

SUBMETIDO 27/07/2022

APROVADO 03/11/2022

PUBLICADO ON-LINE 07/11/2022

PUBLICADO 10/07/2024

EDITORA ASSOCIADA

Monaliza Mirella de Moraes Andrade Cordeiro

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2022id7126>

ARTIGO ORIGINAL

Doses de fósforo e fungos micorrízicos arbusculares na cultura do feijão-caupi na Paraíba

RESUMO: O feijão-caupi ou feijão-macassar [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] é conhecido por ser excelente fonte de proteínas, carboidratos, vitaminas e minerais, além de fibras dietéticas e baixa quantidade de gordura. Uma das alternativas para a redução do uso de fertilizantes minerais é a utilização de fungos micorrízicos arbusculares inoculados na semeadura das sementes. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos do fungo micorrízico arbuscular, *Gigaspora margarita*, no crescimento e desenvolvimento do feijão-caupi em resposta a doses de fósforo. O experimento, constituído de sete tratamentos (dois sem inoculação e cinco inoculados e com doses de fósforo), foi desenvolvido entre os meses de março e junho de 2021, no Instituto Federal da Paraíba, Campus Cabedelo. O delineamento experimental foi em blocos casualizados e quatro repetições por tratamento. As variáveis analisadas foram altura e diâmetro dos caules, número de lançamentos foliares, matéria seca de parte aérea, raízes e vagens, teores de nutrientes nos grãos e nas folhas, além de análise microscópica da colonização radicular. Constatou-se a contribuição do *Gigaspora margarita* em promover o crescimento e desenvolvimento do feijão-caupi quando as plantas foram adubadas com 50% da dose de fósforo recomendada, o que pode significar economia em termos de adubação fosfatada para o pequeno agricultor.

Palavras-chave: adubação fosfatada; feijão-macassar; *Gigaspora margarita*; micorrizas.

Doses of phosphorus and arbuscular mycorrhizal fungi in cowpea cultivation in Paraíba

ABSTRACT: Cowpea or macassar beans [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] is known to be an excellent source of protein, carbohydrates, vitamins and minerals, in addition to dietary fibers and low amounts of fat. One of the alternatives to reduce the use of mineral fertilizers is the use of arbuscular mycorrhizal fungi inoculated at the time of seeds sowing. The objective of this

 Patricia Fabian de Araújo Diniz ^{[1]*}

 Gabriel Cavalcante da Silva ^[2]

 Nathalia Alves da Silva ^[3]

 Adailson Pereira de Souza ^[4]

[1] patricia.diniz@ifpb.edu.br

[2] silva.cavalcante@academico.ifpb.edu.br

[3] nathaliaalvesbio27@gmail.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Campus Cabedelo, Brasil

[4] adailson@cca.ufpb.br

Departamento de Solos e Engenharia Rural, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil

*Autor para correspondência.

study was to evaluate the effects of the arbuscular mycorrhizal fungus, *Gigaspora margarita*, on the growth and development of cowpea in response to phosphorus doses. The experiment, consisting of seven treatments (two without inoculation and five inoculated and with doses of phosphorus), was carried out between March and June 2021, at the Federal Institute of Paraíba, Cabedelo campus. The experimental design was in randomized blocks and four replications per treatment. The variables analyzed were stem height and diameter, number of foliar shoots, dry matter of stems, roots and pods, nutrients contents in grains and leaves, in addition to microscopic analysis of root colonization. The contribution of *Gigaspora margarita* in promoting the growth and development of cowpea was verified when the plants were fertilized with 50% of the recommended dose of phosphorus, which can mean savings in terms of phosphate fertilization for the small farmers.

Keywords: *Gigaspora margarita*; macassar beans; mycorrhizae; phosphate fertilization.

1 Introdução

O feijão-caupi, feijão-de-corda ou feijão-macassar [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] é uma espécie de origem africana introduzida no Brasil no final do século XVI (Freire Filho, 2016). Além de ser uma excelente fonte de proteínas, aminoácidos essenciais, carboidratos, vitaminas e minerais, ele apresenta ainda grande quantidade de fibras dietéticas e baixa quantidade de gordura.

A espécie apresenta-se como um alimento de elevadas qualidades nutricionais para a população brasileira, em especial as populações rurais e urbanas das regiões norte e nordeste do país. Além disso, o feijão-caupi possui ciclo de vida curto, baixa exigência hídrica, além de rusticidade para se desenvolver em solos de baixa fertilidade (EMBRAPA, 2017).

O feijão-caupi é o segundo tipo mais cultivado no país (CNA/SENAR, 2020). A produção total de feijão no Brasil para a safra 2020/21 foi estimada em 2,86 milhões de toneladas, 11,4% menor que a safra de 2019/20. Essa redução aconteceu devido à seca nas principais regiões produtoras. Desse total, 625,2 mil toneladas foram de feijão-caupi. Na Paraíba, a cultura tem grande relevância, possuindo uma expressiva área de cultivo – em torno de 73,7 hectares semeados –, sendo que, no geral, a expectativa de produção é na ordem de 27,6 mil toneladas (CONAB, 2021).

Ressalta-se que, apesar de o Brasil figurar como terceiro produtor mundial de feijão-caupi, a produtividade média brasileira é considerada extremamente baixa (Santos *et al.*, 2014). Essa baixa produtividade pode decorrer de cultivos em solos de baixa fertilidade e manejo inadequado, uma vez que a espécie é cultivada, quase sempre, como cultura de subsistência, com baixo nível tecnológico.

Para o incremento da cultura, a utilização de fertilizantes no solo é uma prática comum, sendo que o uso deles representa um custo maior para as culturas, além de esbarrar nas questões ambientais, uma vez que o seu uso indiscriminado está associado a uma gama de problemas ambientais. A utilização inadequada dos insumos químicos ocasiona impactos ambientais, como lixiviação, contaminação do lençol freático, eutrofização de cursos-d'água, sendo que as atividades agrícolas, entre outras, têm ocasionado a alteração da dinâmica do fósforo no meio ambiente (Quevedo; Paganini, 2011).

Segundo Melo (2016), o fósforo, apesar de ser extraído pelo feijão-caupi em quantidade não muito elevada, é o principal nutriente limitante da produção de grãos da cultura. Como a maioria dos solos das regiões produtoras de feijão-caupi apresentam baixos teores de fósforo disponível, o agricultor utiliza a adubação química para aumentar sua produção.

Uma alternativa para melhoria da nutrição fosfatada de culturas, a exemplo do feijão-caupi, seria a utilização de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), os quais podem auxiliar na redução do uso de insumos (fertilizantes e pesticidas), melhorar a qualidade e estrutura do solo e estimular o desenvolvimento das plantas, por aumentar a área de absorção de água e nutrientes (Nonato *et al.*, 2020). Além disso, o fungo ocasiona uma indução de tolerância ou resistência das plantas a metais pesados, contribuindo também para reduzir incidência de doenças em plantas de interesse econômico (Martins; Melloni; Melloni, 2017).

