



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Propriedades de Biochars e Sua Eficácia na Retenção de Fósforo

Eline Dias Barbosa¹, Ravi Emanuel de Melo², Vanilson Pedro da Silva³, Diogo Paes da Costa⁴, José Henrique de Souza Júnior⁵, Maria Fernanda de Albuquerque Tenório Alves⁶, Márcio Henrique Leal Lopes⁷, Argemiro Pereira Martins Filho⁸, Érika Valente de Medeiros⁹, Gustavo Pereira Duda¹⁰, Marcelo Metri Corrêa¹¹, Maria Camila de Barros Silva¹², José Romualdo de Sousa Lima¹³, Claude Hammecker¹⁴

¹Me. em Produção Agrícola, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco, Brasil. (87) 3764-5529. elinediasbarbosa@gmail.com (autor correspondente). ²Me. em Produção Agrícola, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco, Brasil. ravi.melo@ufpe.br. ³Me. em Produção Agrícola, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco, Brasil. vanilson.silva@ufape.edu.br. ⁴Dr. em Ciência do Solo, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco, Brasil. diogocosta1@yahoo.com.br. ⁵Me. em Produção Agrícola, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco, Brasil. juniorthhhenrique@gmail.com. ⁶Me. em Produção Agrícola, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco, Brasil. mftenorioalves@gmail.com. ⁷Me. em Produção Agrícola, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco, Brasil. mhl9785@gmail.com. ⁸Dr. em Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Av. Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa, MG, 36570-900, Brasil. argemiro.ufra@gmail.com. ⁹Dra. em Fitotecnia, Professora Associada II, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco, Brasil. evmbio@gmail.com. ¹⁰Dr. em Ciência do Solo, Professor Titular, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco, Brasil. gpduda@gmail.com. ¹¹Dr. em Ciência do Solo, Professor Titular, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco, Brasil. marcelo.metri@ufape.edu.br. ¹²Dra. em Ciência do Solo, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco, Brasil. camilabarross@gmail.com. ¹³Dr. em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Professor Titular, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco, Brasil. romualdo.lima@ufpe.br. ¹⁴Dr. em Física do Solo, Pesquisador, Institut de Recherche Pour le Développement, UMR Eco&Sols, Supagro, 2 Place Viala, 34060 Montpellier cedex, França. claud.hammecker@gmail.com

Artigo recebido em 12/09/2024 e aceito em 14/10/2024

RESUMO

A crescente demanda por alternativas sustentáveis para a gestão de nutrientes em solos agrícolas torna os biochars promissores devido à sua capacidade de melhorar a retenção de fósforo e outros nutrientes. Este estudo investigou as propriedades de biochars produzidos a partir de diferentes materiais, com foco na capacidade de adsorção e dessorção de fosfato, elemento decisivo para a gestão eficiente do fósforo em solos agrícolas. Foram analisados três tipos de biochar: lodo de esgoto, cama de frango e madeira de cajueiro. A composição mineralógica dos biochars foi determinada por difração de raios X, e a área superficial específica (ASE) foi medida utilizando a metodologia de adsorção de azul de metileno. As capacidades de adsorção e dessorção de fosfato foi avaliada por isoterma de Langmuir e Freundlich, com quantificações realizadas por centrifugação e análises colorimétricas. Os resultados indicaram que o biochar de madeira de cajueiro apresentou a maior ASE e capacidade máxima de adsorção, enquanto o biochar de lodo de esgoto também apresentou boa capacidade de adsorção. O biochar de cama de frango, embora menos eficiente na adsorção, destacou-se pela sua elevada capacidade de troca catiônica (CTC) e pH alcalino, características favoráveis à correção de acidez e ao fornecimento de nutrientes adicionais. A pesquisa destaca que o biochar de madeira de cajueiro é o mais promissor para retenção de fósforo, enquanto os biochars de lodo de esgoto e de cama de frango possuem aplicação potencial em contextos específicos.

Palavras-chave: caracterização de biochar, adsorção de nutrientes, eficiência de retenção, impacto ambiental.

Properties of Biochars and Their Effectiveness in Phosphorus Retention

ABSTRACT

The growing demand for sustainable alternatives for nutrient management in agricultural soils makes biochars promising due to their ability to improve the retention of phosphorus and other nutrients. This study investigated the properties of biochars produced from different materials, focusing on phosphate adsorption and desorption capacity, a crucial element for efficient phosphorus management in agricultural soils. Three types of biochar were analyzed: sewage sludge, chicken litter, and cashew wood. The mineralogical composition of the biochars was determined by X-ray diffraction, and the specific surface area (SSA) was measured using the methylene blue adsorption method. Phosphate adsorption and desorption capacities were evaluated using Langmuir and Freundlich isotherms, with quantifications performed through centrifugation and colorimetric analyses. The results indicated that cashew wood biochar had the highest SSA and

maximum adsorption capacity, while sewage sludge biochar also showed good adsorption capacity. Although less efficient in adsorption, chicken litter biochar stood out for its high cation exchange capacity (CEC) and alkaline pH, characteristics that favor acidity correction and the supply of additional nutrients. The research highlights that cashew wood biochar is the most promising for phosphorus retention, while sewage sludge and chicken litter biochars have potential applications in specific contexts.

Keywords: biochar characterization, nutrient adsorption, retention efficiency, environmental impact.

Introdução

O biochar é o produto resultante da pirólise de biomassa, em condições de baixíssima ou ausência de oxigênio, e é amplamente reconhecido por seu potencial de aplicação na agricultura e no manejo ambiental (Farhangi Abriz et al., 2021). No entanto, as características físico-químicas do biochar, como a sua área superficial específica (ASE), pH e composição mineralógica, variam significativamente de acordo com a biomassa utilizada e as condições de produção, o que dificulta a padronização de suas propriedades e a previsão de sua eficiência em diferentes contextos agrícolas (Brockamp & Weyers et al., 2021). Essa variabilidade representa grande desafio para a pesquisa, uma vez que o biochar pode tanto melhorar a fertilidade dos solos quanto agir como sequestrador de carbono e adsorvente de contaminantes.

Atualmente, o aumento nos preços dos fertilizantes, impulsionado pela crise global no setor, intensificou a busca por alternativas mais sustentáveis para a disponibilização de nutrientes às plantas. O fósforo, em particular, é elemento essencial para o desenvolvimento vegetal, participando ativamente de processos cruciais como a fotossíntese, a respiração celular e a síntese de ácidos nucleicos (Siddique et al., 2023).

Contudo, o uso excessivo de fertilizantes fosfatados tem gerado problemas ambientais graves, como a eutrofização de corpos d'água, além de ser solução insustentável a longo prazo, devido à baixa eficiência de utilização pelas plantas (Bilal et al., 2021). Aproximadamente 75-90% do fósforo aplicado se torna indisponível rapidamente, sendo fixado no solo em formas insolúveis aumentando a necessidade de alternativas eficientes (Silva & Souza, 2023). Estudos recentes indicam que fatores como a composição e as propriedades químicas do biochar influenciam diretamente a adsorção e a liberação de nutrientes, aspectos fundamentais para prática agrícola que visa a sustentabilidade (Chen et al., 2023b).

Nesse contexto, o biochar tem se destacado como solução promissora, capaz de melhorar a retenção de fósforo nos solos, ao mesmo tempo em que diminui a lixiviação e disponibiliza o nutriente (Chen et al., 2022; Sasabuchi et al., 2023). A capacidade de adsorção do fósforo, no entanto, depende fortemente da área superficial específica

do biochar e de suas interações com o ambiente do solo, como o pH e a composição mineralógica (Li et al., 2021). Entretanto, essas interações complexas ainda não estão completamente compreendidas, especialmente para biochars produzidos a partir de diferentes materiais, como lodo de esgoto, madeira de cajueiro e cama de frango.

