UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO
UNIDADE ACADÊMICA DE TECNOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO
CURSO DE ENGENHARIA DE BIOSSISTEMAS

JARLEAN LOPES NOBREGA

GRANULOMETRIA DO FOSFATO DE ROCHA E FONTES ORGÂNICAS NO FEIJÃO MACASSAR (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) CULTIVADO EM SOLOS DO CARIRI DA PARAÍBA.

SUMÉ - PB
2026

JARLEAN LOPES NOBREGA

GRANULOMETRIA DO FOSFATO DE ROCHA E FONTES ORGÂNICAS NO FEIJÃO MACASSAR (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) CULTIVADO EM SOLOS DO CARIRI DA PARAÍBA.

Monografia apresentada ao Curso Superior de Engenharia de Biossistemas do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Biossistemas.

Orientador: Professor Dr. Rivaldo Vital dos Santos

SUMÉ - PB

2026

N754g Nobrega, Jarlean Lopes.
Granulometria do fosfato de rocha e fontes orgânicas no feijão macassar (Vigna unguiculata (L.) Walp.) cultivado em solos do Cariri da Paraíba. / Jarlean Lopes Nobrega. - 2026.

67 f.

Orientador: Professor Dr. Rivaldo Vital dos Santos.
Monografia - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Curso de Engenharia de Biossistemas.

1. Granulometria. 2. Fosfato natural. 3. Rochagem. 4. Feijão macassar. 5. Vigna unguiculata. 6. Remineralizadores. 7. Fertilidade do solo – Cariri Paraibano. I. Santos, Rivaldo Vital dos. II. Título.

CDU: 632.5(043.1)

Elaboração da Ficha Catalográfica:

Johnny Rodrigues Barbosa
Bibliotecário-Documentalista
CRB-15/626

JARLEAN LOPES NOBREGA

GRANULOMETRIA DO FOSFATO DE ROCHA E FONTES ORGÂNICAS NO FEIJÃO MACASSAR (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) CULTIVADO EM SOLOS DA CARIRI DA PARAÍBA.

Monografia apresentada ao Curso Superior de Engenharia de Biossistemas do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Biossistemas.

BANCA EXAMINADORA

_____
Professor Dr. Rivaldo Vital dos Santos
Orientador UAEB/CDSA/UFCG

_____
Professora Drª. Adriana de Fátima Meira Vital
Examinadora I - UATEC/CDSA/UFCG

_____
Professor Dr. José George Ferreira Medeiros
Examinador II - UATEC/CDSA/UFCG

_____
Engenheiro Agrônomo Danilson Correia da silva
Examinador III - UATEC/CDSA/UFCG

Trabalho aprovado em 06 de fevereiro de 2026.

SUMÉ--PB

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, a Deus, por me sustentar nos momentos de dúvida e me conceder força, saúde e perseverança para concluir esta etapa tão significativa da minha vida acadêmica.

Ao meu pai, que hoje vive na memória e no coração, deixo minha mais profunda gratidão. Mesmo sem ter tido acesso aos estudos formais, nunca mediu esforços para que eu tivesse oportunidades melhores do que as que lhe foram oferecidas. Seu exemplo de trabalho, dignidade e amor segue sendo minha maior referência.

À minha mãe, meu alicerce, agradeço por todo que fez e faz por mim, por todo cuidado, incentivo e dedicação incansável. Seu compromisso com a minha educação e seu apoio incondicional foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

À minha irmã, Janaina, e aos meus sobrinhos, Renniton, Vitória e Yara, agradeço pelo carinho, pela alegria e pelo apoio constantes, que tornaram os dias mais leves, mesmo nos momentos de maior cansaço.

À minha namorada, Vitória Raiany, agradeço profundamente pelo companheirismo, paciência e apoio ao longo dessa jornada. Sua presença foi essencial para que eu seguisse firme, mesmo diante das dificuldades.

À professora Adriana e ao professor Rivaldo, minha sincera gratidão pela orientação, confiança e pelas oportunidades concedidas ao longo da minha formação. Agradeço sobretudo por ter integrado projetos de extensão, que contribuíram de forma decisiva para o meu crescimento acadêmico e humano.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), pela oportunidade de acesso a auxílios, programas e projetos que tornam possível a permanência na universidade e a vivência da pesquisa e extensão.

Ao corpo docente da Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, pelo aprendizado.

Ao Programa de Ações Sustentáveis para o Cariri (PASCAR) e projeto associado - Matutando Solos e Agroecologia, bem como à Rádio Cidade 95 FM de Sumé, pelo apoio, parceria e incentivo, fortalecendo meu aprendizado profissional e

pessoal para a construção e a divulgação de iniciativas voltadas à sustentabilidade e ao desenvolvimento local.

À banca examinadora, pela disponibilidade, atenção e valiosas considerações, que contribuíram para o aprimoramento deste TCC.

Aos proprietários, Romero e Cristiani Mayer, pela doação do material mineral utilizado na execução desta pesquisa, contribuição essencial para a realização do trabalho.

Aos meus amigos Hugo, Dayanne, Lucas Vicente, José Ilton, Rogerio, Armando, Raylson, Eliseu, e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para essa conquista, e ao parceiro do Viveiro de Mudas, José Tiano, deixo meu muito obrigado. Cada palavra de incentivo e todo apoio fez diferença nesta pesquisa e nesse meu percurso.

RESUMO

Este trabalho avaliou o potencial do fosfato natural da Paraíba como fonte alternativa de fósforo, considerando o efeito da granulometria do fosfato de rocha e a associação com fontes orgânicas (esterco bovino fresco e esterco bovino curtido) na solubilização do P e no crescimento do feijão-vigna (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). O experimento foi conduzido em condições controladas (laboratório e telado), em delineamento inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 4×2+1 (0,106; 0,26; 0,5; 1,0 mm × esterco fresco/curtido + testemunha absoluta), com quatro repetições. O fósforo disponível no solo foi quantificado pelo extrator Mehlich-1 aos 20, 40 e 60 dias de incubação, e o desempenho da cultura foi avaliado aos 60 dias após a emergência, por meio da massa seca da parte aérea (MSPA) e da massa seca de raízes (MSR). Em geral, as combinações com esterco curtido apresentaram maiores teores de P disponível ao longo do período de incubação, com destaque para a granulometria de 0,26 mm. Para a biomassa, observou-se resposta significativa aos tratamentos, com maior MSPA sob esterco fresco, enquanto a MSR apresentou melhor desempenho na combinação com esterco curtido em granulometria intermediária. Conclui-se que o manejo organomineral com fosfato natural e fontes orgânicas altera a dinâmica do P no solo e influencia o crescimento inicial do feijão-vigna, sendo uma alternativa promissora para condições do Semiárido, especialmente quando se busca maior disponibilização de P no solo.

Palavras chave: fosfato natural; granulometria; fósforo disponível; rochagem; remineralizadores; fertilidade do solo.

ABSTRACT

This study evaluated the agronomic potential of Paraíba phosphate rock as an alternative phosphorus source, focusing on the effects of particle size and the association with organic inputs (fresh and cured cattle manure) on P solubilization and cowpea growth (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). The experiment was carried out under controlled conditions (laboratory and greenhouse) using a completely randomized design in a 4×2+1 factorial scheme (0.106, 0.26, 0.5 and 1.0 mm × fresh/cured manure + absolute control), with four replicates. Soil available phosphorus was quantified using the Mehlich-1 extractor at 20, 40 and 60 days of incubation, and plant performance was assessed at 60 days after emergence through shoot dry mass (SDM) and root dry mass (RDM). Overall, cured manure treatments resulted in higher soil P availability throughout incubation, particularly at the 0.26 mm particle size. Biomass production responded significantly to treatments, with higher SDM under fresh manure, whereas RDM tended to be favored by cured manure at intermediate particle sizes. The results indicate that organomineral management combining phosphate rock and organic sources affects soil P dynamics and early cowpea growth, representing a promising strategy for Semi-Arid conditions, especially when the goal is to increase soil-available P.

Key words: natural phosphate; particle size distribution; available phosphorus; rock dust; remineralizers; soil fertility.

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ATP	Trifosfato de Adenosina
BSh	Clima semiárido quente (classificação de Köppen-Geiger)
BSP	Bactérias Solubilizadoras de Fosfato
Ca^{2+}	Íon cálcio
CDSA	Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CV	Coeficiente de Variação
DAE	Dias Após a Emergência
DAP	Diamônio Fosfato
DAS	Dias Após a Semeadura
DIC	Delineamento Inteiramente Casualizado
EC	Esterco Curtido
EF	Esterco Fresco
FCP	Fator Capacidade Tampão de Fósforo
FN	Fosfato Natural
FNR	Fosfato Natural Reativo
GL	Graus de Liberdade
$H_2PO_4^-$	Íon fosfato primário
HPO_4^{2-}	Íon fosfato secundário
kg ha^{-1}	Quilograma por hectare
LAFISA	Laboratório de Fitossanidade do Semiárido
MAP	Monoamônio Fosfato
mg dm^{-3}	Miligrama por decímetro cúbico
mm	Milímetro
MSPA	Massa Seca da Parte Aérea
MSR	Massa Seca das Raízes
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
P	Fósforo
P_2O_5	Pentóxido de Fósforo
Pi	Fósforo Inorgânico

Po	Fósforo Orgânico
R^2	Coeficiente de Determinação
S	Sul
TA	Testemunha Absoluta
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
W	Oeste

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo do fósforo.....20
Figura 2 - Coleta de amostras de solo (0–20 cm) efetuada em área adjacente ao local de abertura do perfil, no Campus de Sumé.....28
Figura 3 - Localização geográfica da área de coleta do mineral.....29
Figura 4 - Área de exploração.....29
Figura 5 - Determinações dos teores de fósforo nas diferentes frações granulométricas aplicadas no solo.....30
Figura 6 - Realização da semeadura nas unidades experimentais.....30
Figura 7 - Desbaste das plantas com menor desenvolvimento vegetativo.....32
Figura 8 - Coleta da Massa seca da parte aérea e Massa seca das raízes.....33
Figura 9 - A biomassa do feijoeiro foi fracionada em sacos de papel e submetida à secagem em estufa com circulação de ar a 65 °C.....33
Figura 10 - Dispersão das médias de MSPA + curva cúbica ajustada para EF.....46
Figura 11 - Dispersão das médias de MSR + curva cúbica ajustada para esterco fresco.....47
Figura 12 - Dispersão das médias de MSR + curva cúbica ajustada para esterco curtido.....50
Figura 13 - Massa seca da parte aérea (g $vaso^{-1}$) em função da fonte orgânica.....51
Figura 14 - Massa seca das raízes (g $vaso^{-1}$) em função da granulometria e esterco.....52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios (± erro padrão) de fósforo disponível no solo aos 20, 40 e 60 dias de incubação e de MSPA e MSR do feijão-vigna aos 60 DAE, em função da granulometria do fosfato natural e da fonte orgânica.....35
Tabela 2 - Resumo da análise de variância (ANOVA) para fósforo disponível (Mehlich-1) no solo aos 20 dias de incubação, em DIC.....36
Tabela 3 - Fósforo disponível no solo (Mehlich-1), em função da granulometria do fosfato natural e da fonte orgânica, na avaliação aos 20 dias após a incubação.....37
Tabela 4 - Fósforo disponível no solo (Mehlich-1), em função da granulometria do fosfato natural e da fonte orgânica, na avaliação aos 40 dias após a incubação.....39
Tabela 5 - Fósforo disponível no solo (Mehlich-1), em função da granulometria do fosfato natural e da fonte orgânica, na avaliação aos 60 dias após a incubação.....40
Tabela 6 - Resumo da análise de variância (teste F) para MSPA e MSR de feijão-vigna em experimento em vasos, aos 60 DAE.....41
Tabela 7 - Massa seca da parte aérea (MSPA) do feijão-vigna em função da granulometria do fosfato natural e da fonte orgânica, aos 60 dias após a emergência (DAE).....41
Tabela 8 - Massa seca de raízes (MSR) do feijão-vigna em função da granulometria do fosfato natural e da fonte orgânica, aos 60 dias após a emergência (DAE).....42
Tabela 9 - Resumo da análise de variância (ANOVA) para a massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSR), sob esterco fresco.....44
Tabela 10 - Médias observadas de Massa Seca da Parte Aérea e Massa Seca das Raízes do feijão-vigna em função da granulometria do fosfato natural, sob esterco bovino fresco.....45
Tabela 11 - Resumo da análise de variância (ANOVA) para Massa Seca da Parte Aérea e Massa Seca das Raízes do feijão-vigna sob esterco bovino curtido.....48

Tabela 12 — Médias observadas de massa seca da parte aérea e massa seca das raízes do feijão-vigna em função da granulometria do fosfato natural, sob esterco bovino curtido.....49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15

2 OBJETIVOS 17

2.1 Objetivo geral 17

2.2 Objetivos específicos 17

3 REVISÃO DE LITERATURA 17

3.1 O fósforo na nutrição das plantas 17

3.2 Comportamento do fósforo nos solos do semiárido 19

3.3 Fertilizantes fosfatados convencionais 21

3.4 Solubilização de fosfato natural com fontes orgânicas 22

3.5 Uso de fosfato natural na agricultura 23

3.6 A cultura do feijão (Vigna unguiculata (L.) Walp) 25

3.7 Extração de P por Mehlich-1 26

4 METODOLOGIA 28

4.1 Localização da pesquisa 28

4.2 Coleta dos materiais 28

4.3 Aspectos gerais da pesquisa 30

4.4 Tratamentos e delineamento experimental 31

4.5 Condução do experimento 31

4.6 Variáveis analisadas 34

4.7 Análise estatística 34

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 35

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 54

REFERÊNCIAS 56

1 INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira ocupa posição estratégica no abastecimento de alimentos e na geração de divisas, mas permanece vulnerável ao suprimento de insumos essenciais, especialmente fertilizantes, em função da elevada dependência externa (Pauli de Bastiani; Péra; Caixeta-Filho, 2024). Revisões recentes apontam que o Brasil é grande importador e que cerca de 75% do fertilizante consumido no país tem origem externa, evidenciando baixa autonomia produtiva no setor (Benício, 2022).

Essa dependência é particularmente crítica para nutrientes do complexo NPK: o Brasil consome aproximadamente 8% do mercado global de fertilizantes e aplica internamente um volume associado a alta dependência externa (≈85%), com importações estimadas em 73% para fósforo (P) e 97% para potássio (K), o que expõe a produção agrícola à volatilidade de preços e a riscos geopolíticos no comércio internacional (Andreata et al., 2024).

A fragilidade dessa dependência fica ainda mais evidente em cenários de crise: análises sobre a guerra Rússia–Ucrânia indicam que o acesso a fertilizantes foi afetado em dezenas de países, incluindo o Brasil, reforçando que choques externos podem comprometer a estabilidade do abastecimento de insumos e, por consequência, a segurança produtiva do agronegócio (Zhang et al., 2023).

Ainda que parte desses preços tenha recuado após os picos iniciais, o mercado segue suscetível a restrições comerciais, custos de energia e mudanças nas rotas e origens de fornecimento, mantendo o insumo oneroso e instável para países importadores (Hu et al., 2025; Vos et al., 2025). Nesse contexto, cresce a importância de estratégias que aumentem a resiliência dos sistemas produtivos por meio do aproveitamento de fontes regionais e de menor custo, especialmente para agricultores de base familiar (Kuhn et al., 2025; Palma et al., 2025).

Entre os macronutrientes, o fósforo (P) se destaca por sua relevância no metabolismo vegetal e por sua dinâmica particular no solo (Khan et al., 2023). Em muitos ambientes tropicais e semiáridos, a disponibilidade de P é frequentemente limitada, seja por baixos teores naturais, seja por processos de retenção/adsorção e precipitação, o que reduz a eficiência do fertilizante e exige manejo criterioso (Raniro et al., 2022).

No Semiárido brasileiro, essa limitação se torna ainda mais crítica porque a instabilidade hídrica e as características de muitos solos podem restringir o

aproveitamento dos nutrientes, impactando o crescimento e a produtividade das culturas (Paiva et al., 2023).

Uma alternativa promissora para reduzir custos e dependência externa é o uso de fosfatos naturais (fosfato de rocha), particularmente quando existe oferta regional do material (Ramos et al., 2025). Entretanto, a eficiência agronômica do fosfato natural costuma ser condicionada por sua baixa solubilidade, que depende de fatores como composição mineralógica, condições químicas do solo e, de forma prática, da granulometria do material aplicado (Saied et al., 2022).

Frações mais finas tendem a apresentar maior área específica e maior reatividade, favorecendo a dissolução e a disponibilização do P no sistema solo–planta (Bouray et al., 2023). Adicionalmente, a associação com fontes orgânicas, como estercos, pode contribuir para aumentar a eficiência do uso do P, por estimular processos de mineralização, alterar o ambiente químico do solo e favorecer mecanismos que reduzem a imobilização do fósforo (Meena et al., 2025).

Diante desse cenário, este Trabalho de Conclusão de Curso foi desenvolvido no município de Sumé (Cariri Ocidental da Paraíba), em condições laboratoriais e em telado, visando avaliar o uso do fosfato natural da Paraíba como fonte de fósforo, considerando dois eixos centrais de manejo: (i) o efeito da granulometria do fosfato de rocha e (ii) o efeito de fontes orgânicas (esterco bovino fresco e curtido) na solubilização do P e na resposta de plantas.

