

Solubilização de fósforo no processo de Compostagem

Phosphorus solubilization in the Composting process

Solubilización del fósforo en el proceso de Compostaje

Recebido: 24/02/2026 | Revisado: 02/03/2026 | Aceitado: 03/03/2026 | Publicado: 04/03/2026

Kleso Silva Franco Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6807-8889>

Centro Superior de Ensino e Pesquisa de Machado, Brasil

E-mail: kleso.junior@cesep.edu.br

Márcio de Souza Dias

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8367-1341>

Secretaria de Estado de Educação de Minas Gerais, Brasil

E-mail: marcio.dias@educacao.mg.gov.br

Resumo

O fósforo (P) apresenta baixa disponibilidade em solos tropicais devido à forte adsorção mineral. Este estudo objetivou avaliar a solubilização de P durante a compostagem de resíduos orgânicos associados a fosfato natural reativo FosBio®. O experimento foi conduzido em Machado, MG, por 60 dias, sob delineamento de blocos casualizados com seis tratamentos compostos por esterco bovino, palha de café e pó de serragem, com e sem adição de FosBio®. Foram analisados os teores de P total e suas frações solúveis em água, citrato neutro de amônio (CNA+água) e ácido cítrico a 2%. A inclusão do FosBio® incrementou significativamente o P solúvel, com destaque para o tratamento Esterco + FosBio®, que atingiu a maior média de solubilidade (1,68 em ácido cítrico). Resíduos com elevada relação C/N, como o pó de serragem, limitaram a solubilização devido à imobilização microbiana, enquanto a palha de café favoreceu a manutenção do P disponível. Conclui-se que a associação entre esterco bovino e FosBio® com resíduos de menor relação C/N é uma alternativa sustentável para a produção de fertilizantes organominerais e construção da fertilidade do solo.

Palavras-chave: Compostagem; FosBio®; Fosfatos naturais; Sustentabilidade.

Abstract

Phosphorus (P) has low availability in tropical soils due to strong mineral adsorption. This study aimed to evaluate the solubilization of P during the composting of organic waste associated with reactive natural phosphate FosBio®. The experiment was conducted in Machado, MG, for 60 days, under a randomized block design with six treatments composed of bovine manure, coffee straw, and sawdust, with and without the addition of FosBio®. The contents of total P and its fractions soluble in water, neutral ammonium citrate (NAC + water), and 2% citric acid were analyzed. The inclusion of FosBio® significantly increased soluble P, with the Manure + FosBio® treatment standing out, achieving the highest average solubility (1.68 in citric acid). Waste with a high C/N ratio, such as sawdust, limited solubilization due to microbial immobilization, while coffee straw favored the maintenance of available P. It is concluded that the association between bovine manure and FosBio® with residues of lower C/N ratio is a sustainable alternative for the production of organomineral fertilizers and the building of soil fertility.

Keywords: Composting; FosBio®; Natural phosphates; Sustainability.

Resumen

El fósforo (P) presenta baja disponibilidad en suelos tropicales debido a la fuerte adsorción mineral. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la solubilización de P durante el compostaje de residuos orgánicos asociados con fosfato natural reactivo FosBio®. El experimento se realizó en Machado, MG, durante 60 días, bajo un diseño de bloques al azar con seis tratamientos compuestos por estiércol bovino, paja de café y aserrín, con y sin la adición de FosBio®. Se analizaron los contenidos de P total y sus fracciones solubles en agua, citrato de amonio neutro (NAC + agua) y ácido cítrico al 2%. La inclusión de FosBio® incrementó significativamente el P soluble, destacándose el tratamiento Estiércol + FosBio®, que logró la mayor solubilidad promedio (1,68 en ácido cítrico). Los residuos con alta relación C/N, como el aserrín, limitaron la solubilización debido a la inmovilización microbiana, mientras que la paja de café favoreció el mantenimiento del P disponible. Se concluye que la asociación entre estiércol bovino y FosBio® con residuos de menor relación C/N es una alternativa sostenible para la producción de fertilizantes organominerales y la construcción de la fertilidad del suelo.

Palabras claves: Compostaje; FosBio®; Fosfatos naturales; Sostenibilidad.