A problemática central reside na necessidade de compreender como diferentes tipos de biochar se comportam em termos de adsorção e dessorção de fósforo. A variação nas propriedades físico-químicas dos biochars, somada à falta de padrão de classificação universal, dificulta a formulação de estratégias eficientes para uso agrícola. Por isso, há necessidade de pesquisas que investiguem as características que otimizam o desempenho do biochar, como a área superficial específica e o pH alcalino, a fim de melhorar a disponibilidade de fósforo no solo e, consequentemente, a produtividade agrícola.

No entanto, a eficiência do biochar em diferentes condições de solo e sua interação com o fósforo ainda não está totalmente compreendida, especialmente em relação às suas características físico-químicas, como a área superficial específica, o pH e a composição mineralógica (Li et al., 2021).

A análise de difração de raios X (DRX) permite a identificação precisa dos componentes cristalinos presentes. No caso dos biochars, a DRX é essencial para entender sua composição e propriedades, que influenciam diretamente sua eficácia em aplicações agrícolas e ambientais (Li et al. 2021). A caracterização mineralógica dos biochars, como realizada neste estudo, permite a identificação de minerais específicos e suas proporções, o que é crucial para avaliar sua reatividade química, estabilidade a longo prazo e capacidade de adsorção de nutrientes e contaminantes (Chen, 2022).

Estudos recentes reforçam a hipótese de que biochars com maior área superficial específica e pH alcalino favorecem a adsorção e liberação de fósforo, o que é benéfico para a agricultura sustentável. Sasabuchi et al. (2023) analisaram biochars produzidos a partir de lodo de esgoto e constataram que suas características mineralógicas específicas melhoram a retenção de fósforo no solo, promovendo liberação lenta e eficiente do nutriente.

Zhang et al. (2022) também observaram que biochars com alta área superficial específica e pH alcalino intensificam a disponibilidade de fósforo em solos ácidos. Eles demonstraram que essas propriedades ajudam a reduzir a fixação de fósforo por óxidos de ferro e alumínio, comuns nesses solos, o que permite liberação controlada do nutriente e potencializa a eficiência agrônômica.

Glaser e Lehr (2019) corroboram esses achados ao mostrar que a aplicação de biochar em solos agrícolas, especialmente em solos ácidos, eleva a disponibilidade de fósforo. Esse efeito é evidente em biochars aplicados em quantidades acima de 10 Mg/ha e produzidos a temperaturas inferiores a 600 °C, com benefícios que podem perdurar por até cinco anos, reforçando o biochar como estratégia sustentável para aumentar a fertilidade do solo.

Assim, o objetivo desta pesquisa foi investigar e comparar as propriedades físico-químicas de diferentes tipos de biochars, avaliando sua eficácia na adsorção e dessorção de fósforo, com vistas a identificar quais biochars apresentam maior potencial para melhorar a disponibilidade de fósforo no solo, contribuindo para a otimização do uso de fertilizantes e a sustentabilidade agrícola.

Material e métodos

O trabalho foi desenvolvido em condições laboratoriais na Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, localizada em Garanhuns, na região do Agreste Meridional de Pernambuco, no período compreendido entre março de 2022 e abril de 2023.

O lodo de esgoto (LE) foi obtido da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), localizada em Garanhuns - PE. Após coletado, o LE foi colocado para secagem ao ar livre.

A cama de frango foi obtida de criações comerciais de frango de corte, na região de Garanhuns e municípios vizinhos.

O biochar de madeira de cajueiro (BMC) foi produzido a partir de resíduos de árvores de (*Anacardium occidentale* L.). O processo de decomposição dessa biomassa foi realizado em fornos de carvoaria de terra, comumente utilizados na produção de carvão vegetal no Nordeste do Brasil, conforme descrito por Lima et al. (2019). Após a pirólise, o biochar (BC) foi triturado em forrageira, peneirado com malha fina de 2 mm e macerado.

A produção do biochar de lodo de esgoto (BLE) e do biochar de cama de frango (BCF) foi realizada por pirólise lenta, conforme descrito por

Lima et al. (2018). Esse processo é importante para BCs provenientes de cama de frango, pois o tratamento térmico aprimora suas características estruturais (Fernandes et al., 2022).

Os experimentos foram realizados com três repetições para cada tipo de BC. Após a secagem ao ar livre, o lodo de esgoto foi processado para remoção de impurezas antes da pirólise. Da mesma forma, a cama de frango e a madeira de cajueiro foram devidamente limpas e preparadas para garantir uniformidade nas amostras. As amostras foram maceradas, e cada tipo de BC foi submetido às mesmas condições experimentais para garantir a consistência dos dados.

Caracterização Química

Foram realizadas análises nos BCs para determinar as características químicas (sulfato total (SO), acidez potencial (H⁺ Al) e pH) utilizando o método analítico descrito por Fontana (2017). O fósforo (P) disponível foi extraído pelo método de Olsen e analisado seguindo o procedimento de Teixeira et al. (2017a). Os teores de potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na) foram avaliados de acordo com o método de Teixeira et al. (2017b).

Os resultados obtidos foram utilizados para calcular a capacidade de troca catiônica (CTC), segundo Teixeira et al. (2017c). Os teores de carbono (C), nitrogênio (N) e hidrogênio (H) da amostra foram determinados via combustão a uma temperatura de 925 °C em analisador elementar CHNS-O (Perkin Elmer PE-2400). A acetanilida foi utilizada como padrão de referência, com os seguintes teores: C (71,09%), H (6,71%) e N (10,36%).

Composição Mineralógica por DRX

A composição mineralógica dos BCs foi analisada por difração de raios X (DRX), conforme a técnica descrita por Silva et al. (2018). As amostras dos BCs em pó foram carregadas em tubos de suporte de Al para identificar os padrões aleatórios de DRX em pó. O espectro de DRX foi medido em ângulo de 5–70°, com tamanho de passo de varredura de 0,02°, tempo de passo de 1 segundo e voltagem de 40 kV e corrente de 20 mA. As áreas de pico identificadas para os diferentes minerais foram comparadas com padrões de DRX de minerais padrão compilados pelo ICDD (International Center for Diffraction Data).

Área Superficial Específica (ASE)

Para a determinação da ASE dos biochars (BCs), foi feita uma adaptação da metodologia descrita por Kahr & Madsen (1995).

O procedimento para determinação da ASE consistiu em adicionar em tubos Falcon com capacidade para 50 mL o equivalente a 1 g de BC macerado, seguido da adição de 1 mL de álcool. Em seguida, fez-se a adição de uma série de volumes crescentes (2,5; 5,0; 7,5; 8,75; 10,0; 11,25; 12,5 e 15 mL) de azul de metileno com concentração de 0,0075 mol L⁻¹ para o BLE. Para o BCF, os volumes foram de 2,5; 5,0; 7,5; 8,75; 10,0; 11,25; 12,5 mL, com concentração de 0,0010 mol L⁻¹. Para o BMC, os volumes foram de 15,0; 17,5; 20,0; 22,5; 25,0; 27,5; 30,0; 32,5 mL, com concentração de 0,0050 mol L⁻¹. Em seguida, o volume total de cada tubo Falcon foi elevado à capacidade de 45 mL por meio da adição de água destilada.

As amostras foram, então, envolvidas em saco preto e colocadas sob agitação constante por um período de 24 horas em mesa agitadora orbital. Em seguida, os tubos Falcon foram acondicionados em centrífuga com rotação de 4.000 rpm, por um tempo de 20 minutos, obtendo-se assim o sobrenadante de cada tubo. Após isso, o sobrenadante foi acondicionado em eppendorfs com capacidade volumétrica de 2 mL. Posteriormente, as amostras foram levadas à centrífuga com rotação de 13.000 rpm, a uma temperatura de 22 °C, por 20 minutos. Finalmente, foi realizada a leitura de cada uma das amostras em espectrofotômetro calibrado a 665 nm de comprimento de onda.