Para isso, foram conduzidas uma etapa de incubação do solo com quantificação de P disponível (Mehlich-1) aos 20, 40 e 60 dias, e uma etapa de cultivo em vasos com feijão-vigna (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), com avaliação da massa seca da parte aérea e de raízes aos 60 dias após a emergência.

Assim, ao investigar simultaneamente a dinâmica do P no solo e o desempenho agronômico de uma cultura relevante para sistemas de produção em condições semiáridas, este estudo busca contribuir para a construção de alternativas tecnicamente fundamentadas e economicamente mais acessíveis, alinhadas à necessidade de reduzir a vulnerabilidade do setor agrícola diante da dependência externa de fertilizantes e da instabilidade recente de preços no mercado internacional.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial do fosfato natural da Paraíba como fonte de fósforo, considerando sua granulometria e a associação com fontes orgânicas, sobre a disponibilidade de P no solo e o crescimento do feijão-vigna (*Vigna unguiculata* (L.) Walp).

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o efeito de diferentes granulometrias do fosfato natural na disponibilidade de fósforo no solo, ao longo da incubação (20, 40 e 60 dias).
- Verificar o efeito de fontes orgânicas (esterco bovino curtido e fresco) na solubilização do fosfato natural e na dinâmica do P disponível no solo durante a incubação.
- Determinar a resposta do feijão-vigna à aplicação dos tratamentos, por meio da massa seca da parte aérea (MSPA) e da massa seca das raízes (MSR) aos 60 dias após a emergência.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O fósforo na nutrição das plantas

O fósforo exerce papel central na respiração celular, na divisão celular, na síntese de proteínas e na formação de amido. Integra os nucleotídeos, como o ATP (trifosfato de adenosina), principal molécula de armazenamento e transferência de energia nas plantas (Yang et al., 2024). Essa energia é essencial para o transporte de assimilados, divisão e expansão celular, bem como para o armazenamento energético e a transmissão da informação genética (Gallo, 2020).

O fósforo é, após o nitrogênio, o nutriente que mais limita o crescimento das plantas, principalmente em razão do seu fornecimento inadequado e da elevada capacidade de fixação nos solos, o que reduz sua disponibilidade às raízes (SasabuchI et al., 2023). Segundo Barros (2020), o fósforo (P) é essencial nos processos de respiração e produção de energia e da formação de substâncias de reserva, como amido e compostos proteicos. Favorece a floração, aumenta a frutificação, antecipa a maturação e contribui para a resistência das plantas a doenças (Amosova et al., 2021)

Também estimula o desenvolvimento radicular, influenciando diretamente na produtividade e qualidade das culturas. No solo, o fósforo está presente principalmente como fosfatos e é absorvido pelas plantas nas formas de íons ortofosfato primário ($H_2PO_4^-$) e secundário (HPO_4^{2-}) (Tonucci et al., 2023).

A concentração adequada de fósforo no solo para o desenvolvimento satisfatório do feijoeiro situa-se em torno de 10 mg kg^{-1}. Dentre os macronutrientes, o fósforo é o nutriente absorvido em menor quantidade pelas plantas, sendo, contudo, o que mais restringe a produtividade do feijão-vigna. (Dlamini; Masarirambi; Gadaga, 2020). Considerando as características do solo e o comportamento do elemento no ambiente edáfico, as doses recomendadas variam entre 20 e 60 kg de P_2O_5 por hectare (Tarafder; Roy, 2023).

A absorção de fósforo pelo feijão-caupi é relativamente baixa ao longo do ciclo da cultura, intensificando-se apenas após os 25 dias após a semeadura (DAS) e alcançando um acúmulo máximo de cerca de 12 kg ha^{-1} entre 47 e 68 DAS. A maior demanda ocorre próximo aos 47 DAS, durante o início da formação das vagens (Orji, 2021). Embora o fósforo seja absorvido em menor quantidade que outros macronutrientes, é altamente responsivo à adubação, sendo fundamental para o aumento da produtividade, especialmente em solos com elevada fixação do nutriente (Ribeiro et al., 2022).

A deficiência de fosfato provoca sérios distúrbios no metabolismo e no desenvolvimento das plantas, refletindo-se em menor perfilhamento em gramíneas, além da redução no número de frutos e sementes (Wei et al., 2025). Os sintomas iniciais manifestam-se, geralmente, em folhas mais velhas, apresentando clorose, perda de brilho e coloração verde-azulada. Por outro lado, o excesso de fósforo pode induzir deficiências secundárias de micronutrientes, especialmente ferro (Fe) e zinco (Zn), devido a interações antagonistas na absorção desses elementos (Meneghelli et al., 2023).

O fornecimento de fósforo durante os estágios reprodutivos regula o particionamento entre folhas e órgãos reprodutivos, sendo esse processo essencial para leguminosas fixadoras de nitrogênio (Wróbel et al., 2023). Além disso, animais e seres humanos também requerem quantidades adequadas de fósforo na dieta para manter os processos metabólicos normais (Hu et al., 2023).

3.2 Comportamento do fósforo nos solos do Semiárido

O Semiárido brasileiro abrange aproximadamente 969.589 km², ocupando 12% do território nacional, abrigando cerca de 28 milhões de habitantes, que se distribuem em 1.477 municípios de 11 estados do Brasil, sendo a maioria na Região Nordeste, além de porções de Minas Gerais e Espírito Santo.

Constituído majoritariamente por embasamento cristalino, com solos jovens, de pouca profundidade e alta pedregosidade, apesar da baixa disponibilidade de matéria orgânica, esses solos apresentam relativa fertilidade, atribuída à reduzida lixiviação de nutrientes (Da Mata et al., 2024).

Predominam no Semiárido nordestino os Neossolos Litólicos e os Luvissolos, ordens de solos que apresentam limitações para a atividade agrícola, devido à baixa disponibilidade hídrica, pedregosidade e reduzida profundidade. Acrescente-se que os solos do Semiárido contêm baixos teores de P, um dos elementos que mais limita a produtividade das culturas nessa região. Essas características exigem práticas específicas de manejo para viabilizar seu uso agrícola de forma sustentável (Crowell; Hembree, 2023).

No contexto brasileiro, os principais depósitos de fosfato são formados predominantemente por apatitas, oriundas de rochas ígneas, muitas vezes submetidas a processos intempéricos (Tavakoli; Mehrabi, 2024). Essas fontes apresentam baixa concentração de fósforo e estrutura cristalina bem definida, o que resulta em baixa reatividade agronômica e lenta liberação do nutriente no solo (Chander et al., 2023).

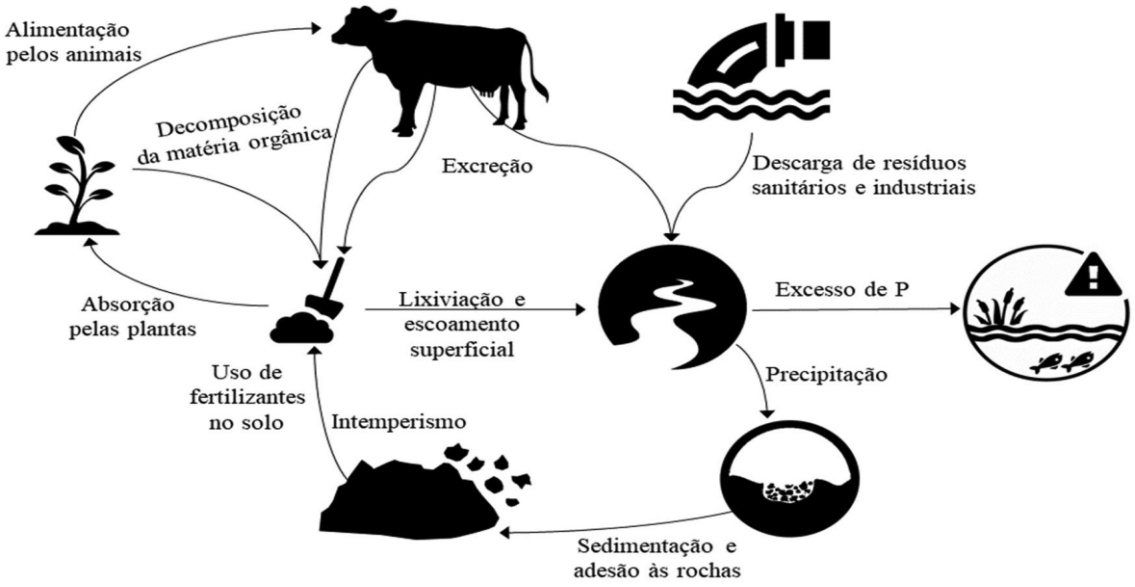
A dinâmica do fósforo no solo é fortemente influenciada por fatores ambientais que regulam a atividade microbiana, a qual pode promover tanto a imobilização quanto a liberação de íons. Além disso, propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo também exercem papel relevante nesse processo (Kumar; Ameen; Verma, 2024).

Em solos com menor grau de intemperismo, como os Neossolos, Chernossolos e Vertissolos, uma parte significativa do fósforo ainda se encontra em minerais primários, embora grande parte esteja presente em formas orgânicas (Po) ou fracamente adsorvido aos minerais secundários na forma inorgânica (Pi) (Cross; Schlesinger, 1995).

O ciclo biogeoquímico do fósforo caracteriza-se pela circulação do elemento entre os compartimentos da litosfera e da hidrosfera, envolvendo sua transição por rochas, sedimentos, organismos e sistemas aquáticos (Figura 1) (Zhuang; Wang,

2021). A mobilidade natural do fósforo ocorre principalmente por meio de dois processos distintos, que diferem significativamente quanto ao tempo necessário para sua conclusão (Tonucci et al., 2023; Aguiar Júnior et al., 2022).

Figura 1 - Ciclo do fósforo.



Fonte: Sasabuchi et al., 2023.

O ciclo terrestre, mais curto, apresenta uma escala temporal que varia de 10^{-2} a 10^{0} anos, enquanto o ciclo combinado terrestre-marinho, de maior duração, pode se estender de 10^{7} a 10^{9} anos (Moreira, 2022). Esses processos refletem a dinâmica lenta do fósforo no ambiente, fator que contribui para sua limitada disponibilidade nas formas assimiláveis pelas plantas (Hanyabu et al., 2020).

Por outro lado, em solos altamente intemperizados, como os Latossolos, predominam as formas inorgânicas fortemente ligadas à fração mineral, bem como formas orgânicas mais estáveis, que interagem física e quimicamente com os constituintes do solo (Mabagala; Mng'ong'o, 2022).

Dependendo do grau de estabilidade desses compostos, o fósforo pode ser classificado em frações lábeis e não lábeis, as formas lábeis são caracterizadas por compostos com maior disponibilidade para a solução do solo, sendo rapidamente absorvidos por plantas ou microrganismos (Mukumbuta et al., 2021).

Essa disponibilidade está diretamente relacionada ao grau de intemperismo do solo, sua textura, composição mineralógica, teor de matéria orgânica, atributos físico-químicos, atividade biológica e vegetação predominante (Walker; Syers, 1976).

O Po pode corresponder a uma fração significativa do total de fósforo no solo, variando entre 5% e 80%, sendo especialmente relevante em solos tropicais, nos quais constitui uma fonte essencial de fósforo para as plantas. Por esse motivo, sua inclusão em estudos sobre a dinâmica e a biodisponibilidade do elemento é fundamental (Pulley; Collins, 2020). A origem do Po está associada à decomposição de resíduos vegetais, tecidos microbianos e produtos da atividade biológica no solo (Rathnayaka et al., 2024).

3.3 Fertilizantes fosfatados convencionais

No Brasil, diversas fontes de fertilizantes fosfatados são utilizadas na agricultura, sendo as mais comuns os fosfatos totalmente acidulados, como o superfosfato simples e o superfosfato triplo, além dos fosfatos de amônio, como o MAP (monoamônio fosfato) e o DAP (diamônio fosfato) (Gao et al., 2024). Também são empregados os termofosfatos, como o termofosfato magnesiano, e os fosfatos naturais, tanto importados (ex.: Arad, Gafsa, Carolina do Norte) quanto nacionais (ex.: Araxá e Patos de Minas) (Castro et al., 2023).

Os fertilizantes com alta concentração de fósforo solúvel, como os superfosfatos, passam por processos industriais que envolvem purificação da rocha fosfática e aplicação de ácidos (como o sulfúrico e o fosfórico) para promover a solubilização do P, o que encarece o produto final (Costa et al., 2025). Esses adubos, no entanto, apresentam alta eficiência agronômica, pois disponibilizam rapidamente o fósforo para as plantas (Crowell; Hembree, 2023).

Segundo Sasabuchi (2023), a preocupação com o fósforo como resíduo ganhou destaque em função de seu papel na poluição dos corpos hídricos, sobretudo por contribuir para processos de eutrofização. A legislação ambiental brasileira, por meio das Resoluções CONAMA n.º 357/2005 e n.º 430/2011, estabelece diretrizes para a qualidade dos efluentes lançados nos recursos hídricos.

No entanto, essas normativas apresentam lacunas significativas no que se refere à regulação do fósforo, sendo consideradas permissivas quanto aos seus limites. Em especial, a Resolução n.º 430/2011 delega ao órgão ambiental competente a definição dos limites máximos de fósforo nos efluentes, sem estabelecer um valor

padronizado nacionalmente, o que dificulta o controle uniforme desse poluente em diferentes regiões (Conama, 2005; Conama, 2011).

O fósforo é um nutriente essencial que pode ser reutilizado no ambiente, porém não possui uma fonte naturalmente renovável (Alewell, et al., 2020). A principal fonte primária conhecida atualmente é a rocha fosfática, sendo necessário, em média, o processamento de aproximadamente 7 kg dessa rocha para a obtenção de 1 kg de fósforo elementar (Brownlie et al., 2022).

Estudos indicam que o teor de fósforo presente nas rochas fosfáticas tem apresentado redução ao longo do tempo, exigindo maiores volumes de extração para alcançar a mesma quantidade do nutriente, o que eleva os custos e dificulta o processo de obtenção (Kumar; Kumar, 2023). As jazidas de rochas fosfáticas podem ter origem sedimentar ou ígnea, sendo que as sedimentares correspondem à maior parte das reservas mundiais, respondendo por cerca de 95% do total disponível (Schambeck; Da Costa; Derlon, 2021).

No cenário brasileiro, predominam as jazidas de fosfato de origem ígnea, colocando o país como o terceiro no ranking mundial em termos de reservas desse tipo de rocha (Agência Nacional De Mineração, 2025). Embora a concentração natural de fósforo nas rochas ígneas seja geralmente inferior (entre 5% e 15% de P_2O_5) em comparação às sedimentares (que variam de 10% a 35% de P_2O_5), o processo de beneficiamento permite a obtenção de concentrados com teores elevados, entre 31% e 41% de P_2O_5, ligeiramente superiores aos 30% geralmente alcançados pelas rochas sedimentares (Guelfi et al., 2022).

No entanto, a composição não homogênea das rochas ígneas impõe maiores desafios técnicos e custos no seu processamento. Segundo estimativas de 2020, as reservas brasileiras de rochas fosfáticas totalizavam aproximadamente 1.700 milhões de toneladas, sendo que o estado de São Paulo concentrava cerca de 6,1% desse total (Santos; Freitas. 2025).

3.4 Solubilização de fosfato natural com fontes orgânicas

A utilização de processos de decomposição aeróbia para a solubilização de rochas fosfatadas tem sido amplamente estudada e aplicada na Alemanha, destacando-se pelo potencial de viabilidade econômica (Raniro et al., 2022).

Estudos indicam que o composto orgânico resultante desse processo, ao ser aplicado como fertilizante, contribui significativamente para a adubação do solo,

promovendo melhorias na disponibilidade de fósforo e na sustentabilidade do manejo nutricional (Erenoğlu; Morsy Mohammed Morsy; Dündar, 2023).

Diversos fatores influenciam a eficiência da solubilização da rocha fosfatada durante o processo de compostagem, entre eles o tipo de resíduo orgânico utilizado (esterco de animais), as proporções das taxas carbono/nitrogênio e carbono/fósforo, bem como a presença de microrganismos específicos (Paez et al., 2022). Condições ambientais, como aeração adequada e temperatura, também exercem papel fundamental. Além disso, a aplicação de fontes energéticas adicionais, como a glicose diluída em água e aspergida sobre as pilhas de compostagem, pode intensificar a atividade microbiana e favorecer a liberação de fósforo (Ma et al., 2022).

Estudos voltados à utilização da compostagem como estratégia para solubilização de rochas fosfatadas têm ganhado destaque em virtude da intensa atividade microbiana envolvida na decomposição da matéria orgânica (Moharana; Meena; Biswas, 2018).