1. Introdução

O fósforo (P) é um macronutriente essencial para o metabolismo vegetal, participando de processos fundamentais como a transferência de energia (ATP e ADP), fotossíntese, síntese de ácidos nucleicos (DNA e RNA) e manutenção da integridade das membranas celulares (Hanyabui et al., 2020).

Sua presença é fundamental na transferência de energia (ATP e ADP), na fotossíntese, na síntese de ácidos nucleicos (DNA e RNA), e na integridade estrutural de membranas celulares, impactando diretamente o crescimento e desenvolvimento vegetal (Epstein; Bloom, 2006), contudo, a deficiência de P é um dos principais fatores limitantes da produtividade agrícola global. A maior parte do P presente nos ecossistemas edáficos se encontra em formas insolúveis ou fortemente fixadas, tornando sua disponibilidade para as culturas um gargalo significativo.

Em solos tropicais, como os encontrados no Brasil, a adsorção de P é notavelmente elevada, resultando em baixa eficiência de uso dos fertilizantes fosfatados. Essa característica é atribuída principalmente à alta presença de minerais de argila do tipo 1:1 (como a caulinita) e, sobretudo, aos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (goethita, hematita, gibbsita), que possuem sítios de alta afinidade por fosfatos (Novais & Smyth, 1999). Além disso, fatores como o pH do solo, o teor de matéria orgânica, a granulometria e a presença de outros íons influenciam a dinâmica de P no solo (Raij, 1991). Em faixas de pH ácido, o P é predominantemente adsorvido por Fe e Al, enquanto em pH alcalino, tende a precipitar com cálcio (Plaxton & Carswell, 1999). A compreensão desses mecanismos é crucial para desenvolver estratégias eficientes de manejo do P.

Os fosfatos naturais (FN) são rochas sedimentares ou ígneas que contêm minerais fosfatados, predominantemente na forma de fluorapatita $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ e, em menor grau, hidroxiapatita (Van Kauwenbergh, 2010). O FosBio é um tipo de fosfato natural reativo que se destaca como uma alternativa viável para o fornecimento de P às plantas, no entanto, a solubilidade do P em fosfatos naturais é intrinsecamente baixa, particularmente em solos com pH neutro a alcalino, o que exige a implementação de estratégias que promovam sua solubilização e, consequentemente, a disponibilidade do nutriente. Vale destacar que a eficiência agrônômica dos fosfatos naturais reativos é multifatorial, sendo influenciada pela reatividade do minério (grau de cristalinidade, tamanho de partícula, conteúdo de P total e impurezas), pelo pH do solo (maior solubilidade em ambientes ácidos) e pela presença de ácidos orgânicos no ambiente rizosférico (Zapata & Roy, 2004). No Brasil, instituições como a Embrapa têm liderado pesquisas sobre o uso de fosfatos naturais, buscando otimizar sua aplicação em diversos sistemas agrícolas, especialmente em solos ácidos e intemperizados (Novais et al., 2007). Estudos recentes têm reforçado o potencial dos fosfatos naturais na construção da fertilidade do solo em médio e longo prazo, auxiliando na recuperação de áreas degradadas e na redução da dependência de fertilizantes químicos solúveis, contribuindo para uma agricultura mais sustentável (Theodoro & Leonardos, 2006; Donagemma et al., 2017). Essa característica de liberação gradual é especialmente benéfica em sistemas de cultivo perenes e em programas de manejo de longo prazo para construção da fertilidade do solo (Chien & Menon, 1995).

O fósforo (P) apresenta baixa disponibilidade em solos tropicais altamente intemperizados, como os do Brasil, devido à forte adsorção por minerais da fração argilosa, como caulinita, gibbsita, goethita e hematita (Raij et al., 1987; Novais & Smyth, 1999). Essa limitação torna o P um dos principais fatores restritivos à produtividade agrícola, estimulando a busca por alternativas sustentáveis de manejo, entre as quais se destacam os fosfatos naturais reativos, por sua viabilidade econômica e ambiental (Lopes et al., 2012). O FosBio, por exemplo, apresenta alta porosidade e liberação lenta de nutrientes, reduzindo perdas por lixiviação, embora sua baixa solubilidade em pH neutro limite a disponibilidade imediata de P (Rocafeed, 2026).