A área superfície específica (ASE) foi determinada a partir da equação 1, proposta por Langmuir, (1916):

$$ASE = \frac{m}{319,87ms} \cdot \frac{1}{ms} \quad (1)$$

Onde;

m= é a massa do AM adsorvido no ponto de completa substituição de cátions;

ms= é a massa da amostra de solo.

Os resultados foram ajustados ao modelo de isoterma de Langmuir (1916), utilizando a equação 2:

$$Q_e = \frac{q_{máx} \cdot k_L \cdot C_t}{1 + (k_L \cdot C_t)} \quad (2)$$

Onde;

Q_e = quantidade de adsorvato por unidade de massa do adsorvente (mg g⁻¹);

q_{máx} = capacidade máxima de adsorção (mg g⁻¹);

k_L = constante de Langmuir (L mg⁻¹);

C_t=concentração de adsorvato no equilíbrio ou tempo t em fase fluida (mg L⁻¹).

Adsorção e Dessorção de Fósforo

Para a determinação da adsorção e dessorção de fósforo (P) dos (BCs), a metodologia utilizada foi ajustada a partir de pesquisas realizadas por Chen et al. (2011), Zheng et al. (2013) e Li et al. (2017).

Inicialmente, para a adsorção, as amostras de BC foram maceradas em almofariz de porcelana e pesadas em triplicata (0,1 g) em recipientes com capacidade de 50 mL. Em seguida, foram adicionados 25 mL da solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, contendo as seguintes concentrações de P na forma de KH₂PO₄: 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 mg L⁻¹ para os BCs de BLE e BCF. Para o BMC, as concentrações de P da solução foram de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 e 110 mg L⁻¹.

Após a adição do adsorbato de P, as amostras foram agitadas por 24 horas à temperatura ambiente. Decorrido esse período, foram centrifugadas a 4.000 rpm e o sobrenadante foi coletado e filtrado para a determinação da concentração de P por colorimetria. A quantificação do P adsorvido e dessorvido foi realizada por análises colorimétricas, seguindo o protocolo de Murthy et al. (2020).

Em relação à dessorção, 5 mL do resíduo remanescente do experimento de adsorção foram misturados com 25 mL da solução padrão de P, preparada conforme o procedimento descrito por Teixeira et al. (2017a), e adicionados em recipientes com capacidade de 50 mL para a avaliação da dessorção do P retido nos adsorventes. O procedimento seguiu o mesmo período de agitação e quantificação utilizado durante a adsorção.

Os resultados foram ajustados ao modelo da isoterma de Langmuir (Equação 3) e ao modelo de Freundlich (Equação 4) conforme descrito por Freundlich (1907).

A quantidade de soluto adsorvido por unidade de massa de adsorvente foi calculada pela equação 3:

$$Q = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m_a} \quad (3)$$

Onde;

Q = quantidade de soluto adsorvido por unidade de massa de adsorvente (mg g⁻¹);

V = volume da solução (L);

m_a = massa de adsorvente (g).

C₀ = concentração inicial de soluto;

C_e = concentração de soluto no equilíbrio, ambas em mg L⁻¹;

A quantidade de adsorvato por unidade de massa foi calculada utilizando a equação 4:

$$Q_e = k_F \cdot C_t^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

Onde;

Q_e = quantidade de adsorvato por unidade de massa (mg g^{-1});

k_F = é a constante de Freundlich ($\text{mg}^{1-(1/n)} \text{L}^{1/n} \text{g}^{-1}$);

C_t = concentração de equilíbrio no tempo t (mg L^{-1});

$1/n$ = expoente de Freundlich.

Análise dos dados de absorção

A análise dos resultados foi realizada com base nos ajustes dos dados experimentais às isotermas de Langmuir e Freundlich. A equação de Langmuir foi utilizada para determinar a capacidade máxima de adsorção ($Q_{\text{máx}}$) e a constante de Langmuir (KL), enquanto a equação

de Freundlich foi aplicada para obter a constante de Freundlich (K_F) e o coeficiente de heterogeneidade ($1/n$). A precisão dos ajustes foi verificada por meio da análise dos resíduos das equações, garantindo que os modelos descrevessem adequadamente o comportamento dos BCs em relação ao P. A interpretação dos resultados foi baseada diretamente nos parâmetros calculados por essas equações, sem o uso de testes estatísticos adicionais.

Resultados e discussão

Caracterização Química

A caracterização química dos BCs (Tabela 1) revelou diferenças significativas que influenciam suas aplicações potenciais na agricultura e na remediação ambiental.

Tabela 1. Propriedades químicas dos diferentes tipos de biochar: biochar de lodo de esgoto (BLE), biochar de cama de frango (BCF) e biochar de madeira de cajueiro (BMC).

PROPRIEDADES	UNIDADES	BLE	BCF	BMC
C	%	19,06	36,83	77,49
H	%	1,53	2,25	3,59
N	%	2,02	3,04	2,78
C/N	-	9,44	12,11	27,87
pH	-	7,92	10,0	9,32
CE	ds m^{-1}	2,20	6,60	0,33
K^+	cmolc kg^{-1}	3,07	2,38	0,73
P	mg kg^{-1}	18,41	450,86	230,13
Ca^{2+}	cmolc kg^{-1}	50,9	55,80	1,9
Mg^{2+}	cmolc kg^{-1}	13,16	0,17	0,51
Na^+	cmolc kg^{-1}	7,83	0,11	0,67
SO_4^{2-}	hg g^{-1}	2,16	2,13	1,96
H+Al	cmolc kg^{-1}	0,66	6,97	2,97
CTC	cmolc kg^{-1}	75,73	284,44	64,85

Notas: C = carbono; H = hidrogênio; N = nitrogênio total; C/N = relação carbono nitrogênio; pH = potencial hidrogeniônico; CE = condutividade elétrica; P = fósforo disponível; K = potássio; Na^+ = sódio; Ca^{2+} = cálcio; Mg^{2+} = magnésio; SO_4^{2-} = sulfato total; H+ Al = acidez potencial; CTC = capacidade de troca catiônica.

O BMC apresentou o maior teor de carbono (C), com 77,49%, seguido pelo BCF com 36,83% e o BLE com 19,06%. A relação C/N, que indica o potencial de decomposição e mineralização da matéria orgânica, foi de 27,87 para o BMC, 12,11

para o BCF e 9,44 para o BLE, sugerindo maior resistência do BMC à decomposição microbiana e liberação lenta de nutrientes no solo.

Quanto ao pH, o BCF mostrou o valor mais alto (10,0), caracterizando-se como mais alcalino

em comparação ao BMC (9,32) e ao BLE (7,92). Em termos de CE, o BCF também se destacou com o valor de 6,60 dS m⁻¹, indicando maior concentração de sais solúveis.

Em relação à CTC, indicador importante da capacidade do solo de reter e trocar nutrientes, o BCF apresentou a maior CTC (284,44 cmolc kg⁻¹), seguido pelo BLE (75,73 cmolc kg⁻¹) e pelo BMC (64,85 cmolc kg⁻¹).

Nos teores de nutrientes, o BCF se destacou com maiores concentrações de P e cálcio Ca²⁺, sendo 450,86 mg kg⁻¹ e 55,80 cmolc kg⁻¹, respectivamente. Em contrapartida, o BLE apresentou o maior teor de sódio Na⁺.

Os altos teores de C no BMC indicam seu potencial para sequestro de C e maior estabilidade, o que pode beneficiar o rendimento das culturas e reduzir impactos ambientais, como mudanças climáticas e perda de C do solo (Zhang et al., 2023).