Dentre esses microrganismos, destacam-se os heterotróficos, cuja atuação na degradação do material orgânico resulta na liberação de carbono, bem como na formação de substâncias húmicas e ácidos orgânicos (Rawat et al., 2021). Esses compostos desempenham papel fundamental na solubilização ou mobilização do fósforo presente nas rochas fosfatadas, aumentando sua disponibilidade para as plantas (Amarasinghe et al., 2022)

Quando o processo é enriquecido com fontes de fósforo mais reativas, os teores de P solubilizado podem alcançar entre 14,7% e 24,5% (Erenoğlu; Morsy Mohammed Morsy; Dündar, 2023). Em muitos casos, o fósforo é convertido em formas orgânicas por ação da microflora atuante na compostagem ou permanece complexado (quelado) por substâncias húmicas presentes no sistema (Reimer et al., 2023).

Embora a solubilização de rochas fosfáticas por meio da compostagem tenha sido amplamente investigada, ainda há lacunas importantes no conhecimento, especialmente no que diz respeito à eficiência do fósforo solubilizado em atender às exigências nutricionais das plantas (Amarasinghe et al., 2022).

3.5 Uso de fosfato natural na agricultura

O uso de fosfatos naturais (FN) no Semiárido brasileiro, em especial na região do Cariri paraibano, tem se consolidado como uma alternativa estratégica para o manejo da baixa disponibilidade natural de fósforo (P), nutriente essencial que

frequentemente atua como fator limitante da produtividade agrícola em sistemas de cultivo locais (Freitas, 2021).

Diferentemente do bioma Cerrado, caracterizado por solos profundos, altamente intemperizados e fortemente ácidos, a região do Cariri paraibano apresenta uma diversidade de classes de solos, com destaque para Luvissolos e Neossolos (Macedo et al., 2021). Esses solos são, em geral, rasos, pedregosos e apresentam ampla variação na reação do solo, com valores de pH que podem oscilar de moderadamente ácidos a levemente alcalinos (entre 5,3 e 8,3) (Msimbira; Smith, 2020). Essas características influenciam diretamente os mecanismos de retenção, disponibilidade e mobilidade do fósforo no sistema solo-planta, demandando práticas de manejo específicas (Sabah et al., 2022).

Nesse contexto, os Fosfatos Naturais Reativos (FNR), especialmente aqueles de origem sedimentar, mostram-se mais adequados às condições do Semiárido (Ramos, 2023). Tais materiais apresentam maior porosidade, maior área superficial específica e estrutura cristalina menos estável, o que favorece sua dissolução gradual no solo (Macedo et al., 2021).

Essa liberação progressiva de P permite que os FNR atuem como um reservatório de fósforo de médio a longo prazo, contribuindo para a manutenção da fertilidade do solo, além de favorecer a eficiência no uso da água e aumentar a tolerância das plantas a estresses térmicos e hídricos, condições recorrentes na Caatinga (Traoré et al., 2025).

A solubilização dos fosfatos naturais está fortemente condicionada à acidez do solo e à concentração de cálcio na solução do solo. A liberação de fósforo a partir dos FN é favorecida em ambientes com maior atividade de prótons e menor saturação por cálcio, o que reforça a importância do manejo integrado da fertilidade do solo para maximizar a eficiência dessas fontes (Barrow, 2022).

Uma característica marcante dos solos do Cariri paraibano é o elevado valor de Fósforo Remanescente, indicador de baixo Fator Capacidade Tampão de Fósforo (FCP). Essa condição está associada, principalmente, à textura frequentemente mais arenosa e à mineralogia diferenciada desses solos, com predominância de minerais do tipo 2:1, como ilita e esmectita (Aslam et al., 2024). Em comparação aos solos tropicais oxídicos, ricos em óxidos de ferro e alumínio, os solos do Cariri apresentam menor energia de adsorção do fósforo, o que pode resultar em maior eficiência imediata das adubações fosfatadas (Wang et al., 2022).

Entretanto, essa menor capacidade de retenção também implica maior risco de perdas por lixiviação ou escoamento superficial, exigindo um manejo criterioso das doses, formas e épocas de aplicação (Meng et al., 2024).

Adicionalmente, a integração do uso de fosfatos naturais com microrganismos solubilizadores de fosfato (BSP) e fungos micorrízicos arbusculares adaptados às condições da Caatinga constitui uma abordagem biotecnológica promissora (Ataíde et al., 2025).

Microrganismos do gênero Bacillus, entre outros, podem atuar na acidificação localizada da rizosfera, na produção de ácidos orgânicos e enzimas fosfatases, catalisando a dissolução das rochas fosfáticas e ampliando a disponibilidade de P para as plantas (Rawat et al., 2021).

Essa estratégia é particularmente relevante em sistemas de produção de sequeiro ou sob irrigação suplementar, típicos do Semiárido, contribuindo para a sustentabilidade, eficiência nutricional e resiliência dos agroecossistemas da região (Bayu, 2022).

3.6 A cultura do feijão (Vigna unguiculata (L.) Walp)

O feijão tem se constituído, ao longo dos séculos, como um dos principais componentes da base alimentar da população brasileira. Tradicionalmente cultivado em pequenas propriedades, sobretudo pela agricultura familiar, seu cultivo é frequentemente realizado em sistemas de policultivo ou em consórcios com outras culturas, como o milho (Kim et al., 2025). Essa prática agrícola, marcada por saberes e técnicas tradicionais, tem sido transmitida entre gerações, reforçando a importância sociocultural dessa leguminosa no meio rural brasileiro (Lustosa-Silva et al., 2023).

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp), também conhecido como feijão-de-corda, feijão-macassar ou feijão-de-praia, é uma leguminosa de expressiva relevância socioeconômica e nutricional, especialmente em regiões Semiáridas (Gomes et al., 2024). No Brasil, seu cultivo é amplamente disseminado na Região Nordeste, onde constitui uma das principais fontes alimentares da população, em função de seu elevado valor nutricional, destacando-se pelo alto teor de proteínas, vitaminas e minerais (Purewal; Kaur; Salar, 2023).

Além disso, a cultura apresenta ampla adaptabilidade a condições edafoclimáticas adversas, o que contribui significativamente para a segurança

alimentar de populações em situação de vulnerabilidade socioeconômica (Ribeiro et al., 2023).

Pertencente à família Fabaceae, o feijão-caupi apresenta composição nutricional expressiva, contendo, em média, entre 23% e 25% de proteínas, com perfil adequado de aminoácidos essenciais, aproximadamente 62% de carboidratos, além de fibras dietéticas, vitaminas e minerais (Phillips; Saalia; Affrifah, 2022). Caracteriza-se ainda pelo baixo teor de lipídios e ausência de colesterol, o que reforça sua importância na alimentação humana, especialmente entre populações de baixa renda (Kapravelou et al., 2020).

Do ponto de vista agronômico, a espécie apresenta ciclo curto, elevada tolerância ao déficit hídrico e capacidade de adaptação a solos de baixa fertilidade, sendo cultivada predominantemente para a produção de grãos destinados ao consumo humano, embora também possa ser utilizada como forragem, adubação verde e cobertura do solo (Loiola, 2020; Olorunwa; Shi; Barickman, 2021).

O cultivo do feijão-caupi pode ser realizado sob diferentes sistemas de manejo, incluindo o preparo convencional do solo, o plantio mínimo e o sistema de plantio direto (Pereira et al., 2020).

A produtividade da cultura é influenciada por diversos fatores agronômicos, destacando-se a densidade e uniformidade de semeadura, a profundidade de deposição das sementes, o tipo de preparo do solo e o manejo da adubação, tanto em relação à dose quanto à fonte utilizada (Ravi et al., 2021). A adequada combinação desses fatores é fundamental para a obtenção de maiores rendimentos e para o desenvolvimento sustentável da cultura (Olorunwa; Shi; Barickman, 2021).

3.7 Extração de P por Mehlich-1

A análise de fósforo no solo constitui uma etapa crucial em estudos agronômicos e de fertilidade de solos, pois esse nutriente desempenha papel determinante no crescimento vegetal e na sustentabilidade de sistemas agrícolas (Magnone et al., 2022).

O fósforo ocorre no solo em diferentes formas químicas, incluindo frações prontamente disponíveis para absorção pelas raízes, bem como formas mineralógicas e orgânicas pouco solúveis que representam reserva de longo prazo (Jin et al., 2021). Assim, os métodos de determinação de fósforo podem ser classificados em extratores

de fósforo disponível e técnicas de fósforo total, sendo cada um deles adequado para diferentes propósitos analíticos e ambientais (Fornasar et al., 2024).

O método Mehlich-1 consiste em extratores multinutrientes que combinam ácidos e agentes complexantes para remover simultaneamente fósforo e outros elementos do solo (Bhatta et al., 2021).

O Mehlich-1, composto por ácidos em baixas concentrações, é capaz de extrair frações lábeis de P ao dissolver parcialmente fosfatos de cálcio, ferro e alumínio, sendo tradicionalmente utilizado em análises de rotina de fertilidade (Guera; Da Fonseca, 2022). No entanto, em solos tratados com fosfatos naturais, este método pode superestimar a disponibilidade de fósforo devido à sua maior agressividade química (Costa; Ramos; Benites, 2025).

A determinação de fósforo total no solo visa quantificar toda a massa de P presente, independentemente de sua forma química ou disponibilidade imediata para as plantas (Barros, 2024). Este parâmetro é fundamental para avaliar a reserva global de fósforo e entender o potencial de longo prazo de uma fonte fosfatada, como o fosfato natural de rocha, em sistemas agrícolas e ambientais (Brasil, 1994; Nyamaizi, 2024).

A digestão com ácido sulfúrico é um dos métodos mais utilizados por sua robustez e relativa simplicidade, embora existam variações que empregam diferentes reagentes e condições para otimizar a recuperação de P (Nyamaizi, 2024; Bhatta et al., 2021).

4 METODOLOGIA

4.1 Localização da pesquisa

O experimento foi conduzido no Laboratório de Química e Fertilidade dos Solos (Lasol) e no Viveiro de Mudas da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), pertencente ao Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido (CDSA), situados no município de Sumé, Estado da Paraíba, região do Cariri Ocidental, com coordenadas geográficas 7°39'43"S e 36°53'41"W, a uma altitude média de 527 m.

O clima predominante, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é do tipo BSh (semiárido quente), caracterizado por duas estações distintas: uma chuvosa (inverno) e outra seca (verão), com elevada variabilidade pluviométrica e longos períodos de estiagem (Medeiros et al., 2014).

4.2 Coleta dos materiais

Amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0–20 cm, em área adjacente ao Perfil Didático do Solo, setor de estudos da Pedologia, do Campus de Sumé (Figura 2), que foi classificado como LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico (Embrapa, 2018). Após a coleta, o solo foi seco ao ar, destorroado e peneirado para posterior utilização nos experimentos.

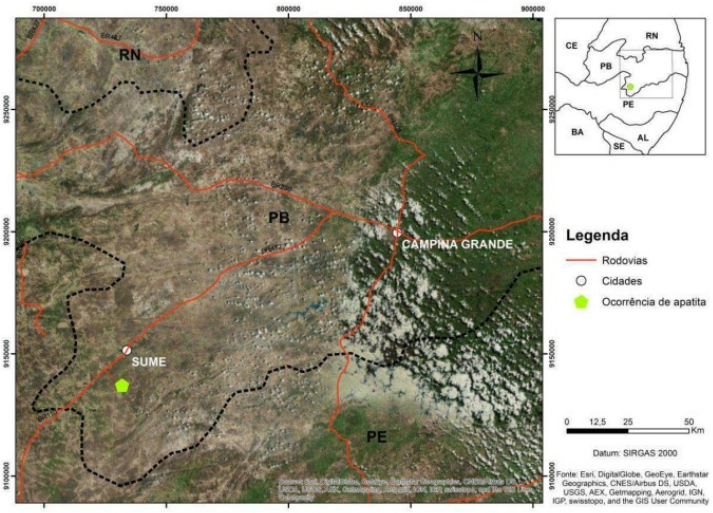
Figura 2 – **Coleta de amostras de solo (0–20 cm) efetuada em áreadjacente ao local de abertura do perfil, no Campus de Sumé.**



Fonte: Elaboração própria (2026).

O fosfato de rocha utilizado foi oriundo de uma propriedade particular, no Sítio Olho D'agua do Cunha (latitude 07º48'02"S e longitude 36º53'49"W), localizado em Sumé, Estado da Paraíba, numa área de antiga exploração (Figura 3 e 4).

Figura 3 – **Localização geográfica da área de coleta do mineral.**



Fonte*:* Vieira (2017).

Figura 4 – Área de exploração



Fonte: Elaboração própria (2026).

O material foi submetido a secagem, trituração e peneiramento, conforme metodologia adaptada de Souza et al. (2006), para obtenção das frações granulométricas de 0,106 mm, 0,26 mm, 0,5 mm e 1,0 mm (ABNT n° 140, 60, 35 e 18, respectivamente). Duas fontes de matéria orgânica foram utilizadas como aditivos: esterco bovino curtido e esterco bovino fresco adquiridos no Parque de Exposição de Sumé.

4.3 Aspectos gerais da pesquisa

A pesquisa apresenta natureza experimental e abordagem quantitativa, visando avaliar o potencial agronômico do fosfato natural da Paraíba como fonte alternativa de fósforo para plantas cultivadas em condições controladas.

O estudo foi desenvolvido em duas etapas:

- Etapa I (Laboratorial) – Foram efetuadas análises químicas do solo e dos tratamentos aos 20, 40 e 60 dias após o início da incubação, visando quantificar o fósforo disponível no substrato (Figura 5).

Figura 5 - Determinações dos teores de fósforo nas diferentes frações granulométricas aplicadas no solo.



Fonte: Elaboração própria (2026).

- Etapa II (Cultivo em vasos) – Avaliação da resposta agronômica do feijão (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) à aplicação dos tratamentos, utilizando sementes adquiridas no Laboratório de Fitossanidade do Semiárido do CDSA/UFCG (LAFISA).

4.4 Tratamentos e delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado (DIC), em arranjo fatorial 4 × 2 + 1, correspondendo a quatro granulometrias do fosfato de rocha (0,106; 0,26; 0,5 e 1,0 mm) combinadas a duas fontes orgânicas (esterco curtido e fresco), acrescido de uma testemunha absoluta (solo sem adição de fosfato nem de matéria orgânica). Foram utilizadas quatro repetições por tratamento, totalizando 36 unidades experimentais.

4.5 Condução do experimento

Na fase de incubação, o solo de cada vaso (5 litros) recebeu as doses correspondentes de fosfato natural da Paraíba, considerando-se o teor de 11,93% de P_2O_5 determinado por Brasil (2012). A dose aplicada foi equivalente a 800 kg ha^{-1}, correspondendo a 34 g de fosfato natural por vaso.

A matéria orgânica, na forma de esterco bovino curtido ou fresco, foi incorporada na proporção de 0,75 L por vaso. A umidade do substrato foi mantida a 60% da capacidade de campo (1,8 L de água por vaso), durante 60 dias, a fim de favorecer a mineralização das fontes orgânicas e a solubilização do fósforo do fosfato natural (Cicek et al., 2020).

Na etapa subsequente (fase de cultivo), procedeu-se à semeadura no dia (14/10/2025) (Figura 6) de quatro sementes de feijão-vigna (*Vigna unguiculata*) por vaso. Após a emergência realizou-se o desbaste (Figura 7), deixando-se duas plantas por unidade experimental.

Figura 6 – Realização da semeadura nas unidades experimentais.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 7 – Desbaste das plantas com menor desenvolvimento vegetativo



Fonte: Elaboração própria (2026).

Aos 60 dias após a emergência (DAE), as plantas foram colhidas e avaliadas quanto às seguintes variáveis: Massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca das raízes (MSR).

Para a determinação da massa seca da parte aérea (MSPA) e da massa seca do sistema radicular (MSR), as plantas foram coletadas e separadas em parte aérea e sistema radicular. Em seguida, o solo aderido às raízes foi removido com auxílio de jato de água e peneira, sob água corrente (Figura 8).

Figura 8 – Coleta da Massa seca da parte aérea e Massa seca das raízes



Fonte: Elaboração própria (2026).

Em seguida, ambas as frações foram acondicionadas em sacos de papel identificados e secas em estufa de circulação/ventilação forçada a 65 °C até atingirem massa constante (Figura 9). Após a secagem, as amostras foram pesadas em balança analítica, registrando-se os valores de MSPA e MSR (Liu et al., 2021; Rolando et al., 2024; Ramzan et al., 2023).

Figura 9 – A biomassa do feijoeiro foi fracionada em sacos de papel e submetida à secagem em estufa com circulação de ar a 65 °C.



Fonte: Elaboração própria (2026).

4.6 Variáveis analisadas

As variáveis de solo compreenderam determinações dos teores de P disponível (Mehlich-1) de amostras de solo, 100g retirados dos vasos aos 20, 40, 60 dias após a incorporação das fontes orgânicas (Guera; Da Fonseca, 2022). As variáveis avaliadas englobaram massa seca da parte aérea e massa seca das raízes (Bhattacharya, 2021). Visando determinar a influência da granulometria do fosfato de rocha e da fonte orgânica sobre a disponibilidade de fósforo e o desempenho do feijão-vigna.

4.7 Análise estatística

Os dados obtidos no experimento foram inicialmente organizados em planilhas eletrônicas, com verificação de digitação, cálculo de estatísticas descritivas (médias, coeficiente de variação e erro-padrão) e elaboração de gráficos exploratórios no Microsoft Excel® (Machado et al., 2025). Em seguida, procedeu-se à análise estatística no software SISVAR®, adotando-se nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$) para tomada de decisão (Santos et al., 2025).