Nesse contexto, a compostagem surge como uma estratégia promissora. Trata-se de um processo biológico aeróbico de degradação da matéria orgânica por microrganismos, que resulta em um composto estável e rico em nutrientes, além de contribuir para a reciclagem de resíduos orgânicos e a melhoria da qualidade do solo (Kiehl, 1985; Bernal et al., 2009). O composto orgânico promove benefícios físicos, químicos e biológicos ao solo, como melhoria da estrutura, aumento da capacidade de troca catiônica,

tamponamento do pH e estímulo à atividade microbiana, refletindo em maior resiliência e melhor desempenho das culturas (Franco Júnior; Siqueira, 2002; Paradelo et al., 2013).

A compostagem de fosfatos naturais reativos com materiais orgânicos de fácil degradação aumenta a disponibilidade de P, pois a intensa atividade microbiana gera ácidos orgânicos e inorgânicos capazes de solubilizar minerais fosfatados, liberando o nutriente em formas assimiláveis pelas plantas (Ceci; Alvarenga, 2009; Singh & Amita, 2011). Além disso, microrganismos solubilizadores de fosfato, como espécies de *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Aspergillus* e *Penicillium*, produzem ácidos e enzimas que intensificam esse processo (Khan & Zaidi, 2007; Sharma et al., 2013). Estudos comprovam a eficácia dessa estratégia, evidenciando aumento da solubilização e disponibilidade de P na compostagem de fosfatos naturais reativos, especialmente quando associada à inoculação microbiana, resultando em fertilizantes organo-minerais de elevado valor agrônômico (Singh et al., 2007; Bertoldo et al., 2013; Nogueira et al., 2017).

Este estudo objetivou avaliar a solubilização de P durante a compostagem de resíduos orgânicos associados ao fosfato natural reativo ao FosBio®.

2. Metodologia

Realizou-se uma pesquisa experimental, laboratorial sob condições controladas num estudo de abordagem qualitativa e quantitativa (Pereira et al., 2018; Risemberg et al., 2026) e, com uso de estatística descritiva simples na parte quantitativa com o uso de classes de dados (conforme o tipo de esterco) e, com valores de média (Shitsuka et al., 2014).

A pesquisa iniciada no dia 26 de agosto e finalizado no dia 26 de outubro 2025, onde os experimentos foram conduzidos no Sul do Estado de Minas Gerais, onde o clima local é classificado como subtropical, com precipitação média anual de aproximadamente 1500 mm, sendo o mês de janeiro o mais chuvoso e julho o mais seco. A escolha do local visa não apenas o aproveitamento do espaço disponível, mas também a observação dos efeitos das condições ambientais locais sobre o processo de compostagem (Melo et al., 2008).

Os compostos utilizados foram fornecidos por uma fazenda comercial, localizada no município de Machado, Sul do Estado de Minas Gerais. Serão utilizados os seguintes resíduos:

Biomassa (folhas secas e restos de poda): que são caracterizados por alto teor de carbono e baixo conteúdo de nitrogênio, apresentando relação C/N que varia entre 30:1 e 60:1, o que os torna importantes fontes de carbono em processos de compostagem (Kiehl, 1985).

Esterco bovino: proveniente de animais leiteiros, o qual possui composição média com teor de matéria orgânica entre 15% e 25%, nitrogênio total entre 1% e 2%, fósforo na forma de P_2O_5 entre 0,4% e 0,8% e potássio na forma de K_2O entre 1% e 2%, além de relação C/N entre 20:1 e 25:1 e pH variando de 6,5 a 7,5, sendo considerado um resíduo equilibrado e rico em nutrientes para a compostagem (Primo et al., 2022).

Cascas de café: subproduto comum na região, que apresentam elevado teor de carbono, teor de nitrogênio entre 1,5% e 2% e relação C/N variando de 25:1 a 35:1, além da presença de compostos fenólicos, como a cafeína, que podem influenciar a dinâmica microbiana durante o processo de decomposição (Ferreira et al., 2018).