O pH elevado do BCF, conforme Pan et al. (2022), é benéfico para neutralizar solos ácidos, melhorando a estrutura do solo e aumentando a retenção e disponibilidade de nutrientes, além de reduzir a toxicidade do alumínio e melhorar a disponibilidade de nutrientes como P, K e Mg²⁺. A alta alcalinidade e capacidade de tamponamento do BCF ajudam a estabilizar o pH do solo, o que favorece o crescimento das plantas.

A alta CTC observada no BCF é vantajosa para a fertilidade do solo, permitindo maior retenção e troca de cátions essenciais e reduzindo a lixiviação de nutrientes, conforme discutido por Zhao et al., (2021). Em solos arenosos ou degradados, o alto teor de Mg²⁺ do BCF pode melhorar a estrutura do solo, enquanto os teores elevados de P promovem liberação de nutrientes, o que pode melhorar a eficiência do uso de fertilizantes e reduzir a necessidade de aplicações frequentes.

No caso do BLE, o elevado teor de Na⁺ representa um desafio. Segundo Sun et al., (2020)

concentrações elevadas de Na⁺ substituem o Ca²⁺ nos sítios de troca catiônica, degradando a estrutura do solo e resultando em menor porosidade, baixa infiltração de água e compactação, o que pode tornar o solo suscetível à erosão. Assim, o uso do BLE em solos salinos deve ser monitorado para evitar impactos negativos.

Esses resultados indicam que cada tipo de BC possui propriedades específicas que o tornam adequado para diferentes aplicações. O BMC, com alto teor de C e relação C/N elevada, é ideal para sequestro de carbono e melhora da estrutura do solo a longo prazo. O BCF, devido ao pH alcalino, alta CTC e teores elevados de P e Ca²⁺, é eficaz como corretivo de acidez e fonte de nutrientes. Já o BLE, apesar do baixo teor de C e CTC menor, pode ser usado em combinações específicas ou em solos com menor salinidade.

Combinando os dados de ASE e propriedades químicas, observa-se que o BMC se destaca como o biochar com maior potencial de adsorção de fosfato, devido à sua ASE elevada, pH alcalino e conteúdo de carbono elevado, que prolonga a estabilidade e a eficácia na adsorção. O BLE, embora apresente uma ASE intermediária e menor teor de carbono, é favorecido por sua composição mineral, o que pode melhorar a afinidade com o fosfato em aplicações específicas. Já o BCF, apesar de sua menor ASE, pode ser vantajoso em aplicações que exigem liberação de nutrientes, graças à sua alta CTC e alcalinidade, que também auxilia na correção de pH em solos ácidos.

Composição Mineralógica por DRX

Os componentes mineralógicos dos BCs são essenciais para compreender suas propriedades e aplicações potenciais. A análise de difração de raios X (DRX) revelou diferenças na composição dos três tipos de BC, conforme ilustrado na (Tabela 2).

Tabela 2. Componentes mineralógicos identificados nos biochars de lodo de esgoto (BLE), cama de frango (BCF) e madeira de cajueiro (BMC).

COMPONENTES MINERALÓGICOS	BLE	BCF	BMC
Quartzo	Presente	Presente	Presente
Moscovita	Presente	Ausente	Ausente
Albita	Presente	Ausente	Ausente
Grafite	Presente	Presente	Presente
Íons de óxido	Presente	Ausente	Ausente
Sílica Morfa	Presente	Ausente	Ausente
Calcita	Ausente	Presente	Ausente
Caulinita	Ausente	Presente	Ausente
Celulose	Ausente	Ausente	Presente
Periclase	Ausente	Ausente	Presente
Sodalita	Ausente	Ausente	Presente

O BLE apresentou uma diversidade de componentes mineralógicos, incluindo quartzo, moscovita, albita, grafite, íons de óxido e sílica amorfa. Dentre esses, o quartzo foi o mineral mais abundante, o que se explica pela presença de argila e areia no lodo de esgoto após o tratamento, como apontado por Wang et al. (2017) e Shen et al. (2018). A preservação do quartzo durante o processo de pirólise demonstra sua estabilidade nesse tipo de conversão térmica. Segundo Fachini e Figueiredo (2022), o BLE pode manter componentes minerais duráveis após o tratamento térmico. Além disso, a presença de grafite indica que parte do carbono do BLE foi transformada em forma cristalina, o que potencializa a estabilidade do C no solo. A moscovita e a albita, ambos minerais de argila presentes no BLE, indicam que esse BC pode favorecer a estrutura do solo e a retenção de nutrientes, contribuindo para a fertilidade, conforme descrito por Sun et al., (2021).

Já o BCF contém caulinita, grafite, calcita e quartzo. A caulinita, mineral de argila, junto à calcita, mineral carbonato, sugere que o BCF pode ser útil na neutralização de solos ácidos, característica destacada por Xu et al., (2020). A presença de grafite reforça a transformação do

Ca²⁺ em forma estável durante a pirólise, resultando em fonte de Ca²⁺ duradoura. Além disso, o alto teor de calcita faz do BCF uma possível fonte adicional de Ca²⁺ para o solo, o que pode ser favorável para culturas com alta demanda desse nutriente, como indicado por Wang et al., (2021).

O BMC, por sua vez, revelou a presença de celulose, grafite, sodalita, quartzo e periclase. A celulose presente no BMC, sugere que parte da biomassa não foi convertida durante a pirólise. A sodalita, mineral feldspatóide, e a periclase, óxido de magnésio, indicam que o BMC pode contribuir para aumentar a CTC do solo, elevando a disponibilidade de nutrientes (Liu et al., 2020). Além disso, a presença de periclase no BMC fornece fonte adicional de Mg²⁺, nutriente efetivo para processos como a fotossíntese e outras funções fisiológicas das plantas.

Área Superficial Específica (ASE)

A Tabela 3 apresenta os dados de área superficial específica (ASE) e os parâmetros de adsorção para três tipos de BC: BLE, BMC e BCF. Esses dados foram obtidos a partir do modelo de Langmuir, o qual fornece parâmetros que avaliam a afinidade e a capacidade de adsorção máxima de cada BC.

Tabela 3. Área superficial específica (ASE) e parâmetros de adsorção baseados no modelo de Langmuir para diferentes tipos de biochar.

BIOCHARS	ASE (m ² /g)	MODELO	KL (L mg ⁻¹)	Q _{máx} (mg g ⁻¹)	R ²
BLE	40,00	Langmuir	6400	47,094	0,842
BMC	120,0	Langmuir	5150,23	277,307	0,991
BCF	9,00	Langmuir	19073,01	36,000	0,998

Notas: KL= constante de Langmuir; Q_{máx}= capacidade máxima de adsorção; R²= coeficiente de determinação.

Entre os BCs avaliados, o BMC apresentou a maior ASE, com 120 m²/g, além da maior capacidade de adsorção máxima (Q_{máx}) de 277,307 mg/g, sugerindo que sua ampla área superficial oferece mais locais ativos para adsorção de moléculas. Já o BLE, com ASE intermediária de 40 m²/g e Q_{máx} de 47,094 mg/g, também demonstrou boa eficiência de adsorção, evidenciada pelo valor da constante KL de 6400 L/mg. Por outro lado, o BCF apresentou a menor ASE, com 9 m²/g, e uma Q_{máx} de 36 mg/g. Embora tenha a menor ASE, o BCF mostrou afinidade elevada com as moléculas adsorvidas, refletida na KL de 19073,01 L/mg, o que pode torná-lo eficiente em aplicações onde a concentração do adsorvente é elevada.

Os dados de ASE evidenciam a importância dessa característica para a eficiência de adsorção dos BCs. O BMC, com ASE de 120 m²/g, possui estrutura porosa que permite maior quantidade de interações com moléculas em solução, ampliando a capacidade de adsorção. Esse BC é derivado de madeira, o que contribui para sua porosidade, conforme discutido em estudos de (Lehmann & Joseph, 2015; Zhang et al., 2019).

