pequenas variações estruturais entre tratamentos. Diferenças sutis na altura das plantas, no número de folhas ou na disposição das folhas no dossel dificilmente se refletem em mudanças perceptíveis na fração de cobertura estimada. Esse comportamento é típico de leguminosas de rápido estabelecimento,

como o feijoeiro, cuja cobertura do solo tende a estabilizar-se precocemente, reduzindo a amplitude de resposta dessa variável a fatores de manejo.

Tabela 7. Fração de cobertura do solo nos estádios V5 (FC1), V7 (FC2), R2 (FC3) e R4 (FC4), em função dos preparos de solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.

Preparo	FC1	FC2	FC3	FC4
	----- % -----			
SPD	28,68	61,39	88,69	84,85
ESC15	30,64	61,58	83,75	81,96
ESC30	32,29	58,53	82,93	81,80
Inoculação				
Com	30,38	61,26	84,86	81,20
Sem	30,69	59,74	85,39	84,55
Valor F				
Preparo (P)	2,89ns	0,20ns	2,12ns	0,69ns
Inoculação (I)	0,06ns	0,12ns	0,05ns	1,96ns
P x I	0,94ns	0,07ns	0,16ns	0,21ns
DMS	4,52	16,5	9,12	8,84
CV (%)	9,8	18,1	7,11	7,08

ns: não significativo. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação. SPD: sistema plantio direto. ESC 15: escarificação a 15 cm. ESC30: escarificação a 30 cm.

4.4 Índice de conteúdo de clorofila

O índice de conteúdo de clorofila é um indicador do estado nutricional e fisiológico das plantas. Sua importância está no fato de ser uma medida rápida e não destrutiva, que reflete de maneira direta a eficiência de absorção de nutrientes, especialmente do nitrogênio.

Para essa variável, verificou-se efeito significativo entre os preparos de solo e a inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato no estágio vegetativo V7, bem como efeito isolado da inoculação no estágio reprodutivo R2 (Tabela 8).

Nos estádios iniciais de desenvolvimento, o ICC não apresentou variação significativa entre os tratamentos. Esse resultado pode ser atribuído ao reduzido porte das plantas e ao baixo acúmulo de matéria seca característicos dessa fase, condições que limitam a demanda nutricional da cultura. Dessa forma, a inoculação com BSF não promoveu diferenças significativas no crescimento inicial, uma vez que a demanda por nutrientes ainda é limitada.

Tabela 8. Índice de clorofila nos estádios V5 (ICF1), V7 (ICF2), R2 (ICF3) e R4 (ICF4), em função dos preparos de solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.

Preparo	ICF1	ICF2	ICF3	ICF4
SPD	75,33	74,16 b	74,16	65,43
ESC15	81,34	76,15 ab	74,74	69,45
ESC30	78,96	83,36 a	72,65	67,8
Inoculação				
Com	79,16	81,04a	76,53a	68,90
Sem	77,93	74,74b	71,18b	66,22
Valor F				
Preparo (P)	3,13ns	5,40*	0,93ns	1,59ns
Inoculação (I)	0,39ns	6,86*	17,14**	2,10ns
P x I	3,82ns	1,10ns	0,84ns	1,59ns
DMS	7,29	8,88	4,77	6,84
CV (%)	6,16	7,6	4,29	6,71

** : significativo a $p < 0,01$. * : $p < 0,05$. Ns: não significativo. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação. SPD: sistema plantio direto. ESC 15: escarificação a 15 cm. ESC30: escarificação a 30 cm.

A resposta significativa ($p < 0,05$) entre os fatores preparo de solo e inoculação, observada no estágio reprodutivo V7 (Tabela 8), indica que as condições físicas do solo exerceram influência direta sobre a eficiência das BSF. A escarificação, realizada a aproximadamente 30 cm de profundidade, promove melhoria estrutural no solo ao reduzir a compactação e aumentar a porosidade e a aeração, criando um ambiente mais favorável ao crescimento radicular e à difusão de fósforo no perfil (Salton et al. 2008).

Nessas condições, o fósforo solubilizado pelas BSF torna-se mais acessível às raízes, resultando em maiores teores de clorofila durante estádios de elevada demanda nutricional, como o R2, que corresponde ao florescimento do feijão-caupi, fase em que se intensifica a atividade fotossintética e o metabolismo da planta.

Resultados semelhantes foram obtidos por Souza et al. (2023), que relataram aumento nos teores foliares de fósforo e clorofila em plantas de feijão-comum inoculadas com *Bacillus* spp. solubilizadoras de fósforo. De forma semelhante, Coelho et al. (2022) verificaram maiores valores do ICC no estágio R6 de cultivares de feijoeiro-comum de crescimento indeterminado — estágio fenológico correspondente ao R2 do feijão-caupi —, fase caracterizada pela coexistência de estruturas vegetativas e reprodutivas ativas, o que eleva a demanda por nutrientes e assimilados.

No estágio R4, observou-se decréscimo nos valores de ICC (Tabela 8), resultado atribuído ao início da senescência das plantas e à consequente redução da área foliar verde, ocasionada pela queda natural de folhas. Esse comportamento é típico das leguminosas anuais e reflete o redirecionamento dos fotoassimilados das folhas para o enchimento de grãos.

4.5 Teores foliares e da parte aérea, e acúmulo de nutrientes na parte aérea

Não foram observadas diferenças significativas nos teores foliares de nenhum dos nutrientes avaliados entre os tratamentos (Tabela 9). Apesar disso, os teores foliares de nitrogênio (TFN) obtidos se encontram acima da faixa considerada adequada por Malavolta et al. (1997) para o feijão-caupi, que varia de 18 a 22 g kg⁻¹. Resultados semelhantes foram relatados por Linhares (2007), Fonseca (2010) e Matoso et al. (2018), que, ao trabalharem com diferentes cultivares da espécie, registraram concentrações foliares de N superiores ao intervalo de referência.

Ao reunir resultados de vários estudos sobre a nutrição do feijão-caupi, Sampaio e Brasil (2009) reforçaram essa tendência, destacando que os teores de N foliar obtidos em condições de cultivo atuais são, de modo geral, mais elevados do que aqueles propostos por Malavolta et al. (1997). Esses resultados indicam que os valores tradicionais utilizados como referência para diagnose foliar podem não representar mais a realidade atual da cultura, especialmente diante da adoção de novos materiais genéticos e de ambientes produtivos mais tecnificados. Assim, torna-se necessária a atualização dos critérios de interpretação para o feijão-caupi, considerando o avanço no melhoramento da espécie e as mudanças nas condições de cultivo.

Tabela 9. Teores foliares de nitrogênio (TFN), fósforo (TFP), potássio (TFK), cálcio (TFCa), magnésio (TFMg) e enxofre (TFS) em função dos preparos do solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.

Preparo	TEOR FOLIAR DE NUTRIENTES (g kg ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
SPD	30,78	1,83	20,96	15,20	2,85	1,94
ESC15	31,75	1,79	21,43	15,15	2,86	1,92
ESC30	30,32	1,88	20,94	15,60	3,02	2,01
Inoculação						
Com	31,31	1,84	21,47	15,77	2,99	1,98
Sem	30,59	1,82	20,74	14,86	2,84	1,93
Valor F						
Preparo (P)	1,34ns	0,62ns	0,30ns	0,24ns	1,81ns	2,51ns
Inoculação (I)	0,98ns	0,08ns	1,62ns	2,42ns	3,50ns	1,55ns
P x I	1,41ns	1,57ns	2,69ns	2,72ns	5,09ns	2,16ns
DMS	2,68	0,244	2,13	2,17	1,63	1,38
CV (%)	5,74	8,86	6,71	9,42	6,97	4,19

ns: não significativo. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação. SPD: Sistema plantio direto. ESC 15: escarificação a 15 cm. ESC30: escarificação a 30 cm.

Os teores foliares de fósforo (TFP) obtidos (Tabela 9) também se encontram acima da faixa adequada proposta por Malavolta et al. (1997), que varia de 1,2 a 1,5 g kg⁻¹. Esse resultado pode estar associado aos elevados teores de P presentes no solo da área experimental (Tabela 1).

Além disso, a maior disponibilidade de P foliar pode ter contribuído, para os teores mais elevados de nitrogênio nas folhas (Tabela 9), uma vez que o fósforo desempenha papel fundamental no metabolismo do nitrogênio (Araújo e Machado, 2006). Em condições de baixa oferta de P, há redução na absorção de nitrato (NO₃⁻) e menor translocação do NO₃⁻ absorvido para a parte aérea (Jeschke et al., 1997; Araújo e Machado, 2006), o que tende a resultar em menores concentrações foliares de N.

Os teores foliares de potássio (TFK) observados no presente estudo estão abaixo da faixa recomendada por Malavolta et al. (1997), que é de 30 – 35 g kg⁻¹ (Tabela 9), indicando possível limitação nutricional, apesar da adequada disponibilidade inicial de K no solo. Em solos sob SPD, por exemplo, a maior estratificação de nutrientes na camada superficial pode dificultar a absorção de K em períodos de menor umidade, reduzindo sua translocação para o tecido foliar.

Os teores foliares de cálcio (TFCa) observados no presente estudo (Tabela 9) ficaram abaixo da faixa de suficiência recomendada por Malavolta et al. (1997), que

varia entre 50 – 55 g kg⁻¹. No caso do magnésio, os teores foliares (TFMg) também ficaram abaixo (Tabela 10) dos valores de suficiência recomendados por Malavolta et al. (1997), situados entre 5 e 8 g kg⁻¹. O Mg, embora seja mais móvel na planta do que o Ca, é altamente suscetível à competição com outros cátions, especialmente o K. Em solos com elevada disponibilidade de bases (como o da área experimental), ocorre com frequência a competição iônica K⁺/Mg²⁺ reduzindo a absorção e translocação do magnésio para a parte aérea.

Por outro lado, os teores de enxofre foliar (TFS) (Tabela 9) permaneceram dentro da faixa adequada, entre 1,5 e 2,0 g kg⁻¹, segundo Malavolta et al. (1997). Esse resultado indica que, apesar da variação em Ca e Mg, a disponibilidade de S no solo foi suficiente para atender à demanda da cultura.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 10, observa-se que os preparos de solo não influenciaram significativamente nenhum dos nutrientes avaliados na parte aérea. Por outro lado, a inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato apresentou efeito significativo para todos os nutrientes, com exceção do potássio (K).

Tabela 10. Teores de nutrientes na parte aérea — nitrogênio (TPAN), fósforo (TPAP), potássio (TPAK), cálcio (TPACa), magnésio (TPAMg) e enxofre (TPAS) em função dos preparos do solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.

Preparo	TEOR DE NUTRIENTES DA PARTE AÉREA (g kg ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
SPD	23,07	1,83	26,51	15,49	3,59	2,35
ESC15	23,50	1,70	26,97	15,15	3,71	2,41
ESC30	22,17	1,78	25,48	15,77	3,89	2,43
Inoculação						
Com	23,60a	1,87a	27,19	16,38a	3,90a	2,50a
Sem	22,23b	1,66b	25,45	14,56b	3,55b	2,30b
Valor F						
Preparo (P)	1,66ns	1,16ns	0,44ns	0,38ns	1,69ns	0,30ns
Inoculação (I)	5,06*	9,25**	1,73ns	9,61**	7,00*	5,50*
P x I	0,51ns	0,03ns	0,16ns	0,14ns	0,02ns	0,22ns
DMS	2,25	1,28	4,87	2,17	1,36	1,01
CV (%)	6,5	9,49	12,29	9,31	8,72	8,53

** : significativo a $p < 0,01$ * : $p < 0,05$. ns: não significativo. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação. SPD: sistema plantio direto. ESC 15: escarificação a 15 cm. ESC30: escarificação a 30 cm.