Para as variáveis do solo (fósforo disponível – Mehlich-1), as avaliações realizadas aos 20, 40 e 60 dias foram analisadas separadamente, em delineamento inteiramente casualizado (DIC). Considerando a estrutura do ensaio (4 granulometrias × 2 fontes orgânicas + testemunha absoluta), os tratamentos foram comparados por análise de variância (ANOVA) pelo teste F. Quando detectada significância para “tratamentos”, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, de modo a identificar diferenças entre combinações de granulometria e fonte orgânica.

Adicionalmente, por se tratar de um fator de natureza quantitativa, a granulometria do fosfato natural foi analisada por regressão polinomial, ajustando-se modelos de 1º, 2º graus, com seleção do modelo com base: (i) na significância dos coeficientes do modelo; (ii) na significância do ajuste por regressão e (iii) na ausência de desvio de regressão (quando aplicável), além do coeficiente de determinação (R^2). As equações ajustadas e os respectivos parâmetros foram obtidos no SISVAR®, e os gráficos finais (dispersão com curva ajustada e apresentação de equação/R^2) foram confeccionados no Microsoft Excel® (Machado et al., 2025; Santos et al., 2025).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para o fósforo disponível no solo aos 20, 40 e 60 dias de incubação e para as variáveis de crescimento do feijão-vigna, massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca das raízes (MSR) aos 60 dias após a emergência (DAE), são apresentados inicialmente de forma descritiva, por meio de valores médios e medidas de dispersão (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores médios (± erro padrão) de fósforo disponível no solo aos 20, 40 e 60 dias de incubação e de MSPA e MSR do feijão-vigna aos 60 DAE, em função da granulometria do fosfato natural e da fonte orgânica

Estercos	Granulometria	P no solo			MSPA (g)	MSR (g)
	mm	20 dias	40 dias	60 dias		
		mg dm^{-3}			g	
Esterco fresco (EF)	0,106	38,00 ± 0,64	42,16 ± 3,74	39,55 ± 4,31	28,91 ± 4,12	10,21 ± 1,37
	0,26	58,01 ± 3,96	49,69 ± 3,56	56,88 ± 5,41	29,16 ± 3,08	10,89 ± 0,88
	0,5	27,29 ± 7,27	37,84 ± 3,69	37,18 ± 2,12	28,08 ± 4,19	10,43 ± 0,92
	1	19,21 ± 1,71	26,91 ± 5,24	24,36 ± 3,31	35,51 ± 2,84	11,43 ± 0,73
Esterco curtido (EC)	0,106	70,16 ± 4,90	59,27 ± 3,90	57,75 ± 4,17	22,20 ± 0,81	10,78 ± 0,58
	0,26	92,81 ± 4,87	77,62 ± 2,05	74,19 ± 3,28	20,15 ± 2,31	11,93 ± 1,18
	0,5	49,12 ± 2,18	69,48 ± 3,79	63,23 ± 3,29	14,93 ± 3,15	6,53 ± 0,93
	1	41,66 ± 3,15	39,07 ± 2,50	43,72 ± 1,71	14,75 ± 4,53	5,98 ± 2,11
Testemunha absoluta (TA)	0	7,49 ± 0,35	7,54 ± 0,37	8,04 ± 0,26	14,68 ± 1,70	7,87 ± 0,46

Fonte: Elaboração própria (2026).

Nota: Valores apresentados como média ± erro padrão (n = 4). P (fósforo) disponível determinado por Mehlich-1 aos 20, 40 e 60 dias de incubação. MSPA e MSR avaliadas aos 60 dias após a emergência (DAE).

A análise de variância revelou efeito significativo da granulometria do fosfato natural ($F = 65,85$; $p < 0,001$) e da fonte orgânica ($F = 103,47$; $p< 0,001$) sobre os teores de fósforo disponível no solo aos 20 dias após a incubação. Por outro lado, não foi observada interação significativa entre a granulometria e a fonte orgânica ($p > 0,05$), indicando que os efeitos desses fatores ocorreram de forma independente (Tabela 2). Esses resultados demonstram que tanto a redução do tamanho de partícula do fosfato de rocha quanto a adição de matéria orgânica influenciam diretamente a disponibilidade de fósforo no solo.

Os teores de fósforo assegurados pelo extrator Mehlich-1 aos 20 dias foram significativamente influenciados pelos tratamentos ($p < 0,05$), indicando resposta do sistema solo–fosfato natural–matéria orgânica já no período inicial de incubação. A análise de variância evidenciou efeito altamente significativo dos tratamentos ($Fc = 46,411$; $p = 0,0000$), com coeficiente de variação (CV) = 17,24%.

Tabela 2 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para fósforo disponível (Mehlich-1) no solo aos 20 dias de incubação, em DIC

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamentos	8	22202,404	2775,301	46,411	0,0000
Erro	27	1614,561	59,799		
Total corrigido	35	23816,966			

Fonte: Elaboração própria (2026), a partir das saídas do SISVAR®

Nota: GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; Fc = valor de F calculado; Pr>Fc = probabilidade associada ao teste F (p-valor). Total corrigido = soma de quadrados total corrigida pela média. Coeficiente de Variação = 17,24%.

Observou-se variação do fósforo disponível em função das combinações de granulometria e fonte orgânica, com destaque para 0,26 mm sob EC, que apresentou a maior média (Tabela 3).

Tabela 3 - Fósforo disponível no solo (Mehlich-1), em função da granulometria do fosfato natural e da fonte orgânica, na avaliação aos 20 dias após a incubação.

Granulometrias (mm)	Esterco	P disponível (mg dm^{-3})
0,106	EF	38,00 cd
0,26	EF	58,01 df
0,5	EF	27,26 bc
1,0	EF	19,22 ab
0,106	EC	70,17 f
0,26	EC	92,80 g
0,5	EC	49,13 de
1,0	EC	41,66 cde
TA		7,49 a
CV (%)		**17,24**

Fonte: Elaboração própria (2026), a partir das saídas do SISVAR®

Nota: EF = esterco bovino fresco; EC = esterco bovino curtido; TA = testemunha absoluta (solo sem adição de fosfato natural e sem fonte orgânica). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). CV = coeficiente de variação.

O maior teor de P disponível foi obtido com EC 0,26 mm (92,81 (mg/dm^3); g), tratamento estatisticamente superior aos demais, demonstrando maior capacidade de promover P disponível no curto prazo.

Em termos comparativos, esse tratamento elevou o P disponível em aproximadamente 12,4 vezes em relação à testemunha (TA).

De modo consistente, o maior P disponível (Mehlich-1) observado com esterco curtido em relação ao esterco fresco, já aos 20 dias, sugere que a estabilização do resíduo orgânico favorece a liberação/mobilização de P e pode potencializar a transferência do P de fontes menos solúveis (ex.: fosfato natural) para formas mais lábeis, em concordância com resultados obtidos para materiais orgânicos compostados e compostos enriquecidos com rocha fosfática na elevação da disponibilidade de P no solo (Grigatti; Petroli; Ciavatta, 2023; Sagnon et al., 2022).

Esse comportamento pode estar associado à maior estabilização da matéria orgânica no esterco curtido, que tende a intensificar a atividade microbiana e a liberação de ligantes orgânicos (ácidos orgânicos e frações húmicas), capazes de dissolver fosfatos pouco solúveis e complexar cátions — especialmente Ca^{2+} — liberados da apatita, reduzindo a reprecipitação e favorecendo a transferência do P

do fosfato natural para formas mais lábeis/extraíveis; paralelamente, microrganismos solubilizadores contribuem via secreção de ácidos e fosfatases para ativar o P insolúvel no solo (Meena et al., 2025; Pan; Cai, 2023).

Observou-se que o tratamento EF 1,0 mm não diferiu estatisticamente da testemunha (TA). Esse resultado indica que, no início do período de incubação, a combinação de maior granulometria com um resíduo menos estabilizado pode ter limitado a liberação imediata de P, possivelmente em função do menor contato solo–insumo e da menor taxa de dissolução, bem como da necessidade de maior tempo para que o processo de decomposição gere compostos reativos, como ácidos orgânicos, capazes de promover a mobilização do P. (Pang et al., 2024).

Essa interpretação é compatível com evidências de incubação de curto prazo mostrando menor recuperação de P quando o insumo está em partículas maiores/pelletizadas em comparação à forma mais fina (pó), e com trabalhos que destacam a importância de produtos da atividade microbiana (ácidos orgânicos) na liberação de P a partir de fosfatos pouco solúveis em sistemas com insumos orgânicos (Pedersen et al., 2025).

O padrão geral indica que as frações mais finas tendem a favorecer maior disponibilidade de P, especialmente quando associadas ao esterco curtido, com destaque para 0,26 mm e 0,106 mm. Esse resultado é coerente com o princípio de que a redução do tamanho de partícula aumenta a área superficial específica e o grau de contato entre o fosfato natural e a solução/colóides do solo, elevando a taxa de dissolução e a reatividade do material (Vandeginste et al., 2024).

Entretanto, o efeito da finura pode apresentar “retornos decrescentes” no curto prazo, uma vez que a elevação da área específica nem sempre se traduz em maior dissolução efetiva: processos como aglomeração de partículas, passivação superficial e precipitações secundárias podem reduzir o contato da solução com sítios reativos e limitar a liberação de P (Bullock; Yang; Darton, 2021; Walker; Bell; Rippy, 2024; Shaw et al., 2025). Além disso, diferenças na distribuição granulométrica e nas condições químicas do sistema modulam a reatividade do fosfato natural, contribuindo para respostas não lineares entre frações muito finas (Bouray et al., 2023).

Na avaliação aos 40 dias, o teor de P disponível variou entre os tratamentos, destacando-se a combinação 0,26 mm + EC, que apresentou a maior média (77,62 mg dm^{-3}), diferindo dos tratamentos com menores teores e da testemunha (Tabela 4).

Tabela 4 - Fósforo disponível no solo (Mehlich-1), em função da granulometria do fosfato natural e da fonte orgânica, na avaliação aos 40 dias após a incubação.

Granulometrias (mm)	Esterco	P disponível (mg dm^{-3})
0,106	EF	42,16 bc
0,26	EF	49,69 cd
0,5	EF	37,84 bc
1,0	EF	26,91 b
0,106	EC	59,27 de
0,26	EC	77,62 f
0,5	EC	69,48 ef
1,0	EC	39,07 bc
TA		7,54 a
CV (%)		**15,22**

Fonte: Elaboração própria (2026), a partir das saídas do SISVAR® **Nota:** EF = esterco bovino fresco; EC = esterco bovino curtido; TA = testemunha absoluta (solo sem fosfato natural e sem fonte orgânica). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). CV = coeficiente de variação.

Aos 40 dias, a manutenção da testemunha (TA) com os menores teores e a superioridade dos tratamentos com fosfato natural associado a insumos orgânicos reforçam que a copresença de matéria orgânica acelera a conversão do P do fosfato para formas mais extraíveis ao longo do tempo, como já observado em sistemas com “phosphate rock-enriched compost”, nos quais há aumento do P disponível e alterações favoráveis na microbiota e em atributos químicos do solo (Sagnon et al., 2022).

Nesse contexto, os maiores valores em EC 0,26 mm e EC 0,5 mm sugerem que, em curto prazo, granulometrias intermediárias a finas podem otimizar a dissolução do fosfato natural quando combinadas a um material orgânico mais estabilizado, o que é coerente com evidências de que a reatividade de fosfatos naturais é fortemente condicionada pela distribuição do tamanho de partícula (Bouray et al., 2023).

A superioridade estatística do esterco curtido sobre o esterco fresco em 0,106; 0,5 e 0,26 mm é compatível com a ideia de que materiais orgânicos processados/compostados tendem a promover uma liberação de P mais consistente e uma dinâmica de disponibilidade mais favorável do que resíduos “in natura”, por mudanças na fração orgânica reativa e na forma como o P é retido/liberado no solo (Grigatti; Petroli; Ciavatta, 2023).

Além disso, resultados recentes indicam que a redução do tamanho de partícula aumenta a disponibilidade imediata de P em incubação, enquanto partículas mais grossas têm desempenho inferior na recuperação de P em extratores no curto prazo (Pedersen et al., 2025).

O que ajuda a explicar por que, em 1,0 mm, a diferença entre EF e EC tende a se atenuar: a menor área específica passa a ser o principal fator limitante, restringindo o “ganho” proporcionado pela matéria orgânica. Por fim, a persistência de valores elevados em EC nas frações 0,26–0,5 mm também dialoga com estudos em que compostos/enriquecidos com fosfato natural aumentam o P lábil e a atividade biológica ligada ao ciclo do P, sustentando incrementos de disponibilidade ao longo do cultivo/incubação (Sagnon et al., 2024).

Na avaliação aos 60 dias, verificou-se que as combinações com esterco curtido tenderam a apresentar maiores teores de P disponível, com destaque para 0,26 mm + EC (74,19 mg dm^{-3}), superior à testemunha e a parte dos demais tratamentos (Tabela 5).

Tabela 5 - Fósforo disponível no solo (Mehlich-1), em função da granulometria do fosfato natural e da fonte orgânica, na avaliação aos 60 dias após a incubação.

Granulometrias (mm)	Esterco	P disponível (mg dm^{-3})
0,106	EF	39,56 bc
0,26	EF	56,88 de
0,5	EF	37,18 bc
1,0	EF	24,36 b
0,106	EC	57,75 de
0,26	EC	74,19 f
0,5	EC	63,23 ef
1,0	EC	43,72 ef
TA		8,05 a
CV (%)		**15,20**

Fonte: Elaboração própria (2026), a partir das saídas do SISVAR®
Nota: EF = esterco bovino fresco; EC = esterco bovino curtido; TA = testemunha absoluta (solo sem fosfato natural e sem fonte orgânica). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). CV = coeficiente de variação.

O conjunto dos tratamentos com esterco curtido permaneceu entre as maiores médias, sugerindo que a matéria orgânica continua potencializando a fração extraível de P do fosfato natural até 60 dias, especialmente quando a granulometria é 0,26–0,5 mm.

A aplicação do fosfato natural associado às fontes orgânicas promoveu respostas significativas de crescimento do feijão-vigna, avaliadas pela massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca das raízes (MSR). Em ambas as variáveis houve efeito significativo de tratamentos (TRAT), indicando que as combinações de granulometria × tipo de esterco modificaram a produção de biomassa (Tabela 6).

Tabela 6 - Resumo da análise de variância (teste F) para MSPA e MSR de feijão-vigna em experimento em vasos, aos 60 DAE.

Variável	GL (TRAT/Erro)	Fc (TRAT)	Pr>Fc	CV (%)	Média geral (g vaso^{-1})
MSPA	8 / 27	5,729	0,0003	27,54	23,15
MSR	8 / 27	3,820	0,0041	23,44	9,56

Fonte: Elaboração própria (2026), a partir das saídas do SISVAR®.

Nota: GL = graus de liberdade; TRAT = tratamentos; Fc = valor de F calculado; Pr>Fc = p-valor associado ao teste F; CV = coeficiente de variação.

O teste de Tukey (5%) para MSPA apresentou DMS = 15,18, evidenciando separação entre um grupo de menor desempenho (tratamentos “a”) e o maior valor (tratamento “b”) como demostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Massa seca da parte aérea (MSPA) do feijão-vigna em função da granulometria do fosfato natural e da fonte orgânica, aos 60 dias após a emergência (DAE).

Granulometrias (mm)	Esterco	MSPA (g) (média)
0,106	EF	28,91 ab
0,26	EF	29,16 ab
0,5	EF	28,08 ab
1,0	EF	35,51 b
0,106	EC	22,21 ab
0,26	EC	20,15 a
0,5	EC	14,93 a
1,0	EC	14,76 a
TA		14,68 a
CV (%)		**27,54**

Fonte: Elaboração própria (2026), a partir das saídas do SISVAR®

Nota: EF = esterco bovino fresco; EC = esterco bovino curtido; TA = testemunha absoluta (solo sem fosfato natural e sem fonte orgânica). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). CV = coeficiente de variação. Valores expressos em g vaso^{-1}.

O maior acúmulo de massa seca da parte aérea (MSPA) nos tratamentos com esterco fresco (EF), sobretudo em 1,0 mm, sugere que o desempenho inicial do feijão-vigna não é explicado apenas pelo P extraível (Mehlich-1), mas também pelo aporte mais imediato de nutrientes lábeis (principalmente N) e por estímulos à atividade biológica do solo (Mndzebele et al., 2023). Isso é consistente com evidências de que materiais orgânicos menos estabilizados tendem a apresentar maior mineralização de N no curto prazo do que compostos, elevando a nutrição inicial e a resposta vegetativa (Hurisso et al., 2024).

Enquanto insumos compostados/corrigidos liberam N de forma mais lenta e sincronizada (Toleikiene et al., 2024). Assim, a superioridade de EF em MSPA reforça uma leitura integrada solo–nutrição–planta, na qual a biomassa responde ao conjunto de fatores de fertilidade e biologia do solo, e não somente ao incremento de P disponível (Howe et al., 2024; Murga-Orrillo et al., 2023).