Os nutrientes são transferidos para as plantas por meio de estruturas fúngicas intracelulares denominadas arbúsculos. Os arbúsculos são hifas que se diferenciam dentro das raízes, são efêmeros e disponibilizam nutrientes minerais para a planta, a qual transfere fotossintatos para o fungo, enquanto as vesículas, que também se formam a partir das hifas, atuam como estruturas de reserva energética para o fungo (Müller *et al.*, 2017).

Inoculantes de FMAs são recomendados para solos com baixa fertilidade e pobres em nutrientes, especialmente aqueles escassos em fósforo (P), a fim de auxiliar na captação e transporte de nutrientes para a planta, conforme já relatado. Contudo, inoculações não são bem-sucedidas em solos muito férteis ou submetidos a adubações pesadas; nestes, mesmo que a micorriza se estabeleça, os benefícios para a planta serão reduzidos (Moreira; Siqueira, 2006). Silva *et al.* (2018), trabalhando com mudas de *Calophyllum brasiliense* Camb. submetidas a doses crescentes de fósforo e fungos micorrízicos arbusculares, observaram maior colonização micorrízica em doses menores de fósforo.

Com o agravamento dos problemas ocasionados pelo uso indiscriminado de fertilizantes, têm-se buscado alternativas que possam reduzir os impactos ambientais negativos advindos de tais práticas. A utilização e o manejo dos microrganismos do solo em sistemas agrícolas vêm se mostrando uma prática viável há muito tempo, contribuindo significativamente para aumentar a produção e manter a sustentabilidade das propriedades rurais.

O feijão-caupi tem grande importância socioeconômica para a alimentação das populações do nordeste brasileiro, embora o pequeno agricultor nordestino não possua, muitas vezes, a orientação adequada quanto à utilização de tecnologias alternativas ao uso de adubação mineral, o que o leva a utilizar adubos, muitas vezes sem qualquer orientação acerca desse uso, como também do manejo adequado dos solos.

Dessa forma, são de grande relevância as pesquisas que possam contribuir de forma significativa para um maior esclarecimento quanto à importância do uso das técnicas de inoculação de fungos micorrízicos arbusculares como elemento fundamental para o desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável, preservando o meio ambiente e desonerando a produção.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos do FMA *Gigaspora margarita* para o crescimento (altura e diâmetro dos caules, matéria seca de raízes, partes aéreas e vagens, número de lançamentos foliares) do feijão-caupi em resposta aos níveis de fósforo (P) no solo. Além do exposto acima, o trabalho teve também como objetivo determinar os teores de nutrientes minerais em folhas e grãos, além da presença ou ausência de estruturas fúngicas no córtex radicular.

Considerando-se os baixos teores de fósforo para o feijão-caupi nas regiões produtoras, o presente estudo, em sua seção 2, preocupou-se em apresentar a caracterização do solo da região onde o feijão foi coletado, enfatizando as formas de preparo desse solo para receber as sementes do feijão em estudo, de acordo com os tratamentos propostos. Além disso, o trabalho apresentou as análises devidas para se avaliar, de forma objetiva e clara, os benefícios do fungo *Gigaspora margarita* para o vegetal, assim como os danos ocasionados pela baixa fertilização fosfatada. Na seção 3, são apresentados os resultados e suas discussões; nela se discutem os ganhos propiciados pela inoculação micorrízica para o feijão-caupi, evidenciando em ilustrações a colonização micorrízica radicular das plantas inoculadas. Por fim, na seção 4, são apresentadas as conclusões da pesquisa.

2 Método da pesquisa

O experimento foi conduzido entre os meses de março e junho de 2021 no Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Campus Cabedelo. O solo utilizado foi coletado em local sem histórico de adubação, situado em Tabatinga, no município do Conde, estado da Paraíba, com coordenadas geográficas 7°19'01"S e 34°48'20"O. O município do Conde está acima do nível do mar, com clima tropical e temperatura média anual em torno de 25,6 °C (Climate-Data.org, 2021).

O solo utilizado para o plantio das sementes do feijão-caupi foi classificado como solo de textura franco-arenosa (756, 108 e 136 g.kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente), segundo caracterização física e química (Tabela 1) realizada no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, Campus II, em Areia (PB).

Tabela 1 ►

Características químicas do solo.

Fonte: dados da pesquisa

pH	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	H ⁺ + Al ⁺³	MO
H ₂ O	mg/dm ³			cmol _c /dm ³				g/kg
5,3	4,9741	0,16	0,10	1,43	0,6	0,10	5,3	9,61

P, K, Na - Extrator Mehlich 1; H+Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 M, pH 7,0; Al, Ca, Mg - Extrator KCl 1 M e MO - Matéria Orgânica - Walkley-Black.

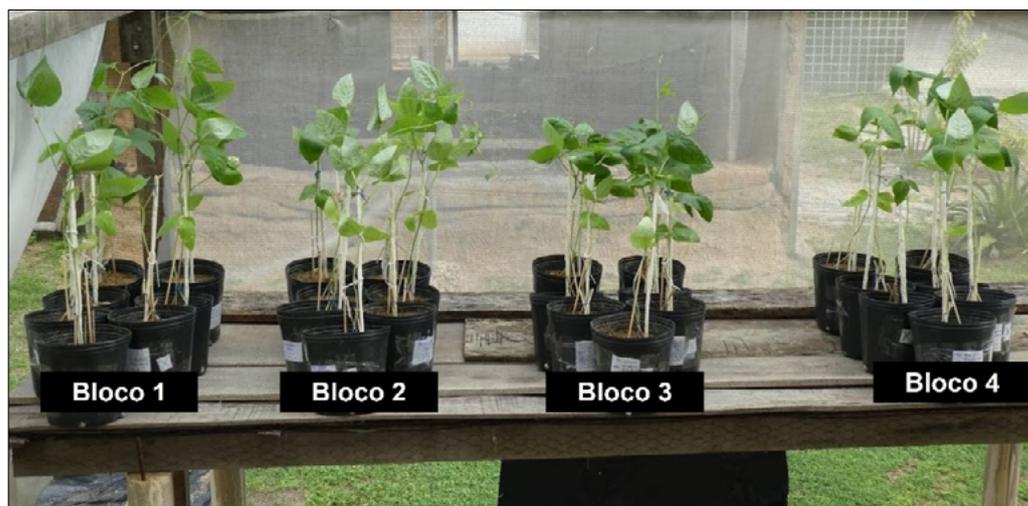
Os tratamentos foram distribuídos em quatro blocos casualizados (Figura 1), sendo que cada bloco continha um vaso de cada tratamento, totalizando, assim, sete tratamentos em cada bloco:

- Tratamento 1: SM0P – sem micorriza e sem fósforo;
- Tratamento 2: SM100P – sem micorriza e com 100% de fósforo;
- Tratamento 3: CM0P – com micorriza e 0% de fósforo;
- Tratamento 4: CM25P – com micorriza e 25% de fósforo;
- Tratamento 5: CM50P – com micorriza e 50% de fósforo;
- Tratamento 6: CM75P – com micorriza e 75% de fósforo;
- Tratamento 7: CM100P – com micorriza e 100% de fósforo.

Figura 1 ▶

Distribuição dos tratamentos entre os blocos.

