

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS – *CAMPUS* BAMBUÍ

BACHARELADO EM AGRONOMIA

Gabriel Ribeiro Cordeiro de Sousa

**O PAPEL DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NA ASSOCIAÇÃO
MICORRÍZICA NA CULTURA DO FEIJÃO**

BAMBUÍ

2026

GABRIEL RIBEIRO CORDEIRO DE SOUSA

O PAPEL DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NA ASSOCIAÇÃO MICORRÍZICA NA CULTURA DO FEIJÃO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso bacharelado em
Engenharia de Agronomia do Instituto
Federal de Minas Gerais – *Campus*
BambuÍ para obtenção do grau de bacharel
em Agronomia.

Orientador: Cássio Roberto Silva Noronha

BambuÍ

2026

Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - *Campus Bambuí*

S125p Sousa, Gabriel Ribeiro Cordeiro de.

O papel da adubação fosfatada micorrízica na cultura do feijão / Gabriel Ribeiro Cordeiro de Sousa. – 2026.

52 f. : il. ; color.

Orientador: Cássio Roberto Silva Noronha.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia)
– Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Bambuí*, 2026.

1. Phaseolus vulgaris. 2. Fungos micorrízicos arbusculares.
3. Adubação fosfatada. 4. Fósforo. 5. Sustentabilidade agrícola.
I. Noronha, Cássio Roberto Silva. II. Instituto Federal de Minas
Gerais – *Campus Bambuí*. III. Título.

CDD 631.8

Catálogo: João Batista Rodrigues - CRB-6/2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Bambuí
Diretoria de Ensino

Departamento de Ciências Agrárias
Faz. Varginha - Rodovia Bambuí/Medeiros - Km 05 - Caixa Postal 05 - CEP 38900-000 - Bambuí - MG
37 3431 4900 - www.ifmg.edu.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

GABRIEL RIBEIRO CORDEIRO DE SOUSA

O PAPEL DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NA ASSOCIAÇÃO MICORRIZICA NA CULTURA DO FEIJÃO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de
GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA, ofertado
pelo Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia
de Minas Gerais - *Campus Ouro*
Preto, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de
AGRÔNOMO.

Aprovado(a) em 29 de junho de 2026, pela Banca Examinadora:

Prof. Dr Cássio Roberto Silva Noronha - IFMG *Campus Bambuí* - Orientador

Prof. Dr(a).Dalila de Fátima Ferreira - IFMG *Campus Bambuí*

Prof. Ms. Emerson Rodrigues Pimentel - IFMG *Campus Bambuí*

BambuÍ, 29 de junho de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Cassio Roberto Silva Noronha, Professor**, em 05/07/2026, às 14:43, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Emerson Rodrigues Pimentel, Professor**, em 06/07/2026, às 15:04, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Dalila de Fátima Ferreira, Professora Visitante**, em 08/07/2026, às 13:51, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2305921** e o código CRC **F6CD99F6**.

23209.001589/2025-99

2305921v1

Dedico esse trabalho a Deus em primeiro lugar. Também aos meus pais, minha namorada, familiares, amigos, professores e todos aqueles que de alguma forma contribuíram ao longo dessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança para superar os desafios e tornar esta conquista possível.

À minha família, em especial à minha mãe, ao meu pai, à minha irmã, aos meus avós e aos meus tios, pelo amor, apoio, incentivo e por sempre acreditarem em mim. Cada um de vocês teve um papel fundamental nesta caminhada.

À minha namorada, pelo carinho, paciência, compreensão e incentivo durante toda essa jornada. Seu apoio foi essencial para que eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos, pela amizade, companheirismo e pelos momentos compartilhados ao longo da graduação, que tornaram essa trajetória mais leve e especial.

Ao meu orientador, pela confiança, orientação e pelos conhecimentos transmitidos durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Shantau Stoffel, da empresa Nova Tero, pela disponibilidade em esclarecer minhas dúvidas sobre os fungos micorrízicos e por disponibilizar uma amostra utilizada na realização deste experimento. Sua colaboração foi de grande importância para o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os professores do curso de Agronomia do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Bambuí, pelos ensinamentos e pela contribuição para minha formação acadêmica e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e fizeram parte dessa importante etapa da minha vida. Meu muito obrigado.

“Tomou, pois, o Senhor Deus o homem e o colocou no jardim do Éden para o **cultivar** e o guardar.”

Gênesis 2:15

RESUMO

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) constitui uma das culturas agrícolas de maior relevância socioeconômica e alimentar do Brasil, desempenhando papel estratégico na segurança alimentar e na sustentabilidade dos sistemas produtivos. Entretanto, a elevada capacidade de fixação do fósforo nos solos tropicais brasileiros limita a disponibilidade desse nutriente às plantas, comprometendo o desenvolvimento e a produtividade da cultura de feijão. Nesse contexto, a associação simbiótica entre fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) e o sistema radicular do feijoeiro emerge como um importante mecanismo biológico capaz de ampliar a eficiência da absorção de nutrientes, como o fosfato, e reduzir a dependência de insumos externos. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo consolidar o conhecimento científico existente acerca dos benefícios das interações simbióticas entre fungos micorrízicos arbusculares e a cultura do feijão, analisando o papel da adubação fosfatada nessa associação para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis. Metodologicamente, a pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de abordagem qualitativa e caráter descritivo-exploratório, realizada a partir da análise de artigos científicos, livros, teses, dissertações e documentos técnicos obtidos em bases de dados nacionais e internacionais. Os resultados evidenciaram que os FMAs exercem papel fundamental na absorção de fósforo, favorecendo o crescimento vegetal, a nutrição mineral e a produtividade do feijoeiro. Verificou-se ainda que a disponibilidade de fósforo atua como importante reguladora da colonização micorrízica, influenciando diretamente a intensidade da simbiose. Além disso, a literatura analisada demonstrou contribuições relevantes da micorrização para a melhoria da estrutura do solo, eficiência no uso da água, tolerância a estresses ambientais e promoção da sustentabilidade agrícola. Conclui-se que a associação entre manejo racional da adubação fosfatada e aproveitamento dos processos biológicos promovidos pelos fungos micorrízicos constitui uma estratégia promissora para o aumento da eficiência produtiva e para a construção de sistemas agrícolas mais sustentáveis.

Palavras-chave: Phaseolus vulgaris. Fungos micorrízicos arbusculares. Adubação fosfatada. Fósforo. Sustentabilidade agrícola.

ABSTRACT

The common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is one of Brazil's most important crops in terms of socioeconomic and nutritional value, playing a strategic role in food security and the sustainability of production systems. However, the high phosphorus-fixing capacity of Brazilian tropical soils limits the nutrient's availability to plants, thereby compromising crop development and productivity. In this context, the symbiotic association between arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and the bean plant's root system emerges as a key biological mechanism capable of enhancing nutrient uptake efficiency—particularly regarding phosphate—and reducing reliance on external inputs. Consequently, this study aimed to consolidate existing scientific knowledge regarding the benefits of symbiotic interactions between AMF and common bean crops, analyzing the role of phosphate fertilization within this association to foster more sustainable agricultural practices. Methodologically, this research is a qualitative, descriptive-exploratory literature review based on the analysis of scientific articles, books, theses, dissertations, and technical documents sourced from national and international databases. The results demonstrated that AMF play a fundamental role in phosphorus uptake, thereby promoting plant growth, mineral nutrition, and bean crop productivity. It was also observed that phosphorus availability acts as a key regulator of mycorrhizal colonization, directly influencing the intensity of the symbiosis. Furthermore, the analyzed literature highlighted the significant contributions of mycorrhization to improved soil structure, water-use efficiency, tolerance to environmental stress, and the promotion of agricultural sustainability. The study concludes that combining rational phosphate fertilization management with the utilization of biological processes driven by mycorrhizal fungi represents a promising strategy for increasing production efficiency and establishing more sustainable agricultural systems.

Keywords: *Phaseolus vulgaris*. Arbuscular mycorrhizal fungi. Phosphate fertilization. Phosphorus. Agricultural sustainability.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADP - adenosina difosfato

ATP – adenosina trifosfato

DNA – Ácido Desoxirribonucleico

FMAAs – fungos micorrízicos arbusculares

PAM - Membrana Periarbuscular

PAS – Espaço Periarbuscular

RNA – Ácido Ribonucleico

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do processo de fixação do fósforo em solos tropicais.....	27
Figura 2 - Representação esquemática das etapas de reconhecimento e estabelecimento da simbiose entre fungos micorrízicos arbusculares e raízes do feijoeiro.....	30
Figura 3 - Representação esquemática da estrutura do arbúsculo e da interface de troca de nutrientes entre fungo e planta.....	31
Figura 4 - Fluxograma referente a metodologia	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Hábitos de crescimento (Tipos I, II, III e IV).....	23
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa	18
1.2 Problema.....	20
1.3 Objetivos	20
1.3.1 Objetivo geral.....	20
1.3.2 Objetivos específicos	20
1.4 Estrutura	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1 Importância agrônômica e características fisiológicas da cultura do feijão	22
2.2 Dinâmica do fósforo em solos tropicais e sua importância para o feijoeiro	25
2.3 Fungos micorrízicos arbusculares: origem, funcionamento e mecanismos de simbiose	28
2.4 Interação entre adubação fosfatada e associação micorrízica na cultura do feijão	32
2.5 Contribuições da associação micorrízica para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas	35
3 METODOLOGIA.....	40
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	42
4.1 Mecanismos fisiológicos e bioquímicos da associação micorrízica no feijoeiro	42
4.2 Impactos da associação micorrízica sobre crescimento, nutrição mineral e produtividade	43
4.3 Influência da disponibilidade de fósforo sobre a colonização e eficiência dos fungos micorrízicos arbusculares.....	45
4.4 Contribuições da associação micorrízica para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas	47
5 CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES	50
REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma espécie originária do continente americano, com centros de domesticação reconhecidos principalmente na Mesoamérica e na região Andina (Bitocchi et al., 2012). A partir dos processos de expansão marítima e intercâmbio agrícola iniciados no século XVI, a cultura difundiu-se para diferentes continentes, consolidando-se como uma das leguminosas alimentares mais importantes do mundo. Sua ampla adaptação a distintas condições edafoclimáticas, associada ao elevado valor nutricional dos grãos, contribuiu para que o feijão assumisse papel estratégico na alimentação humana e na economia agrícola de diversos países (GEPTS, 2017).

No Brasil, essa relevância tornou-se ainda mais expressiva. Introduzido durante o período colonial e amplamente incorporado aos sistemas produtivos nacionais, o feijão passou a integrar de forma permanente os hábitos alimentares da população, constituindo atualmente um dos principais componentes da dieta brasileira, uma vez que os grãos constituem importante fonte de proteínas vegetais, fibras, ferro, zinco, vitaminas e compostos bioativos (Coelho et al., 2021). Além de sua importância nutricional, a cultura exerce papel fundamental na segurança alimentar do país, sendo cultivada em praticamente todas as regiões brasileiras por produtores de diferentes escalas tecnológicas (Santos; Ribeiro, 2022). Na safra 2025/26, o Brasil esteve entre os maiores produtores mundiais do grão. A produção nacional foi estimada em aproximadamente 3,0 a 3,1 milhões de toneladas, volume destinado majoritariamente ao abastecimento do mercado interno e que evidencia a relevância socioeconômica da cultura (CONAB, 2026).

Embora apresente ampla adaptabilidade, a cultura do feijão caracteriza-se por um ciclo relativamente curto, variando geralmente entre 75 e 100 dias, o que reduz o período disponível para absorção e acúmulo de nutrientes necessários ao seu desenvolvimento (Taiz et al., 2017). Além disso, seu sistema radicular relativamente superficial limita a exploração de camadas mais profundas do solo, tornando a cultura altamente dependente da disponibilidade imediata de nutrientes na região radicular (Malavolta, 2006). A soma dessas características faz com que a planta dependa fortemente da disponibilidade imediata de nutrientes no solo, especialmente durante

as fases iniciais de crescimento, quando ocorre a formação do sistema radicular e o estabelecimento do potencial produtivo.

Nesse contexto, o fósforo destaca-se como um dos nutrientes mais importantes para o desenvolvimento do feijoeiro. Sua participação em processos fisiológicos relacionados à transferência de energia, síntese de compostos orgânicos, crescimento radicular, divisão celular e formação de estruturas reprodutivas torna esse elemento indispensável (fósforo) para o adequado desenvolvimento da cultura (López-Arredondo et al., 2014). Consequentemente, limitações na disponibilidade de fósforo podem comprometer o crescimento inicial das plantas, reduzir a eficiência metabólica e refletir negativamente sobre a produtividade final da lavoura (Souza et al., 2016).

Nos solos tropicais brasileiros, a baixa disponibilidade de fósforo não decorre simplesmente da ausência absoluta desse elemento no ambiente edáfico, mas principalmente de sua baixa mobilidade e de sua forte interação com os componentes minerais do solo. Em solos altamente intemperizados, como muitos Latossolos e Argissolos, predominam óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, além de argilas de alta capacidade de adsorção de fosfatos (Novais; Smyth, 1999; Roy et al., 2016).

Nessa condição, parte significativa do fósforo aplicado por meio da fertilização pode ser rapidamente adsorvida pelos componentes minerais do solo, tornando-se pouco acessível ao sistema radicular das plantas. Como consequência, mesmo em áreas submetidas à adubação fosfatada, a eficiência de aproveitamento desse nutriente pode ser limitada, gerando desafios relacionados ao desempenho agrônômico das culturas, ao aumento dos custos de produção e ao uso racional dos fertilizantes (Oliveira et al., 2020).

Diante dessa limitação natural, as plantas desenvolveram, ao longo de sua trajetória evolutiva, mecanismos capazes de ampliar sua capacidade de obtenção de nutrientes em ambientes com baixa disponibilidade de fósforo. Entre esses mecanismos, destaca-se a associação micorrízica, considerada uma das interações biológicas mais importantes dos ecossistemas terrestres (Brundrett; Tedersoo, 2018). O termo micorriza deriva das palavras gregas *mykes* (fungo) e *rhiza* (raiz), designando uma relação simbiótica estabelecida entre fungos do solo e raízes vegetais (Moreira; Siqueira, 2006).

Diferentemente da percepção comum que associa fungos apenas a agentes patogênicos, os fungos micorrízicos arbusculares, pertencentes ao filo Glomeromycota, formam relações simbióticas com cerca de 80% das plantas

terrestres, constituem organismos benéficos capazes de ampliar funcionalmente o sistema radicular das plantas (Tedersoo et al., 2020).

Por meio de suas hifas, esses fungos exploram volumes de solo inacessíveis às raízes, alcançam microporos e zonas distantes da rizosfera imediata e favorecem a absorção de nutrientes de baixa mobilidade, especialmente o fósforo (Smith; Smith, 2012).

Assim, nessa relação mutualística, a planta fornece compostos carbonados produzidos pela fotossíntese, enquanto o fungo contribui para a aquisição de nutrientes e água, além de poder favorecer maior tolerância a estresses ambientais (Ferrari et al., 2021).

No caso específico do feijoeiro, essa interação torna-se particularmente importante porque a cultura apresenta elevada demanda por condições adequadas de fertilidade, mas possui limitações morfológicas para explorar eficientemente o fósforo retido no solo. Dessa forma, a micorrização pode atuar como uma estratégia biológica complementar à adubação fosfatada, aumentando a eficiência de uso do fósforo e contribuindo para sistemas de produção mais sustentáveis (Souza et al., 2016).

Entretanto, a relação entre adubação fosfatada e associação micorrízica não é linear. Em condições de baixa disponibilidade de fósforo, a planta tende a depender mais intensamente da simbiose, favorecendo a colonização micorrízica como mecanismo de compensação nutricional. Por outro lado, níveis elevados de fósforo disponível podem reduzir a necessidade fisiológica dessa associação, levando à diminuição da colonização radicular e da atividade dos fungos micorrízicos. Assim, compreender o papel da adubação fosfatada sobre a associação micorrízica na cultura do feijão significa investigar um ponto de equilíbrio entre nutrição mineral, atividade microbiológica do solo e eficiência produtiva (Breuils et al., 2020).

1.1 Justificativa

A cultura do feijão possui expressiva relevância econômica, social e alimentar no contexto brasileiro, sendo responsável por contribuir diretamente para a segurança

alimentar da população e para a geração de renda em diferentes sistemas produtivos. Entretanto, a manutenção de níveis adequados de produtividade depende de práticas de manejo capazes de garantir o suprimento eficiente de nutrientes essenciais, especialmente o fósforo, frequentemente considerado um dos principais fatores limitantes ao desenvolvimento vegetal em solos tropicais. Nesse cenário, torna-se fundamental ampliar a compreensão dos mecanismos que influenciam a dinâmica desse nutriente no sistema solo-planta, buscando alternativas que conciliem produtividade, eficiência agrônômica e sustentabilidade.

Sob a perspectiva científica, a associação entre fungos micorrízicos arbusculares e plantas cultivadas tem despertado crescente interesse em virtude de seu potencial para aumentar a eficiência de absorção de nutrientes e otimizar o aproveitamento dos fertilizantes aplicados ao solo. Embora a influência das micorrizas sobre a nutrição fosfatada seja amplamente reconhecida, a interação entre diferentes condições de disponibilidade de fósforo e o estabelecimento dessa simbiose ainda apresenta resultados que demandam análise integrada e interpretação crítica. Dessa forma, discutir a relação entre adubação fosfatada e associação micorrízica na cultura do feijão significa abordar um tema que se encontra na interface entre nutrição mineral, microbiologia do solo e sustentabilidade agrícola.

A relevância deste estudo também se justifica pela necessidade de reunir, analisar e interpretar criticamente os conhecimentos produzidos sobre o tema, oferecendo uma visão integrada de processos que, muitas vezes, são discutidos de maneira fragmentada na literatura. A presente pesquisa não se limita à simples compilação de informações já disponíveis, mas busca compreender de forma aprofundada as interações existentes entre o fósforo, os fungos micorrízicos e o feijoeiro, destacando mecanismos biológicos, implicações agrônômicas e perspectivas para o manejo sustentável da fertilidade do solo. Assim, espera-se que os resultados obtidos possam contribuir tanto para o avanço das discussões acadêmicas quanto para a adoção de estratégias produtivas mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

1.2 Problema

Considerando a importância do fósforo para o desenvolvimento da cultura do feijão e o papel desempenhado pelos fungos micorrízicos arbusculares na absorção desse nutriente, de que maneira a adubação fosfatada influencia o estabelecimento e a eficiência da associação micorrízica, e quais são as implicações dessa interação para o desenvolvimento sustentável da cultura do feijoeiro?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Analisar, por meio de revisão bibliográfica, a influência da adubação fosfatada sobre a associação entre fungos micorrízicos arbusculares e a cultura do feijão, discutindo seus impactos na nutrição mineral, no desenvolvimento vegetal e na sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola.

1.3.2 Objetivos específicos

- Descrever os mecanismos biológicos envolvidos na associação entre fungos micorrízicos arbusculares e o sistema radicular do feijoeiro;
- Compreender o papel do fósforo no crescimento e desenvolvimento da cultura do feijão;
- Analisar a influência da disponibilidade de fósforo sobre a colonização e a eficiência da simbiose micorrízica;

- Discutir os impactos da interação entre adubação fosfatada e fungos micorrízicos na absorção de nutrientes, no desenvolvimento vegetal e na produtividade da cultura;
- Avaliar as contribuições dessa associação para a construção de sistemas agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

1.4 Estrutura

A estrutura deste trabalho é composta por seções. A primeira seção é a introdução que traz a apresentação do tema. A segunda seção fica incumbida de trazer em seu conteúdo as teorias de autores conceituados sobre o tema proposto, que fundamentaram a elaboração de toda a pesquisa e auxiliaram na organização do estudo e do texto, com o uso dos dados obtidos. A terceira seção trata da metodologia adotada para o delineamento de pesquisa e plano de coleta e interpretação de dados. A quarta seção descreve a discussão, tópico que aborda a interpretação do autor e de dados encontrados e expostos no corpo do trabalho contextualizados às teorias consolidadas. A quinta traz as considerações finais e fechamento do estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente referencial teórico tem como finalidade reunir e discutir os principais achados científicos relacionados à cultura do feijão, à dinâmica do fósforo nos solos tropicais e à associação entre fungos micorrízicos arbusculares e plantas cultivadas. A compreensão integrada desses elementos é essencial para analisar os mecanismos que influenciam a disponibilidade e a absorção de nutrientes, bem como seus reflexos sobre o desenvolvimento vegetal e a produtividade agrícola.

Inicialmente, são apresentadas as principais características agronômicas e fisiológicas da cultura do feijão, destacando sua relevância econômica e alimentar. Em seguida, discute-se a importância do fósforo para o metabolismo vegetal e os fatores que condicionam sua disponibilidade nos solos brasileiros. Posteriormente, aborda-se a associação micorrízica, enfatizando seus mecanismos biológicos, sua evolução e seu papel na aquisição de nutrientes. Por fim, são analisadas as interações entre a adubação fosfatada e os fungos micorrízicos arbusculares, bem como suas contribuições para a construção de sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis.

Dessa forma, o referencial teórico busca estabelecer uma conexão entre os processos biológicos, químicos e agronômicos envolvidos na relação solo-planta-microrganismo, fornecendo o embasamento necessário para a compreensão e discussão da problemática proposta neste estudo.

2.1 Importância agronômica e características fisiológicas da cultura do feijão

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) representa um dos pilares da segurança alimentar e da sustentabilidade socioeconômica em diversas regiões tropicais e subtropicais do globo, com destaque para o cenário agropecuário brasileiro. Sob a perspectiva agronômica, a relevância da cultura está atrelada não apenas ao

seu valor nutricional intrínseco, mas também à sua versatilidade de cultivo em diferentes sistemas de produção, que variam desde a agricultura familiar de subsistência até complexos agroindustriais de alta tecnologia. Contudo, para expressar seu máximo potencial produtivo, a cultura demanda um entendimento aprofundado de suas particularidades morfofisiológicas e de suas interações com a matriz edáfica (Santos; Ribeiro, 2022).

O feijoeiro apresenta uma notável plasticidade fenotípica, sendo classificado classicamente em quatro principais hábitos de crescimento (Tipos I, II, III e IV), que variam desde o tipo determinado arbustivo até o indeterminado volúvel. Essa distinção morfológica influencia diretamente a arquitetura da planta, a distribuição do dossel e, consequentemente, a dinâmica de partição de fotoassimilados entre os drenos vegetativos e reprodutivos. A classificação dos hábitos de crescimento do feijoeiro encontra-se sintetizada no Quadro 1 (Minami et al., 2018).