Os dados da Tabela 10 mostram que a inoculação promoveu aumento significativo ($p < 0,05$) no teor de N da parte aérea. Esse resultado confirma que as BSF

contribuíram para melhorar a absorção e a assimilação do nutriente, por meio da intensificação da atividade radicular e da maior oferta de P na rizosfera, elemento essencial para o metabolismo do N.

Ainda assim, mesmo com esse incremento, os valores médios de N na parte aérea permaneceram baixos (Malavolta et al., 1997). Esse resultado pode estar relacionado ao fato de que o N absorvido tende a ser direcionado prioritariamente para folhas metabolicamente mais ativas, onde o nutriente participa de processos essenciais, como a síntese de clorofila, de proteínas estruturais e de enzimas diretamente envolvidas na fotossíntese.

Desse modo, os baixos teores da parte aérea não refletem necessariamente deficiência nutricional, mas sim o padrão fisiológico de alocação do N, acrescido do efeito positivo, porém não suficiente, da inoculação para elevar a concentração do nutriente em todos os tecidos simultaneamente.

Apesar dos teores foliares de P estarem dentro da faixa considerada adequada (Tabela 9), os teores de P na parte aérea também foram inferiores (Tabela 10). Essa redução pode estar associada ao efeito de diluição, resultado do aumento da biomassa vegetativa e da produção de grãos (Fageria et al., 2015). No caso desta cultivar, que apresenta hábito de crescimento indeterminado, o crescimento contínuo ao longo do ciclo tende a intensificar esse efeito, uma vez que a planta mantém crescimento ativo enquanto ainda direciona nutrientes para os grãos. Nessa condição, mesmo que a planta absorva quantidades adequadas de P, o aumento do volume de tecidos faz com que a concentração do nutriente na parte aérea seja proporcionalmente menor, sem necessariamente indicar deficiência.

A inoculação microbiana influenciou significativamente ($p < 0,01$) os teores de P na parte aérea das plantas (Tabela 10). As cepas de *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) e *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084), já avaliadas quanto a eficiência na solubilização de fosfato (Oliveira et al., 2009; Abreu et al., 2017), contribuíram de forma efetiva para esse resultado. Espécies do gênero *Bacillus* apresentam atuação multifuncional, destacando-se pela produção de compostos promotores de crescimento — como AIA, sideróforos e substâncias envolvidas na formação de biofilme — que favorecem o desenvolvimento radicular e ampliam a eficiência de exploração de nutrientes (Velloso et al., 2020; Sousa et al., 2021).

Os teores de potássio na parte aérea (TPAK) não apresentaram respostas significativas para nenhum dos tratamentos avaliados (Tabela 10), isso indica que a

cultura manteve uma absorção adequada do nutriente, independentemente do manejo do solo ou da inoculação.

Para os teores de cálcio na parte aérea (TPACa) (Tabela 10), a inoculação com BSF apresentou diferenças significativas ($p < 0,01$) promovendo alterações na rizosfera capazes de aumentar a eficiência de absorção de cátions, como a liberação de ácidos orgânicos, especialmente AIA, que estimulam o crescimento e a atividade do sistema radicular. O maior volume de raízes finas aumenta a interceptação radicular, mecanismo essencial para a absorção de Ca^{+2} , nutriente de baixa mobilidade no solo.

Os teores de magnésio na parte aérea (TPAMg) apresentaram valor médio de 3 g kg^{-1} (Tabela 10). Esse resultado era esperado, considerando que o solo da área experimental possui textura argilosa, condição que favorece a retenção e a disponibilidade de Mg devido à maior capacidade de troca de cátions. Além disso, o teor elevado de fósforo no solo (42 mg dm^{-3}) tende a intensificar o sinergismo entre P e Mg, mecanismo fisiológico que aumenta a absorção de Mg após o ponto crítico de absorção de fósforo.

No entanto, mesmo em ambiente propício, os teores de magnésio não ultrapassaram a faixa adequada. Isso pode ser explicado pela competição entre cátions. O solo apresentou teores muito altos de cálcio (45 mmolc dm^{-3}) e potássio ($6,1 \text{ mmolc dm}^{-3}$), ambos acima das faixas consideradas altas para a cultura pelo Boletim 100. Como Ca^{2+} e K^{+} competem com Mg^{2+} pelos mesmos sítios de absorção radicular, concentrações elevadas desses nutrientes podem reduzir parcialmente a absorção de magnésio pela planta. Assim, embora o solo oferecesse condições favoráveis, a competição com Ca e K provavelmente limitou incrementos maiores nos teores de Mg na parte aérea, mantendo-os apenas dentro da faixa de suficiência.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 11, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos em relação ao acúmulo de nutrientes na parte aérea. A ordem de acúmulo dos macronutrientes foi a seguinte: $\text{K} > \text{N} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{S} > \text{P}$. Sendo o P (APAP) o nutriente de menor contribuição para o acúmulo. Para o P, esses resultados estão de acordo com os valores relatados por Vera et al. (2019). No entanto, esses autores observaram que o K foi o segundo nutriente mais requerido, se posicionando após o N.

Tabela 11. Acúmulo de nitrogênio (APAN), fósforo (APAP), potássio (APAK), cálcio (APACa), magnésio (APAMg) e enxofre (APAS) na parte aérea em função dos preparos do solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.

Preparo	ACÚMULO DE NUTRIENTES DA PARTE AÉREA (kg ha ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
SPD	70,50	5,58	80,88	47,37	10,96	7,15
ESC15	71,37	5,16	81,75	46,05	11,21	7,32
ESC30	76,43	6,12	87,90	54,49	13,44	8,31
Inoculação						
Com	78,62	6,25	90,37	54,29	12,91	8,23
Sem	66,92	4,98	76,65	44,32	10,83	6,96
Valor F						
Preparo (P)	0,25ns	0,76ns	0,22ns	1,03ns	1,86ns	0,98ns
Inoculação (I)	2,48ns	3,90ns	2,16ns	3,71ns	3,26ns	2,98ns
P x I	0,98ns	0,61ns	0,74ns	0,84ns	0,89ns	1,14ns
DMS	0,106	0,009	0,133	0,0739	0,0167	0,0106
CV (%)	25	27,98	27,36	25,7	23,82	23,7

ns: não significativo. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação. SPD: sistema plantio direto. ESC 15: escarificação a 15 cm. ESC30: escarificação a 30 cm.

Esse comportamento pode ser explicado pela função essencial do N na planta, já que, no acúmulo de nitrogênio na parte aérea (APAN), o nutriente participa diretamente da composição de citocininas (hormônios reguladores do crescimento) e da clorofila, principal pigmento fotossintético. Além disso, o nitrogênio integra a estrutura de aminoácidos, proteínas, nucleotídeos e diversos outros compostos fundamentais ao metabolismo vegetal (Taiz et al., 2017).

Apesar de não integrar estruturas orgânicas nas plantas, o potássio desempenha funções essenciais, como a regulação da abertura e do fechamento dos estômatos, a absorção de água, a fotossíntese, a ativação de enzimas, a síntese proteica e a expansão celular (Marschner, 2012). Essas funções explicam o acúmulo expressivo do nutriente na parte aérea (APAK).

O acúmulo de cálcio na parte aérea (APACa) foi o terceiro maior entre os macronutrientes (Tabela 11), de acordo com o observado por Vera et al. (2019). O cálcio é um componente estrutural fundamental da parede celular (Marschner, 1995) e, por esse motivo, seu fornecimento adequado é essencial para sustentar o crescimento, já que a expansão dos tecidos vegetais dependem da disponibilidade desse nutriente.

O acúmulo de magnésio na parte aérea (APAMg) foi de aproximadamente 11 kg ha⁻¹, valor compatível com o intervalo descrito na literatura, que varia de 10 a 18 kg

ha⁻¹, podendo chegar a 36 kg ha⁻¹ em algumas condições (Thung & Oliveira, 1988). O enxofre (APAS) apresentou o menor acúmulo, cerca de 7 kg ha⁻¹, valor inferior a referência na literatura para a cultura (Tabela 11).

4.6 Componentes de produção e produtividade

Para a massa de matéria seca da parte aérea do feijão-caupi (MSFC), não foram observadas diferenças significativas entre os manejos adotados (Tabela 12), apresentando média de 12,36 g planta⁻¹. Almeida et al. (2020), ao trabalharem com a cultivar BRS Guariba em época de semeadura próxima à do presente estudo, obtiveram média de 14,7 g planta⁻¹.

Em trabalho realizado com feijão-caupi, Leite et al. (2004) relatam que os prejuízos ao crescimento da cultura são maiores quando o déficit hídrico se prolonga, independentemente do estágio fenológico, resultando em redução progressiva da matéria seca de folhas, flores e frutos. Os autores também observaram que, sob períodos prolongados de estresse, as plantas tendem a diminuir seu crescimento e entrar em repouso fisiológico, porém retomam suas atividades após o reestabelecimento da umidade, com emissão de novas folhas e botões florais, evidenciando sua capacidade de superar condições adversas.

Entre os componentes de produção do feijão-caupi, o número de vagens por planta (NVP) é considerado um dos mais relevantes. No entanto, no presente estudo, esse parâmetro não foi afetado pelos manejos adotados (Tabela 12), apresentando média de aproximadamente 6,2 vagens por planta.

Coutinho (2016), avaliando o feijão-caupi no sistema plantio direto e convencional, registrou média de 5,43 vagens por planta no sistema plantio direto. Almeida et al. (2021), ao analisarem o efeito da calagem em diferentes cultivares, obtiveram 8,9 vagens por planta para a cultivar utilizada neste estudo. Almeida et al. (2020), que trabalhando com a cultivar BRS Guariba em época de semeadura próximas à do presente estudo, obtiveram 8,4 vagens por planta. De acordo com Silva, Lima e Menezes (2007), o número de vagens por planta constitui um dos principais componentes relacionados à produtividade de grãos, sendo altamente influenciado pelas condições ambientais.

Tabela 12. Massa seca da parte área do feijão-caupi (MSFC), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de cem grãos (MCG) e produtividade dos grãos (PG) em função dos preparos de solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.

Preparo	MSFC g planta ⁻¹	NVP -	NGV -	MCG G	PG kg ha ⁻¹
SPD	11,84	6,03	5,88	26,10	1.517,74
ESC15	11,77	7,13	5,75	28,63	1.560,01
ESC30	13,46	6,73	5,38	26,97	1.556,93
Inoculação					
Com	12,96	6,81	5,58	27,43	1.498,85
Sem	11,75	6,44	5,75	27,04	1.590,94
Valor F					
Preparo (P)	0,72ns	3,07ns	1,06ns	1,39ns	0,11ns
Inoculação (I)	0,87ns	1,00ns	0,33ns	0,10ns	1,26ns
P x I	0,73ns	0,14ns	1,06ns	0,35ns	0,12ns
DMS	4,82	1,35	1,08	4,66	302
CV (%)	25,86	13,56	12,62	11,35	12,99

ns: não significativo. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação. SPD: sistema plantio direto. ESC 15: escarificação a 15 cm. ESC30: escarificação a 30 cm.