Serragem de madeira: que constitui uma importante fonte de carbono estrutural, com teor de carbono entre 70% e 80%, baixo teor de nitrogênio, variando de 0,1% a 0,3%, e relação C/N superior a 100:1, sendo utilizada principalmente para ajuste da relação C/N e da estrutura física da leira de compostagem (Kiehl, 1985).

A proporção dos materiais na composição dos tratamentos foi ajustada para atingir uma relação C/N ideal entre 25:1 e 35:1, considerada adequada para uma compostagem eficiente (Kiehl, 1985). O fosfato natural reativo utilizado é o FosBio®, adquirido de fornecedor comercial, com diferentes formulações disponíveis (FosBio® 12, FosBio® 20), contendo entre 12% e

20% de P_2O_5 . O produto é classificado como fosfato natural reativo e utilizado como fonte de fósforo para o enriquecimento do composto (Rocafeed, 2026). O delineamento experimental segue o modelo blocos casualizados com 6 tratamentos e 4 repetições, totalizando 24 parcelas experimentais, onde cada monte de compostagem é uma parcela. Os tratamentos estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 - Tratamentos.

Tratamentos	Material orgânico	Com ou sem Fosbio®
1	Compostagem de esterco bovino	Sem
2	Compostagem de esterco bovino	Com
3	Compostagem de esterco bovino + palha de café	Com
4	Compostagem de esterco bovino + pó de serragem	Com
5	Compostagem de esterco bovino + de pó de serragem	Sem
6	Compostagem de esterco bovino + palha de café	Sem

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

As doses de FosBio® foram aplicadas no início da compostagem e misturadas uniformemente aos materiais. A estimativa dos 60 kg de composto será baseada na massa inicial, considerando perdas naturais durante o processo (Kiehl, 1985).

As leiras são padronizadas com cerca de 1,5 m de largura, 1,0 m de altura e comprimento variável, realizando as seguintes atividades de monitoramento: da temperatura a qual foi aferida diariamente em diferentes pontos das leiras com termômetro de haste longa, visando manter a fase termofílica $>55^{\circ}C$ (Berton et al., 2014), da umidade mantida entre 50% e 60%, utilizando higrômetro ou teste manual de compressão (Melo et al., 2008), do revolvimento o qual foi realizado semanalmente com enxadas, para promover aeração e homogeneização da pilha (Kiehl, 1985).

A compostagem foi finalizada ao atingir a fase de maturação, com temperatura estabilizada, cor escura, odor terroso e ausência de resíduos visíveis. O processo da compostagem foi realizado em 60 dias (Primo et al., 2022).

Ao final do processo de compostagem, foi coletada amostras representativas de cada leira (composto orgânico final). As amostras são homogeneizadas, secas ao ar, para posterior análise laboratorial. As análises laboratoriais foram realizadas no laboratório Ribersolos, garantindo a confiabilidade dos resultados. Teor de P Solúvel foi determinado utilizando-se o extrator de resina (resina de troca aniônica), método considerado mais representativo da disponibilidade de P para as plantas em sistemas de solos tropicais (Raij et al., 1987).

Os dados obtidos são submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando necessário, ao Scott-Knot (Scott & Knot, 1974)

3. Resultados e Discussão

Em relação ao Fósforo Total é possível verificar nos dados apresentados (Tabela 2) que houve diferença significativa entre os tratamentos abordados, onde primeiro tratamento (com Esterco) possui pouca disponibilidade de fósforo por ser o tratamento que não foi acrescido o FosBio® (Controle), nos outros dois tratamentos obtiveram-se resultados positivos de disponibilidade do fósforo total onde o tratamento Esterco + FosBio® proporcionou o maior resultado entre os diferentes tratamentos. Contudo, fosforo total não revela se o nutriente está na forma disponível.

Tabela 2 - Teor de Fósforo Total nos diferentes tratamentos.

Tratamentos	Média (%)
Esterco	0,79 Cb
Esterco + FosBio®	7,50 Aa
Esterco + FosBio® + Palha de Café	5,89 Ba
Esterco + Palha de Café	1,02 Db
Esterco + FosBio® + Pó de Serragem	4,14Ca
Esterco + Pó de Serragem	0,82 Db
CV%	20,86

* Letras diferentes diferenciam estatisticamente pelo teste de Scott-Knott 5%. Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Quanto ao Fósforo Solúvel em água foi possível observar valores baixos, fato este explicado pela baixa solubilidade em água dos fosfatos naturais reativos (Tabela 3).

