EFEITO DE DOSES DE BIOCARVÃO DE CASCA DE CAFÉ NO TEOR DE FÓSFORO DO SOLO SOB DUAS TENSÕES DE ÁGUA NO CULTIVO DE MILHO

Autores: Gabriel Vieira Cordeiro[1], Chansislayne Gabriela da Silva[1], Ezequiel da Silva Campos[1], Ingo Hoffmann Curti[1], Maria Olívia Ferreira da Conceição Gomes[1], Renato Ribeiro Passos[1],

[1]Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias/Departamento de Agronomia, Alto Universitário, s/n, caixa postal 16, Guararema, 29500-000, Alegre - ES, Brasil, gabriel.v.cordeiro@edu.ufes.br, chansislayne_silva@outlook.com, ezequiel.campos@edu.ufes.br, ingo.curti@edu.ufes.br, maria.f.gomes@edu.ufes.br, renatoribeiropassos@gmail.com.

Resumo

O trabalho avaliou o efeito de doses de biocarvão de casca de café sobre o teor de fósforo (P) do solo sob duas tensões de água, utilizando milho como planta-teste. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 5 × 2, constituído pelas doses de 0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10 t ha^{-1} de biocarvão e pelas tensões de −10 e −30 kPa, com quatro repetições. Aos 45 dias após a semeadura, foram coletadas amostras de solo para determinação do P extraível por Mehlich-1. O teor de P apresentou resposta quadrática às doses de biocarvão nas duas tensões avaliadas. As doses de máxima resposta estimada foram de 5,68 e 5,45 t ha^{-1} para −10 e −30 kPa, respectivamente, com coeficientes de determinação de 0,895 e 0,8473. Os resultados indicam que doses intermediárias de biocarvão de casca de café favorecem o aumento do P extraível do solo, enquanto doses superiores reduzem esse efeito.

Palavras-chave: Biochar. Condicionador do solo. Atributo químico do solo. Resíduos agrícolas.

Área do Conhecimento: Ciências Agrárias e Agronomia

Introdução

O fósforo (P) é indispensável ao metabolismo e ao desenvolvimento das plantas, porém sua baixa mobilidade no solo restringe a quantidade que as raízes realmente conseguem acessar. Em solos tropicais essa limitação assume maior importância devido às reações de sorção e precipitação que transferem o nutriente da solução para formas menos disponíveis (Ibrahim et al., 2022; Cordeiro; Rosolem, 2026). Em solos ácidos, a disponibilidade de P é reduzida por sua retenção em óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Zheng et al., 2020; Cordeiro; Rosolem, 2026). A água acrescenta outra limitação ao sistema. Como o transporte do P até as raízes ocorre predominantemente por difusão, a redução da umidade diminui sua movimentação no solo limitando sua absorção por pelos radiculares, mesmo quando existe P potencialmente disponível (Rosolem et al., 2024; Cordeiro; Rosolem, 2026).

O biocarvão pode modificar esse equilíbrio por diferentes vias. Além de introduzir nutrientes presentes em sua biomassa, sua incorporação altera propriedades do solo como pH, capacidade de troca catiônica, retenção de água, reduzindo a sorção de fósforo pelos sítios de sorção devido à competição de ânions orgânicos e inorgânicos presentes em sua composição por esses espaços, de modo que o efeito final sobre a disponibilidade de P resulta da interação entre as características do biocarvão e do solo (Hossain et al., 2020). Essa resposta, contudo, não é necessariamente crescente com a dose nem ocorre da mesma forma em todos os solos. Zheng et al. (2020), por exemplo, observaram aumento da sorção de fosfato em solo arenoso e redução em solo argiloso após a adição de um mesmo biocarvão alcalino, demonstrando que propriedades do solo podem alterar até mesmo o sentido da resposta. Estudos com biocarvão de casca de café mostram aumento do P disponível e redução da retenção do nutriente em solos ácidos, embora esses efeitos também tenham variado com dose, temperatura de pirólise e tempo de incubação (Dume et al., 2017; Ngalani et al., 2023).