Para o número de grãos por planta (NGP), também não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 12). De acordo com a Embrapa (2009), a cultivar utilizada apresenta, em média, 12 grãos por vagem, valor acima do encontrado neste trabalho, que registrou cerca de 5,66 grãos por vagem.

A menor formação de grãos observada no experimento pode estar associada à baixa precipitação ocorrida durante grande parte do desenvolvimento da cultura e ao excesso de precipitação durante o início do florescimento (Figura 3). Segundo Taiz et al. (2017a), a falta de água reduz o potencial hídrico nas células e a turgescência, comprometendo o crescimento de tecidos jovens, incluindo estruturas florais em desenvolvimento. Essa condição também intensifica o fechamento estomático, diminuindo a fotossíntese e a produção de fotoassimilados necessários para a fecundação e o início do desenvolvimento dos ovários.

Por outro lado, o excesso de água, especialmente no início do florescimento, pode ser igualmente prejudicial, uma vez que essa cultura apresenta sensibilidade a condições de encharcamento nessa fase crítica. Nessas condições, há prejuízos à respiração radicular e maior propensão ao abortamento de flores e vagens, refletindo diretamente na produtividade. Jadoski et al. (2003) constataram que o feijão-caupi

submetido ao excesso hídrico pode apresentar redução de produtividade de até 50%, evidenciando o impacto negativo do estresse por excesso de água.

Outro aspecto a ser considerado é o crescimento vegetativo mais expressivo, característico de cultivares de hábito indeterminado. Nessas condições, ocorre maior competição por assimilados entre tecidos vegetativos e estruturas reprodutivas, o que pode favorecer o abortamento floral.

A massa de cem grãos não apresentou diferenças significativas entre os manejos avaliados (Tabela 12). Ainda assim, a média observada no presente estudo foi de aproximadamente 27,23 g, valor superior ao descrito como característico para essa cultivar, estimado em 19,5 g (Embrapa, 2009).

No feijão-caupi, o processo de enchimento dos grãos está diretamente relacionado ao transporte de fotoassimilados via floema, o qual é influenciado pelo equilíbrio entre órgãos que produzem assimilados (fontes) e os que os consomem (drenos). De acordo com Taiz et al. (2017b), folhas maduras atuam como importantes fontes, enquanto flores, vagens e sementes em desenvolvimento funcionam como drenos, competindo entre si pelos recursos disponíveis. Durante o período reprodutivo, estruturas com maior demanda fisiológica ou em menor número tendem a receber maior quantidade desses compostos.

No presente estudo, a menor quantidade de grãos por vagens reduziu o número de drenos reprodutivos competindo simultaneamente. Com uma demanda total menor, os drenos remanescentes passam a ter maior prioridade, favorecendo o direcionamento de fotoassimilados aos grãos durante o enchimento. Esse comportamento pode justificar o aumento observado na massa de cem grãos em relação ao valor esperado para a cultivar, mesmo com produção reduzida de grãos em relação ao esperado para a cultivar.

Ainda segundo os autores, as condições ambientais podem alterar a hierarquia dos drenos, fazendo com que, quando há limitação na formação de vagens, aquelas que se desenvolvem se tornem fisiologicamente prioritárias. Dessa forma, o aporte de assimilados é mantido, favorecendo o acúmulo de reservas nos grãos.

Assim, os resultados obtidos estão de acordo com o modelo fonte–dreno. A redução no número de grãos não compromete necessariamente o seu enchimento; pelo contrário, pode favorecer o aumento da massa individual devido à menor competição interna por assimilados, caracterizando um mecanismo de compensação comum em leguminosas.

Embora os manejos avaliados não tenham afetado significativamente a produtividade de grãos (PG) (Tabela 12), destaca-se que, mesmo sob cultivo de sequeiro, o feijão-caupi pode apresentar desempenhos expressivos e economicamente viáveis.

Segundo a Embrapa (2009), a cultivar utilizada neste estudo é indicada para cultivo nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Apesar disso, no local avaliado apresentou bom desempenho produtivo, com média aproximada de 1.544 kg ha^{-1} , superando valores relatados para sua região de recomendação, tais como 1.475 kg ha^{-1} no Piauí, 1.508 kg ha^{-1} no Maranhão, 1.326 kg ha^{-1} no Rio Grande do Norte e 1.454 kg ha^{-1} em Roraima (Cravo et al., 2007). Matoso et al. (2018) analisaram diferentes épocas de semeadura da mesma cultivar em Botucatu, São Paulo, obtiveram produtividades de 1.180 kg ha^{-1} .

Em estudo conduzido por Souza et al. (2016), avaliando o uso de cobertura morta no cultivo de feijão-caupi sob estresse hídrico, os autores observaram que a redução da disponibilidade de água no solo comprometeu o crescimento das plantas e o acúmulo de biomassa. Entretanto, a presença de cobertura no solo atenuou os efeitos negativos do déficit hídrico. Esse comportamento favorável pode estar relacionado à elevada eficiência no uso da água apresentada pela cultura, o que possibilita ao feijão-caupi sustentar níveis satisfatórios de produtividade mesmo na ausência de irrigação suplementar.

Em determinadas condições, produtividades superiores a 1.500 kg ha^{-1} têm sido relatadas mesmo sem irrigação suplementar, desde que a precipitação ao longo do ciclo seja adequada, geralmente acima de 350 mm (Santos & Lima, 2015). Esses resultados demonstram que, mesmo com valores acumulados abaixo do recomendado para a cultura (Figura 3), foi possível obter bom desempenho produtivo no presente estudo.

Almeida et al. (2020), trabalhando com a cultivar BRS Guariba em época de semeadura semelhante à do presente estudo, relataram produtividade média de 3.168 kg ha^{-1} em experimento conduzido no município de Uberaba–MG, sob utilização de irrigação complementar.

Ademais, embora o cultivo irrigado apresente produtividades superiores, estudos indicam que o sistema de sequeiro permanece economicamente viável, evidenciando a boa adaptabilidade do feijão-caupi a ambientes com restrição hídrica. Além disso, mesmo sob condições adversas, o sistema plantio direto tem se mostrado uma

alternativa promissora para essa cultura, favorecendo maiores produtividades e maior eficiência no uso da água (Freitas et al., 2019).

4.7 Teores e exportação de nutrientes nos grãos

Com relação aos teores de nutrientes nos grãos (Tabela 13), o nitrogênio (TNG) apresentou diferenças significativas apenas entre os preparos de solo. Para os demais nutrientes, não foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos, com exceção do enxofre (TSG), que mostrou efeito tanto dos preparos de solo quanto da inoculação com as BSF.

Tabela 13. Teores de nitrogênio (TNG), fósforo (TPG), potássio (TKG), cálcio (TCaG), magnésio (TMgG) e enxofre (TSG) nos grãos, em função dos preparos do solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.

Preparo	TEOR DE NUTRIENTES DOS GRÃOS (g kg ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
SPD	30,32b	3,07	11,74	0,66	1,65	1,90b
ESC15	30,68ab	3,11	11,67	0,63	1,64	1,99b
ESC30	31,79a	3,20	12,03	0,62	1,66	2,24a
Inoculação						
Com	30,64	3,06	11,68	0,63	1,62	2,00b
Sem	31,22	3,19	11,95	0,65	1,67	2,09a
Valor F						
Preparo (P)	5,69*	1,19ns	1,46ns	0,82ns	0,26ns	25,67**
Inoculação (I)	2,49ns	3,14ns	2,14ns	0,35ns	5,72ns	5,02*
P x I	0,77ns	0,34ns	0,69ns	1,43ns	0,31ns	3,16ns
DMS	1,37	1,01	0,681	0,104	0,938	2,61
CV (%)	2,93	5,72	3,83	10,77	3,01	4,82

** : significativo a $p < 0,01$ * : $p < 0,05$. ns: não significativo. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação. SPD: sistema plantio direto. ESC 15: escarificação a 15 cm. ESC30: escarificação a 30 cm.

A diferença significativa entre os preparos de solo para o teor de N nos grãos (TNG) indica que a escarificação a 30 cm (Tabela 13) favoreceu o aumento desse nutriente, sugerindo que a melhoria das condições físicas do solo foi determinante. A escarificação reduz o adensamento na subsuperfície e amplia o volume de solo explorado pelas raízes, possibilitando maior absorção de N durante o florescimento e o enchimento das vagens, fases em que a cultura depende fortemente da assimilação corrente desse nutriente.

Cardoso e Melo (2017) destacam que o uso de escarificadores em áreas com compactação melhora o ambiente físico inicial do solo, o que favorece o crescimento radicular e contribui para um melhor desempenho nutricional do feijão-caupi.

Os teores de fósforo nos grãos (TPG) observados neste estudo (Tabela 13) encontram-se dentro da faixa adequada para o feijão-caupi, indicando que a disponibilidade de P no solo foi suficiente para atender à demanda da cultura e sustentar sua translocação para os grãos durante o enchimento dos grãos. Essa adequação nutricional reforça que, mesmo diante dos diferentes tratamentos, o ambiente manteve oferta suficiente do nutriente ao longo do ciclo.

Além disso, o teor de P nos grãos está significativamente correlacionado com a produtividade, o que demonstra que práticas adequadas de manejo do solo, aliadas ao uso de cultivares eficientes na absorção e redistribuição de P, podem elevar tanto o teor quanto o acúmulo de nutriente nos grãos, resultando em maior produtividade do feijoeiro (Fageria et al., 2015).

Os teores de potássio nos grãos (TKG) obtidos neste estudo situaram-se dentro da faixa considerada adequada para o feijão-caupi (Tabela 13), o que indica que a disponibilidade do nutriente no solo foi suficiente para suprir a demanda da cultura. Esse resultado é coerente com a textura argilosa do solo da área experimental, condição que favorece a retenção de K e reduz sua perda por lixiviação.

Os teores de cálcio (TCaG) e de magnésio (TMgG) nos grãos apresentados na Tabela 13, tendem a ser relativamente estáveis entre diferentes ambientes de cultivo (Fageria et al., 2011). A redução dos teores de Ca e Mg nos grãos, em comparação à parte aérea, está de acordo com Fageria et al. (2015), que relata que ambos aparecem em menores concentrações nos grãos, sendo o Ca normalmente superior ao Mg.

Com relação aos teores de enxofre nos grãos (TSG), observa-se que houve efeito significativo tanto dos preparos de solo ($p < 0,1$) quanto da inoculação com BSF ($p < 0,05$). O enxofre, embora essencial às plantas, ainda recebe pouca atenção no manejo nutricional, e sua disponibilidade no solo tende a diminuir em áreas com uso contínuo e prolongado (Fageria et al., 2015).

A escarificação a 30 cm rompeu camadas adensadas e aumentou a aeração do solo, o que pode ter estimulado a mineralização do S orgânico e, conseqüentemente, ampliado a oferta de sulfato, a forma absorvida pelas plantas. Esse efeito explica os maiores teores observados para esse preparo (Tabela 13).