Os resultados apresentados indicam efeito significativo dos diferentes tratamentos sobre a variável avaliada, conforme evidenciado. As médias variaram de 0,06 a 0,15, com coeficiente de variação (CV) de 23,17%, valor considerado moderado para experimentos de natureza biológica, indicando variabilidade aceitável dos dados.

Tabela 3 - Fósforo Solúvel em Água.

Tratamentos	Média (%)
Esterco	0,15 Aa
Esterco + FosBio®	0,13 Aa
Esterco + FosBio + Palha de Café	0,13 Aa
Esterco + Palha de Café	0,11 Aa
Esterco + FosBio + Pó de Serragem	0,08 Ba
Esterco + Pó de Serragem	0,06 Ba
CV%	23,17

* Letras diferentes diferenciam estatisticamente pelo teste de Scott – Knott 5%. Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Os teores de P solúvel em água foram baixos em todos os tratamentos, variando de 0,06 a 0,15, o que reflete a baixa solubilidade imediata dos fosfatos naturais reativos nesta fração. O teste de Scott-Knott (5%) separou os tratamentos em dois grupos distintos. O primeiro grupo (A), composto por Esterco isolado (0,15), Esterco + FosBio® (0,13), Esterco + FosBio® + Palha de Café (0,13) e Esterco + Palha de Café (0,11), não apresentou diferença significativa entre si. Isso indica que, para a fração solúvel em água, o FosBio® e a palha de café não alteraram o equilíbrio químico inicial do esterco. Já o segundo grupo (B), formado pelos tratamentos com pó de serragem (0,08 e 0,06), apresentou os menores índices. A redução significativa nesta fração sugere que a elevada relação C/N da serragem promoveu uma rápida imobilização do P inorgânico disponível pela biomassa microbiana.

Raij et al. (1987) destacam que a extração por resina de troca aniônica fundamenta-se na remoção do fósforo da solução do solo por troca iônica, simulando o mecanismo de 'dreno' exercido pelas raízes das plantas sem alterar quimicamente o equilíbrio das frações sólidas. O método da resina é superior aos extratores ácidos em solos que receberam fosfatos naturais reativos, pois evita a solubilização artificial de formas de fósforo que não estariam disponíveis para as culturas no curto prazo (Raij, 1991). Novais et al. (2007) pontua que em solos tropicais altamente intemperizados, a resina de troca aniônica apresenta

as melhores correlações com o crescimento vegetal, sendo o método oficial adotado em estados como São Paulo para fins de recomendação de adubação.

Os resultados da apresentados na Tabela 4 demonstram efeito dos tratamentos sobre os teores de fósforo solúvel extraído por citrato neutro de amônio + água, método amplamente utilizado para estimar a fração de fósforo potencialmente disponível às plantas. As médias variaram de 0,30 a 0,55, com coeficiente de variação (CV) de 26,34%, valor considerado relativamente elevado, porém ainda aceitável em experimentos envolvendo fontes orgânicas e resíduos, nos quais a variabilidade é naturalmente maior.

Tabela 4 - Fósforo solúvel em citrato neutro de amônio + água.

Tratamentos	Média (%)
Esterco	0,41 Ab
Esterco + FosBio®	0,55 Aa
Esterco + FosBio® + Palha de Café	0,47 Aa
Esterco + Palha de Café	0,40 Ab
Esterco + FosBio® + Pó de Serragem	0,35 Ba
Esterco + Pó de Serragem	0,30 Bb
CV%	26,34

* Letras diferentes diferenciam estatisticamente pelo teste de Scott – Knott 5%. Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Esterco resultou em um incremento de 0,14, a palha de café 0,07 e o pó de serragem 0,035, o que mostra que materiais mais estáveis em relação a C/N proporcionam uma melhor solubilização de P, pois não existe uma demanda tão intensa de nutrientes para os microrganismos, os quais precisam aumentar em população para acelerar os materiais orgânicos (decompor).