Quadro 1 - Hábitos de crescimento (Tipos I, II, III e IV)

Tipo	Hábito de crescimento	Características principais
I	Determinado arbustivo	Crescimento limitado após o florescimento, porte baixo e ciclo geralmente mais uniforme
II	Indeterminado arbustivo	Porte ereto, crescimento contínuo e maior produção de ramos laterais
III	Indeterminado prostrado ou semiprostrado	Maior desenvolvimento vegetativo, ramificação intensa e maior cobertura do solo
IV	Indeterminado volúvel	Crescimento trepador, elevado vigor vegetativo e necessidade de suporte

Fonte: Minami et al. (2018)

Essa diversidade morfofisiológica demonstra que a cultura do feijão não deve ser analisada como um sistema biologicamente homogêneo, uma vez que diferenças na arquitetura vegetal, duração do ciclo e distribuição de biomassa podem influenciar diretamente a eficiência de absorção de nutrientes e a intensidade das interações estabelecidas com os microrganismos do solo (Coelho et al., 2021).

Independentemente do hábito de crescimento, uma das principais características fisiológicas da cultura é o seu ciclo fenológico relativamente curto, compreendido geralmente entre 75 e 100 dias. Essa rapidez no desenvolvimento

ontogênico impõe uma restrição temporal severa para a aquisição de recursos do solo (Taiz et al., 2017).

Diferente de culturas perenes ou de ciclo longo, o feijoeiro possui uma janela estreita para absorver a totalidade dos macro e micronutrientes necessários para a sustentação de suas fases críticas, como a diferenciação floral e o enchimento de vagens. Consequentemente, qualquer limitação nutricional nos estádios iniciais de crescimento pode acarretar prejuízos irreversíveis aos componentes de rendimento da lavoura (Souza et al., 2016).

A eficiência na captação de recursos edáficos é intrinsecamente dependente da morfologia e da distribuição espacial do sistema radicular. O feijoeiro possui um sistema radicular do tipo pivotante, porém caracterizado por ser relativamente superficial, concentrando a maior parte de sua biomassa radicular ativa e de suas raízes laterais absorventes nos primeiros 20 a 30 centímetros de profundidade do perfil do solo (Malavolta, 2006).

Essa conformação anatômica limita severamente a capacidade da planta em explorar volumes mais profundos de solo, tornando-a altamente vulnerável a estresses hídricos de curto prazo (veranicos) e, sobretudo, dependente da fertilidade imediata da camada arável. Elementos químicos que apresentam baixa mobilidade na solução do solo, como o fósforo, demandam um contato por interceptação radicular ou difusão a curtíssimas distâncias para que ocorra a absorção. Portanto, a combinação entre um ciclo biológico acelerado e um sistema radicular restrito confere ao feijoeiro uma baixa eficiência natural de absorção de nutrientes de baixa dinâmica de movimento no solo (Oliveira et al., 2020).

Historicamente, os programas de melhoramento genético de *Phaseolus vulgaris* L. têm focado na obtenção de cultivares com alta produtividade, arquitetura ereta (para facilitar a colheita mecanizada), resistência a patógenos e ciclos precoces ou superprecoces. No entanto, esses processos de seleção artificial foram conduzidos, em sua grande maioria, sob condições de alta fertilidade e inputs tecnológicos elevados (Zilio et al., 2017).

Essa pressão de seleção em ambientes caracterizados pela elevada disponibilidade de nutrientes pode ter gerado um efeito fisiológico pouco explorado na literatura, mas potencialmente relevante para a agricultura sustentável. A abundância artificial de nutrientes durante sucessivos ciclos de seleção pode ter favorecido genótipos menos dependentes das interações simbióticas tradicionalmente utilizadas

pelas plantas para superar limitações nutricionais. Como consequência, algumas cultivares modernas podem ter atenuado parte de sua capacidade intrínseca de sinalização bioquímica voltada ao recrutamento e estabelecimento de associações mutualísticas com microrganismos benéficos do solo (Sawada et al., 2018).

Em cultivares antigas ou variedades crioulas, a escassez de nutrientes atua como um gatilho fisiológico para a liberação de exsudatos radiculares que atraem microrganismos simbioses. Já em linhagens modernas de teto produtivo elevado, os limiares de sinalização molecular podem estar alterados, reduzindo a habilidade da planta em colonizar e ser colonizada por fungos micorrízicos arbusculares em condições de campo. Compreender essa transição genética e fisiológica é fundamental para traçar estratégias de manejo que reconciliem o potencial genético das cultivares atuais com o aproveitamento de vias biológicas complementares de nutrição (Peixoto et al., 2020).

2.2 Dinâmica do fósforo em solos tropicais e sua importância para o feijoeiro

O fósforo é classificado como um macronutriente primário essencial, desempenhando papéis vitais que limitam ou potencializam o rendimento biológico das culturas. No ecossistema agrícola, a transferência do fósforo da matriz do solo para o interior da planta é governada por uma complexa rede de reações químicas, físicas e biológicas. Em regiões tropicais, essas interações assumem contornos desafiadores devido às características mineralógicas dominantes das classes de solos majoritárias (Roy et al., 2016).

No metabolismo vegetal do feijoeiro, o fósforo atua como o elemento central da bioenergética celular. Ele é o componente estrutural das moléculas de adenosina trifosfato (ATP) e adenosina difosfato (ADP), funcionando como a "moeda corrente" para o armazenamento e transferência de energia proveniente dos processos de fotossíntese e respiração (Taiz et al., 2017).

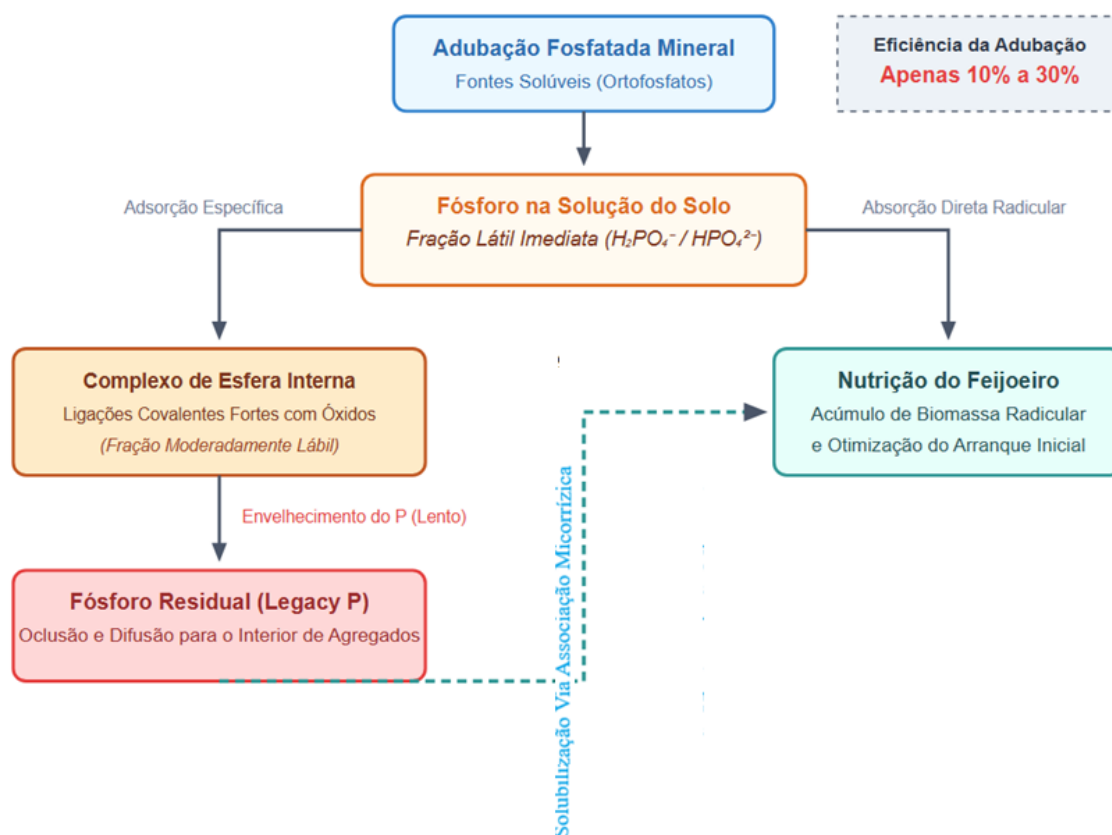
Além do papel energético, o Fósforo é constituinte fundamental de ácidos nucleicos (DNA e RNA), fosfolipídios de membranas celulares e coenzimas. Na cultura

do feijão, os reflexos visíveis do suprimento adequado de Fósforo manifestam-se nas fases iniciais do estabelecimento da lavoura, favorecendo a divisão celular, a expansão do sistema radicular e a exploração de maiores volumes de solo (estímulo ao arranque inicial). Além disso, o nutriente exerce papel determinante na eficiência da fixação biológica de nitrogênio, uma vez que os processos de infecção radicular, formação de nódulos e atividade metabólica das bactérias simbióticas demandam elevado consumo energético na forma de ATP (fixação biológica de nitrogênio). Reflexos adicionais podem ser observados sobre os componentes de rendimento, incluindo vigor da florada, pegamento de flores, formação de vagens e enchimento dos grãos (componentes de rendimento) (Souza et al., 2016).

O grande paradoxo da agricultura tropical reside no fato de que os solos frequentemente contêm quantidades totais expressivas de fósforo, porém em formas químicas de baixíssima solubilidade e virtualmente indisponíveis para a captação radicular. Solos altamente intemperizados, como os Latossolos e Argissolos dominantes no território brasileiro, apresentam uma mineralogia rica em argilas do tipo 1:1 (caulinita) e, sobretudo, em óxidos e hidróxidos de ferro (goethita e hematita) e alumínio (gibbsita) (Malavolta, 2006).

Os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio presentes nesses solos possuem superfícies carregadas positivamente sob condições de pH predominantemente ácido. Ao aplicar um fertilizante fosfatado solúvel, os ânions ortofosfato (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}) presentes na solução do solo sofrem uma rápida reação de adsorção específica (ou fixação química) (Oliveira et al., 2020). Deste modo, o processo de adsorção do fósforo em óxidos de ferro e alumínio, responsável por reduzir sua disponibilidade para absorção vegetal, encontra-se representado de forma esquemática na Figura 1.

Figura 1 - Representação esquemática do processo de fixação do fósforo em solos tropicais



Fonte: Autor (2026)

Como resultado, essa reação forma ligações covalentes altamente estáveis (complexos de esfera interna) na superfície dos óxidos. Com o passar do tempo, ocorre o fenômeno do envelhecimento do fósforo, onde o elemento difunde-se para o interior dos agregados minerais, tornando sua dessorção (retorno para a solução do solo) um processo extremamente lento e difícil. Como consequência, a eficiência imediata da adubação fosfatada mineral na safra de aplicação raramente ultrapassa a faixa de 10% a 30% (Novais; Smyth, 1999).

Devido à baixa eficiência da adubação mineral decorrente da forte fixação edáfica, a prática agrícola convencional baseou-se, por décadas, na aplicação de doses de Fósforo superiores à exigência real de extração das culturas, visando saturar os sítios de adsorção do solo e garantir uma fração mínima disponível na solução. Esse histórico de superadubação resultou no acúmulo de um imenso estoque químico subutilizado no perfil do solo, denominado na literatura científica internacional como Fósforo Residual ou *Legacy Phosphorus* (Roy et al., 2016).