No caso da inoculação microbiana, os tratamentos sem BSF apresentaram maiores teores de S nos grãos (Tabela 13). Esse resultado é coerente com a fisiologia do nutriente e com a ação das BSF, que atuam principalmente na disponibilização de fósforo. O aumento da absorção de P tende a intensificar o crescimento vegetativo, o que pode modificar o balanço interno de nutrientes. Nesse cenário, parte do S absorvido é direcionada para atender ao maior metabolismo estrutural das folhas e caules, reduzindo sua concentração relativa nos grãos — fenômeno conhecido como diluição fisiológica.

As quantidades de nutrientes extraídos pela cultura e exportados com os grãos permitem estimar as necessidades nutricionais da planta e constituem uma ferramenta importante para ajustar as recomendações de adubação. Esses dados auxiliam na definição da reposição adequada antes de cada cultivo, considerando a eficiência dos fertilizantes, o que contribui para a manutenção da fertilidade do solo e para o alcance do potencial produtivo da cultura. Além disso, compreender tanto a capacidade de absorção de nutrientes pela planta quanto as quantidades efetivamente removidas do sistema é fundamental para o planejamento de fertilização mais racionais.

Na Tabela 14 estão apresentados os dados referentes à exportação de nutrientes pelos grãos. Com exceção do cálcio (EXGCa), todos os nutrientes mostraram efeito significativo para os preparos de solo ($p < 0,01$). No caso das BSF, houve resposta significativa para N, P e Mg.

A exportação de nutrientes seguiu a ordem decrescente $N > K > P > S > Mg > Ca$. Esse padrão é semelhante ao observado por Vera et al. (2019), que encontraram distribuição semelhante ao avaliarem cultivares de feijão-caupi sob cultivo mínimo.

Pesquisas relatam uma exportação média de cerca de 25 kg ha^{-1} de N nos grãos (Soratto et al., 2013), valor inferior ao observado no presente estudo. No preparo com escarificação a 30 cm, que apresentou efeito significativo ($p < 0,01$), a média foi de $45,19 \text{ kg ha}^{-1}$. Para a inoculação, os tratamentos sem BSF também diferiram significativamente ($p < 0,05$), apresentando média de $41,44 \text{ kg ha}^{-1}$ (Tabela 14).

Tabela 14. Exportação de nitrogênio (EXGN), fósforo (EXGP), potássio (EXGK), cálcio (EXGCa), magnésio (EXGMg) e enxofre (EXGS) nos grãos, em função dos preparos do solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.

Preparo	EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES NOS GRÃOS (kg ha ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
SPD	36,55b	3,70b	14,16b	0,80	1,98b	2,29b
ESC15	38,85b	3,93b	14,78b	0,79	2,07b	2,53b
ESC30	45,19a	4,56a	17,12a	0,88	2,36a	3,19a
Inoculação						
Com	38,96b	3,89b	14,85	0,80	2,06b	2,56
Sem	41,44a	4,23a	15,85	0,85	2,2a	2,78
Valor F						
Preparo (P)	24,00**	11,38**	12,13**	1,90ns	14,85**	25,02**
Inoculação (I)	5,52*	5,03*	3,73ns	1,60ns	7,04*	4,54ns
P x I	2,92ns	1,00ns	1,75ns	0,38ns	1,66ns	3,03ns
DMS	2,53	1,93	1,88	1,03	2,15	2,56
CV (%)	6,43	9,14	8,25	12,76	6,67	9,82

** : significativo a $p < 0,01$. * : $p < 0,05$. ns: não significativo. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação. SPD: sistema plantio direto. ESC 15: escarificação a 15 cm. ESC30: escarificação a 30 cm.

A escarificação a 30 cm resultou em maior exportação de N pelos grãos (EXGN), indicando melhoria na exploração radicular, redução da resistência mecânica e maior eficiência na absorção de NO_3^- e NH_4^+ . O nitrogênio é o nutriente mais exportado pela cultura, principalmente por sua função essencial na síntese de proteínas. Durante o enchimento das vagens, estima-se que 70–90% do N presente nos grãos seja remobilizado das folhas e caules (Taiz et al., 2017), o que reforça a sensibilidade desse processo às condições que afetam o crescimento vegetativo.

A inoculação, por sua vez, reduziu a exportação de N (Tabela 14), possivelmente em razão de um efeito de diluição fisiológica. O maior crescimento vegetativo estimulado pela maior disponibilidade de P pode alterar o balanço interno de nutrientes, diminuindo proporcionalmente a fração de N direcionada aos grãos.

O fósforo é um nutriente altamente remobilizável, mas sua exportação depende, sobretudo, da eficiência de absorção pelas raízes. O aumento da exportação (EXGP) observado em ESC30 (Tabela 14) está associado à melhoria das condições físicas do solo, pois a escarificação profunda favorece a difusão dos fosfatos e amplia o volume de solo explorado pelo sistema radicular, resultando em maior absorção do nutriente. O P absorvido é fundamental para a síntese de ATP, fosfolipídios e ácidos nucleicos,

componentes essenciais para o enchimento dos grãos, fase em que o dreno reprodutivo se torna altamente ativo e exige grande aporte de energia metabólica.

Observou-se também que a maior exportação de P ocorreu na ausência de inoculação, indicando que, nessas condições, a planta direcionou de forma mais eficiente o P para os grãos, possivelmente porque o menor crescimento vegetativo favoreceu maior prioridade fisiológica para os órgãos reprodutivos durante o enchimento das vagens. Esse comportamento é compatível com a alta mobilidade do fósforo no floema e com a tendência natural das plantas de direcionarem o elemento para os drenos mais exigentes no período reprodutivo.

O potássio apresentou aumento significativo na exportação (EXKG) sob escarificação a 30 cm ($p < 0,01$), enquanto não houve resposta à inoculação (Tabela 14). Como o K é absorvido predominantemente por difusão, mecanismo responsável por cerca de 70 a 90% do transporte desse nutriente até as raízes, sua disponibilidade está fortemente ligada à umidade e à mobilidade no solo — fatores que tendem a melhorar quando há menor compactação. Dessa forma, a escarificação favorece as condições físicas que ampliam o fluxo de K em direção às raízes, refletindo em maior exportação do nutriente pelos grãos.

Para o cálcio (EXCaG), não foram observadas diferenças significativas na exportação entre os tratamentos. Esse comportamento está relacionado à baixa mobilidade do Ca no floema. Conforme descrito por Taiz et al. (2017), o cálcio é transportado quase exclusivamente pelo xilema e, após ser incorporado às paredes celulares na forma de pectatos, torna-se praticamente não remobilizável. Assim, mesmo quando a absorção poderia ter sido favorecida pela melhoria da estrutura física do solo nas escarificações, a translocação para os grãos permanece limitada.

Para o magnésio (EXMgG), observou-se aumento significativo ($p < 0,01$) na exportação em resposta à escarificação a 30 cm (Tabela 14). Essa resposta está relacionada às características fisiológicas do Mg, que apresenta boa mobilidade no floema e desempenha funções centrais no metabolismo fotossintético. O nutriente compõe o átomo central da clorofila, participa da ativação de várias enzimas e está diretamente ligado aos processos de assimilação do nitrogênio. Em condições de menor compactação, há maior exploração radicular devido a escarificação a 30 cm, o que favorece a absorção de Mg e amplia a quantidade de teor do nutriente aos grãos.

A ausência de efeito da inoculação com BSF já era esperada, já que o Mg não depende de mecanismos de solubilização microbiana, e sua alocação aos grãos está

mais associada à eficiência fotossintética e ao metabolismo do nitrogênio do que à disponibilidade momentânea do nutriente no solo.

A exportação de S (EXSG) observada no presente estudo reflete principalmente a maior absorção e translocação de sulfato proporcionada pela escarificação a 30 cm ($p < 0,01$), além da demanda por compostos sulfurados durante a fase de maturação dos grãos.

4.8 Qualidade dos grãos de feijão-caupi

Os tratamentos utilizados não promoveram diferenças significativas na qualidade dos grãos, exceto no tempo para máxima hidratação (Tabela 15 e 16). Ainda assim, as médias observadas para cada parâmetro mantiveram-se dentro dos padrões esperados para a cultivar utilizada e compatíveis com as exigências do mercado consumidor.

O tamanho dos grãos costuma ser pouco influenciado pelo ambiente ou pelo manejo, sendo principalmente determinado por fatores genéticos (Marinho et al., 2021). Essa característica pode justificar a ausência de diferenças significativas observadas para o rendimento de peneiras no presente estudo (Tabela 15).

Tabela 15. Rendimento de peneiras (RP14, RP13, RP12, RP11 e RP≥12) em função dos preparos de solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.

Preparo	RP14	RP13	RP12	RP11	RP≥12
	----- % -----				
SPD	18,23	40,04	27,24	9,15	85,50
ESC15	17,94	37,73	28,53	10,33	84,19
ESC30	17,39	38,35	28,51	10,26	84,25
Inoculação					
Com	18,12	38,04	27,73	10,28	83,88
Sem	17,58	39,37	28,46	9,54	85,41
Valor F					
Preparo (P)	0,16ns	1,50ns	0,53ns	1,54ns	1,24ns
Inoculação (I)	0,19ns	1,38ns	0,39ns	1,45ns	3,96ns
P x I	0,77ns	1,82ns	0,07ns	0,92ns	3,05ns
DMS	4,52	4,16	4,33	2,27	2,83
CV (%)	16,79	7,14	10,23	15,21	2,22

ns: não significativo. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação. SPD: sistema plantio direto. ESC 15: escarificação a 15 cm. ESC30: escarificação a 30 cm.

Apesar de o rendimento de peneiras já ser um critério bastante utilizado na classificação comercial, principalmente no feijão-comum, ainda não se observam na

literatura procedimentos metodológicos consolidados para essa avaliação em cultivares de feijão-caupi. Isso reforça a necessidade de pesquisas que estabeleçam um método de classificação de grãos adequado às exigências dos diferentes mercados consumidores, especialmente no que se refere ao tamanho dos grãos de feijão-caupi. Considerando que a cultura se destina em maior parte ao consumo humano, torna-se essencial assegurar que o produto final atenda aos padrões de qualidade exigidos pelo mercado.

Assim, verificou-se que a peneira RP13 obteve a maior proporção de grãos classificados, alcançando aproximadamente 40% do total (Tabela 15). Essa classe de peneira costuma apresentar boa aceitação comercial, pois corresponde ao tamanho intermediário preferido pelos consumidores de feijoeiro. Além disso, o rendimento médio das peneiras ≥ 12 foi de 84,6%, o que demonstra a predominância de grãos graúdos, superando o padrão mínimo adotado pelas empacotadoras de feijão comum, as quais oferecem gratificação financeira para lotes com RP acima de 70% (Carbonell et al., 2010).

No Brasil, há uma forte demanda por cultivares de feijão-caupi que apresentem grãos de maior tamanho, os quais costumam atingir maior valor comercial. Entretanto, as preferências do consumidor não são uniformes, variando conforme a região, o estado e o tipo comercial predominante, com destaque para o mercado de grãos brancos — grupo ao qual pertence a cultivar utilizada — (Martins et al., 2022).

Um aspecto relevante a ser considerado diz respeito ao destino dos grãos no mercado consumidor. No Brasil, o comércio interno de grãos secos ainda predomina, embora as exportações tenham apresentado crescimento expressivo nos últimos anos (Embrapa, 2021).

No presente estudo, o teor de proteína bruta (TPB) apresentou diferença significativa apenas entre os preparos de solo ($p < 0,05$), sendo que a escarificação a 30 cm resultou nos maiores valores (Tabela 16).

Ao avaliar oito cultivares lançadas no mercado, Freire Filho et al. (2011) encontraram teores de proteína bruta variando de 21% a 26%, com média de cerca de 24%, valor superior ao observado no presente estudo, cuja média foi de aproximadamente 19,33%.

Esses valores também ficaram abaixo do teor característico da própria cultivar, estimado em cerca de 22% (Embrapa, 2009). Segundo Lajolo et al. (1996), o acúmulo de proteína pode ser influenciado por diversos fatores, incluindo condições climáticas.

No presente estudo, a ausência de precipitação durante grande parte do ciclo da cultura (Figura 3) provavelmente contribuiu para a redução do teor de proteína bruta. Assim, embora a escarificação tenha melhorado as condições físicas do solo e favorecido o desenvolvimento da cultura, esse benefício pode não ter sido suficiente para que a cultivar alcançasse os valores esperados.

Tabela 16. Teor de proteína bruta (TPB), tempo de cozimento (TC), tempo máximo de hidratação (TMH) e relação de hidratação (RH) em função dos preparos de solo e da inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato.

Preparo	TPB	TC	TMH	RH
	%	Min	h:min	-
SPD	18,95b	13:00	9:14	2,21
ESC15	19,18ab	11:75	8:45	2,21
ESC30	19,87a	12:02	8:48	2,20
Inoculação				
Com	19,15	12:33	9:13 ^a	2,21
Sem	19,51	12:18	8:37b	2,2
Valor F				
Preparo (P)	5,69*	1,56ns	2,36ns	0,10ns
Inoculação (I)	2,49ns	0,07ns	5,94*	0,09ns
P x I	0,77ns	1,46ns	2,31ns	0,44ns
DMS	1,29	2,25	0,57	0,0491
CV (%)	2,93	12,11	3,7	1,48

*: significativo a $p < 0,05$. ns: não significativo. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação. SPD: plantio direto. ESC 15: escarificação a 15 cm. ESC30: escarificação a 30 cm.

O tempo de cozimento variou de 11,75 a 13,00 minutos entre os manejos avaliados (Tabela 16). Bezerra et al. (2019) observaram tempos entre 8 e 10 minutos para genótipos de feijão-caupi cultivados na Paraíba. Resultados semelhantes foram relatados por Silva (2011), com valores de diferentes cultivares variando de 9 a 14 minutos. De forma próxima ao observado neste estudo, Silva (2020) também registrou tempos semelhantes para a cultivar BRS Guariba. Os rápidos tempos de cozimento podem estar relacionada à maior capacidade de absorção de água, conforme descrito por Plhak et al. (1989).

O tempo de cozimento dos grãos se tornou um dos principais atributos considerados pelos consumidores na escolha de uma cultivar (Oliveira et al., 2012). Além disso, a avaliação desse parâmetro é obrigatória no processo de registro de novos materiais junto ao Serviço Nacional de Proteção de Cultivares (SNPC), vinculado ao

MAPA, o que evidencia a relevância de estudos voltados à caracterização dessa variável em diferentes cultivares (Bertoldo, 2009).

Mais recentemente, novas cultivares têm sido disponibilizadas ao mercado com tempos de preparo ainda menores, pois há constante avanço no melhoramento genético na medida que cultivares mais novas são lançadas.

A seleção de cultivares de feijão-caupi com menor tempo de cozimento é de grande importância, pois contribui para a preservação das propriedades químicas, físicas e sensoriais dos grãos durante o processamento (Bordin et al., 2010). Quando o tempo de cozimento é elevado, as cultivares tendem a apresentar menor aceitação pelos consumidores, em razão do maior consumo de energia necessário para o preparo. Assim, o desenvolvimento de genótipos de rápido cozimento torna-se estratégico para atender à demanda de um mercado que busca praticidade e economia de energia no preparo dos alimentos (Bezerra et al., 2019).

A literatura ainda é limitada em relação a estudos que abordem o tempo de cozimento do feijão-caupi, evidenciando a necessidade de maiores investigações sobre essa característica em diferentes condições e regiões de cultivo.

A inoculação com bactérias solubilizadoras de fósforo influenciou significativamente o tempo máximo de hidratação (TMH) dos grãos ($p < 0,05$) (Tabela 16). O efeito significativo do TMH observada nos tratamentos inoculados pode estar relacionado a mecanismos fisiológicos promovidas pela atuação de *Bacillus subtilis* no sistema solo - planta

De acordo com Zucareli et al. (2018), a inoculação associada ao fornecimento de fósforo favorece o crescimento radicular e vegetativo, ampliando a capacidade de absorção de água e nutrientes e impactando diretamente o desenvolvimento dos grãos. Esse efeito ocorre porque as bactérias solubilizadoras de fósforo aumentam a disponibilidade do nutriente na rizosfera e estimulam o crescimento do sistema radicular, promovendo maior exploração do solo e, conseqüentemente, maior absorção de água e nutrientes. Os autores ressaltam que esse efeito tende a se manifestar em estádios mais avançados, especialmente após o florescimento, fase em que ocorre o enchimento dos grãos e são definidas importantes características estruturais, como espessura de parede celular e conformação do tegumento.

O processo de hidratação de grãos é um dos fatores presente na caracterização da qualidade fisiológica do grão, contribuindo para a extração de algum constituinte de

interesse no cozimento, na redução ou eliminação de fatores antinutricionais existentes nos grãos e na melhora da digestibilidade (Omoto et al., 2009).

No feijão-caupi, a ocorrência de grãos impermeáveis está relacionada a um mecanismo de proteção utilizado pela planta em condições ambientais adversas. Lam-Sanches et al. (1990) relatam que, em situações de excesso de chuva no momento da semeadura, sementes permeáveis tendem a apodrecer, enquanto aquelas com tegumento impermeável conseguem resistir ao período úmido e germinar posteriormente.

No presente estudo, houve poucos registros de precipitação após a emergência (Figura 3), e não foram observados sintomas acentuados de déficit hídrico nas plantas. Esse cenário indica que o processo natural de absorção de água foi suficiente para manter a integridade das membranas. Como resultado, os grãos formados apresentaram boa capacidade de hidratação, atingindo a saturação em menor tempo. Dessa forma, o desempenho observado no tempo de máxima hidratação está associado às condições fisiológicas adequadas do tegumento.

Em Boa Vista – RR, Campos et al. (2010) observaram que a cultivar BRS Guariba apresentou tempo de máxima hidratação de 11,48 horas. Já Lam-Sanchez et al. (1990), avaliando cinco genótipos de feijão-caupi em São Paulo – SP, registraram valores médios variando de 5 a 12 horas para esse parâmetro. Resultados superiores aos obtidos neste estudo foram relatados por Almeida et al. (2020), os quais, trabalhando com a mesma cultivar em época de semeadura semelhante, encontraram média de 13,19 horas. Por outro lado, Lemos et al. (2004) observou que, em cultivares de feijão-comum do grupo carioca, o tempo necessário para atingir a máxima hidratação variou de 8,17 a 12,2 horas, dependendo do material genético avaliado.

Dessa forma, os resultados obtidos reforçam o potencial da cultivar avaliada para atender às exigências do mercado consumidor, que prioriza produtos de preparo rápido e menor custo energético.

As propriedades do tegumento, como espessura, massa, aderência aos cotilédones, elasticidade, porosidade e comportamento coloidal, exercem influência direta sobre a absorção de água pelos grãos de feijão. Em função disso, o tempo necessário para atingir a máxima hidratação pode variar entre cultivares e de acordo com as condições ambientais às quais os grãos são expostos durante o seu desenvolvimento (Corrêa, 2007).

A relação de hidratação não apresentou diferenças significativas entre os manejos avaliados (Tabela 16). Ainda assim, os valores permaneceram próximos de 2,0 indicando boa capacidade de absorção de água pelos grãos de feijão-caupi.

Bezerra et al. (2019) destacam que diversos estudos indicam uma relação inversa entre o tempo de cozimento e a capacidade de absorção de água pelos grãos, de modo que maiores índices de hidratação tendem a resultar em tempos menores de cozimento.

Conforme descrito por Farinelli e Lemos (2010) para feijão-comum, após aproximadamente 12 horas de hidratação, os grãos tendem a duplicar sua massa inicial, devido à absorção de água em quantidade semelhante ao seu próprio peso. Resultados semelhantes foram relatados por Leal et al. (2021) e Oliveira et al. (2023), que também verificaram que grãos de feijão comum absorvem volumes de água equivalentes à sua massa original.

No mesmo sentido, os resultados deste estudo estão próximos com os de Almeida et al. (2020), que trabalhando com a cultivar BRS Guariba em época de semeadura próximas às do presente estudo, registraram relação de hidratação de 2,29.

A adequada capacidade de hidratação dos grãos é um aspecto desejável para a indústria e para o consumidor final, pois está diretamente associada à redução do tempo de cozimento. Grãos que embebem água de forma eficiente tendem a cozinhar mais rapidamente e a apresentar melhor qualidade sensorial, fatores que contribuem para maior aceitação no mercado e menor gasto energético durante o preparo.

5. CONCLUSÃO

- A escarificação esporádica em sistema plantio direto consolidado não alterou a produção de biomassa do milho e seus teores e acúmulos de nutrientes.
- Não houve diferenças significativas entre os tratamentos para a qualidade de semeadura do feijão-caupi e fração de cobertura do solo.
- Entretanto, observou-se que a inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato elevou o índice de clorofila da cultura do feijão-caupi e promoveu alterações significativas nos teores de alguns nutrientes na parte aérea e na exportação dos grãos, com respostas mais expressivas em solo escarificado a 30 cm.

- As demais variáveis de produção e produtividade não foram influenciadas pelos tratamentos.
- Conclui-se que a escarificação apresenta efeitos agrônômicos limitados em sistema plantio direto de longa duração, podendo contribuir para melhorias pontuais nas condições do solo e na resposta das plantas à inoculação microbiana. Assim, seu uso deve ser considerado apenas em situações em que haja necessidade comprovada de correção física do solo.

6. REFERÊNCIAS

- ABREU, C. S.; FIGUEIREDO, J. E. F.; OLIVEIRA, C. A.; DOS SANTOS, V. L.; GOMES, E. A.; RIBEIRO, V. P.; BARROS, B. A.; LANA, U. G. P.; MARRIEL, I. E. Maize endophytic bacteria as mineral phosphate solubilizers. **Genetics and Molecular Research**, vol. 16, no. 1, 16 Feb. 2017.
- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 519-531, 2004.
- ALMEIDA, A. L. G.; MINGOTTE, F. L. C.; COELHO, A. P.; LEMOS, L. B.; MELO, F. B.; PRADO, R. M. Agronomic performance of cowpea cultivars (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) under application of limestone doses. **Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, n. 2, p. 1-10, 2021.
- ALMEIDA, F. S.; MINGOTTE, F. L. C.; LEMOS, L. B.; SANTANA, M. J. Agronomic performance of cowpea cultivars depending on sowing seasons in the Cerrado biome. **Revista Caatinga, Mossoró**, v. 30, n. 2, p. 361-369, abr./jun. 2017.
- ALMEIDA, F. S.; MINGOTTE, F. L. C.; COELHO, A. P.; LEMOS, L. B.; SANTANA, M. J.; ROCHA, M. M. Does the sowing period change the grain technological quality of cowpea cultivars? **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 15, n. 4, e8677, 2020.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L., & SPAROVEK, G. Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 6, pág. 711-728, 2013.
- ANDRIOLI, I.; CENTURION, J. F. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27., Brasília, 1999. Brasília, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 1999. p.1-4 CD ROM.
- ARAÚJO, A. et al. Doses e fontes de fósforo sob a eficiência nutricional de genótipos de feijão-caupi. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, n. 27, 2018.

ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). Nutrição mineral de plantas. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2006. p. 253-280.

ARCOVERDE, S. N. S.; DE SOUZA, C. M. A.; CORTEZ, J. W.; GUAZINA, R. A.; MACIAK, P. A. G. Qualidade do processo de semeadura da cultura do milho de segunda safra. **Revista Engenharia na Agricultura-reveng**, v. 24, n. 5, p. 383-392, 2016.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS [AOAC]. 1995. Official methods of analysis. 16 ed. **AOAC**, Washington, USA.

BERTOLDO, J.G.; COIMBRA, J.L.M.; NODARI, B.O.; GUIDOLIN, A.F.; HEMP, S.; BARILI, L.D.; VALE, N.M.; ROZZETO, D.S. Stratification of the state of Santa Catarina in macro-environments for bean cultivation. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Florianópolis, v.9, p.335-343, 2009.

BEZERRA, J. M.; VIEIRA, M. M. S.; SANTOS, A. F., FARIAS, E. T. R.; LOPES, M. F.; dos SOUZA, A. S. Composição química de oito cultivares de feijão-caupi. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 14, n. 1, 41-47. 2019.

BORDIN, L. C.; COELHO, C. M. M.; SOUZA, C. A. D.; ZILIO, M. Diversidade genética para a padronização do tempo e percentual de hidratação preliminar ao teste de cocção de grãos de feijão. **Food Science and Technology**, London, v. 30, n. 4, p. 890-896. 2010. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612010000400009.

BRAZ, A. J. B. P.; SILVEIRA, P. M. da.; KLIEMANN, H. J.; ZIMMERMANN, J. P. Acumulação de nutrientes em folhas de milheto e dos capins braquiária e mombaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 34, n. 2, p. 83-87, 2004.

BRUNKEN, A. V. (1977). A systematic study of Pennisetum sect. Pennisetum (Gramineae). **American Journal of Botany**, 64(2), 161-176. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1977.tb15715.x>

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Revista Ciência Rural**, v. 35, n. 4, p. 813-819, 2005.

CAMPOS, E. de S.; ALVES, J. M. A.; UCHÔA, S. C. P.; ALBUQUERQUE, J. de A. A. de.; SANTOS, C. S. V. dos. Características morfológicas e físicas de grãos secos e hidratados de cinco cultivares de feijão-caupi. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 4, n. 1, p. 34-41, 2010.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H.; BRARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTI, R.B.; NEVES, J.C.L. 1. ed. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 7, p. 375-470.

CARDOSO, M. J.; RIBEIRO, V. Q. Desempenho agrônomo do feijão-caupi, cv. Rouxinol, em função de espaçamentos entre linhas e densidades de plantas sob regime de sequeiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 37, p. 102-105, 2006.

CARVALHO, A.M.X.; MENDES, F.Q.; MENDES, F.Q.; TAVARES, L.F. SPEED Stat: a free, intuitive, and minimalist spreadsheet program for statistical analyses of experiments. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, 20(3): e327420312, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332020v20n3s46>.

CAVALCANTE, V. S; SANTOS, V. R; NETO, A. L. dos S; SANTOS, M. A. L dos; SANTOS, C. G. dos; COSTA, L. C. **Biomassa e extração de nutrientes por plantas de cobertura**. Arapiraca, AL: Universidade Federal de Alagoas, 2012.

CAZETTA, D. A.; FORNASIERI FILHO, D.; GIROTTO, F. Composição, produção de matéria seca e cobertura do solo em cultivo exclusivo e consorciado de milho e crotalária. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringa, v. 27, p. 575-580, 2005.

CHAGAS, R. C. S. **Avaliação de fontes de silício para as culturas do arroz e milho**. Piracicaba, 2004. 80 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo.

CHIEZA, E. D.; GUERRA, J. G. M.; ARAÚJO, E. S.; ESPÍNDOLA, J. A.; FERNANDES, R. C. Produção e aspectos econômicos de milho consorciado com *Crotalaria juncea* L. em diferentes intervalos de semeadura, sob manejo orgânico. **Revista Ceres**, v. 64, n. 2, p. 189-196, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764020013>.

COELHO, A. M.; PEREIRA FILHO, I. A. A importância do milho na disponibilização de potássio. **Campo & Negócios**, Uberlândia, v. 110, pág. 40-42, abr. 2012.

COELHO, A. P.; FARIA, R. T. de; LEMOS, L. B.; ROSALEN, D. L.; DALRI, A. B. Yield predict and physiological state evaluation of irrigated common bean cultivars with contrasting growth habits by learning algorithms using spectral indices. **Geocarto International**, v. 0, p. 1-23, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2054715>.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2024/25 – 12º levantamento**. Brasília, DF: Companhia Nacional de Abastecimento, set. 2025. Tabela de dados – Produção e balanço de oferta e demanda de grãos (XLS).

CONAC - Congresso Nacional de feijão-caupi, 4, Sorriso. **Feijão-caupi: avanços e desafios tecnológicos e de mercados: resumos**. Brasília: Embrapa, 269 p. 2016.

CORRÊA, M.M. Avaliação da qualidade tecnológica de feijão comum (*Phaseolus vulgaris*, L.) de sete cultivares, quanto à: absorção de água, tempo de cozimento, *hard-shell* e, aos teores de ferro e zinco antes e após diferentes métodos de cozimento doméstico. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – Instituto de Tecnologia Seropédica, 2007.

CORTEZ, J. W.; ALVES, S.; DA, A. D.; MOURA, M. R. D. DE; OLSZEWSKI, N.; NAGAHAMA, J.; De, H. Physical properties of yellow argisol in the semiarid region of northeastern Brazil under tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1207–1216. 2011.

DERPSCH, R. Historical review of no-tillage cultivation of crops. In: SEMINAR NO TILLAGE CULTIVATION OF SOYBEAN AND FUTURE RESEARCH NEEDS IN

SOUTH AMERICA, 1., 1998, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** [Toquio]: JIRCAS, 1998. p. 1-18.

DRESCHER, M. S.; REINERT, D. J.; DENARDIN, J. E.; GUBIANI, P. I.; FAGANELLO, A.; DA SILVA, B. R.; ZARDIN, M. C. Fertilizer shanks to promote soil decompaction in the seeding operation. **Cienc. Rural**, v.47, n. 3, p. 1–8, 2017.

DRESCHER, M. S.; REINERT, D. J.; DENARDIN, J. E.; GUBIANI, P. I.; FAGANELLO, A.; DRESCHER, G. L. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 2, p. 159-168, 2016.

DRESCHER, M. S. et al. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1713-1722, 2011.

EMBRAPA – AGÊNCIA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA. *Consumo de água – Feijão-caupi*. Conteúdo migrado na íntegra em: 20 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao-caupi/producao/irrigacao/consumo-de-agua>. Acesso em: 27 out. 2025.

EMBRAPA – AGÊNCIA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA. *Mercado e comercialização*. Portal Cultivos: Feijão-caupi. Conteúdo migrado na íntegra em: 20 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao-caupi/pre-producao/socioeconomia/mercado-e-comercializacao>. Acesso em: 27 out. 2025

EMBRAPA. **Feijão caupi - portal embrapa**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao-caupi>. Acesso em: 19 ago. 2025.

EMBRAPA MEIO-NORTE. **Cultivo de feijão vigna**. 2003. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/FeijaoCaupi/>>.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Org. SILVA, F. C. Brasília, DF: Embrapa, 1999. 370 p.

EMBRAPA. **Sistema de produção do milho**. Brasília: Embrapa, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br>.

FAGERIA NK, STONE LF, SANTOS AB AND CARVALHO MCS. Nutrição mineral do feijoeiro. Brasília: **Embrapa Arroz e Feijão**, 2015.

FAGUNDES, Marla Oliveira et al. Qualidade de um latossolo sob plantio convencional e sistema plantio direto no cerrado baiano, Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 3, p. 281-297, 2019.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division**. 2018. Disponível em: . Acesso em: 30 ago. 2025.

FAO. **Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação.** International Year of Millets. 2023.

FARINELLI R, LEMOS L.B (2010) Yield, agronomic efficiency, technological and nutritional characteristics of the common bean with nitrogen fertilization in no-tillage and conventional tillage. **Bragantia** 69:165-172.

FARINELLI, R; LEMOS, L. B. Qualidade nutricional e tecnológica de genótipos de feijão cultivados em diferentes safras agrícolas. **Bragantia**: Campinas, v.69, n.3, p.759-764, 2010.

FIDALSKI, J. et al. Revolvimento ocasional e calagem em Latossolo Muito Argiloso em sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 5, p. 1483-1489, 2015.

FILLA, V. A.; COELHO, A. P.; MEIRELLES, F. C.; CAVALCANTE, A. G.; OLIVEIRA, N. H. C.; LEMOS, L. B. Responsiveness of Arabica coffee cultivars to skeleton pruning in a low-altitude region. **Crop Science**, v. 64, n. 2, 2024.

FIORENTIN, C. F.; LEMOS, L. B.; JARDIM, C. A.; FORNASIERI FILHO, D. Formação e manutenção de palhada de gramíneas concomitante à influência da adubação nitrogenada em cobertura no feijoeiro irrigado em sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 917-924, 2011.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA - FEBRAPDP. **Evolução Área do Sistema Plantio Direto no Brasil**. Foz do Iguaçu, 2017. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br/area-de-pd>. Acesso em: 01 set. 2025.

FERREIRA, F. M.; OSS, L. L.; CARNEIRO, M. A.; LITTER, F. A. Distribuição longitudinal na semeadura do milho com semeadoras de precisão mecânica e pneumática. **Nativa**, v. 7, n. 3, p. 296-300, 2019.

FOLONI, J. S. S., CATUCHI, T. A., DE MORAES BARBOSA, A., CALONEGO, J. C., & TIRITAN, C. S. Acúmulo de nutrientes e relação C/N em diferentes estádios fenológicos do milho submetido à adubação nitrogenada. **Revista Agro@ mbiente On-line**, v. 10, n. 1, p. 1-9, 2016.

FONSECA, M. R.; FERNANDES, A. R.; SILVA, G. R. da; BRASIL, E. C. Teor e acúmulo de nutrientes por plantas de feijão-caupi em função do fósforo e da saturação por bases. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 53, n. 2, p. 195-205, jul./dez. 2010.

FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q.; RODRIGUES, J.E.L.F. & VIEIRA, P.F. DE M.J. (2017) – **A Cultura: Aspectos Socioeconômicos**. In: Vale, J.C do; Bertini, C. & Borém, A. (Eds.) – Feijão-Caupi do plantio à colheita. Viçosa, MG; UFV, cap. 1, p. 9-34.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. de M.; SILVA, K. J. D.; NOGUEIRA, M. do S. da R.; RODRIGUES, E. V. Feijão-Caupi no Brasil. **Produção, melhoramento genético, Avanços e desafios**. Teresina, Piauí, Brasil, p. 18-38. 2011.