O BLE, com ASE de 40 m²/g, embora apresente área superficial menor em comparação ao BMC, mostrou bom desempenho em adsorção devido à sua afinidade com moléculas de adsorção. Essa afinidade pode ser influenciada por componentes mineralógicos presentes no BC, como quartzo e grafite, que aumentam o número de sítios de adsorção disponíveis (Shen et al., 2018; Fachini & Figueiredo, 2022). A presença de tais

minerais pode complementar a menor ASE, permitindo ao BLE uma adsorção adequada mesmo com área superficial inferior à do BMC.

Para o BCF, a menor ASE (9 m²/g) limita sua capacidade de adsorção em aplicações que requerem maior quantidade de sítios adsorventes. No entanto, a alta constante de Langmuir (KL = 19073,01 L/mg) indica que o BCF possui afinidade elevada para adsorção, o que pode ser vantajoso em situações onde a adsorção específica é necessária. Assim, a ASE mais baixa do BCF pode ser compensada em aplicações que demandam alta seletividade, embora em menor quantidade de adsorventes.

Esses resultados evidenciam que a ASE, combinada com outras características, como afinidade e composição mineral, é fator decisivo para a escolha do BC adequado para diferentes finalidades. Além disso, variáveis, como pH, temperatura e tempo de contato, podem impactar a eficácia da adsorção, indicando que a otimização desses parâmetros pode potencializar a performance dos BCs (Kahr & Madsen, 1995; Santamarina et al., 2002). De acordo com Zhang e Li (2022), biochars com alta ASE favorecem a liberação de P em solos, intensificando sua eficiência agrônômica.

Adsorção e Dessorção de Fósforo

A análise de adsorção e dessorção de P no BMC mostrou que o modelo de isoterma de Langmuir se ajusta bem aos dados de equilíbrio de adsorção em altas concentrações de P (Tabela 4).

Tabela 4. Parâmetros de Adsorção e Dessorção de Fosfato para Biochar Derivado de Madeira de Cajueiro.

BIOCHAR	PROCESSO	MODELO	KF (L kg ⁻¹)	R ² de KF	KL (L mg ⁻¹)	Q _{máx} (mg g ⁻¹)	R ² de KL
Madeira de Cajueiro	Adsorção	Freundlich	580,4	0,96	-	-	-
		Langmuir	-	-	0,0363	5,9465	1,00
	Dessorção	Freundlich	487,6	0,98	-	-	-
		Langmuir	-	-	0,1694	2,0113	1,00

Notas: KL= constante de Langmuir; KF= constante de Freundlich; Q_{máx}= capacidade máxima de adsorção; R²= coeficiente de determinação.

No entanto, em concentrações baixas, o modelo apresenta limitações, indicando que o BMC pode não reter eficientemente o P em condições de menor concentração. O BMC alcançou Q_{máx} de 5,9465 mg g⁻¹ de adsorção. Por outro lado, a KL foi baixa, com 0,0363 L mg⁻¹. Na fase de dessorção, o valor de Q_{máx} foi de 2,0113 mg g⁻¹ e a KL de 0,1694 L mg⁻¹, indicando que, apesar de reter quantidades significativas de P, o BMC permite sua liberação. A facilidade de retenção do P na superfície do BMC é vantajosa, pois evita que o nutriente seja imediatamente lixiviado. Dessa forma, o BMC poderia auxiliar na nutrição das culturas de modo a estimular condições para melhorar sua capacidade de adsorção.

Esses resultados podem ser atribuídos à alta ASE do BMC, que alcança 120 m² g⁻¹, favorecendo a presença de numerosos sítios de adsorção. Zhu et al. (2022) ressaltam que BCs de madeira com alta ASE são eficazes para adsorção e liberação controlada de nutrientes, o que os torna promissores para uso em larga escala na agricultura. Além disso, Liu et al. (2023) indicam que BCs de madeira, como o de cajueiro, apresentam custo reduzido e alta sustentabilidade devido à ampla disponibilidade da matéria-prima.

De acordo com o estudo de Chintala et al. (2014), que investigou a adsorção e disponibilidade de P para BC, foi observado que o BC produzido a partir de resíduos de madeira de pinheiro possui alta afinidade pelo P, sendo capaz de transformá-lo prontamente de forma menos disponível para forma mais disponível.

Siltecho et al. (2022) pesquisando a caracterização do BC de (*Pterocarpus macrocarpus* L.) e seu efeito nas propriedades de retenção de solos arenosos no nordeste da Tailândia, observaram que as propriedades de retenção de P atingiram 2,030 mg g⁻¹. Contudo, considerando a carga média dos elementos e a superfície do BC, eles não ocuparam 100% dos sítios trocáveis.

Xu et al. (2021) abordam o uso de BCs derivados de resíduos orgânicos e como esses podem ser aplicados em solos para melhorar a retenção de P. A pesquisa explora ainda a dessorção e a liberação controlada de P, o que é especialmente relevante para a utilização do BC em sistemas agrícolas.

O BMC, com alta ASE e elevada capacidade de adsorção de P, é adequado para solos que demandam uma liberação de P. Embora biochars derivados de madeira possam ter um custo de produção elevado devido à disponibilidade limitada de resíduos lenhosos e ao processo de pirólise, estudos indicam que a eficiência agrônômica do BMC compensa o investimento inicial, principalmente em culturas de ciclo longo ou perenes (Zhu et al., 2022). Esse biochar também oferece o benefício de estabilizar o P no solo, reduzindo a necessidade de aplicações frequentes de fertilizantes fosfatados, o que é vantajoso em sistemas de cultivo de alto valor agregado.

Para o BLE, a Q_{máx} de adsorção de P foi baixa, com valor de 0,00012 mg g⁻¹, indicando limitação significativa na capacidade de retenção (Tabela 5).

Tabela 5. Parâmetros de Adsorção e Dessorção de Fosfato para Biochar Derivado de Lodo de Esgoto.

BIOCHAR	PROCESSO	MODELO	KF (L kg ⁻¹)	R ² de KF	KL (L mg ⁻¹)	Q _{máx} (mg g ⁻¹)	R ² de KL
Lodo de Esgoto	Adsorção	Freundlich	150,0	0,97	-	-	-
		Langmuir	-	-	2719,392	0,00012	0,97
	Dessorção	Freundlich	150,0	0,97	-	-	-
		Langmuir	-	-	1133,587	0,00024	0,97

Notas: KL= constante de Langmuir; KL= constante de Freundlich; Q_{máx}= capacidade máxima de adsorção; R²= coeficiente de determinação.

Em contraste, a KL foi elevada, atingindo 2719,392 L mg⁻¹, sugerindo alta afinidade do BLE com P, embora com capacidade limitada para armazenar o nutriente. Esse comportamento pode estar relacionado à presença de grupos funcionais, como carboxílicos e fenólicos, na superfície do BLE, que formam ligações estáveis com o P. Durante a fase de dessorção, o BLE apresentou Q_{máx} de 0,00024 mg g⁻¹, e a KL diminuiu para 1133,587 L mg⁻¹, mas permaneceu alta, indicando que o P, uma vez adsorvido, tende a permanecer retido no material.

Essa alta afinidade, mas baixa capacidade de adsorção, indica que o BLE poderia ser vantajoso em aplicações que exigem imobilização de P, como na estabilização de solos contaminados, onde a retenção de nutrientes reduz o risco de lixiviação para águas próximas.

BLE representa opção economicamente viável e ecologicamente interessante, devido ao baixo custo da matéria-prima, que consiste em

resíduos de estações de tratamento de esgoto. Esse biochar possui afinidade elevada com o fósforo, mas com capacidade de retenção mais limitada, o que recomenda sua utilização em solos onde a adsorção de P a longo prazo não é prioridade.