Este banco de fósforo acumulado representa um passivo econômico e ambiental, mas também uma oportunidade agrônômica sem precedentes. O grande gargalo contemporâneo da agricultura não é mais a inserção contínua de fertilizantes fosfatados de fontes finitas (rochas fosfáticas), mas sim o desenvolvimento de estratégias de manejo capazes de mobilizar e solubilizar o Fósforo residual já existente (Oliveira et al., 2020).

A transição desse fósforo das frações não-lábeis (estáveis) para as frações lábeis (disponíveis) depende de alterações químicas microambientais e da ação enzimática na rizosfera. É exatamente nesse cenário de restrição de movimento e forte aprisionamento químico do *Legacy Phosphorus* que os mecanismos biológicos, capitaneados pela associação micorrízica arbuscular, tornam-se ferramentas ecológicas indispensáveis para otimizar a eficiência de uso dos nutrientes e desenhar sistemas de produção de feijão economicamente viáveis e sustentáveis (Souza et al., 2016).

Nesse contexto, a associação micorrízica deixa de ser apenas um fenômeno biológico de interesse ecológico e passa a ocupar posição estratégica no desenvolvimento de sistemas agrícolas capazes de converter estoques historicamente inacessíveis de fósforo em produtividade vegetal, reduzindo a dependência de fertilizantes minerais e ampliando a sustentabilidade da cultura do feijão (Roy et al., 2016).

2.3 Fungos micorrízicos arbusculares: origem, funcionamento e mecanismos de simbiose

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), pertencentes ao filo Glomeromycota, são organismos biotróficos obrigatórios, o que significa que dependem do hospedeiro vegetal vivo para obter os compostos carbonados necessários ao seu ciclo vital. Essa associação mutualística, estabelecida com cerca de 80% das espécies de plantas terrestres, não é um evento aleatório, mas sim o resultado de um refinado processo coevolutivo que remonta à colonização do ambiente terrestre pelas primeiras plantas decorrentes do período Devoniano. No

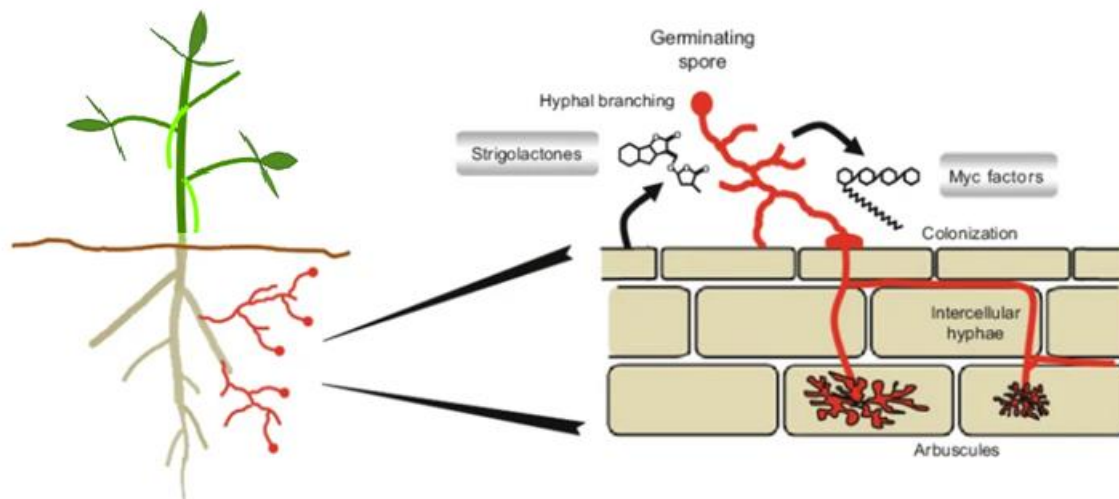
feijoeiro, o estabelecimento dessa simbiose envolve uma complexa troca de sinais bioquímicos e modificações estruturais na raiz (Brundrett; Tedersoo, 2018).

O início da associação micorrízica ocorre no microambiente da rizosfera e é governado por um diálogo químico bidirecional de extrema especificidade. Quando o feijoeiro se encontra em condições de baixa disponibilidade de fósforo no solo, seu metabolismo interno ativa rotas de síntese de fitormônios específicos chamados estrigolactonas, que são exsudados pelas raízes para a solução do solo em concentrações picomolares (10^{-12} a 10^{-10}) (Breuils et al., 2020).

As estrigolactonas atuam como moléculas sinalizadoras associadas à deficiência de fósforo. Ao serem percebidas pelos esporos dos FMAs presentes no solo, esses compostos estimulam: a germinação dos esporos e a ramificação das hifas fúngicas em direção à raiz; e o aumento da atividade metabólica do fungo, preparando-o para a infecção. Em resposta, o fungo libera os chamados fatores Myc (lipoquitooligossacarídeos e quitooligossacarídeos), que ativam a rota de sinalização de simbiose comum (*SYM pathway*) na planta, sinalizando para o feijoeiro que o parceiro simbiótico é benéfico não um patógeno (Parniske, 2008).

Com o reconhecimento mútuo estabelecido, ocorre a desativação temporária dos mecanismos de defesa da planta, permitindo o avanço do fungo. Contudo, caso o solo apresente altos níveis de fósforo disponível (geralmente acima de 30 a 40 mg dm⁻³ em análises de solo), o feijoeiro cessa a exsudação de estrigolactonas, interrompendo o canal de comunicação e mitigando o estabelecimento da simbiose. O processo de estabelecimento da associação micorrízica envolve uma sequência coordenada de sinais químicos entre planta e fungo, desde a percepção da deficiência de fósforo até a colonização efetiva das raízes (López-Ráez; Pozo, 2013). As principais etapas desse diálogo molecular encontram-se representadas na Figura 2.

Figura 2 - Representação esquemática das etapas de reconhecimento e estabelecimento da simbiose entre fungos micorrízicos arbusculares e raízes do feijoeiro



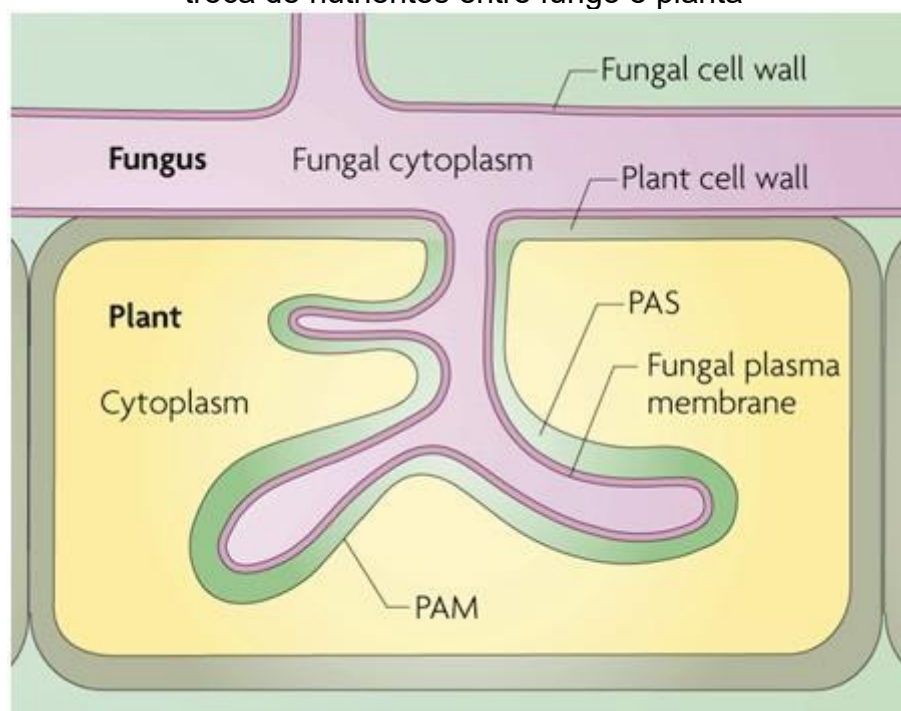
Nota: O diagrama ilustra o fluxo de sinalização na rizosfera. Sob baixa disponibilidade de fósforo, as raízes liberam estrigolactonas que estimulam a germinação de esporos e ramificação de hifas (*Hyphal branching*). Em contrapartida, o fungo libera os fatores Myc (*Myc factors*), iniciando o processo de colonização celular (*Colonization*) e formação de hifas intercelulares (*Intercellular hyphae*) e arbúsculos (*Arbuscules*).

Fonte: López-Raéz; Pozo (2013) - Adaptado

Após o reconhecimento molecular, o fungo forma uma estrutura de ancoragem na superfície da raiz chamada apressório. A partir do apressório, a hifa penetra nas células epidérmicas e avança pelo córtex radicular de forma inter e intracelular, sem romper a membrana plasmática da célula vegetal (Genre et al., 2020).

No interior das células corticais, a hifa ramifica-se intensamente de forma dicotômica, originando os arbúsculos. Essas estruturas constituem o verdadeiro centro funcional e o coração anatômico da simbiose. Embora ocupem até 50% do volume da célula cortical vegetal, os ramos fúngicos permanecem totalmente isolados do citoplasma do hospedeiro por uma extensão modificada da membrana plasmática da raiz, denominada Membrana Periarbuscular (PAM), criando um microambiente interfacial de troca chamado Espaço Periarbuscular (PAS), conforme detalhado microscopicamente na Figura 3 (Parniske, 2008).

Figura 3 - Representação esquemática da estrutura do arbúsculo e da interface de troca de nutrientes entre fungo e planta



Nota: tradução dos termos gerais em inglês: *Fungus*: Fungo; *Plant*: Planta; *Fungal cytoplasm*: Citoplasma fúngico (o interior da hifa do fungo); *Cytoplasm*: Citoplasma (o interior da célula da raiz do feijoeiro); *Fungal cell wall*: Parede celular fúngica; *Plant cell wall*: Parede celular vegetal; *Fungal plasma membrane*: Membrana plasmática fúngica

Fonte: Parniske (2008)

Entretanto, a elevada eficiência dessa transferência nutricional depende diretamente da capacidade do fungo em explorar regiões do solo inacessíveis ao sistema radicular da planta. Diferentemente das raízes do feijoeiro, cuja absorção de fósforo é limitada pela baixa mobilidade desse nutriente no solo, os fungos micorrízicos desenvolvem uma extensa rede de hifas extrarradiculares que se projeta além da rizosfera imediata. Essa rede funciona como uma verdadeira extensão do sistema radicular, ampliando significativamente o volume de solo explorado e aumentando o acesso a fontes de fósforo que permaneceriam indisponíveis para a planta em condições normais (Smith; Smith, 2012).

O transporte desse fósforo capturado pelas hifas até o interior da planta ocorre por meio de sistemas de transporte altamente especializados. Plantas não micorrizadas dependem exclusivamente de transportadores de fósforo da família *Pht1* expressos nos pelos radiculares (via direta). Contudo, no feijoeiro micorrizado, ocorre a ativação de genes específicos que codificam transportadores de fósforo induzidos

por micorrizas, como os genes *PvPT1* e *PvPT2*, ativando uma via simbiótica paralela de absorção (SOUZA et al., 2016).