FREITAS, R. M.; DOMBROSKI, J. L.; DE FREITAS, F. C.; NOGUEIRA, N. W.; LEITE, T. S.; PRAXEDES, S. C. Water use of cowpea under deficit irrigation and cultivation

systems in semi-arid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 271-276, 2019.

JUDICE, M. G. Avaliação do coeficiente de variação em experimentos zootécnicos. 2000. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal de Lavras.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. S.; HORBE, T. A. N.; FERREIRA, A. O.; TABALDI, F. M.; LANZANOVA, M. E. Alterações nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob plantio direto induzidas por diferentes tipos de escarificadores e o rendimento da soja. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 35, n. 6, p. 2115-2126, 2011.

GONÇALVES, E. A. Sistemas de manejo do solo e velocidade de semeadura na cultura do milho. 2019. **Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrícola)** – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2019.

INSPER AGRO GLOBAL. *Geopolítica dos Fertilizantes: Impactos sobre o Agronegócio Brasileiro*. São Paulo: Insper Agro Global, 2025. Disponível em: <https://agro.insper.edu.br/storage/papers/November2025/2025.11.05%20IAG%20WP%20Geopol%C3%ADtica%20dos%20Fertilizantes%20%20VERS%C3%83O%20COMPLETA%20%5BPT%5D.pdf>.

JESCHKE, W. D. et al. Effects of P deficiency on assimilation and transport of nitrate and phosphate in intact plants of castor bean (*Ricinus communis* L.) **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 48, n. 1, p. 75-91, 1997.

KARIKARI, B.; ARKORFUL, E.; ADDY, S. Growth, Nodulation and Yield Response of Cowpea to Phosphorus Fertilizer Application in Ghana. **Journal of Agronomy**, v. 4, n. 4, p.234-240, 2015.

KEHRWALD, Joice Camila. **Eficiência de bactérias solubilizadoras de fósforo em diferentes ambientes no desenvolvimento do trigo**. 2025. 36 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2025.

KYEI-BOAHEN S.; SAVALA C. E.; CHIKOYE D.; ABAIDOO R. Growth and Yield Responses of Cowpea to Inoculation and Phosphorus Fertilization in Different Environments. **Frontiers in Plant Science**: v. 8, p. 1-13, 2017.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 36 p.

KRISHNARAJ, P. U. DAHALE U. P. Mineral phosphate solubilization: concepts and prospects in sustainable agriculture. **Proc Indian Natl Sci Acad**. 2014. p. 389-405.

KUMAR, K. A. (1989). Pearl millet: current status and future potential. **Outlook on Agriculture**, 18(2), 46-53. <https://doi.org/10.1177/003072708901800201>.

KUMAR, S., HASH, C. T., NEPOLEAN, T., MAHENDRAKAR, M. D., SATYAVATHI, C. T., SINGH, G., RATHORE, A., YADAV, R. S., GUPTA, R., & SRIVASTAVA, R. K.

(2018). Mapping grain iron and zinc content quantitative trait loci in an inbred-derived immortal population of pearl millet. **Genes**, 9(5), 24.

LAJOLO, F. M.; GENOVESE, M. I.; MENEZES, E. W. Qualidade nutricional. In: ARAUJO, R. S.; AGUSTÍNRAVA, C.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, M. J. de O. (Coords.). Cultura do feijoeiro comum no Brasil. Piracicaba: **Potafos**, p. 71-99, 1996.

LAM-SANCHEZ, A.; DURIGAN, J. F.; CAMPOS, S. L.; SILVESTRE, S. R.; PEDROSO, P. A. C.; BANZATTO, D. A. Efeitos da época de semeadura sobre a composição química e características físico-químicas de grãos de cultivares de *Phaseolus vulgaris* L., *Phaseolus angularis* (Wild) Wright e *Vigna unguiculata* (L) Walp. **Alimentos e nutrição**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 35-44, 1990.

LEAL FT, BETTIOL JVT, FILLA VA, COELHO AP, MINGOTTE FLC, LEMOS LB (2021) Grain quality of common bean cultivars under low and high nitrogen dose, **Revista de la facultad de ciencias agrarias**, 53:118-127.

LEITE, M. L.; VIRGENS FILHO, J. S. Produção de matéria seca em plantas de caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) submetidas a déficits hídricos. **Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 43-51, 2004.

LEMOS, L.B.; OLIVEIRA, R.S.; PALOMINO, E.C.; SILVA, T.R.B. Características agrônomicas e tecnológicas de genótipos de feijão do grupo comercial Carioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.319-326, 2004.

LINHARES, C. F. L. **Comportamento de três cultivares de caupi, submetidos à omissão de nutrientes, cultivados em amostras de Gleissolo de várzea do Rio Pará**. 2007. 58 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2007.

LIU, W.; ZHANG, X.; HE, D.; LIAO, S.; LIU, D.; HUANG, Q. Effects of Millet Crop Rotation on Soil Organic Carbon in a Karst Region in Southwest China. **Soil Research**, v. 53, n. 7, p. 813-821, 2015.

LONGE, O.G. Varietal differences in chemical characteristics related to cooking quality of cowpea. **Journal Food Products**. Nigéria, p.143-150. 1983.

LÓPEZ-ARREDONDO, D. L. et al. Phosphate nutrition: Improving low- phosphate tolerance in crops. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 65, n. 1, p. 95-123, abr. 2014.

MACHIONE, E. de C.; QUEIROZ, R. F. de; LOPES, A.; FURLANI, C. E. A.; CANATA, T. F. No-tillering system: is it worth conducting soil scarification as an option for “field reform”? **Agriculture**, v. 14, n. 8, p. 1434, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14081434>.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1997. p. 308.

MARCANTE, Nericles Chaves; CAMACHO, Marcos Antonio; JUNIOR, Francisco Pereira Paredes. Teores de nutrientes no milho como cobertura de solo. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 2, p. 196-204, 2011.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press. 2^a ed. 1995. 889 p.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3ed. Academic Press, 2012. 649p.

MARTINS, M. P. S. C.; LOPES, A. F. S.; JEAN, A.; DAMASCENO-SILVA, K. J.; MARTINS, M. C. C.; ROCHA, M. M. Characterization of cowpea cultivars for grain size, color, and biofortification. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 36, n. 1, p. 207-214, 2023.

MATOSO, A. O.; SORATTO, R. P.; GUARNIERI, F.; COSTA, N. R.; ABRAHÃO, R. C.; TIRABASSI, L. H. Sowing date effects on cowpea cultivars as a second crop in southeastern Brazil. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 5, p. 1799-1812, 2018.

MELO, F. B. Nutrição e adubação mineral do feijão-caupi. In: CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI, 4., 2016, Sorriso. **Feijão-caupi: avanços e desafios tecnológicos e de mercados**: resumos. Brasília, DF: Embrapa, 2016. p. 265-266. Disponível em: Acesso em: 01 set. 2025.

MIORANZA, D. et al. Alterações estruturais de um Latossolo argiloso sob plantio direto induzidas pela intensidade de tráfego de um trator. **Revista Agropecuária Técnica**, Areia, v. 36, p. 203–211, 2015.

MIRANDA, R. A. Relatório de avaliação dos impactos de tecnologias geradas pela Embrapa. **Embrapa**, Sete Lagoas, 2019. Disponível em: https://bs.sede.embrapa.br/2018/relatorios/milhoesorgo_2018_milheto.pdf. Acesso em: 30 ago. 2025.

MISIUNAS, S.; KOJENÉ, A. Winter Cereal Cover Crops and Their Importance in Soil Erosion Mitigation. **Acta Scientiarum Polonorum Agricultura**, [s.l.], v. 15, n. 4, p. 57-68, 2016.

MORAES, M. T. **Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejo do solo em Latossolo Vermelho Distroférrico muito argiloso**. 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MORAES, M. T. DE.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; CEZAR, J.; RODRIGUES, V.; BONINI, F. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.155, n. 1, p.351–362, 2016.

MOTTER, Paulino et al. **Plantio direto: A tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira**. Foz do Iguaçu: Parque Itaipu, 2015.

NAGAHAMA HJ, GRANJA GP, CORTEZ JW, RAMOS RL, ARCOVERDE SNS (2016) Efeitos da escarificação mecânica nos atributos físicos do solo e agronômicos do capim elefante. **Revista Ceres** 63:741–746. doi: 10.1590/0034-737x201663050020.

NASCIMENTO, V. D.; et al. Soil mechanical scarification increases the dry matter yield of cover crops under no-tillage. **IDESIA (Chile)**, v. 37, n. 4, p. 29-39, dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-3429201900040029>.

NETTO, D. A. M. A cultura do milho. **Embrapa Milho e Sorgo**, 1998. ISSN 0101-5605. Acesso em: 30 ago. 2025.

OLIVEIRA, I. J. et al. Recomendações técnicas para o cultivo de feijão-caupi no estado do Amazonas. **Circular Técnica Embrapa**, Manaus, v. 71, p. 1-30, 2019.

OLIVEIRA, C. A.; ALVES, V. M. C.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; SCOTTI, M. R.; CARNEIRO, N. P.; GUIMARÃES, C. T.; SCHAFFERT, R. E.; SÁ, N. M. H. Phosphate solubilizing microorganisms isolated from rhizosphere of maize cultivated in an oxisol of the Brazilian Cerrado Biome. **Soil Biology and Biochemistry**, vol. 41, no. 9, p. 1782–1787, Sep. 2009.

OLIVEIRA NHC, COELHO AP, MEIRELLES FC, CAZUZA A, LEMOS LB (2023) Response of early-cycle common bean cultivars with carioca, black and speckled grains to top-dressing nitrogen fertilization. **Bioscience Journal**, v. 39, p. e39005.

OLIVEIRA, J. A. de.; RÊGO, I. C.; SCIVITARRO, W. B.; LIMA FILHO, O. F. de.; STEFANUTTI, R.; GONZÁLES, G. R.; BOARETTO, A. E. Efeito de fontes e de aditivos na absorção de 35S via foliar pelo feijoeiro. *Scientia Agricola*, Piracicaba. v. 52, n. 3, p.452-457, 1995.

OLIVEIRA, D. P.; VIEIRA, N. M. B.; SOUZA, H.C.; MORAIS; A. R. de.; PEREIRA, J.; ANDRADE, M. J. B. Qualidade tecnológica de grãos de cultivares de feijão-comum na safra das águas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 5, p. 1831- 1838, 2012.

OMOTO, E. S.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, R. M. M.; COUTINHO, M. R.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. Modelagem matemática e análise da hidratação de grãos de ervilha. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 29, n. 1, p. 12-18, 2009.

PADOVAN, M.O.; MOTTA, I.S.; CARNEIRO, L.F.; MOITINHO, M.R.; SALOMÃO, G.B. Dinâmica de acúmulo de massa e nutrientes pelo milho para fins de adubação verde em sistemas de produção sob bases ecológicas. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 7, p. 95-103, 2012.

PASSOS, A.; ALVARENGA, R.; SANTOS, F. Sistema de plantio direto. In: Nobre, MM; Oliveira, IR de (Ed.). **Agricultura de baixo carbono: tecnologias e estratégias de implantação**, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1101765/1/>. Sistemaplantio.pdf. Acesso em: 01 set. 2025.