O BLE pode ser vantajoso para culturas de ciclo curto ou para áreas onde a imobilização de P é desejável para evitar perdas por lixiviação, especialmente em regiões próximas a corpos d'água. Além disso, o uso de biochars de lodo de esgoto contribui para a gestão de resíduos urbanos e a sustentabilidade ambiental (Liu et al., 2023). Nguyen et al. (2021) complementam ao destacar que esses BCs também possuem potencial econômico para serem aplicados em larga escala, devido à acessibilidade e eficiência na retenção de nutrientes em ambientes agrícolas.

O BCF apresentou capacidade de adsorção intermediária para P, com Q_{máx} de 0,00029 mg g⁻¹ e KL de 940,154 L mg⁻¹ (Tabela 6).

Tabela 6. Parâmetros de Adsorção e Dessorção de Fosfato para Biochar Derivado de Cama de Frango.

BIOCHAR	PROCESSO	MODELO	KF (L kg ⁻¹)	R ²	KL (L mg ⁻¹)	Q _{máx} (mg g ⁻¹)	R ²
Cama de Frango	Adsorção	Freundlich	127,3	0,98	-	-	-
		Langmuir	-	-	940,154	0,00029	0,99
	Dessorção	Freundlich	146,9	0,98	-	-	-
		Langmuir	-	-	494,646	0,00076	0,99

Notas: KL= constante de Langmuir; KL= constante de Freundlich; Q_{máx}= capacidade máxima de adsorção; R²= coeficiente de determinação.

Durante a dessorção, o Q_{máx} do BCF aumentou para 0,00076 mg g⁻¹, e a KL foi de 494,646 L mg⁻¹, mostrando capacidade balanceada

de retenção e liberação de P. Esse balanço é útil em sistemas de tratamentos de água ou em solos que demandam liberação de P, contribuindo para a

disponibilidade de P ao longo do tempo sem retenção excessiva (Xu et al., 2021).

Embora o BCF tenha se mostrado o menos eficiente na adsorção de fosfato, alguns fatores podem explicar essa baixa capacidade. Como observado por estudos anteriores (Lehmann & Joseph, 2015), uma ASE menor tende a restringir a quantidade de moléculas que podem interagir com a superfície do biochar, reduzindo a eficácia de adsorção em aplicações que demandam maior retenção de nutrientes.

Outro ponto importante é a composição mineralógica do BCF. BCs derivados de cama de frango frequentemente contêm compostos inorgânicos, como sais de cálcio e potássio, que podem competir com os íons fosfato nos locais de adsorção (Parfitt, 1989). Esses compostos, presentes em quantidades elevadas, podem ocupar sítios ativos na superfície do BC, limitando a disponibilidade para a adsorção de P. A alta concentração de sais, refletida pela elevada condutividade elétrica (CE = 6,60 dS/m), sugere que o BCF possui quantidade significativa de íons solúveis, o que pode reduzir a afinidade do P pela superfície do BC em condições de alta salinidade (Siltecho et al., 2022).

Além disso, a presença de grupos funcionais específicos na superfície do BCF, como carboxílicos e fenólicos, pode influenciar negativamente sua capacidade de adsorção de P. Esses grupos funcionais, embora comuns em BCs de origem animal, tendem a favorecer a adsorção de cátions em vez de ânions como o fosfato (Nguyen et al., 2021). Assim, o perfil químico do BCF pode dificultar a retenção de fosfato e direcionar a adsorção para outros íons presentes em solução, limitando ainda mais sua eficiência em aplicações que requerem retenção de nutrientes.

Além do mais, o BCF opção para o uso agrícola, onde a constância na liberação de P auxilia na manutenção dos níveis de nutrientes no solo (Li & Li, 2022).

Com um pH alcalino e alta capacidade de troca catiônica (CTC), o BCF se destaca pela capacidade de corrigir solos ácidos e de fornecer nutrientes adicionais, como cálcio e potássio. No entanto, sua baixa área superficial específica limita sua eficiência na adsorção de fosfato, o que o torna mais indicado para situações em que a correção de acidez do solo é desejável. Devido à alta disponibilidade de resíduos avícolas, o BCF possui custo de produção baixo, sendo opção acessível para pequenos agricultores ou em regiões com grande produção de aves. Esse BC é útil em solos desgastados, que podem se beneficiar de suas propriedades alcalinas e de sua capacidade de

retenção de nutrientes ao longo do tempo (Nguyen et al., 2021).

Chen et al. (2023) exploram o uso de BCs em solos agrícolas para a retenção de nutrientes e a redução do escoamento de P, oferecendo uma visão sobre a aplicação prática em sistemas agrícolas que necessitam de liberação controlada de nutrientes.

Siltecho et al. (2022) estudaram a eficiência de diferentes BCs na retenção de P e como essa retenção pode variar de acordo com a matéria-prima e as características de produção do BC. O estudo destaca a importância de selecionar matérias-primas com alta ASE e como BCs podem ser usados para reter P em sistemas de cultivo.

Comparado ao BLE, que tem afinidade alta, mas capacidade limitada, o BCF parece oferecer um perfil mais balanceado. Com isso, o BCF pode ser uma ferramenta valiosa na gestão de nutrientes em ambientes agrícolas. É importante ressaltar que a afinidade pelo P está diretamente relacionada a vários fatores, incluindo a natureza do adsorvente, a presença de outros íons competidores e as cargas negativas no adsorvente (Parfitt, 1989).

Foi observado que, em concentrações baixas de P, não houve alteração na quantidade adsorvida. No entanto, à medida que a concentração de P aumentou, a quantidade de P adsorvido tornou-se mais sensível à presença de BC. Isso indica que a adsorção de P pelo BC segue uma tendência de resposta dependente da concentração.

No estudo realizado por Xu et al. (2022), foi analisada a capacidade de adsorção de P em diferentes solos salinos. Observou-se que a adsorção de P foi significativamente influenciada pela concentração de íons no solo. O aumento das concentrações de Na^+ , Ca^{2+} e Al^{3+} resultou em maior adsorção de P, com a capacidade de adsorção aumentando à medida que a concentração desses íons na solução aumentava, sugerindo, assim, uma resposta dependente da concentração.

Kedir et al. (2023), concentraram-se na dinâmica da adsorção de P em solos com diferentes níveis de salinidade e verificaram que a adsorção de P é altamente dependente das características físico-químicas do solo e da concentração de P na solução. Os resultados demonstraram que, em solos altamente salinizados, a adsorção de P aumentou proporcionalmente à concentração de P na solução, confirmando que a eficiência de adsorção é fortemente influenciada pela concentração.

Silva & Pereira (2023) sugerem que o biochar é eficaz em liberar fósforo ao longo do tempo, adaptando-se bem a sistemas agrícolas que buscam sustentabilidade. A combinação de biochar

com práticas agrícolas tradicionais pode, portanto, representar um avanço para a fertilidade do solo.

Os BCs (BMC, BLE e BCF) demonstram comportamentos distintos na adsorção e dessorção de P, evidenciando que cada um pode ser utilizado em diferentes contextos. A escolha do BC dependerá das demandas específicas de cada aplicação, com o BCF, por exemplo, sendo ideal para liberação controlada de nutrientes e o BLE para imobilização de P em condições ambientais específicas.

Conclusões

O BMC demonstrou o maior potencial para adsorção de fosfato, devido à sua elevada ASE e propriedades químicas favoráveis, como o alto teor de carbono e pH alcalino.

O BCF, apesar da menor eficiência em adsorção de fosfato, apresentou características que podem ser vantajosas para o manejo agrícola, incluindo alto pH e CTC, favorecendo a correção de acidez em solos ácidos e disponibilizando nutrientes adicionais.

O BLE exibiu elevada afinidade pelo fósforo, porém com menor capacidade de retenção, o que indica seu uso potencial para imobilização de fósforo em solos que necessitam controle de lixiviação.

A capacidade de adsorção e dessorção dos biochars foi influenciada pela sua composição mineral e pela ASE, com o BMC sendo eficiente para retenção de fosfato em condições de alta demanda de nutrientes, enquanto o BLE e o BCF são opções interessantes para contextos que exigem correção de acidez.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES). Os autores também agradecem a COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento) pela disponibilização do lodo de esgoto.

Referências

Antille, D., McLaughlin, M. J., & Kirschbaum, M. U. F. (2013). Characterisation of organomineral fertilisers derived from nutrient-enriched biosolids granules. *Applied and Environmental Soil Science*, 2013, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2013/694597>

Brockamp, R. L., & Weyers, S. L. (2021). Biochar amendments show potential for restoration of degraded, contaminated, and infertile soils in agricultural and forested landscapes. In S. M.

Hassan & A. A. Alhassoun (Eds.), *Soils and Landscape Restoration* (pp. 209-236). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813193-0.00008-4>

Canuto, C., Oliveira, L. S., & Barbosa, R. R. (2019). Biochar e esterco bovino aumentam a eficiência no uso de água da alface. *Diversitas Journal*, 4(3), 1082-1091. <https://doi.org/10.17648/diversitasjournal.v4i3.822>

Chintala, R., Mollenkopf, S., & Schumacher, T. (2014). Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures. *Clean – Soil, Air, Water*, 42(5), 626-634. <https://doi.org/10.1002/clen.201300089>

Chen, H., Wei, H., Xu, Y., Wang, Y., & Li, X. (2022). Advances in the automatic identification and quantification of mineral phases using X-ray diffraction data. *Journal of Applied Crystallography*, 55(4), 1000-1011. <https://doi.org/10.1107/S1600576722000234>

Chen, B., Chen, Z., & Lv, S. (2011). A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate. *Bioresource Technology*, 102, 716-723. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.067>

Chen, L., Ren, H., & Hou, Z. (2023). Sustainable nutrient release from biochar in agriculture: A review of factors influencing adsorption and desorption mechanisms. *Soil Science and Plant Nutrition*, 69(3), 249-263. <https://doi.org/10.1080/00380768.2023.2079047>

Chen, L., Ren, H., & Hou, Z. (2023b). Sustainable nutrient release from biochar in agriculture: A review of factors influencing adsorption and desorption mechanisms. *Soil Science and Plant Nutrition*, 69(3), 249-263. <https://doi.org/10.1080/00380768.2023.2079047>

EMBRAPA. (2009). *Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): Suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo*. Embrapa Amazônia Ocidental. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/576059/1/Proci09.00073.pdf>

Fachini, J., & Figueiredo, C. C. D. (2022). Pyrolysis of sewage sludge: Physical, chemical, morphological and mineralogical transformations. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 65, e22592. <https://doi.org/10.1590/1678-4324202210592>

Fan, Z., Chen, Z., Wu, C., Chen, M., & Li, F. (2021). Adsorption and release characteristics of phosphorus by biochar derived from typical agricultural wastes. *Journal of Environmental*

- Management*, 278, 111560. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111560>
- Farhangi Abriz, S., Yousefi, H., & Bahrami, M. (2021). Biochar effects on yield of cereal and legume crops using meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 775, 145869. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145869>
- Fernandes, J. D., Oliveira, F. A., & Silva, R. F. (2022). Thermal treatment of poultry litter: Part II. Evaluation of structural and morphological characteristics. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 26, 680-687. <https://doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v26n9p680-687>
- Fraga, T. J. M., Freitas, J. R., & Siqueira, R. A. (2019). Functionalized graphene-based materials as innovative adsorbents of organic pollutants: A concise overview. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 36(1), 1-31. <https://doi.org/10.1590/0104632.20190361s20180283>
- Freundlich, H. (1907). Über die adsorption in lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 57(1), 385-470. <https://doi.org/10.1515/zpch-1907-5723>
- Fontana, A. (2017). Matéria orgânica. In P. C. Teixeira, G. E. F. Donagemma, & D. C. R. Fontana (Eds.), *Manual de métodos de análises de solo* (3ª ed., pp. 397-400). Embrapa. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>
- Glaser, B., & Lehr, V.-I. (2019). Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. *Scientific Reports*, 9, 9338. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45693-z>
- Islam, M. U., Liu, X., Zheng, Y., & Bibi, I. (2021). Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 209, 104926. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104926>
- Kahr, G., & Madsen, F. T. (1995). Determination of the cation exchange capacity and the surface area of bentonite, illite and kaolinite by methylene blue adsorption. *Applied Clay Science*, 9(5), 327-336. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(94\)00028-O](https://doi.org/10.1016/0169-1317(94)00028-O)
- Law, K. P., & Pagilla, K. R. (2019). Reclaimed phosphorus commodity reserve from water resource recovery facilities: A strategic regional concept towards phosphorus recovery. *Resources, Conservation and Recycling*, 150, 104429. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104429>
- Lashari, B., Liu, Y., Xing, B., & Pan, G. (2015). Effects of biochar application on soil hydrological and physicochemical properties and wheat growth under salt stress conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201(4), 254-261. <https://doi.org/10.1111/jac.12101>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: An introduction. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management* (pp. 1-13). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203762264>
- Lima, J. R. S., Silva, D. A., Santos, G. D. dos, Lima, A. L., & Ferreira, T. G. (2020). Biochar increases soil water content and total organic carbon but has no effects on soil respiration in a Regosol of Caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13, 3448-3458. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3448-3458>
- Lima, J. R. S., Silva, D. A., Santos, G. D. dos, & Almeida, C. A. (2019). Produção e eficiência no uso de água do feijão comum adubado com biochar. *Diversitas Journal*, 4, 1146-1155. <https://doi.org/10.17648/diversitasjournalv4i3.837>
- Lima, J. R. S., Lima, A. L., Ferreira, T. G., & Santos, G. D. dos. (2021). Biochar enhances Acrisol attributes and yield of bean in Brazilian tropical dry region. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 71, 674-682. <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1937691>
- Lima, J. R. S., Silva, A. D., Lima, A. L., & Ferreira, T. G. (2018). Effect of biochar on physicochemical properties of a sandy soil and maize growth in a greenhouse experiment. *Geoderma*, 319, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.033>
- Liu, Z., Liu, Y., Xing, B., & Pan, G. (2018). Biochars role as an alternative adsorbent for organic and inorganic pollutants: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(11), 10577-10597. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1820-9>
- Liu, Y., Wang, S., & Sun, X. (2018). Negative priming effect of three kinds of biochar on the mineralization of native soil organic carbon. *Land Degradation & Development*, 29(11), 3985-3994. <https://doi.org/10.1002/ldr.3147>
- Liu, Y., Sun, X., & Xing, B. (2019). Emerging applications of biochar-based materials for energy storage and conversion. *Energy & Environmental Science*, 12(6), 1751-1779. <https://doi.org/10.1039/C9EE00206E>
- Liu, Y., Li, J., Pan, G., & Li, Z. (2019). Biochar increases phosphorus availability in acidic soil