Para MSR, o teste de Tukey (5%) apresentou DMS = 5,33, com diferenças mais sutis entre os tratamentos e maior sobreposição de grupos (a b c) (Tabela 8).

Tabela 8 - Massa seca de raízes (MSR) do feijão-vigna em função da granulometria do fosfato natural e da fonte orgânica, aos 60 dias após a emergência (DAE).

Granulometrias (mm)	Esterco	MSR (g vaso^{-1}) (médias)
0,106	EF	10,21 abc
0,26	EF	10,89 abc
0,5	EF	10,44 abc
1,0	EF	11,43 bc
0,106	EC	10,78 abc
0,26	EC	11,93 c
0,5	EC	6,53 ab
1,0	EC	5,98 a
TA		7,87 abc
CV (%)		**23,44**

Fonte: Elaboração própria (2026), a partir das saídas do SISVAR®

Nota: EF = esterco bovino fresco; EC = esterco bovino curtido; TA = testemunha absoluta (solo sem fosfato natural e sem fonte orgânica). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). CV = coeficiente de variação. Valores expressos em g vaso^{-1}.

O menor valor de MSR ocorreu em EC 1,0 mm, enquanto o maior ocorreu em EC 0,26 mm. Esses dois tratamentos diferem entre si, indicando que a redução do tamanho de partícula até 0,26 mm, sob esterco curtido, favoreceu o acúmulo de biomassa radicular em relação à fração mais grossa sob a mesma fonte orgânica.

A maioria dos tratamentos ficou no grupo intermediário, indicando que, para raízes, houve maior sobreposição e menor separação entre combinações, quando comparado à MSPA

A menor diferenciação da massa seca de raízes (MSR) entre tratamentos, com destaque positivo para EC 0,26 mm e negativo para EC 1,0 mm, é compatível com a ideia de que a planta responde sobretudo a microssítios de P no entorno radicular: quando há maior formação de “zonas ricas em P”, ocorre proliferação de raízes laterais e melhor exploração do substrato (Sun et al., 2024; Swain et al., 2024).

Em contrapartida, em granulometria mais grossa, a menor reatividade/dissolução do fosfato natural tende a limitar o aporte de P no microambiente do vaso, reduzindo o estímulo ao crescimento radicular; estudos com fosfato natural evidenciam que a disponibilidade agronômica depende da reatividade do material e do seu preparo/solubilidade, sendo a finura um fator associado ao desempenho (Lopes et al., 2022; Ramos et al., 2025).

Houve efeito significativo de tratamentos para MSPA (Fc = 5,301; p = 0,0073), enquanto para MSR o efeito não foi significativo (p = 0,1201) (Tabela 9). O resultado para o tratamento com esterco bovino fresco (EF), considerando-se como variável independente às classes de granulometria do fosfato natural (0,106 mm; 0,26 mm; 0,5 mm; 1,0 mm; 0 = testemunha).

Tabela 9 - **Resumo da análise de variância (ANOVA) para a massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSR), sob esterco fresco**.

Variável	Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc	*p*-valor	CV (%)	Média
								g vaso^{-1}
MSPA	Tratamentos	4	932,93	233,23	5,301	0,0073	24,33	27,27
	Resíduo	15	659,92	43,99				
	Total	19	1592,86					
MSR	Tratamentos	4	29,87	7,47	2,186	0,1201	18,18	10,17
	Resíduo	15	51,25	3,42				
	Total	19	81,12					

Fonte: Elaboração própria (2026), a partir das saídas do SISVAR®.

Nota: GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; Fc = valor de F calculado; p-valor = probabilidade associada ao teste F; CV = coeficiente de variação. Médias expressas em g vaso^{-1}. Considerou-se significância a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$).

A ANOVA indicou que, sob EF, houve efeito significativo de tratamentos sobre a MSPA (p = 0,0073), evidenciando que os níveis de granulometria do fosfato natural (incluindo a testemunha) influenciaram o acúmulo de biomassa aérea.

Para a MSR, entretanto, o efeito global de tratamentos não foi significativo (p = 0,1201), sugerindo que, nas condições do ensaio, as variações de granulometria não resultaram em diferenças estatisticamente detectáveis para biomassa radicular ao nível de 5%.

A Tabela 10 apresenta as médias observadas de MSPA e MSR em função da granulometria sob EF.

Tabela 10 — Médias observadas de Massa Seca da Parte Aérea e Massa Seca das Raízes do feijão-vigna em função da granulometria do fosfato natural, sob esterco bovino fresco.

Granulometria mm	MSPA g vaso^{-1}	MSR g vaso^{-1}
TA	14,6825	7,87
0,5	28,08	10,435
1,0	35,51	11,43
0,26	29,155	10,89
0,106	28,9075	10,205

Fonte: Elaboração própria (2026).

Nota: TA = testemunha absoluta (solo sem fosfato natural e sem fonte orgânica). MSPA = massa seca da parte aérea; MSR = massa seca de raízes. Valores expressos em g vaso^{-1}.

Observa-se incremento expressivo da MSPA com a aplicação do fosfato natural associado ao esterco fresco, com aumento pronunciado em relação à testemunha. O maior valor de MSPA foi registrado em (1,0 mm), atingindo 35,5100 g vaso^{-1}, enquanto a testemunha apresentou 14,6825 g vaso^{-1}, evidenciando resposta positiva ao manejo organomineral no ambiente controlado do experimento.

A decomposição da soma de quadrados por regressão indicou ajuste cúbico para MSPA, com significância dos termos de ordem superior e ausência de desvio de regressão (p = 0,980), indicando que o modelo descreve adequadamente a variação das médias entre os níveis avaliados (Figura 8).

O modelo ajustado foi:

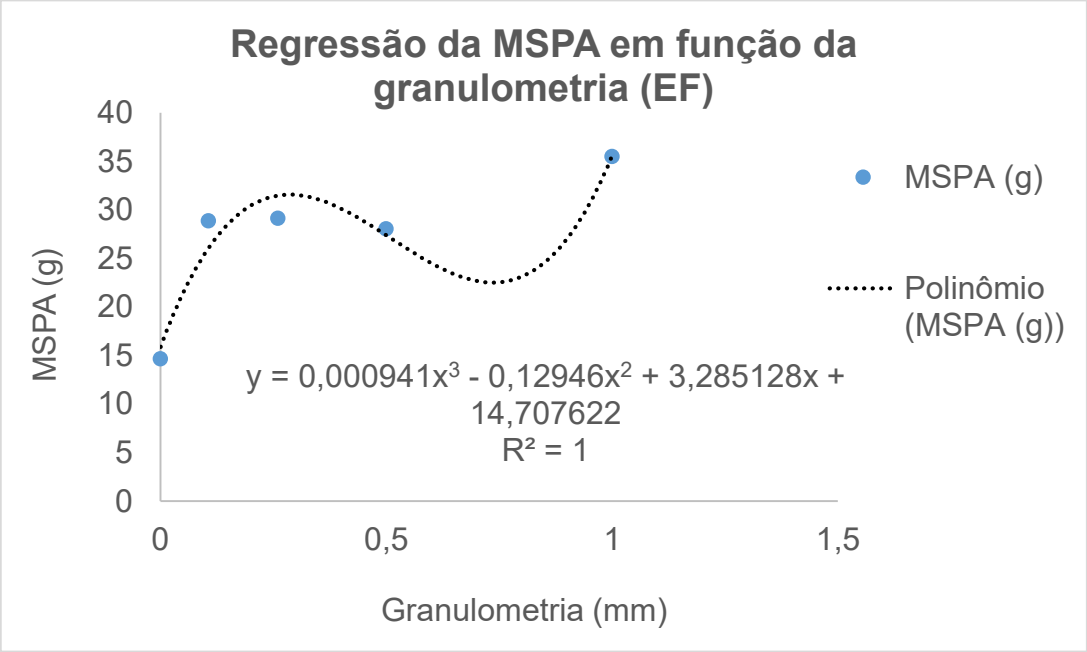
$$Y = 0{,}000941x^3 - 0{,}129446x^2 + 3{,}28518x + 14{,}707622 \quad (R^2 = 100\%) \quad \text{Eq. (1)}$$

Do ponto de vista agronômico, o comportamento observado sugere que, a resposta da parte aérea foi fortemente associada ao esterco fresco, com pico no nível 1,0 mm.

Esse padrão pode ser discutido considerando que o esterco fresco apresenta maior proporção de frações orgânicas lábeis, podendo intensificar a atividade microbiana e a dinâmica de liberação de nutrientes no curto prazo, o que tende a favorecer o crescimento vegetativo.

Dentro do intervalo avaliado, a resposta da MSPA não se mostrou monotônica em direção às frações mais finas, indicando que, sob EF, a performance pode refletir a interação entre a disponibilidade inicial de nutrientes da fonte orgânica e a cinética de dissolução do fosfato natural em cada classe.

Figura 10 — Dispersão das médias de MSPA + curva cúbica ajustada para EF



Fonte: Elaboração própria (2026).

Embora a ANOVA não tenha identificado efeito global significativo de tratamentos para MSR (p = 0,1201), as médias observadas indicaram valores de MSR superiores nos tratamentos com fosfato natural em relação à testemunha, com máximo em 1,0 mm (11,43 g vaso^{-1}).

Assim, as diferenças devem ser apresentadas como tendência descritiva, sem inferência conclusiva a 5%. A regressão ajustada no SISVAR é expressa por:

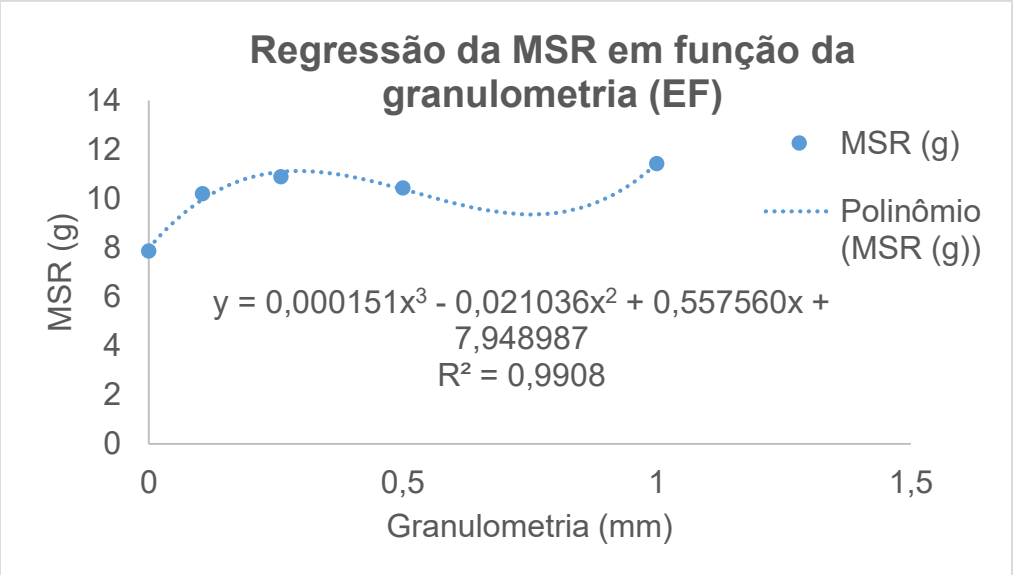
$$Y = 0{,}000151x^3 - 0{,}021036x^2 + 0{,}557560x + 7{,}948987 \quad (R^2 = 99{,}08\%) \quad \text{Eq. (2)}$$

Apesar do aumento médio de MSR nos tratamentos em comparação à testemunha, a variabilidade experimental não permitiu confirmar diferenças estatísticas entre os níveis. Nesse contexto, a curva de regressão deve ser utilizada principalmente para ilustrar o padrão de resposta e apoiar a discussão fisiológica, sem

extrapolar para uma recomendação de “granulometria ótima” com base apenas neste conjunto.

A partição sequencial apontou significância do componente cúbico e ausência de desvio (p = 0,781), sinalizando que a curva acompanha os pontos (Figura 9), ainda que a ANOVA não comprove efeito global.

Figura 11 - Dispersão das médias de MSR + curva cúbica ajustada para esterco fresco



Fonte: Elaboração própria (2026).

Conforme mostrado na Tabela 11 os resultados de regressão obtidos no SISVAR para os tratamentos com esterco bovino curtido (EC), considerando-se como variável independente às classes de granulometria do fosfato natural (0,106 mm; 0,26 mm; 0,5 mm; 1,0 mm; 0 = testemunha).

Tabela 11 - **Resumo da análise de variância (ANOVA) para Massa Seca da Parte Aérea e Massa Seca das Raízes do feijão-vigna sob esterco bovino curtido.**

Variável	Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc	*p*-valor	CV (%)	Média
MSPA	Tratamentos	4	200,68	50,17	1,622	0,2203	32,37	17,345
	Resíduo	15	464,00	30,93				
	Total	19	664,69					
MSR	Tratamentos	4	113,28	28,32	4,743	0,0113	27,94	8,6175
	Resíduo	15	89,56	5,97				
	Total	19	202,84					

Fonte: Elaboração própria (2026), a partir das saídas do SISVAR®.

Nota: GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; Fc = valor de F calculado; p-valor = probabilidade associada ao teste F; CV = coeficiente de variação. Médias expressas em g vaso^{-1}. Considerou-se significância a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$).

A ANOVA indicou que, sob EC, não houve efeito significativo de tratamentos sobre a MSPA (p = 0,2203), sugerindo que, considerando a variabilidade experimental (CV = 32,37%), as diferenças entre médias não foram suficientes para caracterizar efeito global a 5%.

Para a MSR, por outro lado, verificou-se efeito significativo de tratamentos (p = 0,0113), evidenciando que a granulometria do fosfato natural associada ao esterco curtido influenciou o acúmulo de biomassa radicular.

A Tabela 12 apresenta as médias observadas de MSPA e MSR em função da granulometria sob EC.

Tabela 12 — Médias observadas de massa seca da parte aérea e massa seca das raízes do feijão-vigna em função da granulometria do fosfato natural, sob esterco bovino curtido.

Granulometria	MSPA	MSR
mm	g vaso^{-1}	
Testemunha	14,6825	7,87
0,5	14,9275	6,525
1	14,755	5,985
0,26	20,1525	11,925
0,106	22,205	10,7825

Fonte: Elaboração própria (2026), a partir das saídas do SISVAR®.

Nota: Testemunha = solo sem adição de fosfato natural e sem fonte orgânica. MSPA = massa seca da parte aérea; MSR = massa seca de raízes. Valores expressos em g vaso^{-1}.

As médias observadas indicam que, sob EC, a MSPA apresentou valores próximos à testemunha nos níveis mais grossos (0,5 e 1,0 mm) e incrementos nas frações mais finas, especialmente em 0,26 e 0,106 mm.

Para a MSR, o efeito foi mais pronunciado, com máximos em 0,26 e 0,106 mm, sugerindo maior responsividade radicular às frações finas sob esterco curtido.

Embora a ANOVA não tenha detectado efeito global significativo de tratamentos para MSPA, a decomposição da soma de quadrados por regressão indicou componente linear significativo (b1; p = 0,0413), com ausência de desvio de regressão (p = 0,868). Isso indica que, mesmo sem diferença global detectável, existe uma tendência direcional entre os níveis avaliados.

O modelo linear ajustado foi:

$$Y = 0{,}071319x + 15{,}2477{,}19 \quad (R^2 = 76{,}73\%) \qquad \text{Eq. (3)}$$

A inclinação positiva do modelo é consistente com o aumento de MSPA nas frações mais finas (11), com destaque para 0,106 mm. Esse comportamento pode ser associado à maior área específica das partículas finas, favorecendo a reatividade do fosfato natural e a liberação gradual de P no substrato ao longo do período experimental, com potencial contribuição do esterco curtido na modulação do

ambiente químico do solo e na manutenção de processos de disponibilização de nutrientes.