Fonte: arquivo dos autores



O solo recebeu adubação nitrogenada e potássica nas doses de 15 e 30 kg.ha⁻¹, respectivamente. A adubação fosfatada foi fornecida obedecendo-se aos tratamentos propostos, com os tratamentos SM100P e CM100P (sem micorrizas e 100% de P e com micorrizas e 100% de P, respectivamente) recebendo 80 kg.ha⁻¹, e os demais tratamentos de inoculação recebendo entre 0% e 75% do fósforo (Tabela 2).

Tabela 2 ▶

Quantidade de fertilizante correspondente aos tratamentos.

Fonte: dados da pesquisa

Tratamento	P e N (MAP)	N (ureia)	K (KCl)
	g.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹
SM0P	0	0	0
SM100P	0,0656	0	0,025
CM0P	0	0,0166	0,025
CM25P	0,0164	0,0122	0,025
CM50P	0,0328	0,008	0,025
CM75P	0,0492	0,036	0,025
CM100P	0,0656	0	0,025

MAP - fosfato monoamônico

O inoculante do fungo micorrízico arbuscular utilizado no experimento, cuja espécie selecionada foi a *Gigaspora margarita*, linhagem A41, foi obtido no Centro de Recursos Biológicos Johanna Dobereiner (CRB-JD), da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Agrobiologia, na cidade de Seropédica, estado do Rio de Janeiro (RJ). As sementes do feijão-caupi (cultivar BRS Tumucumaque) foram obtidas no Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), localizado em Recife.

A inoculação do solo em cada vaso foi realizada depositando-se 2,13 g do inóculo *Gigaspora margarita*, o qual forneceu aproximadamente 100 esporos, no fundo do sulco de semeadura (5 cm de profundidade). Sobre o inóculo foram depositadas três sementes da variedade BRS Tumucumaque. As sementes inoculadas foram cobertas

com solo. Após 20 dias, foi realizado o desbaste das plantas, deixando-se apenas um indivíduo por vaso.

Os vasos de cultivo foram irrigados diariamente, mantendo-se a umidade e tendo-se o cuidado de evitar a contaminação entre os recipientes de cultivo e de não permitir a lixiviação dos adubos através dos vasos. Ressalta-se que o sistema de drenagem foi mantido aberto e a irrigação foi feita de forma cuidadosa, a fim de evitar extravasamento de água dos vasos. Todo o experimento foi conduzido por um período de 76 dias, contados da inoculação e semeadura.

As características avaliadas foram: altura do caule (do colo ao meristema apical do caule) e diâmetro do caule (a uma distância de 2 cm da superfície do solo, utilizando-se um paquímetro analógico), número de lançamentos foliares, matéria seca de parte aérea e raiz, peso seco de vagens, teores de nutrientes nas folhas e nos grãos, além de avaliação visual da colonização micorrízica.

As folhas diagnósticas para avaliação dos teores de nutrientes nitrogênio, fósforo e potássio (N, P e K, respectivamente) foram coletadas no início da floração. As análises de nutrientes nas folhas e nos grãos foram realizadas no Laboratório de Análise de Tecidos de Planta, da Universidade Federal da Paraíba, Campus II. A colonização micorrízica foi avaliada segundo o método de Philips e Hayman (1970). As raízes finas foram lavadas em água corrente e mergulhadas em solução de 10% de hidróxido de potássio (KOH) a 90 °C por 1 hora. O KOH foi removido e as raízes lavadas em água (2-3 vezes). Posteriormente, as raízes foram mergulhadas em solução de ácido clorídrico (HCl) a 1% por 5 minutos. Após esse procedimento, as raízes foram mergulhadas em solução 0,05% de azul de tripano em glicerol acidificado (0,5 g/L) por 24 horas. A solução corante foi descartada após a coloração e as raízes foram guardadas em solução de glicerol acidificado à temperatura ambiente. As partes aéreas, raízes e vagens foram secas em estufa de ventilação forçada a 50 °C durante 72 horas, para obtenção do peso seco. A avaliação da colonização foi realizada através de microscopia ótica, com aumento de 400 vezes, sendo obtidas fotomicrografias.

Foi utilizado o software R para as análises estatísticas. Para o teste de homogeneidade de variâncias, foi utilizado o teste Fligner-Killeen. Ao se constatar que as variáveis analisadas não apresentaram homogeneidade de variâncias, foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis e, posteriormente, foi utilizado o teste *pos hoc* de Dunn.

3 Resultados e discussão

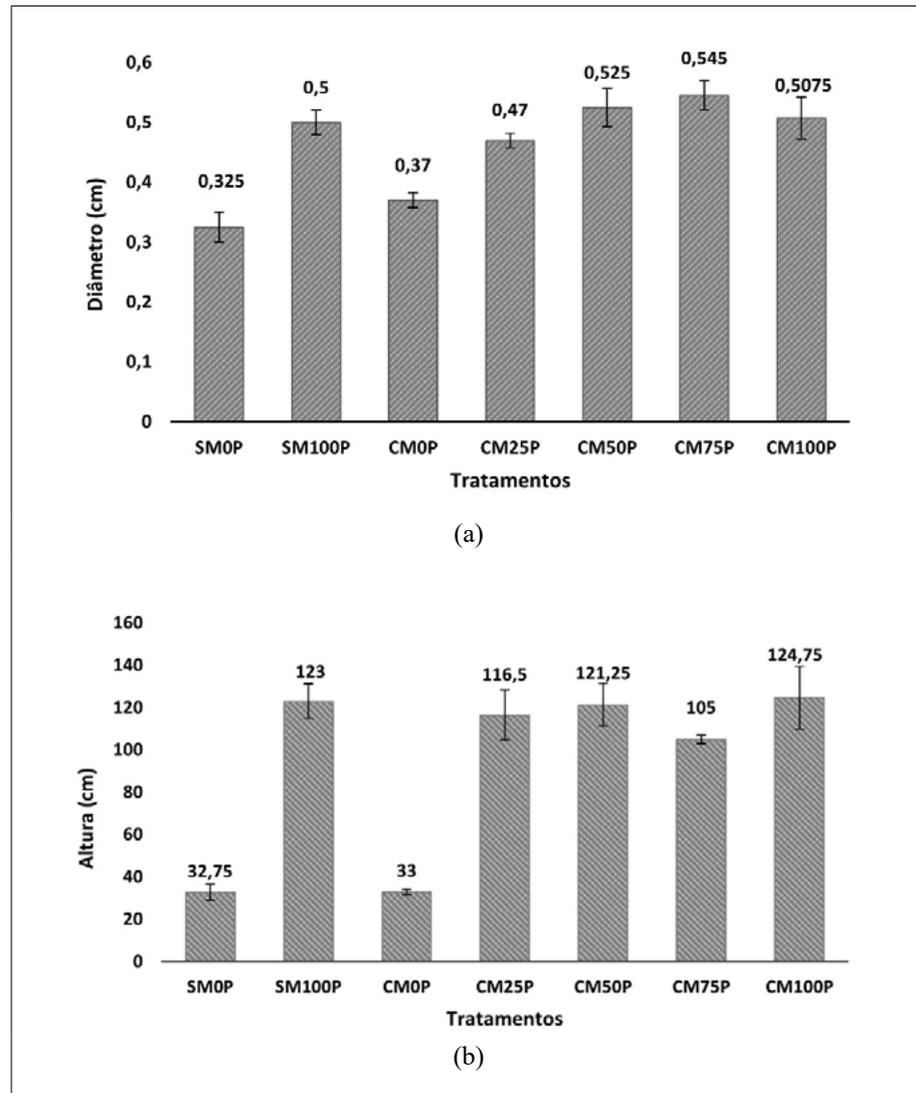
Para as variáveis analisadas, observou-se diferença entre os tratamentos (teste Kruskal-Wallis, $p < 0,01$). As análises *pos hoc* indicaram, para todas as variáveis, que os tratamentos SM0P e CM0P não diferiram entre si e diferiram de todos os demais (teste de Dunn, $p < 0,05$). Não houve diferença estatística entre SM0P e CM0P (teste de Dunn, $p > 0,05$) e entre SM100P, CM25P, CM50P, CM75P e CM100P (teste de Dunn, $p > 0,05$).

As Figuras 2a e 2b (próxima página) mostram a variação do diâmetro e da altura dos caules em virtude da micorrização e da adubação fosfatada.

Figura 2 ▶

Diâmetro (a) e altura (b) dos caules do feijão-caupi.

Fonte: dados da pesquisa



Constata-se que a adubação fosfatada é importante para o crescimento da planta quando se comparam os tratamentos SM100P e SM0P. Também se observa a importância do fósforo ao analisar o tratamento CM0P, o qual, embora contendo inóculos, não mostrou desenvolvimento satisfatório. No entanto, observando-se as Figuras 2a e 2b, percebe-se que a micorrização foi efetiva em promover o crescimento das plantas mesmo com uma baixa adubação fosfatada (CM25P). Os tratamentos inoculados se desenvolveram tanto quanto o tratamento que recebeu apenas a adubação fosfatada recomendada (SM100P).

A não diferença estatística significativa entre os tratamentos SM100P, CM25P, CM50P, CM75P e CM100P (teste de Dunn, $p > 0,05$) pode ser indicativo da eficiência do *Gigaspora margarita* em promover o crescimento da parte aérea do feijão-caupi. A contribuição do fungo para o crescimento da planta pode não se dever apenas à captação de P: de acordo com Fitze *et al.* (2005), fitormônios como auxinas e citocininas, liberadas pelo fungo ou pela própria planta, por indução do fungo, podem também estimular o crescimento da planta.

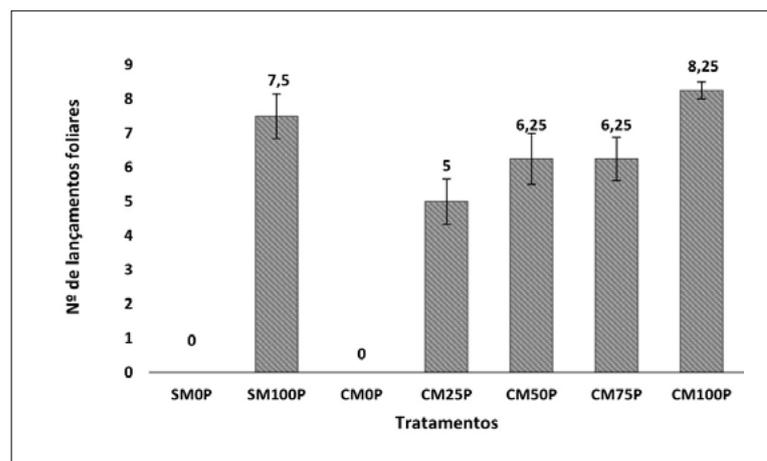
As plantas do tratamento SM0P cresceram em solo sem adubação fosfatada e sem inóculos e, portanto, mostraram crescimento reduzido e comprometido, assim como as plantas do tratamento CM0P, que, embora inoculadas, também não receberam fósforo. Ambos os tratamentos apresentaram caules frágeis, os quais sofreram quebra precoce próximo ao ápice, não se desenvolvendo. Segundo Vicelli (2017), a ausência de fósforo leva ao retardo no crescimento e a caules atrofiados, deixando a planta com sintomas de raquitismo severo.

Os tratamentos SM100P, CM50P, CM75P e CM100P não mostraram diferença estatística entre si, exibindo diâmetros de caules de 0,5 mm, 0,525 mm, 0,545 mm e 0,5075 mm, respectivamente. Os menores diâmetros de caules são observados nos tratamentos que não receberam fósforo. Um maior incremento nos caules indica possível contribuição do FMA nos tratamentos com menores doses de P. Percebe-se que o uso de 50% de fósforo já pode contribuir para o incremento dos caules.

Soares *et al.* (2012), trabalhando com mudas de jenipapeiro inoculadas com FMAs da espécie *G. etunicatum*, encontraram aumentos de 63,6% no diâmetro do caule, quando comparados às mudas não inoculadas. Segundo Mencuccini *et al.* (2019), caules de maior diâmetro podem implicar em maior circulação de seiva, transpiração, produção e acúmulo de matéria seca nas folhas.

Quanto ao número de lançamentos foliares, não houve diferença estatística entre SM0P e CM0P e entre SM100P, CM25P, CM50P, CM75P e CM100P (Figura 3).

Figura 3 ►
Número de lançamentos foliares.
Fonte: dados da pesquisa



Observa-se que os tratamentos SM0P e CM0P não exibiram folhas ao fim de 76 dias de experimento. As folhas que surgiram no início logo atrofiaram e caíram em virtude dos caules atrofiados precocemente. Os tratamentos CM25P, CM50P e CM75P mostraram números de lançamentos foliares aumentando à medida que se aumentou a dose de fósforo, enquanto os tratamentos SM100P e CM100P exibiram quantidades maiores de folhas, indicando a importância do fósforo para a produção de biomassa vegetal. Observando-se o tratamento CM25P e o tratamento SM0P, pode-se inferir que o ganho em lançamentos foliares para aquele tratamento pode se dever à presença do fungo micorrízico, uma vez que o teor de fósforo é baixo (25%). O fungo pode ter sido eficiente em promover maior emissão e crescimento de folhas também nos demais tratamentos inoculados. Uma maior área foliar resulta em maior captação de energia luminosa, o que pode levar a taxas de fotossíntese maiores e, conseqüentemente, maior produção de biomassa (Zhang *et al.*, 2017).

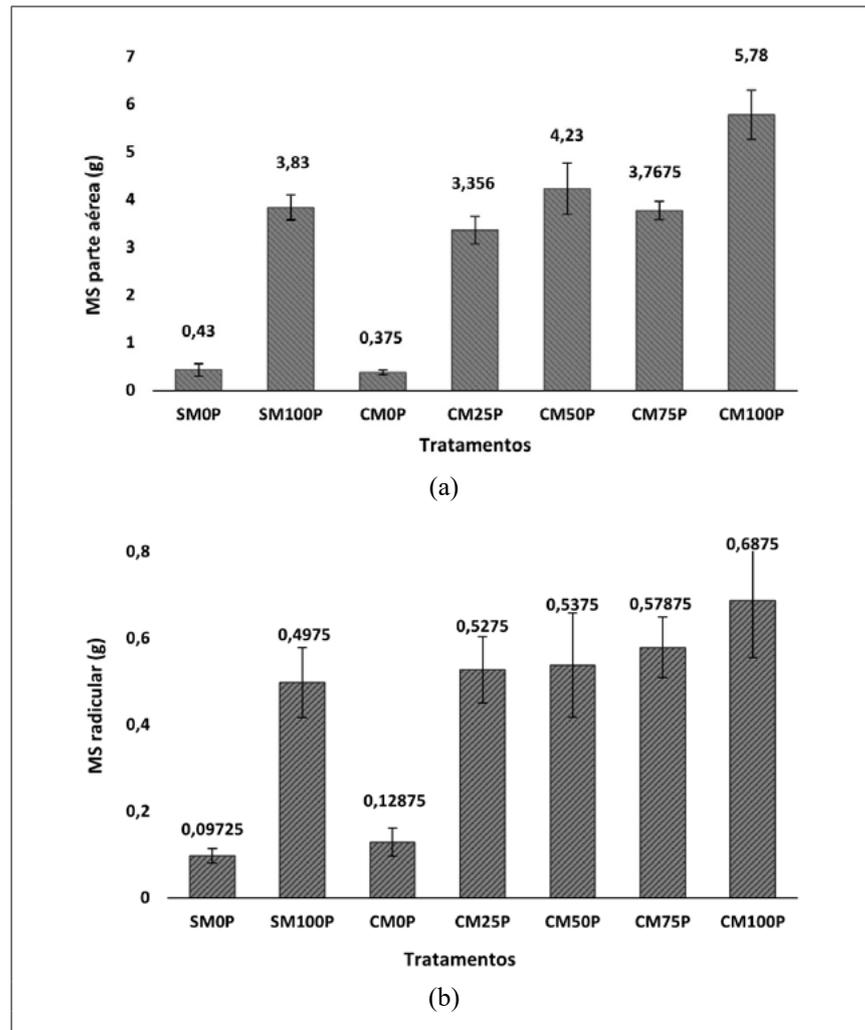
O tratamento CM100P exibiu a maior quantidade de folhas (10% a mais que o tratamento SM100P), o que pode ter ocorrido devido a uma melhor captação e translocação de P para a planta por parte do fungo. De acordo com Silva (2018), o fósforo atua na maioria das transformações energéticas da planta, inclusive em translocação de fotoassimilados entre folhas e órgãos de armazenamento. Rocha (2016) aborda a participação do P na formação da molécula de ATP (trifosfato de adenosina), a qual é de extrema importância em todo o metabolismo da planta, incluindo sua produção de biomassa.

Givnish (2002) afirma que é necessário o investimento em recursos primários para a construção de novas folhas, os quais, de acordo com Maathuis (2009), incluem o

fósforo. Assim, de maneira indireta, a ausência de P afeta, de forma negativa, o número e o tamanho das folhas, o que reduz a área foliar necessária para a captação de radiação utilizada na fotossíntese. Cultivando soja com micorrizas, Vieira *et al.* (2015) perceberam que a interação P e FMA foi eficiente para aumentar o número de lançamentos foliares da planta.

Observa-se que as plantas dos tratamentos SM0P e CM0P exibem os menores valores para matéria seca de parte aérea e matéria seca de raiz, não diferindo estatisticamente entre si (Figura 4a e Figura 4b). Isso está de acordo com os outros parâmetros avaliados, uma vez que todas as plantas desses tratamentos atrofiaram precocemente.

Figura 4 ►
Matéria seca da parte aérea (a) e da raiz (b).
Fonte: dados da pesquisa



Os tratamentos SM100P, CM25P, CM50P e CM75P mostraram valores inferiores ao tratamento CM100P para a variável matéria seca da parte aérea. Esse incremento (cerca de 50% em relação ao tratamento SM100P) na matéria seca de parte aérea das plantas micorrizadas e adubadas com 100% da dose recomendada de fósforo está de acordo com outros dados obtidos para esse tratamento (altura, lançamentos foliares). O fungo *Gigaspora margarita* se mostrou eficiente na presença da maior dose de fósforo fornecida, promovendo maior massa seca de parte aérea.

Cruz *et al.* (2017), trabalhando com feijão-caupi inoculado com *Scutellospora heterogama* e *Glomus clarum* em doses variáveis de fósforo, demonstraram que *S. heterogama* propiciou aumentos de 48% na matéria seca da parte aérea, quando comparado com os tratamentos sem inoculação.

Para Silva (2018), a falta de fósforo ou sua deficiência compromete a formação do sistema radicular, prejudicando a absorção de água e nutrientes pelas plantas. Assim, uma planta com deficiência de fósforo pode ter a parte aérea afetada em virtude do prejuízo de suas raízes. Isso está de acordo com os dados obtidos para matéria seca radicular, a partir dos quais se observa que as plantas cultivadas sem fósforo exibem baixo crescimento do sistema radicular, enquanto as plantas que recebem adubação fosfatada mostram ganhos em matéria seca de raiz.

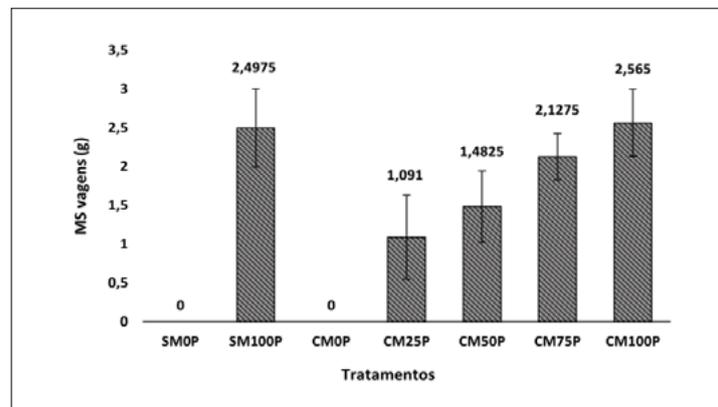
Entretanto, observa-se que os tratamentos inoculados – apesar de não haver diferença estatística entre eles e o tratamento SM100P – exibem um maior incremento de raízes, em especial o tratamento inoculado e com 100% da dose recomendada de fósforo (incremento de cerca de 38% em relação a SM100P), o qual também exibiu maior desenvolvimento da parte aérea, incluindo número de folhas.

Karikari, Arkorful e Addy (2015) observaram um crescimento significativo do feijão-caupi em virtude de adubação fosfatada. Ao trabalhar com omissão de fósforo em solução nutritiva, Alves *et al.* (2008) verificaram a paralisação de crescimento das raízes, o que, para Karikari, Arkorful e Addy (2015), afeta diretamente as funções da planta. Esse fato acontece porque o nutriente é responsável por desencadear uma série de atividades metabólicas que vão desde a formação dos nucleotídeos à síntese proteica (Mengel *et al.*, 2001), o que leva ao comprometimento de todo o desenvolvimento do vegetal.

Ao analisar a Figura 5, observa-se que os tratamentos em ausência de fósforo não produziram vagens, o que também está de acordo com os outros parâmetros avaliados, indicando a importância do fósforo para o desenvolvimento e a frutificação do feijão-caupi.

Figura 5 ►

Matéria seca das vagens.
Fonte: dados da pesquisa



O tratamento CM100P exibe o maior valor para matéria seca de vagens, seguido do tratamento SM100P, indicando a importância do fósforo para a produção de frutos. Observa-se que, à medida que o teor de fósforo diminui no substrato, a matéria seca das vagens também diminui. Para a variável matéria seca de vagens, foi feito um modelo linear generalizado (GLM, $p < 0,01$, $R^2 0,72$), mostrando que a concentração de P tem uma forte influência na produção de massa de vagens. Dessa forma, a presença do fungo parece não contribuir para um aumento de produtividade dos frutos, exceto quando se tem uma dose adequada de P, o que se observou no tratamento CM100P.

Coutinho *et al.* (2014), trabalhando com doses variadas de P em feijão-caupi, observaram que o número de vagens por planta foi influenciado pelas doses de P, possivelmente, pelo fato de P estimular o desenvolvimento da raiz, favorecendo a formação de frutos, o que favorece a produção de maior quantidade de grãos e de melhor qualidade.

Para as variáveis teores de nutrientes nos grãos e nas folhas, indicadas na Figura 6, observa-se que, novamente, não houve diferença estatística entre SM0P e CM0P (teste de Dunn, $p > 0,05$)

e entre SM100P, CM25P, CM50P, CM75P e CM100P (teste de Dunn, $p > 0,05$). A Figura 6a, a Figura 6b e a Tabela 3 ilustram os teores de nutrientes nos grãos e nas folhas, a partir dos quais se pode observar que, embora as plantas CM100P tenham exibido maior matéria seca de raízes, da parte aérea, de vagens e maior produção de folhas, as plantas CM50P mostraram teores ligeiramente maiores de N, P e K nos grãos, superando o tratamento SM100P.

Figura 6 ▶

Teores de nutrientes nos grãos (a) e nas folhas (b).

Fonte: dados da pesquisa

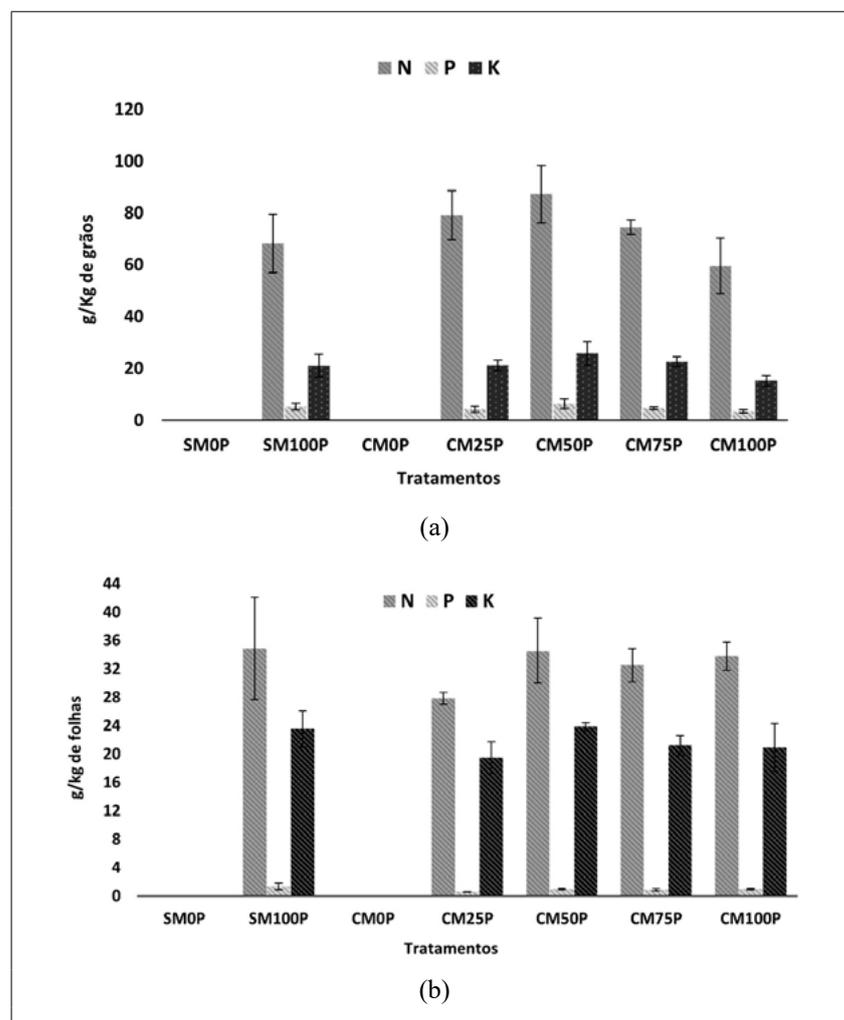


Tabela 3 ▶

Teores de nutrientes nos grãos e nas folhas (os valores correspondem à média de 4 repetições).

Fonte: dados da pesquisa

Tratamento	Teores de nutrientes (g.kg^{-1})					
	Grãos			Folhas		
	N	P	K	N	P	K
SM0P	0	0	0	0	0	0
SM100P	68,8	5,1	21,0	34,9	1,3	23,5
CM0P	0	0	0	0	0	0
CM25P	79,0	4,1	21,2	27,8	0,6	19,5
CM50P	87,4	6,2	25,7	34,5	0,9	23,8
CM75P	74,5	4,5	22,7	32,5	0,8	21,2
CM100P	59,4	3,4	15,1	33,8	0,9	20,9

Esse incremento em N, P e K nos grãos pode se dever à presença do fungo micorrízico. Os tratamentos SM0P e CM0P não produziram nenhuma vagem e, portanto, nenhum grão, uma vez que tiveram seus caules atrofiados.

A composição mineral dos grãos é importante não só para a alimentação, mas também para a germinação das sementes. Um aspecto significativo é a remobilização de nutrientes para a formação de raízes e parte aérea, enquanto a absorção de nutrientes minerais do solo é insuficiente (Parry; Kato; Carvalho, 2008).

As plantas dos tratamentos SM0P e CM0P não produziram folhas devido à atrofia dos caules, conforme já relatado. Observa-se pela Figura 6b e pela Tabela 3 que o tratamento CM50P mostrou um discreto aumento de N, P e K quando comparado aos outros tratamentos inoculados, embora ficando abaixo do tratamento SM100P. Esse incremento de N, P e K nas folhas pode se dever a um melhor desempenho do fungo *Gigaspora margarita* em presença de 50% da dose recomendada de P.

As Figuras 7a, 7b, 7c, 7d e 7e ilustram as raízes das plantas dos tratamentos inoculados exibindo estruturas fúngicas (arbúsculos, vesículas e hifas) no córtex radicular.

Figura 7 ▶

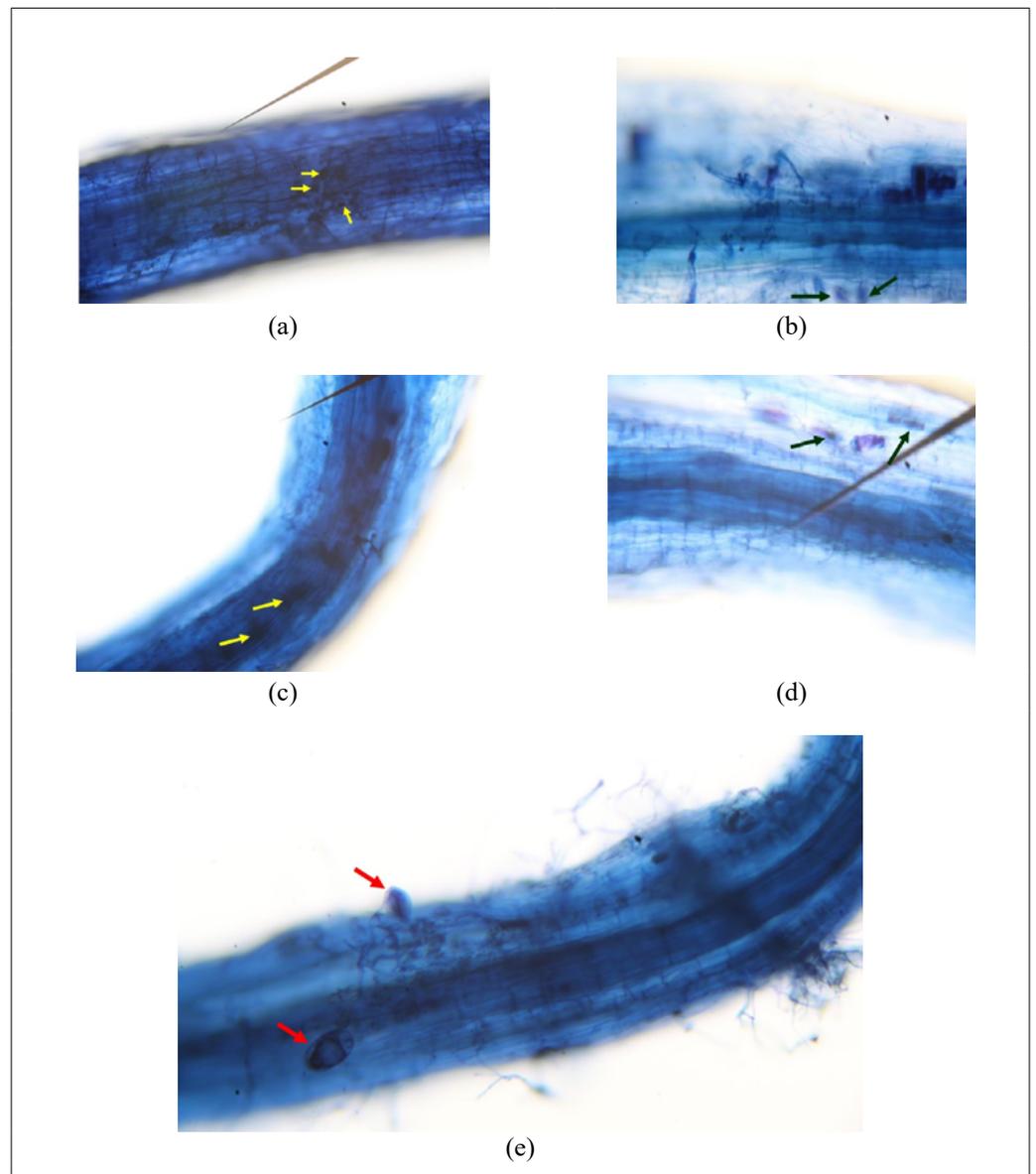
Fotomicrografias de estruturas fúngicas presentes em raízes finas de plantas de feijão-caupi inoculadas com *Gigaspora margarita*.

- (a) Tratamento CM0P.
- (b) Tratamento CM25P.
- (c) Tratamento CM50P.
- (d) Tratamento CM75P.
- (e) Tratamento CM100P.

As setas vermelhas indicam vesículas e as setas amarelas e pretas indicam arbúsculos.

Aumento: 400×.

Fonte: arquivo dos autores



A análise microscópica das raízes finas das plantas inoculadas mostra que o fungo foi efetivo em penetrar o sistema radicular e exibir estruturas fúngicas no córtex radicular de todas as plantas dos tratamentos inoculados.

4 Conclusões

A adubação fosfatada aliada à inoculação do *Gigaspora margarita* promoveu o crescimento das plantas mesmo na dose mais baixa de P (25%). Isso demonstra que a inoculação se mostrou eficiente, promovendo condução dos nutrientes para a planta e, possivelmente, contribuindo para a produção de auxinas e citocininas, as quais promovem crescimento vegetal.

As plantas inoculadas e adubadas com 100% da dose de P recomendada exibiram maiores valores para as variáveis avaliadas, embora não tenha havido diferença estatística significativa entre esse tratamento e os demais, exceto SM0P e CM0P. Entretanto, vale ressaltar que as plantas adubadas com 50% da dose recomendada de P e inoculadas mostraram ganhos nos teores de N, P e K nos grãos e nas folhas, aproximando-se dos valores para o tratamento SM100P, o que sugere a contribuição do fungo para a translocação de nutrientes para esses órgãos.

Assim, a inoculação com essa espécie de FMA associada com 50% da dose recomendada de fósforo não apresentou diferença estatística significativa em relação ao solo adubado com 100% da recomendação e na ausência do inoculante, para a maioria das variáveis analisadas, mostrando-se suficiente para promover o crescimento do feijão-caupi. Isso, no mínimo, trará uma economia expressiva para os agricultores.

Torna-se necessário avaliar os custos de produção de inóculos e também da adubação fosfatada, além de proceder à experimentação de outros fungos micorrízicos arbusculares que possam ser mais eficientes na dose mais baixa de fósforo fornecida à cultura.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ALVES, A. U.; PRADO, R. M.; GONDIM, A. R. O.; FONSECA, I. M.; CECILIO FILHO, A. B. Desenvolvimento e estado nutricional da beterraba em função da omissão de nutrientes. **Horticultura Brasileira**, v. 26, n. 2, p. 292-295, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362008000200033>.

CLIMATE-DATA.ORG. **Clima Conde (Brasil)**. [2021?]. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/paraiba/conde-42733/>. Acesso em: 2 jul. 2021.

CNA – CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA DO BRASIL; SENAR – SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL. **Feijão-caupi, a África no Nordeste Brasileiro**. Brasília, DF: CNA/SENAR, 2020. Disponível em: <https://cnabrasil.org.br/cna-pulses/page3.html>. Acesso em: 11 out. 2022.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Grãos: safra 2020/21, décimo levantamento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, Brasília, DF, v. 8, n. 10, p. 1-110, 2021. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/45074_99beed2f07582616b57c95dbdbf30bfc. Acesso em: 15 jan. 2022.

COUTINHO, P. W. R.; SILVA, D. M. S.; SALDANHA, E. C. M.; OKUMURA, R. S.; SILVA JÚNIOR, M. L. Doses de fósforo na cultura do feijão-caupi na região nordeste do Estado do Pará. **Revista Agro@ambiente**, v. 8, n. 1, p. 66-73, 2014. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v8i1.1310>.

CRUZ, E. C.; SOBREIRA, A. C.; BARROS, D. L.; GOMIDE, P. H. O. Doses de fósforo e fungos micorrízicos arbusculares no crescimento e produção do feijão-caupi em Roraima. **Boletim do Museu Integrado de Roraima**, v. 11, n. 1, p. 21-28, 2017. DOI: <https://doi.org/10.24979/bolmirr.v11i01.792>.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivo de feijão-caupi: solos e adubação**. 2. ed. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2017. (Sistemas de Produção, v. 2). Versão Eletrônica. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/161212/1/SistemaProducaoCaupiCapituloSolosAdubacao.pdf>. Acessado em: 7 nov. 2022.

FITZE, D.; WIEPNING, A.; KALDORF, M.; LUDWIG-MÜLLER, J. Auxins in the development of an arbuscular mycorrhizal symbiosis in maize. **Journal of Plant Physiology**, v. 162, n. 11, p. 1210-1219, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.01.014>.

FREIRE FILHO, F. R. Melhoramento de feijão-caupi no Brasil. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI, 4., 2016, Sorriso. **Feijão-caupi: avanços e desafios tecnológicos e de mercados: resumos**. Brasília, DF: Embrapa, 2016. p. 235-236. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1063708/fejao-caupi-avancos-e-desafios-tecnologicos-e-de-mercados-resumos>. Acesso em: 7 nov. 2022.

GIVNISH, T. J. Adaptive significance of evergreen vs. deciduous leaves: solving the triple paradox. **Silva Fennica**, v. 36, n. 3, p. 703-743, 2002. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.535>.

KARIKARI, B.; ARKORFUL, E.; ADDY, S. Growth, nodulation and yield response of cowpea to phosphorus fertilizer application in Ghana. **Journal of Agronomy**, v. 14, n. 4, p. 234-240, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3923/ja.2015.234.240>.

MAATHUIS, F. J. M. Physiological functions of mineral macronutrients. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 12, n. 3, p. 250-258, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.003>.

MARTINS, R. M. S.; MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P. Crescimento micelial de fungos micorrízicos arbusculares e formação de micorriza em solos contaminados por cádmio.

Scientia Agraria, Curitiba, v. 18, n. 3, p. 48-60, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v18i3.51122>.

MELO, F. B. Nutrição e adubação mineral do feijão-caupi. In: CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI, 4., 2016, Sorriso. **Feijão-caupi: avanços e desafios tecnológicos e de mercados: resumos**. Brasília, DF: Embrapa, 2016. p. 265-266. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1064610/1/pagina002652.pdf>. Acesso em: 10 out. 2021.

MENCUCCINI, M.; ROSAS, T.; ROWLAND, L.; CHOAT, B.; CORNELISSEN, H.; JANSEN, S.; KRAMER, K.; LAPENIS, A.; MANZONI, S.; NIINEMETS, Ü.; REICH, P. B.; SCHRODT, F.; SOUDZILOVSKAIA, N.; WRIGHT, I. J.; MARTÍNEZ-VILALTA, J. Leaf economics and plant hydraulics drive leaf: wood area ratios. **New Phytologist**, v. 224, n. 4, p. 1544-1556, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.15998>.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A.; KOSEGARTEN, H.; APPEL, T. (ed.). **Principles of plants nutrition**. 5th. ed. New York: Springer, 2001. *E-book*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-010-1009-2>.

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

MÜLLER, A.; NGWENE, B.; PEITER, E.; GEORGE, E. Quantity and distribution of arbuscular mycorrhizal fungal storage organs within dead roots. **Mycorrhiza**, v. 27, n. 3, p. 201-210, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-016-0741-0>.

NONATO, E. R. L.; SANTOS, D. R.; LEITE, J. A.; SILVA, G. A.; PEREIRA, C. T.; LUZ, M. N.; NÓBREGA, C. M. B. Crescimento da Craibeira inoculada com fungos micorrizicos sob diferentes regimes hídricos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 12, p. 98929-98940, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n12-399>.

PARRY, M. M.; KATO, M. S. A.; CARVALHO, J. G. Macronutrientes em caupi cultivado sob duas doses de fósforo em diferentes épocas de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 236-242, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000300003>.

PHILLIPS, J. M.; HAYMAN, D. S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. **Transactions of the British Mycological Society**, v. 55, n. 1, p. 158-161, 1970. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3).

QUEVEDO, C. M. G.; PAGANINI, W. S. Impactos das atividades humanas sobre a dinâmica do fósforo no meio ambiente e seus reflexos na saúde pública. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 16, n. 8, p. 3529-3539, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-81232011000900021>.

ROCHA, W. S. **Inoculação e doses de fósforo em feijão-caupi no sul do Estado do Tocantins**. 2016. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2016. Disponível em: <https://repositorio.uft.edu.br/handle/11612/432>. Acesso em: 7 nov. 2022.

SANTOS, J. A. S.; TEODORO, P. E.; CORREA, A. M.; SOARES, C. M. G.; RIBEIRO, L. P.; ABREU, H. K. A. Desempenho agrônomo e divergência genética entre genótipos de feijão-caupi cultivados no ecótono Cerrado/Pantanal. **Bragantia**, v. 73, n. 4, p. 377- 382, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0250>.

SILVA, D. M. **Avaliação da produtividade do rabanete, sob diferentes dosagens de fósforo**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Centro Universitário do Cerrado, Patrocínio, 2018. Disponível em: <https://www.unicerp.edu.br/public/docs/e7161a5a9eb6-08e3.pdf>. Acesso em: 12 out. 2021.

SILVA, E. N.; TAVARES, A. T.; SILVA, C. P.; FERREIRA, T. A.; CARLINE, J. V. G.; NASCIMENTO, I. R. Fungos micorrízicos arbusculares e doses de fósforo no desenvolvimento de mudas de guanandi. **Nativa: Pesquisas Agrárias e Ambientais**, v. 6, n. 3, p. 246-251, 2018. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i3.4720>.

SOARES, A. C. F.; SOUSA, C. S.; GARRIDO, M. S.; LIMA, F. S. Fungos micorrízicos arbusculares no crescimento e nutrição de mudas de jenipapeiro. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43, n. 1, p. 47-54, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000100006>.

VIECELLI, C. A. (org.). **Guia de deficiências nutricionais em plantas**. Toledo: PUCPR, 2017. *E-book* (112 p). Disponível em: <https://www.briolimp.com/def.pdf>. Acesso em: 12 out. 2021.

VIEIRA, G. E. G.; FURMIGARE, N. S.; TEIXEIRA, L. F.; COLEN, A. G. N. Influência da micorriza na cultura da soja: preocupação com a produção de energia – uma revisão. **Revista Liberato: Educação, Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 25, p. 57-64, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.31514/rliberato.2015v16n25.p57>.

ZHANG, K.; BASKIN, J. M.; BASKIN, C. C.; YANG, X.; HUANG, Z. Effect of seed morph and light level on growth and reproduction of the amphicarpic plant *Amphicarpaea edgeworthii* (Fabaceae). **Scientific Reports**, v. 7, 39886, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep39886>.