Em uma meta-análise baseada em 516 comparações, Tesfaye et al. (2021) encontraram aumento médio de 65% no P disponível do solo após a aplicação de biocarvão, mas a resposta mudou conforme pH, textura, disponibilidade inicial de P, matéria-prima e dose empregada. A disponibilidade hídrica

amplia essa variabilidade, pois altera a difusão dos nutrientes no ambiente rizosferico, sendo relatados efeitos distintos sob diferentes regimes de irrigação no cultivo do milho (Wan et al., 2025). Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de doses de biocarvão de casca de café sobre o teor de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido às tensões de água de −10 e −30 kPa durante o cultivo de milho.

Metodologia

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAE-UFES), localizado no município de Alegre, Espírito Santo, Brasil. Foi utilizado um Latossolo Vermelho-Amarelo, de textura média (SM), classificado conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

O solo utilizado no experimento foi coletado na área experimental da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) – Campus de Alegre, na profundidade de 20–40 cm. Após a coleta, o solo foi seco ao ar, destorroado e peneirado em malha de 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Posteriormente, foi realizada a caracterização química e física do solo, conforme metodologia descrita por Teixeira et al. (2017), sendo os resultados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização química e física * dos solos de ambientes pedológicos diferentes utilizados na montagem do experimento

Atributos	Solo Textura Média (SM)
pH (H2O)	5,63
P (mg kg-1)	1,90
P-rem (mg kg-1)	36,3
K (mg kg-1)	27,90
Na (mg kg-1)	0,10
Ca (cmolc kg-1)	0,96
Mg (cmolc kg-1)	0,54
Al (cmolc kg-1)	0,00
H + Al (cmolc kg-1)	2,71
SB (cmolc kg-1)	1,57
t (cmolc kg-1)	1,57
T (cmolc kg-1)	4,28
V (%)	36,78
m (%)	0,00
M.O (g kg-1)	16,04
Fe (mg kg-1)	60
Cu (mg kg-1)	0,9
Zn (mg kg-1)	1,7
Mn (mg kg-1)	36,4
Areia Total	69,58
Silte	20,08
Argila	10,34

*pH: relação solo-água 1:2,5; P: extrator Mehlich-1 e determinação por colorimetria; Na e K: extrator Mehlich-1 e determinação por fotometria de chama; Ca e Mg: extrator KCl 1 mol/L e determinação por espectrometria de absorção atômica; Al: extrator KCl 1 mol/L e determinação por titulometria; H+Al: extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L pH 7,0 e determinação por titulometria; SB: Soma de bases trocáveis; t: capacidade de troca catiônica efetiva; (T): capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Índice de saturação de bases; m: Índice de saturação por alumínio; Matéria Orgânica: oxidação de carbono via úmida com dicromato de potássio em meio ácido (H2SO4); Prem

(fósforo remanescente): solução de CaCl2 0,01 mol/L contendo 60 mg/L de P. Fe, Cu, Zn e Mn: extrator Mehlich-1 e determinação por espectrometria de absorção atômica. Silte e argila: Método da pipeta — agitação lenta a 50 rpm por 16 horas, com agitador tipo Wagner; dispersante químico: NaOH 0,1 mol/L e determinação das frações silte e argila pelo método da pipeta (Teixeira et al., 2017).

Fonte: elaborado pelo próprio autor

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 5 × 2, constituído por cinco doses de biocarvão de casca de café (0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10 t ha^{-1}) e duas tensões de água no solo (−10 e −30 kPa), com quatro repetições, totalizando 40 unidades experimentais.

O biocarvão utilizado no experimento foi produzido a partir de casca de café e adquirido da empresa NetZero. A caracterização química do biocarvão, bem como sua capacidade de retenção de água (CRA) e área superficial específica, encontra-se apresentada na Tabela 2 e 3 respectivamente.

Tabela 2 - Caracterização* de biocarvão de casca de café utilizado nos experimentos.

Parâmetros	**Resultados**
C (%)	67,3
H (%)	3,64
O (%)	14,8
CTC (cmolc kg^{-1})	43,8
pH (H_2O)	10,2
P (g kg^{-1})	4,23
K (g kg^{-1})	40,9
Ca (g kg^{-1})	12,3
Mg (g kg^{-1})	3,4
Fe (mg kg^{-1})	2820
Cu (mg kg^{-1})	35,4
Zn (mg kg^{-1})	25,7
CRA 10 cm (% ou v/v)	62,6
Área superficial (m^{-2} g^{-1})	2,9
Cinzas %, m/m	12

*Carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) foram determinados em analisador elementar PerkinElmer Série II 2400, enquanto o oxigênio (O) foi calculado por diferença. O pH foi determinado em água, e a capacidade de troca catiônica (CTC) foi obtida pelo método acetato de sódio–acetato de amônio a pH 7,0. Os teores de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu e Zn foram determinados após digestão nítrico-perclórica. Capacidade de retenção de água (CRA) sob tensão de 10 cm de coluna de água ou 0,1kPa (10hPa). A área superficial por isotermas de adsorção e dessorção de N2, adquiridas a 77 K em um equipamento JWFB modelo Meso 112. As áreas superficiais especificas foram calculadas utilizando a equação de BET na região de baixa pressão (p/p0=0,200).

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 3 - Curva de retenção* de água do solo utilizado na montagem do experimento

Potencial mátrico	**Textura Média (SM)**
-10 kPa	0,140
-30 kPa	0,123
-50 kPa	0,113
-300 kPa	0,090
-1500 kPa	0,069

*A curva foi determinada utilizando câmara de pressão de Richards, conforme metodologia padrão para avaliação da retenção hídrica do solo (Teixeira et al., 2017).

Fonte: elaborado pelo próprio autor

O experimento foi conduzido em vasos com capacidade de 5 L, contendo 4 kg de solo. As doses de biocarvão correspondentes a cada tratamento foram incorporadas e homogeneizadas ao solo antes da implantação do experimento.

O milho (*Zea mays* L.) foi utilizado como planta-teste. Foram semeadas cinco sementes por vaso e, aos 10 dias após a semeadura, foi realizado o desbaste, mantendo-se as três plantas mais vigorosas em cada vaso. A adubação foi conduzida conforme as recomendações de Novais et al. (1991), utilizando-se 100 mg kg^{-1} de solo de N e 150 mg kg^{-1} de solo de K e 150 mg kg^{-1} de solo para P. Onde P foi aplicado integralmente no plantio, enquanto N e K foram parcelados duas aplicações, respectivamente, sendo a primeira realizada no plantio e segunda no intervalos de 15 dias.

Após o estabelecimento das plantas, foram aplicados os dois regimes hídricos, correspondentes aos potenciais mátricos de −10 e −30 kPa. A umidade do solo nos vasos foi controlada por meio da pesagem, sendo a irrigação realizada de acordo com a necessidade de reposição de água para manutenção dos respectivos potenciais mátricos estabelecidos em cada tratamento.

Aos 45 dias após a semeadura, foram coletadas amostras de solo de cada unidade experimental. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Posteriormente, foi determinado o fósforo do solo por extrator Mehlich-1, conforme metodologia descrita por Teixeira et al. (2017).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando os efeitos das doses de biocarvão, das tensões de água no solo e da interação dose × tensão. Para o fator quantitativo dose de biocarvão, foram ajustados modelos de regressão quando constatado efeito significativo, enquanto as tensões de água no solo foram comparadas entre si, adotando-se nível de significância de 5%.

.