O modelo cúbico ajustado (Figura 10):

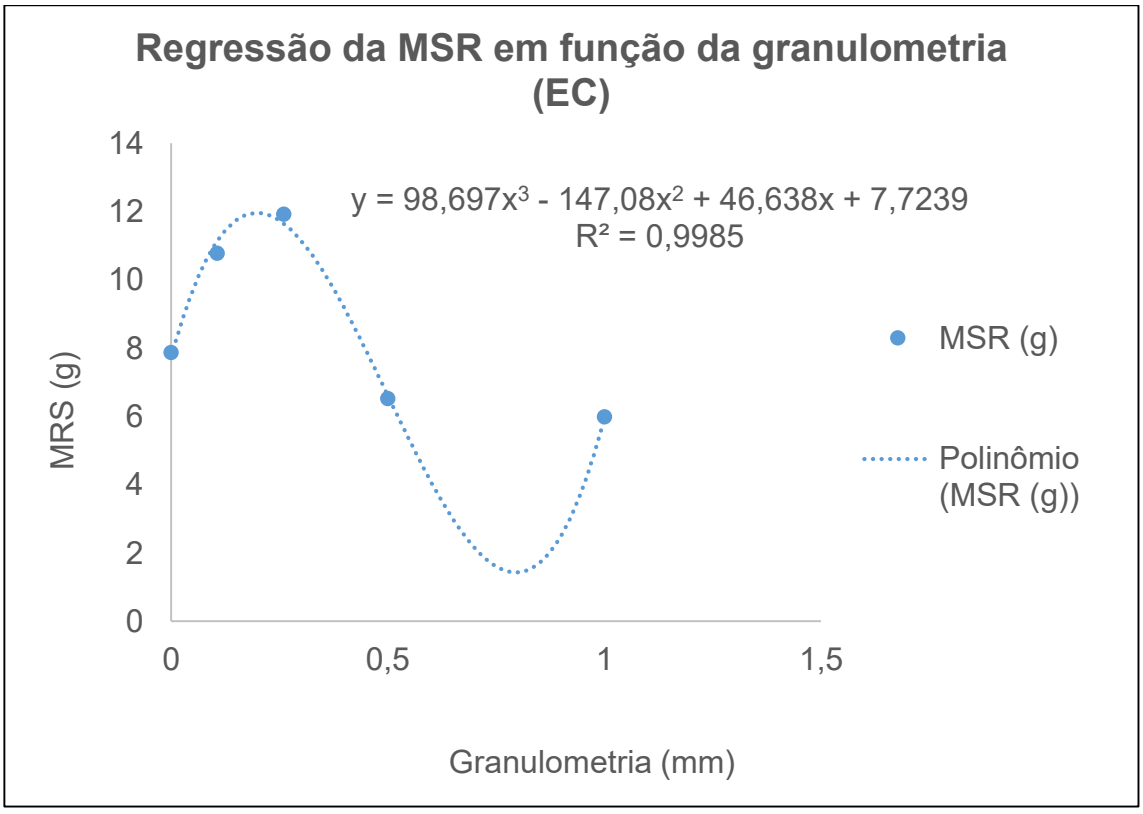
$$Y = -0{,}000236x^3 + 0{,}029526x^2 - 0{,}4552x + 7{,}9318 \ (R^2 = 99{,}85\%) \quad \text{Eq. (4)}$$

As médias observadas mostram que os maiores valores de MSR ocorreram em 0,26 mm e 0,106 mm, enquanto os níveis mais grossos (0,5 e 1,0 mm) apresentaram valores inferiores à testemunha.

Este padrão sugere que a fração fina do fosfato natural, quando associada ao esterco curtido, favoreceu a formação de sistema radicular mais robusto, possivelmente por aumentar o contato solo–partícula e a reatividade do fosfato, proporcionando maior disponibilidade de P na rizosfera durante o ciclo em vasos.

Nesse contexto, a resposta radicular mais intensa pode refletir maior eficiência na exploração do solo e na aquisição de P, nutriente frequentemente limitante em solos do semiárido.

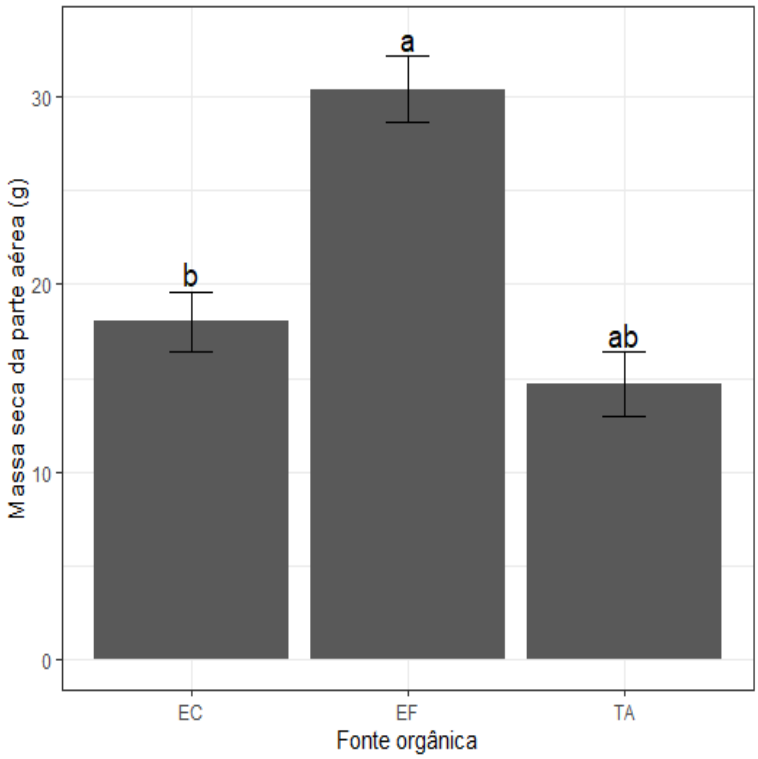
Figura 12 — Dispersão das médias de MSR + curva cúbica ajustada para esterco curtido



Fonte: Elaboração própria (2026).

A Figura 11 apresenta o efeito das fontes orgânicas sobre a massa seca da parte aérea (MSPA) do feijão-vigna. Observa-se que o tratamento com esterco bovino fresco (EF) resultou nos maiores valores de MSPA, diferindo significativamente do esterco curtido (EC). A testemunha absoluta (TA) apresentou comportamento intermediário, não diferindo estatisticamente de EF nem de EC, conforme indicado pelo teste de Tukey.

Figura 13 – **Massa seca da parte aérea (g vaso^{-1}) em função da fonte orgânica**



Fonte: Elaboração própria (2026).

*Massa seca da parte aérea (MSPA) do feijão-vigna em função da fonte orgânica: EC = esterco bovino curtido; EF = esterco bovino fresco; TA = testemunha absoluta.

Nota: Barras representam as médias (n = 4) e as hastes verticais representam o erro padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

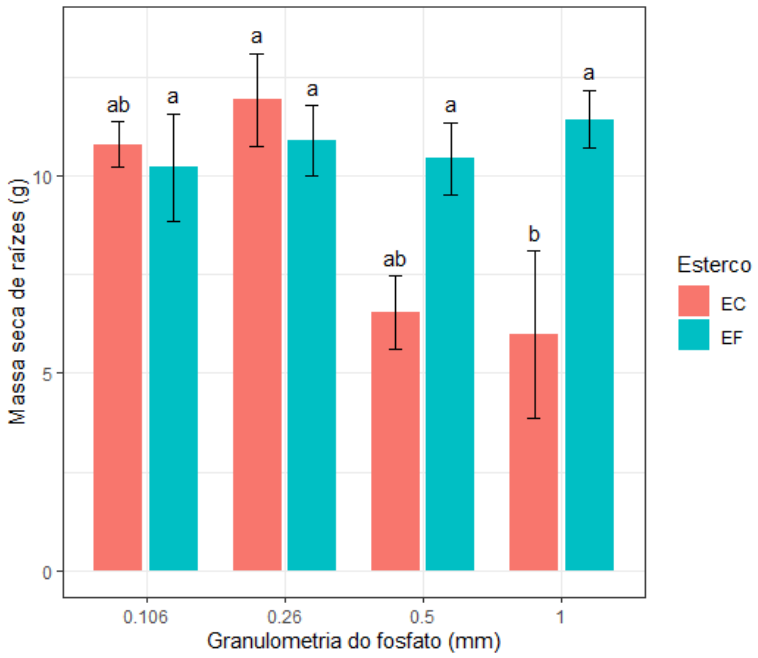
O maior acúmulo de biomassa aérea observado sob aplicação de EF pode ser explicado pela maior disponibilidade imediata de nutrientes, especialmente nitrogênio, além de frações orgânicas mais facilmente mineralizáveis, favorecendo o crescimento vegetativo e a expansão de tecidos no início do ciclo; em condições de curto prazo, resíduos orgânicos frescos tendem a promover maior crescimento e absorção de nutrientes do que suas formas compostadas (Martins et al., 2024).

Em contraste, o EC, por apresentar matéria orgânica mais estabilizada, tende a disponibilizar nutrientes de forma mais gradual e, como demostrado por Luccetta et al. (2023). O que pode reduzir a resposta imediata da parte aérea, embora contribua para a melhoria do ambiente do solo e aumento da disponibilidade de nutrientes em horizonte de médio prazo, com respostas biológicas frequentemente mais evidentes após períodos sucessivos de aplicação (Bischak; Ghezzehei; Ryals, 2024).

O comportamento intermediário da testemunha sugere que, nas condições do experimento, a resposta da MSPA foi mais sensível ao aporte nutricional de rápida liberação proporcionado pelo esterco fresco do que à simples presença de P oriundo do fosfato natural, reforçando que a parte aérea pode responder fortemente à disponibilidade de nutrientes gerais (principalmente N) em comparação a efeitos exclusivos do P (Ngo et al., 2023).

A Figura 12 evidencia o comportamento da MSR em função da granulometria do fosfato natural sob aplicação de EC e EF. Observa-se que, sob EC, a granulometria de 0,26 mm apresentou maiores valores de MSR, diferindo significativamente da granulometria de 1,0 mm, enquanto as demais granulometrias apresentaram valores intermediários.

Figura 14 – Massa seca das raízes (g vaso^{-1}) em função da granulometria e esterco



Fonte: Elaboração própria (2026).

*EC = esterco curtido; EF = esterco fresco) na massa seca das raízes (g)

Nota: Pontos representam as médias (n = 4) e as barras verticais representam o erro padrão da média.

A resposta diferenciada das raízes sob esterco curtido sugere que a granulometria do fosfato natural se torna mais determinante quando a fonte orgânica apresenta mineralização mais lenta e contínua (Martins et al., 2024).

Nessa condição, frações mais finas do fosfato (como 0,26 mm) tendem a apresentar maior reatividade e área específica, favorecendo a liberação de fósforo e estimulando o crescimento radicular, enquanto partículas mais grossas (1,0 mm) apresentam menor dissolução e, consequentemente, menor resposta em biomassa de raízes (Bouray et al., 2023).

Por outro lado, a ausência de diferenças entre granulometrias sob esterco fresco pode estar associada à maior disponibilização imediata de nutrientes provenientes dessa fonte, reduzindo a dependência do sistema radicular em relação ao fósforo liberado pelo fosfato natural e atenuando o efeito do tamanho de partícula (Martins et al., 2024).

Em termos agronômicos, os resultados indicam que o manejo combinado de fosfato natural com fontes orgânicas mais estabilizadas pode favorecer o aproveitamento do fósforo em consonância com Poblete-Grant et al. (2022), sobretudo quando se utiliza fosfato em granulometrias mais finas, estratégia relevante para sistemas de produção em ambientes de baixa disponibilidade de P e maior restrição econômica (Sagnon et al., 2024).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados demonstram que a granulometria do fosfato natural e o tipo de fonte orgânica alteram de forma consistente a disponibilidade de fósforo no solo e o crescimento inicial do feijão-vigna em condições controladas.

Observou-se que a associação com esterco bovino curtido elevou e sustentou maiores teores de P disponível ao longo do período de incubação, com melhor desempenho nas frações intermediárias (especialmente 0,26 mm), indicando que a combinação entre maior área específica do fosfato e a estabilização da matéria orgânica favorece processos de mobilização e transferência do P para formas mais extraíveis.

Por outro lado, a resposta da parte aérea evidenciou que o crescimento vegetal não depende apenas do P extraível no solo. O esterco bovino fresco promoveu maior acúmulo de massa seca da parte aérea, sugerindo contribuição relevante do fornecimento mais imediato de nutrientes lábeis e do estímulo biológico no curto prazo, aspectos que podem favorecer o estabelecimento inicial das plantas.

Para o sistema radicular, as diferenças foram mais sutis; contudo, a combinação entre esterco bovino curtido e a granulometria de 0,26 mm apresentou destaque positivo, enquanto a fração mais grossa associada ao esterco curtido mostrou desempenho inferior, reforçando a relevância do tamanho de partícula na eficiência agronômica do fosfato natural.

Embora nem todas as variáveis avaliadas tenham apresentado diferenças estatisticamente significativas, observou-se um expressivo incremento nos teores de fósforo disponível e no crescimento das plantas, o que reforça a relevância da proposta investigada e indica tendência consistente de resposta aos tratamentos avaliados. Esse comportamento evidencia que estratégias de manejo envolvendo a combinação de fosfato natural e fontes orgânicas podem resultar em ganhos agronômicos relevantes, especialmente quando considerados efeitos acumulativos e de médio prazo.

Do ponto de vista aplicado, os achados indicam que o fosfato natural da Paraíba, quando adequadamente manejado com fontes orgânicas, possui potencial para integrar estratégias de adubação com menor dependência de insumos externos, contribuindo para sistemas agrícolas mais sustentáveis e adaptados às condições do Semiárido. Nesse contexto, a pesquisa assume importância estratégica ao valorizar o

potencial mineral do território, promovendo o uso racional de recursos locais e fortalecendo alternativas tecnológicas acessíveis aos produtores.

Assim, recomenda-se a realização de ensaios em condições de campo, contemplando diferentes doses, épocas de aplicação e a inclusão de indicadores adicionais, como estado nutricional das plantas, produtividade e eficiência agronômica.

Adicionalmente, sugere-se a avaliação de combinações com outras fontes orgânicas e estratégias biológicas que possam intensificar os processos de solubilização do fosfato natural, ampliando sua eficiência e viabilidade agronômica.

E, para além das questões técnicas relativas à fertilidade dos solo e nutrição de plantas, listadas acima, como contribuição à construção de uma proposta de valorização das potencialidades do Cariri, que garanta a soberania das comunidades e a segurança alimentar, considera-se pertinente recomendar políticas públicas voltadas ao setor mineral, especialmente com foco na sustentabilidade, inovação, soberania econômica e qualidade ambiental.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. **Sumário Mineral Brasileiro 2025: ano-base 2024**. Brasília: ANM, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2025/sumario-2025.pdf. Acesso em: 11 jan. 2026.

AGUIAR JÚNIOR, A.L.D.; OLIVEIRA NETO, S.N.D.; SOARES, C.P.B.; MÜLLER, M.D.; OBOLARI, A.M.D.M.; CALSAVARA, L.H.F. Modelagem De Clones De Eucalipto Em Sistemas Agrossilvipastoris. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, p. E02547, 2022

ALEWELL, C.; RINGEVAL, B.; BALLABIO, C.; ROBINSON, D.A.; PANAGOS, P.; BORRELLI, P. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. **Nature communications**, v. 11, n. 1, p. 4546, 2020

AMARASINGHE, T.; MADHUSHA, C.; MUNAWEERA, I.; KOTTEGODA, N. Review on mechanisms of phosphate solubilization in rock phosphate fertilizer. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 53, n. 8, p. 944-960, 2022.

AMOSOVA, A.V.; GHUKASYAN, L.; YURKEVICH, O.Y.; BOLSHEVA, N.L.; SAMATADZE, T.E.; ZOSHCHUK, S.A.; MURAVENKO, O.V. Cytogenomics of Deschampsia P. Beauv. (Poaceae) Species Based on Sequence Analyses and FISH Mapping of CON/COM Satellite DNA Families. **Plants**, v. 10, p. 1105. 2021. https://doi.org/10.3390/plants10061105

ANDREATA, M.F.; AFONSO, L.; NIEKAWA, E.T.; SALOMÃO, J.M.; BASSO, K.R.; SILVA, M.C.D.; ALVES, L.C.; ALARCON, S.F.; PARRA, M.E.A.; GRZEGORCZYK, K.G., CHRYSSAFIDIS, A.L.; ANDRADE, G. Microbial fertilizers: A study on the current scenario of brazilian inoculants and future perspectives. **Plants**, v. 13, n. 16, p. 2246, 2024.

ASLAM, Z.; YAHYA, M.; HUSSAIN, H.S.; TABBASUM, S.; JALALUDDIN, S.; KHALIQ, S.; YASMIN, S. Development of bacteria-based bioorganic phosphate fertilizer enriched with rock phosphate for sustainable wheat production. **Frontiers in microbiology**, v. 15, p. 1361574, 2024.

ATAÍDE, C.B.; SILVA, T.M.; COSTA, M.E.L.C.; SILVA, P.C.V.; SILVA, J.M.; SILVA, V.D.; ALMEIDA, A.C.P.S.; MONTALDO, Y.C.; SANTOS, T.M.C. Phosphorus Solubilization by Actinobacteria from Brazilian Semiarid in Different Culture Media and Rock Dust. **Journal of Advances in Biology & Biotechnology**, v. 28, n. 6, p. 1312-1320, 2025.

BARROS, I.B. **Plantas de cobertura influenciando a dinâmica do fósforo em diferentes sistemas de manejo do solo**. 2024. Tese (Doutorado em Ciências) — Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2024.

BARROS, J. **Fertilidade do solo e Nutrição das plantas**. 2020.

BARROW, N.J. How understanding soil chemistry can lead to better phosphate fertilizer practice: A 68 year journey (so far). **Plant and Soil**, v. 476, n. 1, p. 117-131, 2022.

BAYU, T. Manejo Integrado da Fertilidade do Solo para Mitigação das Mudanças Climáticas e Sustentabilidade Agrícola. In: **Manual de Informação Geoespacial para Recursos Hídricos e Gestão de Bacias Hidrográficas, Volume I.** CRC Press, p. 129-154. 2022.

BENÍCIO, L.P. Overview of the use of phosphate fertilizers in brazil, a review. **Agri-environmental sciences**, v. 8, n. 2, p. 12-12, 2022.