Esses transportadores específicos localizam-se exclusivamente na Membrana Periarbuscular (PAM) da planta. O fungo converte instantaneamente o ortofosfato absorvido do solo em cadeias estáveis de polifosfatos para neutralizar a pressão osmótica e transportá-lo rapidamente ao longo de suas hifas (em velocidades que atingem até 10 a 20 centímetros por dia) até os arbúsculos. No interior das ramificações arbusculares, o polifosfato é novamente clivado em ortofosfato solúvel e bombeado ativamente para o Espaço Periarbuscular (PAS); nesse ponto, os transportadores induzidos (*PTs*) do feijoeiro capturam o nutriente com alta afinidade termodinâmica (K_m na faixa micromolar), garantindo um fluxo contínuo, abundante e energeticamente eficiente de fósforo para o metabolismo do hospedeiro, mesmo em solos sob severa fixação mineral (Souza et al., 2016).

Dessa forma, a associação micorrízica arbuscular não deve ser compreendida apenas como uma ampliação física macroscópica do sistema radicular, mas como uma engrenagem fisiológica e molecular integrada capaz de modificar profundamente a cinética de absorção de nutrientes pela planta. Essa característica torna os FMAs componentes bioestratégicos insubstituíveis para o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis, especialmente em solos altamente intemperizados onde a dinâmica do fósforo constitui o principal fator limitante ao rendimento da cultura do feijão (Roy et al., 2016).

2.4 Interação entre adubação fosfatada e associação micorrízica na cultura do feijão

A interrelação entre o fornecimento de fósforo por via mineral e o estabelecimento da simbiose micorrízica arbuscular não segue um padrão linear ou puramente cumulativo. Trata-se de um sistema biológico dinâmico de retroalimentação, onde o status nutricional interno do feijoeiro regula a intensidade, a viabilidade e a eficiência da colonização radicular pelos fungos do solo (Breuils, 2020).

O estabelecimento da associação micorrízica é controlado de forma homeostática pela planta hospedeira por meio de um mecanismo conhecido como efeito gangorra. O gatilho para a regulação da simbiose não é a quantidade total de fósforo presente no solo, mas sim a concentração de ortofosfato solúvel vacuolar nos tecidos internos da raiz do feijoeiro, cujo limiar crítico de regulação molecular costuma situar-se entre 2,0 e 4,0 mmol kg⁻¹ de massa fresca (Balzergue et al., 2011).

Assim, em um cenário de baixa disponibilidade de fósforo (teores edáficos inferiores a 10-15 mg dm⁻³), o feijoeiro tende a intensificar os mecanismos fisiológicos que favorecem o estabelecimento da associação micorrízica, ampliando sua dependência da simbiose como estratégia para aumentar em até 300% a aquisição do nutriente e sustentar seu desenvolvimento metabólico. Inversamente, quando o fósforo encontra-se prontamente disponível em decorrência da adubação mineral, ocorre uma redução do investimento fisiológico da planta na manutenção da simbiose, resultando em quedas de 60% a 80% nas taxas de colonização radicular, formação de arbúsculos e atividade dos fungos micorrízicos (Souza et al., 2016).

Sob a ótica da ecologia e da fisiologia vegetal, a simbiose micorrízica envolve uma rígida análise de custo-benefício econômico entre os parceiros. Os fungos micorrízicos arbusculares são heterotróficos e dependem exclusivamente da planta para obter energia na forma de hexoses (açúcares) e ácidos graxos. Estima-se que o feijoeiro direcione entre 10% e 20% de todo o carbono fixado na fotossíntese para sustentar a biomassa e o metabolismo do fungo (Smith; Smith, 2012).

Em condições de fertilidade limitante, esse investimento de carbono compensa amplamente para a planta, dado que o ganho em absorção de fósforo (e o consequente incremento na síntese de ATP gera um saldo fotossintético líquido positivo, elevando a taxa de carboxilação foliar em até 25%. No entanto, em áreas com superdosagem de adubação fosfatada mineral, o dreno de carbono pelo fungo continua ativo, mas o benefício de fósforo trazido pelas hifas torna-se nulo ou insignificante para a planta (Sawada et al., 2018).

Nesse limiar de saturação, a associação deixa de ser um mutualismo benéfico e transiciona para um quadro de parasitismo energético discreto, onde o fungo atua como um dreno de fotoassimilados que poderia comprometer em até 15% o vigor vegetativo inicial do feijoeiro se não fosse regulado pelo hospedeiro (Sawada et al., 2018).

Um dos aspectos mais complexos e de maior impacto agrônômico na cultura do feijão é a ocorrência da simbiose tripartite. Como uma leguminosa, o feijoeiro possui a capacidade natural de associar-se a bactérias fixadoras de nitrogênio do gênero *Rhizobium*, formando nódulos radiculares capazes de converter o nitrogênio atmosférico (N_2) em formas assimiláveis pela planta (Santos; Ribeiro, 2022).

O grande gargalo da Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) é a sua extraordinária exigência energética. O complexo enzimático da nitrogenase requer elevado investimento metabólico, consumindo aproximadamente 16 moléculas de ATP e 8 elétrons para cada molécula de nitrogênio atmosférico reduzida a duas moléculas de amônia ($2NH_3$). Essa elevada demanda energética explica a forte dependência da atividade nodular em relação ao adequado suprimento de fósforo na planta (Kalamulla et al., 2022).

Devido à elevada demanda estequiométrica por energia, os nódulos bacterianos funcionam como potentes drenos de fósforo na planta. É nesse cenário que a interação com o fungo micorrízico atua como um elo sinérgico fundamental (Kalamulla et al., 2022).

Ao expandir o volume de solo explorado e capturar o fósforo retido além da zona de depleção radicular, a micorriza fornece o aporte contínuo de fósforo necessário para sustentar a atividade energética dos nódulos do *Rhizobium*. A interação harmônica desses três organismos cria um sistema de co-cooperação biológica onde a micorriza resolve a limitação de fósforo, o *Rhizobium* resolve o suprimento de nitrogênio e o feijoeiro, beneficiado pelo vigor nutricional pleno, gera o aporte estável de carbono para sustentar ambas as simbioses (Souza et al., 2016).

Dessa forma, a interação entre adubação fosfatada, fungos micorrízicos arbusculares e bactérias fixadoras de nitrogênio demonstra que a produtividade do feijoeiro resulta da integração entre processos químicos, fisiológicos e microbiológicos. A compreensão desse equilíbrio torna-se fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo capazes de maximizar a eficiência do uso de nutrientes e promover sistemas agrícolas mais sustentáveis (Chowdhary et al., 2025).

2.5 Contribuições da associação micorrízica para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas

A consolidação de estratégias que integrem os processos biológicos do solo ao manejo agrônomo convencional deixou de ser apenas uma vertente ecológica para se tornar uma necessidade técnico-econômica. Na cultura do feijão, o uso estratégico da associação micorrízica arbuscular desponta como uma das principais ferramentas para a transição em direção a uma agricultura de baixa emissão de carbono, aliando o incremento da eficiência no uso de insumos à mitigação de estresses ambientais decorrentes das mudanças climáticas globais (Chowdhary et al., 2025).

O principal impacto econômico e ecológico dos fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) reside na melhoria significativa da Eficiência do Uso de Nutrientes (NUE - *Nutrient Use Efficiency*). Conforme discutido anteriormente, a adubação fosfatada convencional em solos tropicais apresenta uma eficiência imediata criticamente baixa, flutuando entre apenas 10% e 30%. Ao atuar como um sistema de extensão radicular de alta afinidade, a rede de micélio extrarradicular do fungo otimiza a área de contato solo-raiz, permitindo que a planta absorva o fósforo que antes seria considerado quimicamente imóvel ou inacessível (Oliveira et al., 2020).

Essa dinâmica produz importantes benefícios agrônômicos e ambientais. Do ponto de vista produtivo, a maior eficiência na absorção de fósforo permite o redesenho dos programas de adubação, possibilitando reduções parciais nas doses de fertilizantes fosfatados minerais sem comprometer o potencial produtivo do feijoeiro. Sob a perspectiva ambiental, a menor dependência de fertilizantes reduz a pegada de carbono associada à mineração e ao processamento de rochas fosfáticas, além de minimizar os riscos de eutrofização de corpos hídricos decorrentes do transporte superficial de nutrientes (Roy et al., 2016).

Essa otimização prática da eficiência do uso do fósforo por vias biológicas é corroborada por diversos ensaios experimentais na literatura agrônoma nacional. Em estudos avaliando a resposta do feijoeiro à inoculação com fungos micorrízicos arbusculares associada a diferentes doses de P_2O_5 constatou-se que plantas micorrizadas submetidas a apenas 50% da recomendação da adubação fosfatada

mineral alcançaram biomassa radicular, teor de fósforo foliar e produtividade de grãos equivalentes aos tratamentos que receberam 100% da adubação mineral sem o aporte fúngico (Souza; Silva; Costa, 2016). Esse incremento na eficiência absorvente demonstra que a atividade do micélio extrarradicular compensa a redução do fertilizante químico, validando a viabilidade técnica da substituição parcial de inputs sintéticos por estratégias de base biológica.

Embora o foco primário da simbiose seja a nutrição fosfatada, os FMAs desempenham um papel vital na sobrevivência do feijoeiro sob condições de estresse abiótico, como os veranicos (períodos de estiagem de curto prazo). O diâmetro reduzido das hifas permite a exploração de microporos do solo onde as raízes do feijoeiro não conseguem penetrar, garantindo o acesso a frações de água retidas sob altas tensões matriciais (Smith; Smith, 2012).

Além do transporte direto de água, os fungos micorrízicos alteram a própria física do solo por meio da produção de glomalina. A glomalina é uma glicoproteína hidrofóbica insolúvel secretada pelas paredes das hifas fúngicas que atua como um cimento biológico. A estabilização da estrutura física do solo promovida pela glomalina melhora a porosidade, a aeração e a condutividade hídrica da matriz edáfica. Consequentemente, o feijoeiro cultivado em um sistema ricamente micorrizado apresenta maior estabilidade celular, menor taxa de abortamento de flores durante estiagens e rápida recuperação fisiológica após períodos de estresse térmico ou hídrico (Bedidni et al., 2009).

Os benefícios agronômicos associados aos FMAs têm estimulado crescente interesse pelo desenvolvimento de tecnologias capazes de incorporar esses organismos aos sistemas produtivos modernos. O mercado de insumos biológicos (bioinsumos) no Brasil vive uma expansão sem precedentes, capitaneado por biofertilizantes e inoculantes bacterianos consolidados (como *Rhizobium* e *Azospirillum*). No entanto, o desenvolvimento e a comercialização de inoculantes à base de fungos micorrízicos arbusculares em escala industrial ainda enfrentam desafios biotecnológicos singulares (Santos; Ribeiro, 2022).

Por serem biotróficos obrigatórios, os FMAs diferem das bactérias e de outros fungos (como o *Trichoderma*), pois não podem ser multiplicados em meios de cultura artificiais (placas de Petri ou biofábricas líquidas de fermentação). A sua multiplicação em larga escala exige a manutenção de plantas hospedeiras vivas em sistemas de

cultivo protegido (estufas ou sistemas aeropônicos especializados), o que eleva substancialmente os custos de produção do inóculo comercial (Genre et al., 2020).

Apesar desses gargalos industriais, os avanços em formulações biotecnológicas (como o encapsulamento de esporos em polímeros e géis protetores) e a seleção de cepas fúngicas altamente eficientes e adaptadas aos solos tropicais têm viabilizado a chegada dos primeiros inoculantes micorrízicos comerciais ao mercado. A integração desses produtos ao tratamento de sementes ou à aplicação no sulco de plantio representa a fronteira do manejo sustentável da fertilidade do solo, consolidando a associação micorrízica como um componente biológico indispensável para a alta produtividade e longevidade dos sistemas de produção de feijão (Kalamulla et al., 2022).

Ademais, a relevância dos fungos micorrízicos arbusculares para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas tem sido progressivamente consolidada pela literatura científica ao longo das últimas décadas. Em diferentes contextos experimentais e produtivos, estudos desenvolvidos em ordem cronológica evidenciam avanços na compreensão dos impactos dos FMAs sobre a estrutura do solo, a eficiência do uso de nutrientes, a tolerância a estresses ambientais e a redução da dependência de insumos externos, reforçando seu papel estratégico para a agricultura sustentável (Rillig, 2004).

Rillig (2004) já destacava que os fungos micorrízicos arbusculares exercem papel relevante na estabilidade estrutural do solo, especialmente por sua relação com proteínas associadas à glomalina, capazes de favorecer a formação e manutenção de agregados. Esse entendimento ampliou a importância dos FMAs para além da nutrição vegetal, evidenciando sua participação na conservação física do solo, na proteção da matéria orgânica e na melhoria da qualidade edáfica, aspectos fundamentais para sistemas agrícolas sustentáveis.

Dando continuidade aos avanços observados na compreensão da relação entre fungos micorrízicos e qualidade do solo, Bedini et al. (2009) demonstraram que diferentes espécies de fungos micorrízicos arbusculares exercem influência direta sobre a agregação do solo e sobre os teores de proteínas relacionadas à glomalina. Os autores verificaram que a presença dos FMAs favorece a estabilidade estrutural da matriz edáfica, contribuindo para a formação de agregados mais resistentes à erosão e à degradação física. Esses resultados reforçaram a hipótese anteriormente discutida por Rillig (2004), consolidando a glomalina como um dos principais

mecanismos biológicos pelos quais a micorriza contribui para a sustentabilidade e conservação dos sistemas agrícolas.

Biel et al. (2021), em estudo de campo com redução de irrigação e fertilização, verificaram que a inoculação com fungos micorrízicos arbusculares esteve associada à manutenção da produtividade mesmo com menores doses de água e fertilizantes. Esse achado é particularmente relevante para sistemas agrícolas sujeitos a restrições hídricas e aumento dos custos de insumos, pois demonstra que os FMAs podem contribuir para maior eficiência no uso de recursos produtivos.

Kalamulla et al. (2022) sintetizaram que os FMAs apresentam funções nutricionais e não nutricionais importantes para a sustentabilidade agrícola, incluindo maior absorção de nutrientes, melhoria da estrutura do solo, estímulo ao crescimento vegetal e aumento da tolerância das plantas a estresses ambientais. Essa visão integrada reforça que a associação micorrízica deve ser compreendida como uma tecnologia biológica capaz de articular produtividade, saúde do solo e redução da dependência de insumos externos.

Chowdhary et al. (2025) reforçaram o papel dos fungos micorrízicos arbusculares na adaptação das culturas aos estresses abióticos, como seca, salinidade, alagamento, temperaturas extremas e toxicidade por metais pesados. Assim, a associação micorrízica passa a ser compreendida não apenas como ferramenta de nutrição fosfatada, mas como mecanismo biológico de resiliência vegetal, essencial para sistemas agrícolas expostos às instabilidades climáticas contemporâneas.

Nesse contexto, os fungos micorrízicos arbusculares deixam de ser compreendidos apenas como organismos associados às raízes e passam a ocupar posição estratégica no desenvolvimento de sistemas agrícolas mais eficientes, resilientes e sustentáveis. A integração entre manejo da fertilidade, processos biológicos do solo e inovação biotecnológica aponta para uma nova perspectiva de produção agrícola, na qual a produtividade do feijoeiro é construída não apenas pela aplicação de insumos, mas também pelo aproveitamento inteligente das interações ecológicas naturalmente presentes no ambiente edáfico (Chowdhary et al., 2025).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza bibliográfica, com abordagem qualitativa e finalidade descritiva-exploratória. A escolha por esse delineamento metodológico fundamenta-se na necessidade de reunir, analisar e integrar conhecimentos científicos já consolidados acerca do papel da adubação fosfatada na associação micorrízica arbuscular na cultura do feijoeiro, permitindo a compreensão dos mecanismos biológicos, fisiológicos e agrônômicos envolvidos nessa interação.

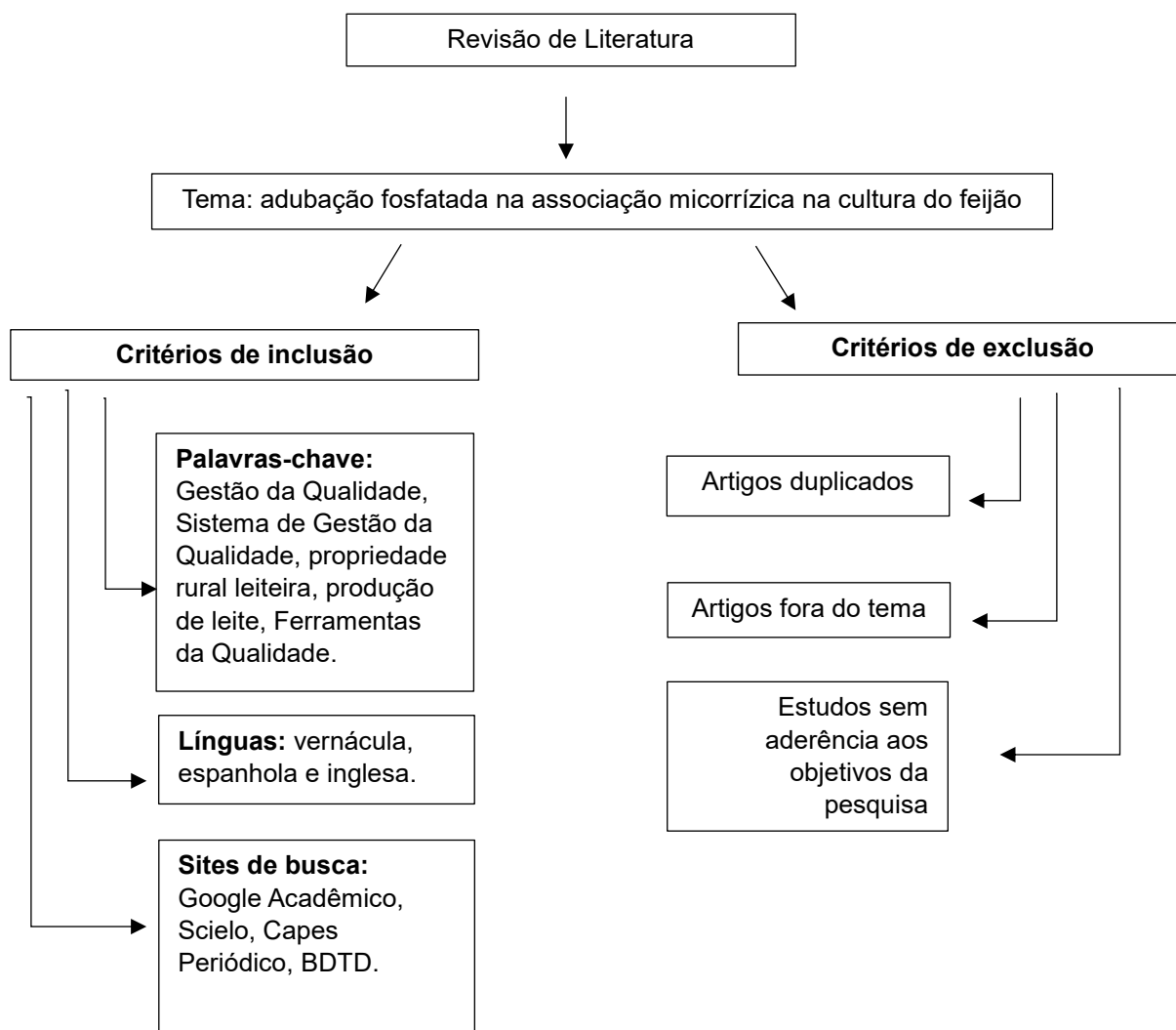
A construção do referencial teórico foi realizada por meio de levantamento bibliográfico em bases de dados científicas nacionais e internacionais reconhecidas pela comunidade acadêmica. As buscas foram conduzidas no Google Acadêmico, *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), Portal de Periódicos CAPES, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), além de periódicos indexados em plataformas de ampla relevância científica. Complementarmente, foram consultados livros, dissertações, teses e documentos técnicos relacionados à fertilidade do solo, microbiologia agrícola, fungos micorrízicos arbusculares e nutrição mineral de plantas.

Para a identificação dos estudos, foram utilizadas combinações de palavras-chave em português e inglês, incluindo os termos: feijão, *Phaseolus vulgaris*, fungos micorrízicos arbusculares, micorriza arbuscular, adubação fosfatada, fósforo, fertilidade do solo, *arbuscular mycorrhizal fungi*, *phosphate fertilization* e *phosphorus availability*. As buscas, realizadas no primeiro semestre de 2026, contemplaram prioritariamente publicações compreendidas entre os anos de 2014 e 2025, embora estudos clássicos anteriores tenham sido incorporados quando considerados fundamentais para a compreensão histórica e conceitual da temática.

Após a etapa de identificação, os materiais foram submetidos a critérios de inclusão e exclusão. Foram incluídos artigos científicos, livros, teses, dissertações e documentos técnicos que apresentassem relação direta com a associação micorrízica, a dinâmica do fósforo no solo, a cultura do feijoeiro e os aspectos de sustentabilidade agrícola. Foram excluídas publicações duplicadas, trabalhos sem acesso ao texto completo e estudos que não apresentavam aderência aos objetivos da pesquisa.

As informações acerca da metodologia utilizada estão sintetizadas através da Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma referente a metodologia



Fonte: Autor (2026).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a escrita desse documento foram utilizados um total de 26 artigos, 4 livros e 1 documento da CONAB que fazia menção a um levantamento de dados de colheita da safra brasileira de grãos. Assim, totalizou-se 31 documentos bases.

4.1 Mecanismos fisiológicos e bioquímicos da associação micorrízica no feijoeiro

A partir da análise da literatura científica, observou-se que o estabelecimento da interação entre fungos micorrízicos arbusculares e raízes vegetais resulta de um processo altamente especializado, regulado por sinais moleculares que coordenam o reconhecimento entre os organismos e viabilizam a formação de estruturas responsáveis pela troca de nutrientes.

Parniske (2008) defende que a associação micorrízica representa uma das mais antigas e bem-sucedidas relações simbióticas da história evolutiva das plantas terrestres, sendo resultado de milhões de anos de coevolução entre fungos e hospedeiros vegetais. Essa perspectiva é complementada por López-Ráez e Pozo (2013), que demonstram que a comunicação inicial entre planta e fungo ocorre por meio da liberação de estrigolactonas pelas raízes, especialmente em condições de baixa disponibilidade de fósforo. Segundo os autores, esses compostos atuam como sinais químicos capazes de estimular a germinação dos esporos fúngicos e direcionar o crescimento das hifas em direção ao sistema radicular.

A interpretação conjunta desses estudos evidencia que a deficiência de fósforo não atua apenas como uma limitação nutricional, mas também como um gatilho fisiológico para o estabelecimento da simbiose. Nesse sentido, Breuils et al. (2020) observam que a escassez do nutriente intensifica a ativação de genes relacionados à sinalização micorrízica, favorecendo a colonização radicular e ampliando a dependência da planta em relação aos mecanismos biológicos de aquisição de fósforo. Tal constatação reforça a existência de uma estreita conexão entre o estado nutricional do hospedeiro e a intensidade da interação simbiótica.

Após o reconhecimento molecular, ocorre a formação dos arbúsculos, estruturas altamente ramificadas localizadas no interior das células corticais das raízes. Para Parniske (2008), essas estruturas constituem o principal centro funcional da simbiose, uma vez que é nesse ambiente que ocorre a troca bidirecional de recursos entre os organismos envolvidos. Enquanto o fungo fornece fósforo e outros nutrientes minerais capturados no solo, a planta disponibiliza compostos carbonados oriundos da fotossíntese, estabelecendo uma relação mutualística baseada na troca equilibrada de recursos.

Smith e Smith (2012) ampliam essa discussão ao demonstrar que grande parte do fósforo absorvido por plantas micorrizadas pode ser transportada por uma via específica induzida pela simbiose, distinta daquela utilizada por plantas não micorrizadas. Segundo os autores, a presença de transportadores especializados na membrana periarbuscular permite que o fósforo capturado pelas hifas seja transferido de forma altamente eficiente para o metabolismo vegetal, aumentando significativamente a capacidade de aquisição do nutriente em solos de baixa disponibilidade.

Os resultados observados na literatura permitem inferir que a eficiência da associação micorrízica não está relacionada apenas à expansão física da área explorada pelas raízes, mas também à ativação de mecanismos moleculares e fisiológicos altamente especializados. Dessa forma, os estudos analisados demonstram que o estabelecimento da simbiose envolve uma complexa rede de sinalização bioquímica, modificações estruturais e sistemas específicos de transporte de nutrientes, permitindo considerar plenamente alcançado o primeiro objetivo específico desta pesquisa.

4.2 Impactos da associação micorrízica sobre crescimento, nutrição mineral e produtividade

A associação micorrízica arbuscular exerce influência direta sobre diversos parâmetros relacionados ao crescimento, à nutrição mineral e à produtividade do feijoeiro. A literatura analisada demonstra que os benefícios decorrentes dessa

interação não se restringem ao aumento da absorção de fósforo, mas abrangem um conjunto de respostas fisiológicas capazes de favorecer o estabelecimento da cultura, o desenvolvimento vegetativo e a formação dos componentes de rendimento.

Smith e Smith (2012) destacam que a principal contribuição dos fungos micorrízicos arbusculares está relacionada à ampliação da eficiência de absorção de nutrientes de baixa mobilidade no solo, especialmente o fósforo. Segundo os autores, a expansão da área efetivamente explorada pelas hifas permite que a planta tenha acesso a reservas nutricionais inacessíveis ao sistema radicular isolado. Essa interpretação é reforçada por Roy et al. (2016), que observaram incrementos significativos no crescimento vegetal em plantas micorrizadas submetidas a condições de limitação nutricional, evidenciando que a associação pode atuar como mecanismo compensatório frente às restrições impostas pelo ambiente edáfico.

Ao analisar especificamente a cultura do feijoeiro, Souza et al. (2016) verificaram que a presença dos fungos micorrízicos favoreceu o desenvolvimento radicular e promoveu maior acúmulo de nutrientes na biomassa vegetal. Os autores argumentam que o aumento da eficiência nutricional proporciona reflexos positivos sobre o vigor inicial das plantas, etapa considerada crítica para a definição do potencial produtivo da cultura. Esse resultado é particularmente relevante para o feijoeiro, uma vez que seu ciclo relativamente curto limita o tempo disponível para a exploração do solo e para a correção de deficiências nutricionais ocorridas nas fases iniciais de desenvolvimento.

Embora os estudos apresentem consenso quanto aos benefícios da associação micorrízica, observa-se que a magnitude das respostas produtivas pode variar em função de fatores como espécie fúngica, cultivar utilizada, condições ambientais e disponibilidade de fósforo no solo. Nesse sentido, Roy et al. (2016) ressaltam que os maiores ganhos tendem a ocorrer em ambientes onde a limitação nutricional representa um fator restritivo ao crescimento vegetal. Tal observação sugere que a eficiência da simbiose não deve ser interpretada como um fenômeno universal e constante, mas como uma resposta biológica dependente das condições de manejo e do contexto produtivo.

Uma abordagem mais abrangente é apresentada por Kalamulla et al. (2022), que associam os efeitos da micorrização não apenas ao aumento da absorção de nutrientes, mas também à melhoria da eficiência fisiológica das plantas. Segundo os autores, culturas micorrizadas frequentemente apresentam maior capacidade

fotossintética, melhor aproveitamento da água disponível no solo e maior equilíbrio metabólico diante de condições adversas. Dessa forma, os benefícios observados sobre a produtividade não decorrem exclusivamente do incremento nutricional, mas da integração de múltiplos mecanismos fisiológicos estimulados pela associação simbiótica.

A análise conjunta dos estudos demonstra que a associação micorrízica exerce papel relevante na promoção do crescimento vegetal, na melhoria da nutrição mineral e no incremento do potencial produtivo do feijoeiro. Entretanto, os resultados também indicam que a magnitude desses benefícios depende das condições ambientais e do manejo adotado, reforçando a necessidade de compreender a micorrização como parte de um sistema integrado de produção. Assim, os achados da literatura permitem considerar alcançado o segundo objetivo específico desta pesquisa, uma vez que evidenciam impactos positivos e consistentes da associação micorrízica sobre o crescimento, a nutrição mineral e a produtividade da cultura do feijão.

4.3 Influência da disponibilidade de fósforo sobre a colonização e eficiência dos fungos micorrízicos arbusculares

A relação entre a disponibilidade de fósforo no solo e o estabelecimento da associação micorrízica arbuscular representa um dos aspectos mais complexos e relevantes da nutrição vegetal em sistemas agrícolas tropicais. Embora tanto a adubação fosfatada quanto a micorrização tenham como consequência o aumento da disponibilidade de fósforo para a planta, a literatura demonstra que essas estratégias não atuam de forma simplesmente complementar. Pelo contrário, existe uma interação dinâmica na qual a concentração de fósforo disponível exerce influência direta sobre a intensidade da colonização micorrízica e sobre a eficiência da simbiose.

Balzerque et al. (2011) defendem que a disponibilidade de fósforo constitui um dos principais fatores reguladores do estabelecimento da associação micorrízica. Segundo os autores, plantas cultivadas sob condições de deficiência fosfatada tendem a intensificar os mecanismos fisiológicos responsáveis pela atração e manutenção dos fungos simbiontes. Essa interpretação é compatível com as

observações de Breuils et al. (2020), que identificaram uma estreita relação entre a limitação de fósforo e a ativação de genes associados à sinalização micorrízica, indicando que a própria deficiência nutricional funciona como um estímulo para o desenvolvimento da simbiose.

Sob essa perspectiva, a micorrização pode ser compreendida como uma resposta adaptativa das plantas à baixa disponibilidade do nutriente. Em ambientes onde o fósforo encontra-se fortemente adsorvido aos constituintes minerais do solo, especialmente em Latossolos e Argissolos altamente intemperizados, os fungos micorrízicos assumem papel estratégico ao ampliar o volume de solo explorado e acessar formas de fósforo inacessíveis ao sistema radicular convencional. Dessa forma, a literatura sugere que a simbiose representa uma alternativa biologicamente eficiente para contornar limitações impostas pela baixa mobilidade do fósforo nos solos tropicais.

Entretanto, a relação entre fósforo e micorriza não ocorre de maneira ilimitada. Sawada et al. (2018) observaram que o aumento da disponibilidade de fósforo promove redução significativa na colonização micorrízica, evidenciando a existência de mecanismos fisiológicos de regulação por parte da planta hospedeira. Esse comportamento corrobora o chamado efeito gangorra discutido anteriormente, no qual a dependência da simbiose diminui à medida que o suprimento do nutriente se torna suficiente para atender às demandas metabólicas da cultura.

Os resultados apresentados por Breuils et al. (2020) reforçam essa interpretação ao demonstrarem que elevados níveis de fósforo disponível reduzem a expressão de genes envolvidos na comunicação entre planta e fungo, diminuindo o investimento fisiológico na manutenção da associação. Nessa condição, a planta passa a priorizar a absorção direta do nutriente pelas raízes, reduzindo progressivamente a necessidade de sustentar uma interação simbiótica que envolve custos energéticos consideráveis.

Essa interpretação é complementada por Smith e Smith (2012), que destacam que a simbiose micorrízica envolve uma relação contínua de troca de recursos. Enquanto o fungo fornece nutrientes minerais, a planta direciona parte significativa dos fotoassimilados produzidos pela fotossíntese para sustentar o crescimento e o metabolismo fúngico. Assim, quando o fósforo encontra-se abundantemente disponível no solo, os benefícios nutricionais proporcionados pela micorriza tornam-

se menos expressivos, reduzindo a vantagem adaptativa da associação para a planta hospedeira.

Contudo, os estudos analisados não indicam que a adubação fosfatada e a micorrização sejam práticas incompatíveis. Pelo contrário, a literatura sugere que o maior potencial agrônomo ocorre em situações de equilíbrio, nas quais a disponibilidade de fósforo é suficiente para sustentar o crescimento da cultura sem atingir níveis capazes de inibir significativamente a atividade dos fungos micorrízicos. Nesse contexto, a associação entre manejo racional da adubação e aproveitamento dos processos biológicos do solo pode resultar em maior eficiência no uso do fósforo e em sistemas produtivos mais sustentáveis.

A análise conjunta dos estudos evidencia que a disponibilidade de fósforo atua simultaneamente como fator de estímulo e de limitação da simbiose micorrízica. Em condições de deficiência, favorece o estabelecimento da associação como mecanismo compensatório de aquisição nutricional; em condições de excesso, reduz a dependência fisiológica da planta em relação ao fungo. Dessa forma, os resultados da literatura permitem concluir que a eficiência da associação micorrízica depende diretamente do equilíbrio entre o suprimento de fósforo e a manutenção dos processos biológicos responsáveis pela colonização radicular, possibilitando considerar plenamente alcançado o terceiro objetivo específico desta pesquisa.

4.4 Contribuições da associação micorrízica para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas

A crescente busca por sistemas produtivos capazes de conciliar produtividade agrícola, viabilidade econômica e conservação ambiental tem ampliado o interesse científico pelas associações micorrízicas arbusculares. A literatura analisada demonstra que os benefícios proporcionados pelos fungos micorrízicos ultrapassam os limites da nutrição vegetal, abrangendo processos relacionados à qualidade do solo, eficiência no uso de recursos naturais, redução da dependência de insumos externos e aumento da resiliência dos agroecossistemas.

Um dos primeiros avanços nessa perspectiva foi apresentado por Rillig (2004), que destacou o papel dos fungos micorrízicos na produção de proteínas associadas à glomalina e sua contribuição para a agregação das partículas do solo. Segundo o autor, a melhoria da estabilidade estrutural favorece a conservação da matéria orgânica, reduz processos erosivos e aumenta a capacidade do solo em armazenar água e nutrientes. Esses resultados ampliaram a compreensão da micorriza para além da absorção de fósforo, inserindo-a no contexto da manutenção da qualidade física dos solos agrícolas.