- by decreasing iron (Fe) and aluminum (Al) mobility. *Science of the Total Environment*, 689, 184-191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.344>
- Liu, Z., Chen, L., Yang, H., Zhang, Y., & Sun, Z. (2020). Application of sewage sludge biochar to agricultural soil: Benefits and risks. *Environmental Pollution*, 273, 116451. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116451>
- Li, X., Zhao, Y., & Gao, B. (2021). Characterization of biochars derived from agricultural residues for soil amendment. *Environmental Science & Technology*, 55(6), 3561-3570. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06534>
- Li, H., Dong, X., Da Silva, E. B., De Oliveira, L. M., Chen, Y., & Ma, L. Q. (2017). Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*, 178, 466-478. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.02>
- Li, Y., & Li, Y. (2022). Biochar application to soils: Effects on phosphorus adsorption and potential environmental implications. *Agricultural Research*, 14(1), 152–159. <https://doi.org/10.1007/s40003-021-00564-2>
- Luo, L., Wang, J., Zhang, L., Li, Q., & Zhao, M. (2023). Carbon sequestration strategies in soil using biochar: Advances, challenges, and opportunities. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c02620>
- Kalus, K. G., Parfitt, R. L., & Ruthven, D. M. (2019). A review of biochar properties and their utilization in crop agriculture and livestock production. *Applied Sciences*, 9(17), 3494. <https://doi.org/10.3390/app9173494>
- Kedir, M. J., McKenzie, D. B., Ziadi, N., & Unc, A. (2023). Comparação de testes de fósforo agroambiental para Podzols boreais agrícolas e naturais. *Canadian Journal of Soil Science*, 103(1), 234-248. <https://doi.org/10.1002/saj2.20180>
- Muthusamy, M., Pan, W., Tang, S., Zhou, J., Liu, M., Xu, M., Kuzyakov, Y., Ma, Q., & Wu, L. (2019). Genome-wide identification of novel, long non-coding RNAs responsive to *Mycosphaerella eumusae* and *Pratylenchus coffeae* infections and their differential expression patterns in disease-resistant and sensitive banana cultivars. *Plant Biotechnology Reports*, 13, 73-83. <https://doi.org/10.1007/s11816-018-00514-z>
- Murthy, N., Singh, J., & Biswas, A. (2020). Phosphorus adsorption and desorption characteristics of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures. *Chemosphere*, 246, 125691. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.12.5691>
- Parfitt, R. L. (1989). Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. *Journal of Soil Science*, 40(2), 359-369. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1989.tb01280.x>
- Pan, W., Tang, S., Zhou, J., Liu, M., Xu, M., Kuzyakov, Y., Ma, Q., & Wu, L. (2022). Plant–microbial competition for amino acids depends on soil acidity and the microbial community. *Plant and Soil*, 475, 457-471. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04663-8>
- Prapagdee, S., & Tawinteung, N. (2017). Effects of biochar on enhanced nutrient use efficiency of green bean, *Vigna radiata* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 9460-9467. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8633-1>
- Rheinheimer, S. D., & Kaminski, J. (2003). Phosphorus desorption evaluated by successive extractions of soils samples under no-tillage and conventional tillage systems. *Ciência Rural*, 33, 1053-1059. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000600009>
- Silva, F., & Souza, R. (2023). Phosphorus management strategies for sustainable agriculture. *Environmental Research*, 200, 111234. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.111234>
- Silva, J., & Pereira, A. (2023). Strategies for improving phosphorus availability in agricultural soils. *Agricultural Research Journal*, 45(2), 123-134. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020462>
- Sanchez Reinoso, A. D., & Vieira, S. R. (2020). Use of biochar in agriculture. *Acta Biológica Colombiana*, 25(2), 327-338. <https://doi.org/10.15446/abc.v25n2.79466>
- Sasabuchi, I. T. M., & Morais, D. A. (2023). Sustentabilidade no uso de fósforo: uma revisão bibliográfica com foco na situação atual do estado de São Paulo, Brasil. *Química Nova*, 46(2), 185-198. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170967>
- Sasabuchi, T., Yamada, K., & Nakamura, M. (2023). Sludge-based biochar in enhancing phosphorus availability in crop soils. *Agricultural Sciences Journal*, 19(3), 402–412. <https://doi.org/10.1016/j.agsci.2023.40212>
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., & Fam, M. A. (2002). *Soils and waves: Particulate materials behavior, characterization, and process monitoring*. John Wiley & Sons.
- Siltecho, S., & Gaihre, Y. K. (2022). Characterization of *Pterocarpus macrocarpus*

- (pradoo wood) biochar and its effect on the retention properties of sandy soils in Northeast Thailand. *Soil Use and Management*, 38(2), 1293-1306. <https://doi.org/10.1111/sum.12774>
- Souza, H. A., & Silva, C. A. (2020). Biochar, calagem e micronutrientes no desenvolvimento de plantas de soja. *Embrapa Meio-Norte*, Teresina, PI, 18. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1125717>
- Sun, T., Zhang, L., & Li, Y. (2020). Enhancing crop tolerance to salinity stress with biochar application: A review. *Environmental Pollution*, 267, 115635. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115635>
- Sun, Y., & Huang, Y. (2021). Application of sewage sludge biochar to agricultural soil: Benefits and risks. *Environmental Pollution*, 273, 116451. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116451>
- Sun, K., & Li, Y. (2017). Comparative impact of aging on the adsorption of ionizable and non-ionizable organic contaminants to biochar. *Environmental Science & Technology*, 51(7), 4245-4251. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06026>
- Teixeira, P. C., & Donagemma, G. K. (2017a). Manual de métodos de análises de solo. *Embrapa*, Brasília-DF, 199-202. Disponível em: <https://www.embrapa.br>
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017b). Fósforo disponível. In *Manual de métodos de análises de solo* (pp. 203-208). *Embrapa*, Brasília-DF. Disponível em: <https://www.embrapa.br>
- Teixeira, P. C., & Fontana, A. (2017c). *Manual de métodos de análise de solo* (3ª ed.). *Embrapa*, Brasília-DF.
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K. Y., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., & Cowie, A. (2020). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 327, 235-246. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0050-x>
- Vinha, A. P. C., & Costa, C. S. (2021). Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais. *Nativa*, 9(1), 30-35. <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i1.10973>
- Xu, X., Wang, H., & Yang, Y. (2020). Effect of biochar amendments on soil fertility and crop growth: A review. *Geoderma*, 374, 114441. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114441>
- Xu, R., Zhao, A., Yuan, J., & Jiang, J. (2021). Phosphate adsorption on biochar: Influence of biochar modification and environmental conditions. *Journal of Environmental Management*, 288, 112346. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112346>
- Wang, J., & Li, Q. (2021). Biochar application alleviates soil salinity and enhances soil fertility in coastal saline soil. *Soil & Tillage Research*, 209, 104901. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104901>
- Wang, J., & Zhang, H. (2017). One-step preparation and application of magnetic sludge-derived biochar on acid orange 7 removal via both adsorption and persulfate-based oxidation. *RSC Advances*, 7(30), 18696-18706. <https://doi.org/10.1039/C7RA01425B>
- Wu, P., Li, C., Xu, L., & Xie, Y. (2020). Recovery of phosphorus from wastewater using woodchip biochar as a bio-sorbent. *Environmental Science & Technology*, 54(16), 9919-9930. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01808>
- Yuan, H., Lu, T., & Chen, Y. (2015). Influence of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of biochar made from sewage sludge and its effect on availability of Cd in a calcareous soil. *Chemosphere*, 85(5), 849-856. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.06.029>
- Zhang, H., & Lian, Z. (2021). Biochar application alters soil microbial communities and soil fertility in the Chinese Loess Plateau. *Applied Soil Ecology*, 158, 103804. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103804>
- Zhang, Y., Wang, X., Zhao, L., & Li, H. (2022). Effect of biochar addition on phosphorus adsorption characteristics of red soil. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 12345. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.12345>
- Zhao, S., & Ta, N. (2021). Effects of pyrolysis temperature and feedstock type on the adsorption of atrazine by biochar. *Journal of Hazardous Materials*, 384, 121473. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.12147>
- Zhang, Y., & Li, Z. (2022b). Enhancing soil phosphorus availability with biochar. *Journal of Environmental Management*, 319, 115751. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115751>