BHATTA, A.; PRASAD, R.; CHAKRABORTY, D.; SHAW, J.N.; LAMBA, J.; BRANTLEY, E.; TORBERT, H.A. Mehlich 3 as a generic soil test extractant for environmental phosphorus risk assessment across Alabama soil regions. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 4, n. 3, p. e20187, 2021.

BHATTACHARYA, A. Dry matter production, partitioning, and seed yield under soil water deficit: a review. **Soil Water Deficit and Physiological Issues in Plants**, p. 585-702, 2021.

BISCHAK, E.; GHEZZEHEI, T.A.; RYALS, R. Nitrogen and phosphorus mineralization dynamics in human excreta-derived fertilizers. **Frontiers in Agronomy**, v. 6, 2024.

BOURAY, M.; MOIR, J.; EL MEJAHED, K.; CHOUKR-ALLAH, R.; EL GHAROUS, M**.** Does phosphogypsum addition affect phosphate rock dissolution in acid soils? **Frontiers in Environmental Science,** v. 11, 1130881, 2023. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1130881.

BRASIL, E.C. **Disponibilidade de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados.** 1994. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) — Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). ***Sumário mineral 2010*****.** Brasília: DNPM/DIPLAM, 2012. 128 p. (Sumário Mineral, v. 30). ISSN 0101-2053. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br. Acesso em: 15 dez. 2025.

BROWNLIE, W.J.; SUTTON, M.A.; HEAL, K.V.; REAY, D.S.; SPEARS, Bryan (eds.). **Our phosphorus future: towards global phosphorus sustainability**. Edinburgh: UK Centre for Ecology & Hydrology, 2022. INMS Report no. 2022/01. ISBN 978-1-906698-79-9.

BULLOCK, L.A.; YANG, A.; DARTON, R.C. **Kinetics-informed global assessment of mine tailings for CO2 removal**. Oxford: University of Oxford, 2021.

CASTRO, C.D. COSTA, M.L.D.; FIRMANO, R.F. GUARDANI, R.; SILVA, G.R. D. Magnesium thermophosphates from the Maicuru complex as sources of P and Mg in maize production. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 58, p. e02892, 2023.

CHANDER, S.; PAIKARAY, S.; BANSAL, S.; SHARMA, K.; DHIMAN, D.; DESHPANDE, R.D. Isótopos δ18O e δ2H, metais traço e íons principais em águas

subterrâneas ao redor da planície aluvial quaternária do vale do Indo, contaminada por urânio e fluoreto, sudoeste do Punjab, Índia: Implicações nos processos hidrogeoquímicos, uso para irrigação e fonte. **Geoquímica Aplicada**, v. 152, p. 105652, 2023.

CICEK, H.; BHULLAR, G.S.; MANDLOI, L.S.; ANDRES, C.; RIAR, A.S. Partial acidulation of rock phosphate for increased productivity in organic and smallholder farming. **Sustainability**, v. 12, n. 2, p. 607, 2020.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA; **Resolução No 357. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**, 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA*;* **Resolução No 430. Condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005**, 2011, p. 9.

COSTA, J.A.K.V.N.D.; RAMOS, J.F.K.; BENITES, V.D.M. Avaliação da eficiência agronômica de fosfatos naturais brasileiros em ensaios em vaso. In: **SEMINÁRIO PIBIC EMBRAPA SOLOS, 2021-2024, Rio de Janeiro.** *Seminários PIBIC Embrapa Solos 2021-2024: resumos*, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2025. p. 161-167. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1177314/1/Avaliacao-da-eficiencia-agronomica-de-fosfatos-2025.pdf. Acesso em: 11 jan. 2026.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, v.64, p.197-214, 1995.

CROWELL, J.K.; HEMBREE, D.I. Climate-induced changes in fluvial ichnofossil assemblages of the Pennsylvanian–Permian Appalachian Basin. **Journal of Sedimentary Environments**, v. 8, n. 2, p. 261-282, 2023.

DA MATA, D.A.; SILVA, T.B.D.; SILVA, J.F.; SILVA, G.D.F.D.; PAIVA, J.H.S.; MACENA, R.A.; NASCIMENTO, R.R.A.; ARAÚJO, J.V.D.S.; PEREIRA, F.M.; LIMA, A.D.D.C.; SILVA, F.G.D.; SOARES. J.V.; SILVA, B.O.T.D.S.; MARTINS, A.H.P.D.C.; DA MATA, D.A.; Fertilidade do solo no semiárido: características e desafios. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 9, p. e4278-e4278, 2024.

DLAMINI, B.N.; MASARIRAMBI, M.T.; GADAGA, T.H.A. comparative review of the beef carcass classification systems of selected African countries with the red meat classification system found in the European Union. **Asian Journal of Advances in Agricultural Research**, v. 12, n. 4, p. 28-35, 2020.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018. 356 p.

ERENOĞLU, E.B.; MORSY MOHAMMED MORSY, M.E.; DÜNDAR, Ş. The effect of organomineral fertilizer phosphorus on the availability of phosphorus in a calcareous soil. **Applied Ecology & Environmental Research**, v. 21, n. 5, 2023.

FORNASARI, C.H.; HUBNER, V.; PINTO, J.S.; JÚNIOR, L.A.Z. avaliação de extratores de fósforo para solos do paraguai. **Revista Thêma et Scientia**, v. 14, n. 2E, p. 138-160, 2024.

FREITAS, D.D.S. **Gênese e variabilidade espacial de solos no núcleo de desertificação dos Cariris Velhos na Paraíba**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) — Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/29837/1/DiogoDanilodeSousaFreitas_Dissert.pdf. Acesso em: 13 jan. 2026.

GALLO, A.S. **Variabilidade espacial das formas de fósforo em solo sob manejo conservacionista no sistema integrado de produção agroecológica**. 2020. 149 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo) — Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020. Disponível em: https://rima.ufrrj.br/jspui/handle/20.500.14407/9021. Acesso em: 09 jan. 2026.

GAO, H.; XU, R.; DU, Z.; YE, H.; TIAN, J.; HUANG, W.; XU, S.; XU, F.; HOU, M. ZHONG, F. Molecular regulation of volatile organic compounds accumulation in tomato leaf by different nitrogen treatments. **Research Square** (preprint), 2024.

GOMES, F.O.; FRANCO, L.J.D.; DAMASCENO-SILVA, K.J.; ROCHA, M.M.; CARVALHO, S.P.; SILVA, D.J.S.; FREITAS, T.K.T. Qualidade nutricional de grãos imaturos branqueados e congelados de cultivares de feijão-caupi. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 12, p. e8053-e8053, 2024.

GRIGATTI, M.; PETROLI, A.; CIAVATTA, C. Plant phosphorus efficiency from raw and composted agro- and bio-waste anaerobic digestates. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, p. 3586–3599, 2023.

GUELFI, D.; NUNES, A.P.P.; SARKIS, L.F.; OLIVEIRA, D.P. Innovative phosphate fertilizer technologies to improve phosphorus use efficiency in agriculture. **Sustainability**, v. 14, n. 21, p. 14266, 2022.

GUERA, K.C.S.; DA FONSECA, A.F. Frações de fósforo e suas relações com atributos químicos do solo em um sistema integrado de produção agrícola e pecuária sob fertilização anual com fosfatos. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 6, p. 893525, 2022.

HANYABUI, E.; APORI, S.O.; FRIMPONG, K.A.; ATIAH, K.; ABINDAW, T., ALI, M.; ASIAMAH, J.Y.; BUALEBEKA, J. **Phosphorus sorption in tropical soils**. 2020.

HOWE, J.A.; MCDONALD, M.D.; BURKE, J.; ROBERTSON, I.; COKER, H.; GENTRY, T.J.; LEWIS, K.L. Influence of fertilizer and manure inputs on soil health: A review. **Soil Security**, v. 16, p. 100155, 2024.

HU, F.; BI, Y.; ZHENG, X.; LU, M.; DIAO, Q.; TU, Y. Effect of baicalin supplementation on the growth, health, antioxidant and anti-inflammatory capacity, and immune function

of preweaned calves. **Animal Feed Science and Technology**, v. 298, p. 115598, 2023.

HU, Z.; YAN, L.; YUAN, J.; ETIENNE, X. Deconstructing fertilizer price spikes: Evidence from Chinese urea fertilizer market. **Food Policy**, v. 133, art. 102829, 2025.

HURISSO, T.T.; DAVIS, J.G.; STONAKER, F.H. GOLDHAMER, D.A.; BRUMMER, J.E. Comparison of dairy manure versus compost effects on short-term nitrogen mineralization and microbial biomass in organic annual forage production system. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 7, n. 3, p. e20555, 2024.

JIN, X.; HU, C.; KHAN, A.; ZHANG, S.; YANG, X.; JIA, L.; SUN, R. Comparison of fractionation methods for soil phosphorus with soils subjected to various long-term fertilization regimes on a calcareous soil. **PeerJ Inorganic Chemistry**, v. 3, p. e3, 2021.

KAPRAVELOU, G.; MARTÍNEZ, R.; MARTINO, J.; PORRES, J.M.; FERNÁNDEZ-FÍGARES, I. Natural fermentation of cowpea (Vigna unguiculata) flour improves the nutritive utilization of indispensable amino acids and phosphorus by growing rats. **Nutrients**, v. 12, n. 8, p. 2186, 2020.

KHAN, F.; SIDDIQUE, A.B; SHABALA, S.; ZHOU, M.; ZHAO, C. Phosphorus Plays Key Roles in Regulating Plants' Physiological Responses to Abiotic Stresses. **Plants**, v. 12, n. 15, 2861, 2023. https://doi.org/10.3390/plants12152861

KIM, D.K.; OCHAR, K.; IWAR, K.; HA, B.K.; KIM, S.H. Cowpea *(Vigna unguiculata* L.) production, genetic resources and strategic breeding priorities for sustainable food security: A review. **Frontiers in plant science**, v. 16, p. 1562142, 2025.

KUHN, C.E.S.; SOUSA, J.V.L.; MENEZES, B.C.; GOMES, A.C.F. Spatial Analysis of the Feasibility of Using Rock Powder as Fertilizer in Agriculture in Mato Grosso in Brazil. **Sustainability**, v. 17, n. 17, art. 7668, 2025.

KUMAR, D.; KUMAR, D. **Phosphate Rock: An Industry in Transition**. Elsevier, 2023.

KUMAR, V.; AMEEN, F.; VERMA, P. Unraveling the shift in bacterial communities profile grown in sediments co-contaminated with chlorolignin waste of pulp-paper mill by metagenomics approach. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1350164, 2024.

LIU, H.; FIORANI, F.; JÄCK, O.; COLOMBI, T.; NAGEL, K. A.; WEIH, M. Shoot and Root Traits Underlying Genotypic Variation in Early Vigor and Nutrient Accumulation in Spring Wheat Grown in High-Latitude Light Conditions. **Plants**, v. 10, n. 1, art. 174, 2021.

LOIOLA, A.T. **Fenologia, produção e qualidade fisiológica de sementes crioulas de feijão-caupi produzidas com água salina.** 2020. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água) — Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufersa.edu.br/items/24affb7f-90c2-407c-9c38-76a50afa0c64. Acesso em: 10 jan. 2026.

LOPES, V.A.; WEI, M.C.F.; CARDOSO, T.M.; MARTINS, E.S.; CASAGRANDE, J.C.; MARIANO, E.D. Phosphorus acquisition from phosphate rock by soil cover crops, maize, and a buckwheat–maize cropping system. **Scientia Agricola,** v. 79, n. 4, e20200319, 2022.

LUCCETTA, M.; ROMANO, A.; ALZATE ZULUAGA, M.Y.; FORNASIER, F.; MONTERISI, S.; PII, Y.; MARCUZZO, P.; LOVAT, L.; GAIOTTI, F. Compost application boosts soil restoration in highly disturbed hillslope vineyard. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023.

LUSTOSA-SILVA, J.D.; DE OLIVEIRA, E.G.; SOARES, L.A.D.C.; FERREIRA-GOMES, R.L.; DA COSTA, A.F.; DE BARROS, R.F.M.; ALMEIDA, R.D.C.; SILVA, B.D.S.; COSTA, M.F., LOPES, Â.C.D.A.M. Traditional varieties of lima beans (Phaseolus Lunatus L.) in northeastern Brazilian farms: conservation and sustainability. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 70, n. 7, p. 2021-2032, 2023.

MA, T.; ZHAN, Y.; CHEN, W.; XU, S.; WANG, Z.; TAO, Y.; SHI, X.; SUN, B.; DING, G.; LI, J.; WEI, Y. Impact of aeration rate on phosphorus conversion and bacterial community dynamics in phosphorus-enriched composting. **Bioresource Technology**, v. 364, p. 128016, 2022

MABAGALA, F.S.; MNG'ONG'O, M.E. On the tropical soils; The influence of organic matter (OM) on phosphate bioavailability. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, n. 5, p. 3635-3641, 2022.

MACEDO, R.S.; BEIRIGO, R.M.; MEDEIROS, B.M.; FELIX, V.J.L.; SOUZA, R.D.S.; BAKKER, A.P. Processos pedogenéticos e susceptibilidade dos solos à degradação no semiárido brasileiro. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 22, n. 81, p. 176-195, 2021.

MACHADO, J.P.; CHAMBÓ, E.D.; MATIAS, M.I.D.A.S.; DE FREITAS, N.W.N. DE FREITAS, R.M.O. Caracterização Morfométrica de Frutos, Sementes, Plântulas e Emergência de Guaranazeiro (*Paullinia Cupana* var. Sorbilis (Mart.) Ducke), em Diferentes Tipos de Substratos. **Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 14, n. 4, p. 208-221, 2025.

MAGNONE, D.; NIASAR, V.J.; BOUWMAN, A.F.; BEUSEN, A.H.; VAN DER ZEE, S. E.; SATTARI, S.Z. The impact of phosphorus on projected Sub-Saharan Africa food security futures. **Nature communications**, v. 13, n. 1, p. 6471, 2022.

MARTINS, G.L.; PELLEGRINETTI, T.A.; FREITAS, A.S.; ROCHA, G.S.; MONTEIRO, G.G.T.N.; MENDES, L.W.; TSAI, S.M.; OLIVEIRA, F.C.; REGITANO, J.B. Differential effects of fresh and composted organic wastes on soil bacterial community and maize growth. **Applied Soil Ecology**, v. 204, art. 105715, 2024.

MEDEIROS, R.M.; FRANCISCO, P.R.M.; BORGES, C.K.; FILHO, M.F.G. Caracterização e classificação climática da cidade de Campina Grande/PB. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2014, Teresina. **Anais...**Teresina, 2014.

MEENA, D.; MEENA, M.D.; SENGAR, S.S.; MISHRA, V.N.; KUMAR, A.; LAKHERA, M.L.; DOTANIYA, M.L.; MEENA, M.K.; KUMAR, S.; MEENA, B.L.; JAT, R.S.; MEENA, L.K.; PRAJAPAT, M.; MEENA, H.S.; GHOSH, A.; MEENA, V.; RAI, P.K.; SHEORAN, P.; MEENA, V.S. Changes in soil phosphorus dynamics amended with rock phosphate-enriched compost and chemical fertilizers. **PLoS One**, v. 20, n. 6, p. e0324716, 2025.

MENEGHELLI, C.M.; FONTES, P.C.R.; MILAGRES, C.D.C.; ABREU, J.A.A.D.; ALMEIDA, K.M. Nitrogen efficiency indices of potato in response to nitrogen doses estimated by algorithms and applied as top-dressing. **Journal of Plant Nutrition**, v. 46, n. 10, p. 2363-2379, 2023.

MENG, T.; SHI, J.; ZHANG, X.; GE, G.; CHENG, Y.; RONG, M.; CHEN, L.; ZHAO, X.; WANG, X.; LU, Z**.** Slow-Release Nitrogen Fertilizer Promotes the Bacterial Diversity to Drive Soil Multifunctionality. **Agronomy**, v. 14, n. 11, p. 2712, 2024.

MNDZEBELE, B., NCUBE, B., FESSEHAZION, M., MABHAUDHI, T., & MODI, A. T. Assessment of the effects of NPK fertilizer on edible yield and agro-biological parameters in a cowpea–amaranth intercrop. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, p. 1210984, 2023.

MOHARANA, P.C.; MEENA, M.D.; BISWAS, D.R. Role of phosphate-solubilizing microbes in the enhancement of fertilizer value of rock phosphate through composting technology. In: **Role of Rhizospheric Microbes in Soil: Volume 2: Nutrient Management and Crop Improvement**. Singapore: Springer Singapore, 2018. p. 167-202.

MOREIRA, A. **Proporções de fertilizante mineral e organomineral no cultivo de cebola.** 2022. Dissertação (Mestrado em Olericultura) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Morrinhos, 2022. Disponível em: https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/3450. Acesso em: 15 out. 2025.

MSIMBIRA, L.A.; SMITH, D.L. The roles of plant growth promoting microbes in enhancing plant tolerance to acidity and alkalinity stresses. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 106, 2020.

MUKUMBUTA, I.; CHABALA, L.M.; SICHINGA, S.; MITI, C.; LARK, R.M. A comparison between three legacy soil maps of Zambia at national scale: The spatial patterns of legend units and their relation to soil properties. **Geoderma**, v. 402, p. 115193, 2021.