Complementando essa abordagem, Bedini et al. (2009) demonstraram que diferentes espécies de fungos micorrízicos exercem influência direta sobre a formação e a estabilidade dos agregados do solo. Os autores observaram que a presença dos FMAs contribui para o fortalecimento da estrutura edáfica, favorecendo condições mais adequadas ao desenvolvimento radicular e à atividade biológica. Em conjunto, os resultados de Rillig (2004) e Bedini et al. (2009) evidenciam que a sustentabilidade promovida pelas micorrizas não se restringe à planta hospedeira, mas envolve melhorias estruturais capazes de beneficiar todo o sistema produtivo.

Sob a ótica da eficiência no uso de recursos, Biel et al. (2021) verificaram que a inoculação com fungos micorrízicos arbusculares permitiu a manutenção da produtividade mesmo sob condições de redução da irrigação e da fertilização. Esse resultado sugere que a micorrização pode contribuir para a racionalização do uso de insumos agrícolas, aspecto particularmente relevante diante do aumento dos custos de produção e da crescente preocupação com a conservação dos recursos hídricos.

Uma interpretação mais abrangente é apresentada por Kalamulla et al. (2022), que defendem que os benefícios da associação micorrízica resultam da integração entre múltiplos mecanismos biológicos. Segundo os autores, os FMAs favorecem simultaneamente a absorção de nutrientes, a tolerância a estresses ambientais, a melhoria da estrutura do solo e o equilíbrio ecológico da rizosfera. Essa perspectiva reforça a ideia de que a sustentabilidade agrícola não deve ser compreendida apenas como redução do uso de fertilizantes, mas como a capacidade de utilizar de forma mais eficiente os processos biológicos naturalmente presentes no ambiente.

Já Chowdhary et al. (2025) ampliam essa discussão ao destacar o papel dos fungos micorrízicos diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas. Os autores observaram que plantas associadas aos FMAs frequentemente apresentam maior tolerância a condições de seca, salinidade, temperaturas extremas e outros

estresses abióticos. Nesse sentido, a micorrização deixa de representar apenas uma estratégia de aumento de produtividade e passa a ser compreendida como uma ferramenta biológica de adaptação dos sistemas agrícolas frente às instabilidades ambientais contemporâneas.

Ao analisar conjuntamente os estudos, observa-se que existe consenso quanto à contribuição dos fungos micorrízicos para a construção de sistemas produtivos mais sustentáveis. Entretanto, os autores diferem quanto à ênfase atribuída aos benefícios da associação. Enquanto Rillig (2004) e Bedini et al. (2009) concentram suas análises nos impactos sobre a qualidade física do solo, Biel et al. (2021) destacam a eficiência no uso de recursos produtivos, e Chowdhary et al. (2025) direcionam a discussão para a resiliência climática. Longe de representar uma divergência, essa pluralidade de perspectivas evidencia a amplitude dos efeitos promovidos pelos FMAs nos agroecossistemas.

Dessa forma, os resultados analisados permitem concluir que a associação micorrízica constitui uma importante ferramenta biológica para a promoção da sustentabilidade agrícola. Seus benefícios abrangem desde a melhoria da estrutura do solo e da eficiência nutricional até o aumento da tolerância a estresses ambientais e a redução da dependência de insumos externos. Assim, considera-se plenamente alcançado o quarto objetivo específico desta pesquisa, uma vez que a literatura evidencia contribuições consistentes dos fungos micorrízicos para a sustentabilidade e para a resiliência dos sistemas de produção agrícola.

5 CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

A cultura do feijoeiro apresenta elevada importância econômica, social e alimentar, especialmente em países tropicais como o Brasil. Entretanto, seu desempenho produtivo está diretamente relacionado à disponibilidade de nutrientes no solo, destacando-se o fósforo como um dos elementos mais limitantes ao crescimento e à produtividade da cultura. Em solos tropicais altamente intemperizados, a baixa disponibilidade desse nutriente representa um desafio recorrente para os sistemas produtivos, exigindo estratégias capazes de aumentar a eficiência de sua utilização pelas plantas.

A análise da literatura permitiu verificar que os fungos micorrízicos arbusculares desempenham papel fundamental nesse processo, estabelecendo associações simbióticas capazes de ampliar significativamente a absorção de fósforo e de outros nutrientes de baixa mobilidade no solo. Os estudos analisados demonstraram que a simbiose micorrízica resulta de mecanismos fisiológicos e bioquímicos altamente especializados, envolvendo processos de sinalização molecular, colonização radicular e formação de estruturas específicas responsáveis pela transferência de nutrientes entre fungo e planta.

Em relação aos objetivos propostos, constatou-se que os mecanismos fisiológicos e bioquímicos da associação micorrízica apresentam papel determinante para o estabelecimento e funcionamento da simbiose. Verificou-se ainda que a presença dos fungos micorrízicos favorece o crescimento vegetal, melhora a nutrição mineral e pode contribuir para incrementos de produtividade, especialmente em condições de limitação nutricional. Observou-se também que a disponibilidade de fósforo constitui um dos principais fatores reguladores da colonização micorrízica, uma vez que baixos níveis do nutriente tendem a estimular a associação, enquanto concentrações elevadas podem reduzir a dependência fisiológica da planta em relação ao fungo.

Os resultados evidenciaram ainda que os benefícios da micorrização ultrapassam os aspectos estritamente nutricionais. A literatura demonstra contribuições relevantes para a melhoria da estrutura do solo, aumento da eficiência no uso da água, redução da dependência de fertilizantes minerais e maior tolerância

das plantas a estresses ambientais. Dessa forma, os fungos micorrízicos arbusculares assumem papel estratégico na construção de sistemas agrícolas mais resilientes, eficientes e ambientalmente sustentáveis.

Conclui-se, portanto, que a adubação fosfatada e a associação micorrízica não devem ser compreendidas como estratégias concorrentes, mas como componentes complementares de um mesmo sistema de manejo. O maior potencial agrônomo não está na maximização isolada de uma dessas práticas, mas na busca pelo equilíbrio entre o suprimento adequado de fósforo e a valorização dos processos biológicos do solo. Sob essa perspectiva, a utilização racional da adubação fosfatada associada ao aproveitamento das interações micorrízicas representa uma alternativa promissora para o aumento da eficiência produtiva do feijoeiro e para a promoção da sustentabilidade dos sistemas agrícolas contemporâneos.

Por fim, recomenda-se que futuras pesquisas ampliem o conhecimento sobre a interação entre diferentes espécies de fungos micorrízicos, cultivares de feijoeiro e níveis de fertilização fosfatada, especialmente em condições de campo, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de manejo cada vez mais eficientes e compatíveis com os princípios da agricultura sustentável.

REFERÊNCIAS

- BALZERGUE, Sandrine et al. The regulation of arbuscular mycorrhizal symbiosis by phosphate in pea involves systemic and local signaling pathways. **Lancet Plant Physiology**, v. 156, n. 4, p. 2037-2051, 2011.
- BEDINI, S. et al. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 41, n. 7, p. 1491–1496, 2009.
- BIEL, C. et al. On-farm reduced irrigation and fertilizer doses, and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation improve water productivity in tomato production. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 288, p. 110337, 2021.
- BITOCCHI, Elena et al. Mesoamerican origin of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is revealed by sequence data. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 14, p. E788-E796, 2012.
- BREUILS, Hadrien et al. Phosphorus management in arbuscular mycorrhizal symbiosis: more than a feedback loop. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 13, p. 3843-3855, 2020.
- BRUNDRETT, Mark C.; TEDERSOO, Leho. Evolutionary history of plant-fungus symbioses for nutrient acquisition: from Archean to Present. **New Phytologist**, v. 220, n. 4, p. 1108-1115, 2018.
- CHOWDHARY, P. et al. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in maintaining sustainable agroecosystems under changing climate conditions. **Soil Systems**, Basel, v. 9, n. 1, p. 1-18, 2025.
- COELHO, Patrícia M. et al. Nutritional value and bioactive compounds in common bean cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.) developed in Brazil. **Food Research International**, v. 143, p. 110-124, 2021.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: nono levantamento, safra 2025/2026**. Brasília: Conab, 2026.
- FERRARI, Luan et al. Arbuscular mycorrhizal fungi as a biostimulant tool for mitigating drought stress in common bean crops. **Applied Soil Ecology**, v. 165, p. 104-118, 2021.
- GENRE, Andrea et al. Exploring arbuscular mycorrhizal symbiosis: cell biology and development. **New Phytologist**, v. 225, n. 1, p. 30-36, 2020.
- GEPTS, Paul. The domestication and evolution of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 5, p. 412-424, 2017.

KALAMULLA, R. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable agriculture: strategies for improving crop productivity and environmental sustainability. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 19, p. 12250, 2022.

LÓPEZ-ARREDONDO, Damar L. et al. Phosphate nutrition: improving low-phosphate tolerance in crops. **Annual Review of Plant Biology**, v. 65, p. 95-123, 2014.

LÓPEZ-RÁEZ, Juan Antonio; POZO, María J. Chemical signaling in the rhizosphere: strigolactones and mycorrhizal communication. **Plant Signaling & Behavior**, v. 8, n. 5, e24112, 2013.

MALAVOLTA, Eurípedes. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Ed. UFV, 2006.

MINAMI, Keigo et al. Morphological characterization and growth habits of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars: a review. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 75, n. 4, p. 321-330, 2018.

MOREIRA, Fatima Maria de Souza; SIQUEIRA, Jose Oswaldo. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Ed. UFLA, 2006.

NOVAIS, Roberto Ferreira; SMYTH, Thomas J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Ed. UFV, 1999.

OLIVEIRA, Rodrigo C. et al. Phosphate fertilization efficiency and recovery in contrasting tropical soils under bean cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, e0200045, 2020.

PARNISKE, Martin. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. **Nature Reviews Microbiology**, Londres, v. 6, n. 10, p. 763–775, 2008.

PEIXOTO, Rafael S. et al. Domestication effects on plant-microbe symbioses: how modern breeding shapes rhizosphere signaling in *Phaseolus vulgaris*. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 589-601, 2020.

RILLIG, M. C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 84, n. 4, p. 355–363, 2004.

ROY, Elissa D. et al. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, v. 2, n. 4, p. 1-6, 2016.

SANTOS, Alana G.; RIBEIRO, Nádia D. Socioeconomic importance and food security of common bean production in South America. **Food Security**, v. 14, n. 2, p. 345-358, 2022.

SAWADA, Alan M. et al. Loss of arbuscular mycorrhizal responsiveness in modern crop cultivars under high nutrient inputs. **Plant and Soil**, v. 426, n. 1, p. 145-159, 2018.

SMITH, Sally E.; SMITH, F. Andrew. Fresh perspectives on the roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant nutrition and growth. **Mycologia**, v. 104, n. 1, p. 1-13, 2012.

SOUZA, Francisco Adriano de; SILVA, Eduardo Jorge da; COSTA, Ana Lucia. Eficiência de fungos micorrízicos arbusculares na absorção de fósforo e promoção do crescimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) sob doses de adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, p. 112-125, 2016.

TAIZ, Lincoln et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TEDERSOO, Leho et al. How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. **Science**, v. 367, n. 6480, eaba5043, 2020.

ZILIO, Marcio de Souza et al. Contributions of genetic breeding to the architectural evolution of common bean in Brazil. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 17, n. 3, p. 254-261, 2017.