O tratamento Esterco + FosBio® apresentou a maior média (0,55), diferindo estatisticamente dos tratamentos Esterco, Esterco + Palha de Café e Esterco + Pó de Serragem, conforme indicado pelas letras minúsculas distintas. Esse resultado evidencia que a adição do FosBio® ao esterco promoveu aumento significativo na solubilização do fósforo, possivelmente em função da atividade microbiana associada à produção de ácidos orgânicos e enzimas fosfatases, que favorecem a disponibilização desse nutriente.

Os tratamentos Esterco + FosBio® + Palha de Café (0,47) e Esterco + FosBio® + Pó de Serragem (0,35) não diferiram estatisticamente do tratamento com Esterco + FosBio®, permanecendo no mesmo grupo estatístico. Isso indica que a presença de resíduos orgânicos adicionais não comprometeu, de forma significativa, a ação do FosBio na solubilização do fósforo, embora valores absolutos menores tenham sido observados, especialmente quando associado ao pó de serragem.

Por outro lado, os tratamentos Esterco, Esterco + Palha de Café e Esterco + Pó de Serragem apresentaram menores teores de fósforo solúvel (0,41; 0,40 e 0,30, respectivamente), sendo agrupados na classe estatística inferior. Esses resultados sugerem que, na ausência do FosBio®, a adição de Palha de Café ou Pó de Serragem não foi suficiente para aumentar a disponibilidade de fósforo, podendo, no caso da serragem, haver imobilização temporária do nutriente em função da elevada relação C/N desse resíduo.

A extração por citrato neutro de amônio mais água é o método padrão para determinar o fósforo disponível em fertilizantes minerais, englobando tanto o fósforo prontamente solúvel quanto as frações de disponibilidade moderada (Berton et al., 2014). Melo & Silva (2007) discutem que para fertilizantes organominerais e compostos, este extrator permite avaliar a eficiência da mineralização do fósforo orgânico e a solubilização das fontes minerais adicionadas à mistura. Embora menos

sensível que o ácido cítrico para avaliar rochas fosfáticas isoladas, o citrato neutro de amônio é fundamental para garantir a conformidade dos fertilizantes com os níveis mínimos de nutrientes exigidos pelo mercado (Raij, 1991).

De forma geral, os dados indicam que o FosBio® exerceu papel determinante no aumento do fósforo solúvel, enquanto resíduos com alto teor de carbono estrutural, como o pó de serragem, tenderam a reduzir ou limitar a disponibilidade do nutriente quando utilizados sem fosbio®.

Os resultados apresentados na Tabela 5 (Fósforo solúvel em ácido cítrico) indicam efeito significativo dos tratamentos sobre o fósforo solúvel em ácido cítrico a 2%, método que estima a fração de fósforo potencialmente disponível às plantas. A separação por letras distintas evidencia diferenças estatísticas entre os tratamentos (teste de médias, $p \leq 0,05$), com coeficiente de variação (CV = 8,40%) considerado baixo, o que confere boa precisão experimental.

Tabela 5 - Fósforo solúvel em ácido cítrico a 2%.

Tratamentos	Média (%)
Esterco	0,39 Cb
Esterco + FosBio®	1,68 Aa
Esterco + FosBio® + Palha de Café	1,14 Aa
Esterco + Palha de Café	0,54 Bb
Esterco + FosBio® + Pó de Serragem	1,04 Aa
Esterco + Pó de Serragem	0,43 Cb
CV%	8,40

* Letras diferentes diferenciam estatisticamente pelo teste de Scott – Knott 5%. Fonte: Dados da pesquisa (2026).

O tratamento Esterco + FosBio® (1,68) apresentou o maior teor de fósforo solúvel, demonstrando que a associação do esterco com o inoculante FosBio® potencializa a solubilização do fósforo. Esse efeito é atribuído à ação de microrganismos solubilizadores, capazes de liberar ácidos orgânicos que aumentam a disponibilidade do nutriente no solo.

Os tratamentos Esterco + FosBio® + Palha de Café (1,14) e Esterco + Palha de Café (0,54) também elevaram os teores de fósforo em relação ao esterco isolado (0,39). A Palha de Café contribui com matéria orgânica, favorecendo a atividade microbiana e a ciclagem de nutrientes, embora possa haver imobilização parcial do fósforo devido à relação C/N do resíduo.