MURGA-ORRILLO, H.; CHUQUIMEZ GONZALES, J.K.; PASHANASI AMASIFUÉN, B.; ARÉVALO LÓPEZ, L.A. Vigna unguiculata: a productive option in the face of climate change?. **Frontiers in Agronomy**, v. 5, p. 1284173, 2023.

NGO, H.T.T.; CAVAGNARO, T.R.; JEWELL, N.; BRIEN, C.J.; BERGER, B.; WATTS-WILLIAMS, S.J. High-throughput shoot phenotyping reveals temporal growth responses to nitrogen and inorganic and organic phosphorus sources in tomato**.** **Plants**, v. 15, n. 2, 2023.

NYAMAIZI, S. **Improving agricultural phosphorus management to reduce environmental loss in high phosphorus soils in the Fraser Valley, British**

Columbia. 2024. Tese (Doctor of Philosophy - PhD) — University of British Columbia, Vancouver, 2024.

OLORUNWA, O.J.; SHI, A.; BARICKMAN, T.C. Varying drought stress induces morpho-physiological changes in cowpea (Vigna unguiculata (L.) genotypes inoculated with Bradyrhizobium japonicum. **Plant Stress**, v. 2, p. 100033, 2021.

ORJI, O.A. Effect of Activated Biochar on the Fertility an Acid Soil in Southern Nigeria. **Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 7, n. 4, p. 101-108, 2021.

PAEZ, L.A.; GARCIA, J.F.; PARRA, J.D.; JACOME, L.L. Effect of phosphoric rock on the chemical, microbiological and enzymatic quality of poultry, equine and cattle manure compost mix. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 11, n. 3, 2022.

PAIVA, M.R.F.C.; OLIVEIRA, F.H.T.D.; ALVES, W.P.L.B.D.C.; FARIAS, M.D.L.; CUNHA, M.L.D.; TAVARES, H.A.M.; GÓIS, H.M.M.N.; SANTOS, M.B.S.B.; ARRUDA, J.A.; GRANGEIRO, L.C.; BEZERRA, M.G.S.; SÁ, F.V.D.S. Phosphorus in alkaline soils of the semiarid region, Brazil: inorganic fractions, capacity factor, and availability. **International Journal of Phytoremediation**, v. 25, n. 8, p. 965–980, 2023.

PALMA, H.H.; GRANADOS, A.I.N.; NECKEL, A.; OSORIO, D.P.; MORENO RÍOS, A.L.; RAMOS, C.G. Valorization of mineral by-products through soil remineralization enhances sustainable agriculture and circular economy outcomes. **Discover Sustainability**, v. 6, art. 1134, 2025.

PAN, L.; CAI, B. Phosphate-Solubilizing Bacteria: Advances in Their Physiology, Molecular Mechanisms and Microbial Community Effects. **Microorganisms**, v. 11, n. 12, art. 2904, 2023.

PANG, F.; LI, Q.; SOLANKI, M.K.; WANG, Z.; XING, Y.X.; DONG, D.F. Soil phosphorus transformation and plant uptake driven by phosphate-solubilizing microorganisms. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1383-1913, 2024.

PAULI DE BASTIANI, F.; PÉRA, T.G.; CAIXETA-FILHO, J.V. Fertilizer Logistics in Brazil: Application of a Mixed-Integer Programming Mathematical Model for Optimal Mixer Locations. **Logistics,** v. 8, n. 1, 4, 2024.

PEDERSEN, I.F.; MÜLLER-STÖVER, D.S.; LEMMING, C.; GUNNARSEN, K.C. Particle size determines the short-term phosphorus availability in biochar produced from digestate solids. **Waste Management**, v. 191, p. 172–181, 2025.

PEREIRA, L.S.; DE OLIVEIRA, G.S.; COSTA, E.M.; DE SOUSA, G.D.; SILVA, J.N., DA SILVA, H.F.; JAKELAITIS, A. Manejo de plantas daninhas e rendimento de feijão-caupi utilizando plantas de cobertura do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 23044-23059, 2020.

PHILLIPS, R.D.; SAALIA, F.K.; AFFRIFAH, N.S. Cowpea composition, processing, and products. **Dry beans and pulses: production, processing, and nutrition**, p. 331-358, 2022.

POBLETE-GRANT, P.; CARTES, P.; PONTIGO, S.; BIRON, P.; MORA, M.L.L.; RUMPEL, C. Phosphorus fertiliser source determines the allocation of root-derived organic carbon to soil organic matter fractions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 167, 108614, 2022.

PULLEY, S.; COLLINS, A.L. Sediment loss in response to scheduled pasture ploughing and reseeding: The importance of soil moisture content in controlling risk. **Soil and Tillage Research**, v. 204, p. 104746, 2020.

PUREWAL, S.S.; KAUR, P.; SALAR, R.K. **Chickpea and cowpea: nutritional profile, processing, health prospects and commercial uses**. CRC press, 2023.

RAMOS, J.F.K. **Caracterização química, mineralógica e eficiência agronômica de diferentes fosfatos**. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2023. Disponível em: https://rima.ufrrj.br/jspui/bitstream/20.500.14407/18645/1/2023%20-%20JÉSSICA%20FRANCIELE%20KAMINSKI%20RAMOS.pdf. Acesso em: 10 jan. 2026

RAMOS, J.F.K.; ALVES, B.J.R.; ALONSO, J.M.; TEIXEIRA, P.C.; BENITES, V.M. Characterization and agronomic efficiency of natural and recovered phosphates in tropical soil with corrected acidity. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 49 (n. spe1), e0240099, 2025.

RAMOS, J.F.K.; ALVES, B.J.R.; ALONSO, J.M.; TEIXEIRA, P.C.; BENITES, V.M. Characterization and agronomic efficiency of natural and recovered phosphates in tropical soil with corrected acidity. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 49, nspe1, e0240099, 2025.

RAMZAN, M.; SARWAR, N.; ALI, L.; SABA, R.; ALAHMADI, T.A.; DATTA, R. Nitrogen enriched chemically produced carbon supplementary impacts on maize growth under saline soil conditions. **Journal of King Saud University – Science**, v. 35, n. 1, art. 102292, 2023.

RANIRO, H.R.; TELES, A.P.B.; ADAM, C.; PAVINATO, P.S. Phosphorus solubility and dynamics in a tropical soil under sources derived from wastewater and sewage sludge. **Journal of Environmental Management**, v. 302, 113984, 2022.

RATHNAYAKA, R.M.U.; SUTHARSAN, S.; MAYAKADUWA, M.A.P.; WEERASINGHE, P.O.P. Growth and Yield Performance of Lactuca sativa L. Grown in Hydroponics using Fish Effluents and Inorganic Fertilizer. **Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry**, v. 10, n. 2, p. 20-33, 2024.

RAVI, V.; SUJA, G.; SARAVANAN, R.; MORE, S.J. Advances in cassava-based multiple-cropping systems. **Horticultural Reviews**, v. 48, p. 153-232, 2021.

RAWAT, P.; DAS, S.; SHANKHDHAR, D.; SHANKHDHAR, S.C. Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 1, p. 49-68, 2021.

REIMER, M.; KOPP, C.; HARTMANN, T.; ZIMMERMANN, H.; RUSER, R.; SCHULZ, R.; MULLER, T.; MOLLER, K. Assessing long term effects of compost fertilization on soil fertility and nitrogen mineralization rate. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 186, n. 2, p. 217-233, 2023.

RIBEIRO, D.G.; BEZERRA, A.C.M.; SANTOS, I.R.; GRYNBERG, P.; FONTES, W.; CASTRO, M.S.; SOUSA, M.V.; LISEI-DE-SÁ, M.E.; GROSSI-DE-SÁ, M.F.; FRANCO, O.L.; MEHTA, A. Insights proteômicos da resposta do feijão-caupi a estresses bióticos e abióticos combinados. **Plants**, v. 12, n. 9, p. 1900, 2023.

RIBEIRO, H.M.S.; NEVES JR, A.F.; OLIVEIRA, D.M.; FERRERIA, J.A.N.; SILVA, R.B.; ROSÁRIO, B.C.; FALCÃO, N.P.S. Biochar After Thirteen Years of Agricultural Crops on the Physical Attributes and Organic Carbon of a Yellow Oxisol in Central Amazon. **Journal of Agricultural Science**, v. 14, n. 5, 2022.

ROLANDO, C.A.; FIELDS, F.; SCOTT, M.B.; SAPSFORD, S.; PAUL, T.S. Impacts of herbicides used for control of invasive Pinus contorta on the potential for reinvasion and germination of restoration species. **Invasive Plant Science and Management**, v. 17, n. 4, 2024.

SABAH, N.U.; TAHIR, M.A.; SARWAR, G.; LUQMAN, M.; AZIZ, A.; MANZOOR, M.Z.; AFTAB, M. Biossolubilização de rocha fosfática utilizando emendas orgânicas: uma abordagem inovadora para a produção sustentável de milho em Aridisols — Uma revisão. **Sarhad J. Agric** , v. 38, n. 2, p. 617-625, 2022.

SAGNON A.; IWASAKI, S.; TIBIRI, E.B.; ZONGO, N.A.; COMPAORE, E.; BONKOUNGOU, I.J.O.; NAKAMURA, S.; TRAORÉ, M.; BARRO, N.; TIENDREBEOGO, F.; SARR, P.S. Amendment with Burkina Faso phosphate rock-enriched composts alters soil chemical properties and microbial structure, and enhances sorghum agronomic performance. **Scientific Reports**, v. 12, art. 13945, 2022.

SAGNON, A.; TRAORE, M.; TIBIRI, E.B.; ZONGO, S.; BONKOUNGOU, I.J.O.; NAKAMURA, S.; BARRO, N.; TIENDREBEOGO, F.; SARR, P.S. Enhancing the use of phosphate rock through microbially-mediated compost transformation to improve agronomic and economic profitability in Sub-Saharan Africa**. Frontiers in Sustainable Food Systems,** v. 8, 2024.

SAIED, H.S.; ABOELENIN, S.M.; KESBA, H.; EL-SHERBIENY, A.E.; HELMY, A.M.; DAHDOUH, S.M.; SOLIMAN, M.M. Chemical evaluation of partially acidulated phosphate rocks and their impact on dry matter yield and phosphorus uptake of maize. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, n. 5, p. 3511-3518, 2022.

SANTOS, E.A.; SOARES, F.A.L.; TEIXEIRA, M.B.; SILVA, E.C.; MORAIS, W.A., PIRES, W.M.; VITORINO, L.C.; BESSA, L.A.; SOUSA, A.V.C.; VALE, L.S.R. Agronomic performance of the first ratoon of sugarcane under phosphorus supply from a mineral and an organic source. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 42340, 2025.

SANTOS, Y.; FRETIAS, L.G.B.G. avaliação dos regimes de aproveitamento de rochas naturais no contexto regulatório brasileiro a partir dos dados abertos disponibilizados pela agência nacional de mineração: o caso do espírito santo. **Revista Ifes Ciência**,

v. 11, n. 1, p. 21, 2025. Disponível em: https://ojs.ifes.edu.br/index.php/ric/article/view/3204. Acesso em: 10 jan. 2026

SASABUCHI, I.T.; KRIEGER, K.S.; NUNES, R. S.; FERREIRA, A.C.; XAVIER, G.T.; URZEDO, A.L.; FADINI, P.S. Sustentabilidade no uso de fósforo: uma revisão bibliográfica com foco na situação atual do estado de São Paulo, Brasil. **Química Nova**, v. 46, n. 02, p. 185-198, 2023.

SCHAMBECK, C.M.; DA COSTA, R.H.R.; DERLON, N. Phosphate removal from municipal wastewater by alginate-like exopolymers hydrogels recovered from aerobic granular sludge. **Bioresource Technology**, v. 333, p. 125167, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085242100506X?via%3Dihub. Acesso em: 03 de jun. de 2025.

SHAW, C., RINGHAM, M.C.; CARTER, B.R.; TYKA, M.D.; EISAMAN, M.D. Using magnesium hydroxide for ocean alkalinity enhancement: elucidating the role of formation conditions on material properties and dissolution kinetics. **Frontiers in Climate**, v. 7, p. 1616362, 2025.

SOUZA, R.F.D.; FAQUIN, V.; TORRES, P.R.F.; BALIZA, D.P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 975-983, 2006.

SUN, Y.; ZHANG, J.; LI, W.; XU, Z.; WANG, S.; ZHAO, M.; SHEN, J.; CHENG, L. Regulation of maize root growth by local phosphorus availability, sucrose metabolism, and partitioning. **Annals of Botany**, v. 136, n. 5–6, p. 961–972, 2024.

SWAIN, S.K.; KALIDAS-SINGH, S.; PUYAM, A.; THAKURIA, D.; MAIMOM, S,; ZHIIPAO, R.R.; DEBNATH, A.; BHUYAN, S.; HOMESHWARI-DEVI, M.; HUIDROM, S.; TSOMU, T.; UMBREY, Y.; BAGANG, P.; RAVAT, V.K.; LAP, B.; TANGJANG, A.; DEVEGOWDA, S.R. A comparative study of localized phosphorus application and broadcasting method on biomass production and their use efficiency on *Chilli* (*Capsicum annuum*) under alkaline soil. **Frontiers in Plant Science,** v. 15, p. 1304963, 01 mar. 2024.

TARAFDER, H.K.; ROY, K. Optimizing Nutrient Management Practices For Cauliflower In Hill Zone Of West Bengal: An Integrated Approach. **Journal Of Experimental Agriculture International**, v. 45, n. 9, p. 142-149, 2023.

TAVAKOLI, V.; MEHRABI, H. Editorial for the Special Issue “Mineralogical, Geological and Geochemical Heterogeneities of Carbonate Reservoirs”. **Minerals**, v. 14, n. 3, p. 289, 2024.

TOLEIKIENE, M.; ARLAUSKIENE, A.; SUPRONIENE, S.; SARUNAITE, L.; CAPAITE, G.; KADZIULIENE, Z. Processing of Legume Green Manures Slowdowns C Release, Reduces N Losses and Increases N Synchronisation Index for Two Years. **Sustainability**, v. 16, n. 5, p. 2152, 2024.

TONUCCI, R.G.; VOGADO, R.F.; SILVA, R.D.; POMPEU, R.C.F.F.; ODA-SOUZA, M.; SOUZA, H.A.D. Agroforestry system improves soil carbon and nitrogen stocks in depth

after land-use changes in the Brazilian semi-arid region. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, p. e0220124, 2023.

TRAORÉ, B.; TRAORÉ, M.; COULIBALY, P.J.D.A.; SAWADOGO, J.; SARR, P.S.; NACRO, H.B. Effect of calcined/non-calcined phosphate rock application on crop yield and phosphorus availability to replace commercial fertilizer on a lixisol in Burkina Faso. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 71, n. 1, p. 1-16, 2025.

VANDEGINSTE, V.; LIM, C.; JI, Y. Exploratory review on environmental aspects of enhanced weathering as a carbon dioxide removal method. **Minerals**, Basel, v. 14, n. 1, art. 75, 2024.

VIEIRA, F. F. **Caracterização e tratamento térmico das fluorapatitas gemológicas de Sumé-Paraíba**. Dissertação (Programa de PósGraduação em Exploração Petrolífera e Mineral). Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

VOS, R.; GLAUBER, J.; HEBEBRAND, C.; RICE, B. **Global shocks to fertilizer markets: Impacts on prices, demand and farm profitability**. Food Policy, v. 133, art. 102790, 2025.

WALKER, I.; BELL, R.; RIPPY, K. Mineralization of alkaline waste for CCUS. **J. Materials Sustainability**, v. 2, n. 1, p. 28, 2024.

WALKER, T.W.; SYERS, J.K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, v.15, p.01-19, 1976.

WANG, Z.; HOU, L.; LIU, Z.; CAO, N.; WANG, X. Using a modified Langmuir equation to estimate the influence of organic materials on phosphorus adsorption in a Mollisol from Northeast, China. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 886-900, 2022.

WEI, J.; ZHANG, X.; LI, G.; FU, K.; YAN, M.; LI, C.; LI, C. Phosphorus alters the metabolism of sugars and amino acids in elite wheat grains. **Plants**, v. 14, n. 20, p. 3152, 2025.

WRÓBEL, B.; NOWAK, J.; FABISZEWSKA, A.; PASZKIEWICZ-JASIŃSKA, A.; PRZYSTUPA, W. Dry matter losses in silages resulting from epiphytic microbiota activity—A comprehensive study. **Agronomy**, v. 13, n. 2, p. 450, 2023.

YANG, S.Y.; LIN, W.Y.; HSIAO, Y.M.; CHIOU, T.J. Milestones in understanding transport, sensing, and signaling of the plant nutrient phosphorus. **The Plant Cell**, Oxford, v. 36, n. 5, p. 1504–1525, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1093/plcell/koad326. Acesso em: 20 out. 2025.

ZHANG, Z.; ABDULLAH, M.J.; XU, G.; MATSUBAE, K.; ZENG, X. Countries' vulnerability to food supply disruptions caused by the Russia–Ukraine war from a trade dependency perspective. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 16591, 2023.

ZHUANG, S.; WANG, J. Magnetic COFs as catalyst for Fenton-like degradation of sulfamethazine. **Chemosphere**, v. 264, p. 128561, 2021.