PRADO, R. de M. **Nutrição de Plantas**. São Paulo: Unesp, 2008. 407p.

PRADO, R. de M.; VIDAL, A. A. Efeitos da omissão de macronutrientes em solução nutritiva sobre o crescimento e a nutrição do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 38, n. 3, p. 208-214, 2008.

PATRIGNANI, A.; OCHSNER, T. E. Canopeo: a powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2312–2320, 2015. DOI: 10.2134/agronj15.0150

PAUSTIAN, K.; COLLINS, H. P.; PAUL, E. A. Management controls on soil carbon. p.15-49. In: Paul, E. A., et al. (ed.) Soil organic matter in temperate agroecosystems: Long-term experiments in North America. **Boca Raton**, FL: CRC Press, 1997.

PELLENS, G. C.; LESSA, P. R.; SCHORN, L. A.; FENILLI, T. A. B. Influência da matocompetição em povoamentos jovens de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 495-504, 2018.

PEREIRA, F. C. B. L.; MELLO, L. M. M. de; PARIZ, C. M.; MENDONÇA, V. Z. de; YANO, É. H.; MIRANDA, E. E. V. de; CRUSCIOL, C. A. C. Autumn maize intercropped with tropical forages: crop residues, nutrient cycling, subsequent soybean and soil quality. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-20, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150071>.

PLHAK, L. C.; CALDWELL, K. B.; STANLEY, D.W. Comparison of methods used to characterize water imbibition in hard-to-cook beans. **Journal of Food Science**, Champaign, v. 54, n. 2, p. 326-336, 1989.

PUJOLA, M.; FARRERAS, A.; CASANAS, F. Protein and starch content of raw, soaked and cooked beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Chemistry*, v. 102, n. 4, p.1034-1041, 2007.

QUEIROZ, R. F. Arranjo espacial do milho em sistema integração lavoura pecuária. 2019, 54 p. **Tese (doutorado)** – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2019.

REICHERT, J. M. et al. Compactação do solo e seu efeito sobre o desenvolvimento radicular. **Ciência Rural**, v. 40, n. 5, p. 1061-1068, 2010.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree of compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, p. 242-254, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>

REIS, L. S.; SILVA, E. D. DA.; BARROS, B. G. A.; OLIVEIRA, F. J. V. Compactação do solo: Uma visão agrônômica e ambiental. *Research*, **Society and Development**, v.11, n. 5, p.1-9, 2022.

RIBEIRO, K. G.; PEREIRA, O. G.; Produtividade de matéria seca e composição mineral do capim-tifton 85 sob diferentes doses de nitrogênio e idades de rebrotação. **Ciênc Agrotec**, v. 35, p. 811-816, 2011.

SALTON, J. C.; KICHEL, A. N. Milheto: alternativa para cobertura de solo e alimentação animal. **Embrapa Agropecuária Oeste**, v. 10, 1998. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/240532/1/Milheto.pdf>.

SALTON, Júlio César; HERNANI, Luis Carlos; FONTES, Clarice Zanoni (org.). Sistema plantio direto: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Dourados, MS: **Embrapa Agropecuária Oeste**, 1998. 248 p. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas). ISBN 85-7383-047-6.

SAMPAIO, L. S. BRASIL, E. C. In: CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI, 2., 2009, Belém, PA. Da agricultura de subsistência ao agronegócio: **anais**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2009.

SANTOS, A. J. M.; GAMERO, C. A.; OLIVEIRA, R. B.; VILLEN, A. C. Análise espacial da distribuição longitudinal de sementes de milho em uma semeadora-adubadora de precisão. **Bioscience Journal**, p. 16-23, 2011.

SANTOS, D. P.; LIMA, L. KS. Avaliação agrônômica de variedades de feijão-caupi em cultivo de sequeiro no município de Coremas, PB. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 1, p. 34, 2015.

SEKI, A. S. et al. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 3, p. 460–468, 2015.

SENAR. **Feijão Caupi**. Disponível em: <https://cnabrazil.org.br/cna-pulses/page3.html>. Acesso em: 19 ago. 2025.

SILVA, S. Z. da. **Resistance and quality of technological and nutritional quality of cowpea cultivars (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) to *Callosobruchus maculatus* (Fabr.) (Coleoptera: Bruchidae)**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2011. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/handle/tede/2826>.

SILVA, L. S. **Desempenho agrônômico, qualidade tecnológica e propriedades físicas de grãos de linhagens e cultivares de feijão-caupi**. 2020. 103 f. Tese (Doutorado em Produção vegetal) – Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, 2020.

SILVA, A. P.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B.; GUIMARAES, R.M.L. Soil structure and greenhouse gas production differences between row and interrow positions under no-tillage. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 2, p.157–162, 2014.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesq. Agrop. Bras.**, v.35, n.12, p.2485-2492, 2000.

SILVA, J. P. M.; FILLA, V. A.; SOUZA, A. E. S.; COELHO, A. P.; LEMOS, L. B. O modo de aplicação de doses de nitrogênio em cobertura afeta o desempenho do feijão-comum. **Nativa**, Sinop, v. 13, n. 3, p. 440-447, 2025.

SILVA, A. O., LIMA E. A., & MENEZES, H. E. A. (2007). Rendimento de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivado em diferentes densidades de plantio. **Revista Fafibe**, 3, 1-5.

SILVA, P. L. F. da; SILVA, A. C.; MOURA, M. R. Caracterização físico-hídrica de solos arenosos através da curva de retenção de água. **Agrarian**, Dourados, v. 13, n. 50, p. 277–287, 2020.

SILVEIRA, D. et al. Plantas de cobertura de solo de inverno em sistemas de integração lavourapecuária. **Revista Plantio Direto & Tecnologia Agrícola**, v. 29, n. 173, 2020. Disponível em:

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1121117/1/6Silveiraetal173.pdf>. Acesso em: 01 set. 2025.

SONG, T.; XU, F.; WEI, Y.; CHEN, M.; HU, Q.; TIAN, Y.; ZHANG, J.; XU, W. Combining alternate wetting and drying irrigation with reduced phosphorus fertilizer application reduces water use and promotes phosphorus use efficiency without yield loss in rice plants. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 223, n. 1, p.1-12, 2019.

Sousa SM, Oliveira CA, Andrade DL, Carvalho CG, Ribeiro VP, Pastina MM, Marriel IE, Paula Lana UG and Gomes EA. Tropical *Bacillus* Strains Inoculation Enhances Maize Root Surface Area, Dry Weight, Nutrient Uptake and Grain Yield. **Journal of Plant Growth Regulation** 40:867–877, 2021.

SOUZA, D. V. L. **Efeito da escarificação do solo nos componentes de produção, produtividade e qualidade fisiológica das sementes**. 2021. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu.

SOUZA, A. E. S. de; FILLA, V. A.; SILVA, J. P. M. da; BARBOSA JÚNIOR, M. R.; OLIVEIRA-PAIVA, C. A. de; COELHO, A. P.; LEMOS, L. B. Application of *Bacillus* spp. phosphate-solubilizing bacteria improves common bean production compared to conventional fertilization. **Plants**, v. 12, n. 3827, p. 1-17, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12223827>.

SOUZA, T. M. A., SOUZA, T. A., SOUTO, L. S., DA SILVA SÁ, F. V., DE PAIVA, E. P., & DE MESQUITA, E. F. Água Disponível e Cobertura do Solo Sob o Crescimento Inicial do Feijão-Caupi Cv Brs Pujante. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 3, p. 598, 2016.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. Estresse abiótico. In: TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. p. 739-780.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. Translocação no floema. In: TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. p. 279-312.

TEIXEIRA, C. M.; CARVALHO, G. J.; NETO, A. E. F.; ANDRADE, M. J. B.; MARQUES, E. L. S. Produção de biomassa e teor de macronutrientes do milheto, feijão-de-porco e guandu-anão em cultivo solteiro e consorciado. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 1, p.93-99, 2005.

TEIXEIRA, C. M.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PIMENTEL, C. Decomposição e ciclagem de nutrientes dos resíduos de quatro plantas de cobertura do solo. **IDESIA (Chile)**, v. 30, n. 1, p. 55-64, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-34292012000100007>.

THUNG, M.D.T.; OLIVEIRA, I.P. Problemas abióticos que afetam a produção do feijoeiro e seus métodos de controle. Santo Antônio de Goiás: **EMBRAPA-CNPAP**, 172 p, 1998.

TORRES, J. L. R; PEREIRA, M. G. Dinâmica do potássio nos resíduos vegetais de plantas de cobertura no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1475–1482, 2008.

VAN DE WIEL, C. C. M.; VAN DER LINDEN, G.; SCHOLTEN, O. E. Improving phosphorus use efficiency in agriculture: opportunities for breeding. **Euphytica**, v. 207, n. 1, p. 1-22, 2016.

VELLOSO CCV, OLIVEIRA CA, GOMES EA, PAULA LANA UG, CARVALHO CG, GUIMARÃES LJM, PASTINA MM AND SOUSA SM. Genome-guided insights of tropical *Bacillus* strains efficient in maize growth promotion. **FEMS Microbiology Ecology** 96:1–16, 2020.

VERA, G. S.; CRUZ, G. S.; SOUZA, H. A.; DAMASCENO e SILVA, K. J.; BEZERRA, A. A. C. Acúmulo e marcha de absorção de macronutrientes no feijão-caupi em sistema de cultivo mínimo. In: CONAC – CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI, 5., 2019, Teresina. **Anais [...]**. Teresina: CONAC, 2019. p. 1–5.

VILAS BOAS, A. A.; GARCIA, D. F. B. Plantio direto nas culturas de milho e soja no município do Chapadão do Céu-GO e os impactos para o meio ambiente. In: XLV CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, XLV CONGRESSO DA SOBER "CONHECIMENTOS PARA AGRICULTURA DO FUTURO" – SOBER., 2007, Londrina. **Anais [...]** Londrina: SOBER, 2007. 1-21 p.

WELLMER, F. W.; SCHOLZ, R. W. Putting phosphorus first: The need to know and right to know call for a revised hierarchy of natural resources. **Resources**, Basel, v. 6, n. 2, p.1-23, jun. 2017.

WITHERS, P. J. A.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. M.; GATIBONI, L. C.; SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, London, v. 8, n. 1, p.1-13, 2018.

WUTKE, E. B. et al. **Outras leguminous graníferas (Caupi)**. In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo, p.257, 2022.

ZUCARELI, C.; PRANDO, A.M.; RAMOS JÚNIOR, E.U.; NAKAGAWA, J. Fósforo na produtividade e qualidade de sementes de feijão Carioca Precoce cultivado no período das águas. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 1, p. 32-38, 2011.

ZUCARELI, C.; BARZAN, R. R.; SILVA, J. B.; CHAVES, D. P. Associação de fosfatos e inoculação com *Bacillus subtilis* e seu efeito no crescimento e desempenho produtivo do feijoeiro. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 65, n. 2, p. 189-195, mar./abr. 2018.

7. APÊNDICES

APÊNDICE A. x = tempo de hidratação (h); y = volume de água absorvida (mL); R^2 = coeficiente de determinação. A = PD com inoculação; B = PD sem inoculação; C = ESC15 com inoculação; D = ESC15 sem inoculação; E = ESC30 com inoculação; F = ESC30 sem inoculação.