A adição de Pó de Serragem, tanto com FosBio® (1,04) quanto sem FosBio® (0,43), resultou em valores inferiores aos tratamentos com palha de café. Esse comportamento está associado à elevada relação C/N da serragem, que intensifica a imobilização microbiana do fósforo, reduzindo sua fração solúvel, mesmo na presença de microrganismos solubilizadores.

A solubilidade em ácido cítrico a 2% é um indicador químico utilizado para medir a reatividade de fosfatos naturais reativos, representando a fração de fósforo que pode ser liberada sob a influência de ácidos orgânicos de baixo peso molecular (Novais; Smyth, 1999). Zapata & Roy (2004) destacam que no processo de compostagem enriquecida, o aumento dos teores de P solúvel em ácido cítrico evidencia a conversão de formas apatíticas em compostos de maior labilidade química mediada por microrganismos. A legislação brasileira utiliza a solubilidade em ácido cítrico como um dos critérios para classificar a eficiência agrônômica de fosfatos naturais reativos para aplicação direta ou em misturas (Franco Júnior; Siqueira, 2002).

De forma geral, os dados demonstram que o FosBio® é determinante para o aumento do fósforo solúvel e a qualidade do resíduo orgânico influencia diretamente a disponibilidade do nutriente, e que resíduos com menor relação C/N, como a palha de café, são mais eficientes do que a serragem na manutenção do fósforo em formas disponíveis.

4. Conclusão

A eficiência na disponibilização do fósforo durante a compostagem é multifatorial, dependendo da reatividade da fonte mineral e da qualidade química dos resíduos orgânicos. A utilização do FosBio® é determinante para elevar os teores de P disponível, superando as fontes orgânicas isoladas, especialmente nas frações solúveis em citrato neutro de amônio e ácido cítrico. O tratamento Esterco + FosBio® apresenta o maior potencial agrônomico de liberação do nutriente em formas assimiláveis. Resíduos com baixa relação C/N, como a palha de café, favorecem a manutenção do P disponível, enquanto materiais de alta relação C/N, como o pó de serragem, restringem a solubilização devido à imobilização microbiana. Portanto, a associação de esterco bovino com FosBio® e resíduos de rápida decomposição constitui a estratégia mais eficiente para a produção de compostos enriquecidos.