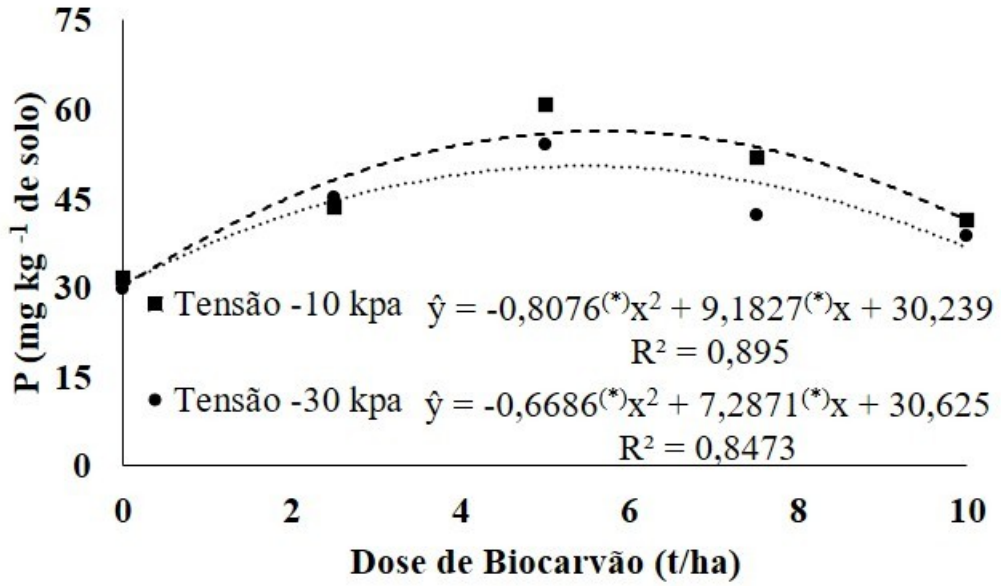
Resultados

O teor de fósforo (P) no solo apresentou resposta quadrática às doses crescentes de biocarvão em ambas as tensões de água avaliadas (Figura 1). Na tensão de −10 kPa, os teores de P aumentaram com a aplicação do biocarvão até a dose ótima estimada de 5,68 t ha^{-1}, a partir da qual ocorreu redução dos valores. Para a tensão de −30 kPa, comportamento semelhante foi observado, com dose ótima estimada de 5,45 t ha^{-1}.

Os modelos quadráticos apresentaram coeficientes de determinação de R^2 = 0,895 e R^2 = 0,8473, para −10 e −30 kPa, respectivamente, indicando bom ajuste das equações aos dados experimentais. De modo geral, os resultados demonstram que doses intermediárias de biocarvão, próximas a 5,5 t ha^{-1}, proporcionaram os maiores teores de P no solo, independentemente da tensão de água avaliada.

Não houve significancia estatistica no teste de variância a 5% para a comparação entre as duas tenções de água.

Figura 1 – Valore de Fósforo do solo (P) do solo em função as doses de biocarvão sob duas tensões de irrigação diferentes. Significativo $p < 0,05$ (*) pelo teste t.



Fonte: O autor (2026).

Discussão

Esse comportamento é coerente com mais de um mecanismo descrito para biomassas pirolisadas: o biocarvão pode fornecer P contido em sua própria fração mineral e, ao mesmo tempo, modificar as reações que controlam a retenção do nutriente no solo (Hossain et al., 2020). Essa interpretação é pertinente pois o biocarvão utilizado neste estudo apresentou 4,23 g kg^{-1} de P e pH 10,2 (Tabela 2). Em solo ácido incubado com biocarvão de casca de café, Dume et al. (2017) verificaram elevação do P disponível juntamente com aumento do pH e redução da acidez e das formas trocáveis de Fe e Al; na maior dose avaliada, 15 t ha^{-1}, o biocarvão produzido a 500 °C elevou em 84,3% o P disponível. Ngalani et al. (2023), também trabalhando com casca de café em solo ácido, observaram menor capacidade de sorção de P e maior dessorção de P para a solução do solo à medida que aumentou a quantidade de biocarvão.

Esses resultados da literatura, entretanto, não permitem concluir que o aumento do teor de P deva continuar com o acréscimo de biocarvão. No presente estudo, a curvatura das regressões mostra o contrário: depois dos máximos estimados em 5,68 e 5,45 t ha^{-1}, o efeito líquido passou a ser de redução do P extraível (Figura 1). O biocarvão pode simultaneamente fornecer P e criar superfícies minerais capazes de retê-lo. No estudo de Zheng et al. (2020), a aplicação de biocarvão alcalino aumentou a sorção de fosfato no solo arenoso, enquanto no solo argiloso o efeito foi inverso; os autores atribuíram parte dessa diferença à ação conjunta do efeito alcalinizante e dos minerais contendo Ca e Mg presentes no biocarvão. Pode se interpretar que houve uma mudança no balanço entre fornecimento e retenção, mecanismo que não foi medido diretamente.

Conclusão

A aplicação de biocarvão de casca de café pode favorecer a disponibilidade de fósforo no solo, porém esse efeito depende da dose utilizada. Os resultados demonstram que o incremento de biocarvão não proporciona aumento contínuo do P no solo, evidenciando a existência de uma faixa de aplicação mais favorável. Assim, o uso desse material como condicionador do solo deve considerar a dose aplicada, uma vez que quantidades elevadas podem reduzir o benefício observado sobre a disponibilidade de fósforo. A resposta observada sob as duas condições hídricas demonstra o potencial do biocarvão de casca de café para o manejo da disponibilidade de P, embora estudos de maior duração e em condições de campo sejam necessários para definir doses de aplicação agronomicamente adequadas.

Referências

CORDEIRO, C. F. dos S.; ROSOLEM, C. A. Management strategies to improve phosphorus use efficiency under an uncertain climate: a review. **Frontiers in Agronomy**, v. 7, art. 1630934, 2026. DOI: 10.3389/fagro.2025.1630934.

DUME, B. et al. Improving available phosphorus in acidic soil using biochar. **Journal of Soil Science and Environmental Management**, v. 8, n. 4, p. 87-94, 2017. DOI: 10.5897/JSSEM2015.0540.

HOSSAIN, M. Z. et al. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. **Biochar**, v. 2, p. 379-420, 2020. DOI: 10.1007/s42773-020-00065-z.

IBRAHIM, M. et al. Phosphorus mobilization in plant-soil environments and inspired strategies for managing phosphorus: a review. **Agronomy**, v. 12, n. 10, art. 2539, 2022. DOI: 10.3390/agronomy12102539.

NGALANI, G. P. et al. Effect of coffee husk and cocoa pods biochar on phosphorus fixation and release processes in acid soils from West Cameroon. **Soil Use and Management**, v. 39, n. 2, p. 817-832, 2023. DOI: 10.1111/sum.12894.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J.; GARRIDO, W. E.; ARAÚJO, J. D.; LOURENÇO, S. (ed.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília, DF: Embrapa-SEA, 1991. p. 189-253.

ROSOLEM, C. A. et al. Humic acid enhances phosphorus transport in soil and uptake by maize. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 187, n. 3, p. 401-414, 2024. DOI: 10.1002/jpln.202300413.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TESFAYE, F. et al. Could biochar amendment be a tool to improve soil availability and plant uptake of phosphorus? A meta-analysis of published experiments. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 34108-34120, 2021. DOI: 10.1007/s11356-021-14119-7.

WAN, H. et al. Contrasting maize responses to soil phosphorus and potassium availability driven by biochar under reduced irrigation. **Plant and Soil**, v. 508, p. 677-700, 2025. DOI: 10.1007/s11104-024-06824-2.

ZHENG, X. et al. Biochar-induced soil phosphate sorption and availability depend on soil properties: a microcosm study. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, p. 3846-3856, 2020. DOI: 10.1007/s11368-020-02713-0.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).