Referências

- Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical characteristics of the final composts. *Bioresource Technology*. 100(22), 5444–53.
- Bertoldo, J. G., Barroso, A. S., Silva, N. F. (2013). Solubilização de fosfatos naturais durante o processo de compostagem. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 43, n. 3, p. 240-248.
- Berton, R. S. et al. (2014). *Manual de compostagem: processo, uso e normatização*. Brasília: EMBRAPA, 2014.
- Ceci, A. L. & Alvarenga, P. (2009). Fontes de fósforo na compostagem de lixo urbano. *Engenharia Agrícola*. 29(3), 488–95.
- Chien, S.H.; Menon, R.G. (1995). Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. *Fertilizer Research*, v.41, p.227-234.
- Donagemma, G. K. et al. (2017). Análise Granulométrica. In: Teixeira, P. C. et al (ed.). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 573 p.
- Epstein, E., Bloom, A.J. (2006). *Nutrição mineral de plantas, princípios e perspectivas*. Trad. Maria Edna Tenório Nunes Londrina: Editora Planta, 86p.
- Ferreira, A. R. et al. (2018). Produtividade e qualidade... *Revista Agro@mbiente On-line*. 12(1), 46–52.
- Franco Jr., M. R. & Siqueira, J. O. (2002). *Biotechnologia do solo: da fundamentação à aplicação*. Lavras: ESAL/UFLA.
- Hanyabui, E., Wang, Y., Liu, J.; et al. (2020). Phosphorus sorption in tropical soils: adsorption mechanisms, influencing factors and implications for P management. *AIMS Agriculture and Food*. 5(3), 5697–715. <https://www.aimspress.com/article/id/5697>.
- Khan, M. S. & Zaidi, A. H. (2007). Phosphate solubilizing microorganisms: role in phosphorus nutrition of agricultural crops. *Journal of Plant Nutrition*. 30(6), 899–913.
- Kiehl, E. J. (1985). *Manual de compostagem: maturação e uso do composto orgânico*. (4ed). Piracicaba: Livraria Agronômica Ceres.
- Lopes, A. S., Guilherme, L. R. G., Ramos, S. J. (2012). The saga of agricultural development of the Brazilian Cerrado. *International Potash Institute*, Horgen, Suíça, v. 32, p. 29-56, 2012. <http://www.ipipotash.org/pt/eifc/2012/32/5/English>>.
- Melo, W. J. & Silva, C. A. (2007). *Compostagem e reciclagem de resíduos orgânicos na agricultura*. In: Novais, R. F. et al. (org.). *Fertilidade do solo*. Viçosa: SBCS.
- Melo, W. J. de et al. (2008). Compostagem de resíduos urbanos e agroindustriais. In: MELO, W. J.; ALVES, M. C. (org.). *Reciclagem e uso de resíduos em agricultura*. Guaíba: Agrolivros.
- Melo, W. J. & Silva, C. A. (2007). *Compostagem e reciclagem de resíduos orgânicos na agricultura*. In: Novais, R. F. et al. (org.). *Fertilidade do solo*. Viçosa: SBCS.
- Nogueira, M. A. et al. (2017). Solubilização de fosfatos naturais reativos por microrganismos durante a compostagem de resíduos orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 41.
- Novais, R. F. & Smyth, T. J. (1999). *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos.
- Novais, R. F. et al. (2007). Manejo do fósforo em solos brasileiros: otimizando o uso de fertilizantes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 31, 19–33.
- Paradelo, N. et al. (2012). Evolution of organic matter during the mesophilic composting of lignocellulosic winery wastes. *Journal of environmental management*. 116C. 18-26. 10.1016/j.jenvman.2012.12.001.
- Pereira, A. S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. (Free ebook). Santa Maria. Editora da UFSM.

- Plaxton, W. C., Carswell, M. C. (1999). Metabolic aspects of phosphate starvation in plants. In: Lerner, H. H. (Ed.). Plant responses to environmental stresses: from phytohormones to genome reorganization. New York: Marcel Dekker, p. 349-372.
- Primo, D. C. et al. (2022). Compostagem de resíduos agrícolas: características, processos e recomendações. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 26(1), 21–9.
- Raij, B. V. (1991). *Fertilidade do solo e adubação*. Piracicaba: Agronômica Ceres.
- Raij, B. V. et al. (1987). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: IAC.
- Risemberg, R. I. C., Wakin, M. & Shitsuka, R. (2026). A importância da metodologia científica no desenvolvimento de artigos científicos. *Revista E-Acadêmica*. 7(1), e0171675. <https://doi.org/10.52076/eacad-v7i1.675>. <https://eacademica.org/eacademica/article/view/675>.
- Rocafeed. (2026). *Produtos FosBio*. <https://rocafeed.com.br/produtos/>.
- Sharma, D., Kinsey, W.H. (2013). PYK2: A calcium-sensitive protein tyrosine kinase activated in response to fertilization of the zebrafish oocyte. *Developmental Biology*. 373(1), 130-140.
- Scott, A. J., Knott, M. (1974). A Cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, Washington, 30, 507-512.
- Singh et al. (2007). Solubilization of inorganic phosphates by phosphate solubilizing microorganisms and their execution in agriculture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 7, 32-38.
- Singh, C. P., Amita, S. (2011). Solubilization of rock phosphate through composting with rice straw, and its biological assessment as a phosphorus source for wheat (*Triticum aestivum* L.). *Biology and Fertility of Soils*, 47, 781–791.
- Shitsuka, R. et al. (2014). *Matemática fundamental para tecnologia*. (2ed). Editora Érica.
- Theodoro, S. H.; Leonardos, O. H. (2006). The use of rocks to improve Family agriculture in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, 78(4), 721-730.
- Van Kauwenbergh, S. J. (2010). World Phosphate Rock Reserves and Resources. IFDC.
- Zapata, F., Roy, R. N. (2004). *Use of phosphate rocks for sustainable agriculture*. Rome: FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin.