

COPIRÓLISE DE CAROÇO DE AÇAÍ E PÓ DE ROCHA: PROPRIEDADES QUÍMICAS E DISPONIBILIDADE DE MACRONUTRIENTES

CO-PYROLYSIS OF AÇAÍ SEED AND ROCK POWDER: CHEMICAL PROPERTIES AND MACRONUTRIENT AVAILABILITY

Nilbia Abreu Ramos¹
Thalia Maria de Sousa Dias Castro²
Yan Nunes Dias³
Flávio Henrique Santos Rodrigues⁴
Antonio Rodrigues Fernandes⁵
Wendel Valter da Silveira Pereira⁶

Área Temática V: Meio ambiente, Mudanças climáticas e Sustentabilidade
Modalidade: Artigo Científico

Resumo

O biocarvão tem sido recomendado como uma alternativa valiosa para fins agrônômicos, melhorando a qualidade do solo e a produtividade das culturas. A copirólise de pó de rocha e biomassa pode produzir um biocarvão com potencial para aumentar a capacidade de fornecer nutrientes como Ca, Mg, K e P, diminuindo assim a necessidade de fertilizantes industrializados. O objetivo foi caracterizar propriedades químicas da copirólise do pó de rocha e caroços de açaí em duas temperaturas. O pó de rocha foi obtido na pedreira Vale do Curuá II, localizada no município de Altamira, estado do Pará. Os caroços de açaí foram coletados em áreas de deposição na cidade de Belém, também no estado do Pará. Os biocarvões foram então produzidos a partir da copirólise de pó de rocha (20%) e caroços de açaí (80%), nas temperaturas de 400 e 700 °C. Os tratamentos consistiram em pó de rocha (PR), pó de rocha pirolisado com caroço de açaí a 400 °C (PRB400), e pó de rocha pirolisado com caroço de açaí a 700 °C (PRB700), que foram caracterizados em termos de acidez ativa (pH), teor de C solúvel, e fracionamento dos nutrientes P, K, Ca e Mg. O pH seguiu a tendência PRB400 < PR < PRB700, variando de 6,9 a 10,4. A temperatura de 700 °C de copirólise resultou em maior conteúdo de C solúvel. O P apresentou maior conteúdo solúvel após a copirólise de 400 °C, equivalente a 224,1 mg kg⁻¹. Cálcio, Mg e K apresentaram comportamento bastante variado, com maior disponibilidade após a aplicação de PR, PRB400 e PRB700, respectivamente. Os resultados desse estudo sugerem que a copirólise de caroço de açaí e pó de rocha potencializa a liberação de nutrientes como P, Mg e K, representando uma alternativa ambientalmente amigável de reutilização de resíduos para fins agrícolas.

¹ Universidade Federal Rural da Amazônia; nilbiaramoss@gmail.com

² Universidade Federal Rural da Amazônia; thaliamsdias@gmail.com

³ Instituto Tecnológico Vale - Desenvolvimento Sustentável; yan.dias@pq.itv.org

⁴ Universidade Federal Rural da Amazônia; flaviohsrodrigues2@gmail.com

⁵ Universidade Federal Rural da Amazônia; antonio.fernandes@ufra.edu.br

⁶ Universidade Federal Rural da Amazônia; wendel.valter@ufra.edu.br

Palavras-chave: economia circular; remineralizadores; agricultura sustentável.

Abstract

Biochar has been recommended as a valuable alternative for agronomic purposes, improving soil quality and crop productivity. The co-pyrolysis of rock powder and biomass can produce a biochar with the potential to enhance the supply capacity of nutrients such as Ca, Mg, K, and P, thereby reducing the need for industrial fertilizers. The objective was to characterize the chemical properties of the co-pyrolysis of rock powder and açai pits at two temperatures. The rock powder was obtained from the Vale do Curuá II quarry, located in the municipality of Altamira, Pará state. The açai pits were collected from deposition areas in the city of Belém, also in Pará state. The biochars were then produced from the co-pyrolysis of rock powder (20%) and açai pits (80%) at temperatures of 400 and 700 °C. The treatments consisted of rock powder (RP), rock powder pyrolyzed with açai pits at 400 °C (RPB400), and rock powder pyrolyzed with açai pits at 700 °C (RPB700), which were characterized in terms of active acidity (pH), soluble C content, and nutrient fractionation of P, K, Ca, and Mg. The pH followed the trend $RPB400 < RP < RPB700$, ranging from 6.9 to 10.4. The 700 °C co-pyrolysis temperature resulted in a higher soluble C content. Phosphorus showed a higher soluble content after the 400 °C co-pyrolysis, equivalent to 224.1 mg kg^{-1} . Calcium, Mg, and K exhibited highly varied behavior, with greater availability after the application of RP, RPB400, and RPB700, respectively. The results of this study suggest that the co-pyrolysis of açai pits and rock powder enhances the release of nutrients such as P, Mg, and K, representing an environmentally friendly alternative for the reuse of waste for agricultural purposes.

Key words: circular economy; remineralizers; sustainable production.

1. Introdução

A maioria dos solos da bacia amazônica apresenta limitações químicas, como alta acidez e baixa disponibilidade de nutrientes. As classes predominantes de solos são os Latossolos e Argissolos, com alta intemperização (Quesada *et al.*, 2020; Schaefer *et al.*, 2023). Essas características refletem em maior demanda de fertilizantes na agricultura, o que aumenta significativamente os custos de produção. Por isso, é essencial desenvolver e adotar novas fontes de nutrientes. A fertilidade desses solos deve ser incrementada por meio de sistemas sustentáveis de produção de alimentos, com o fortalecimento de políticas públicas voltadas à pesquisa e assistência técnica, além da implementação de práticas agrícolas que aumentem a produtividade e promovam a saúde do solo.

A aplicação do pó de rocha tem se destacado como uma alternativa promissora para aumentar a fertilidade do solo e favorecer o cultivo de espécies agrícolas. Essa prática é considerada uma remineralização, utiliza pó de rocha para recuperar solos com baixa disponibilidade de nutrientes, promovendo a fertilidade e a produção sustentável (Theodoro

et al., 2021). Outra estratégia recomendada para melhorar a qualidade de solos é a aplicação de biocarvão, que consiste em um material carbonáceo oriundo da pirólise de biomassa, sob condições controladas de tempo, temperatura e taxa de aquecimento. O biocarvão pode ser produzido a partir de diversas matérias-primas, incluindo resíduos agroindustriais (Bano *et al.*, 2025).

O estado do Pará é o maior produtor nacional de açaí, com 1.576.302 toneladas de frutos colhidos em 2023, o que tem resultado na geração de grandes volumes de resíduos, frequentemente descartados de maneira inadequada nos centros urbanos. Paralelamente, atividades como britagem e mineração também produzem quantidades expressivas de rochas trituradas no estado. Esses materiais residuais apresentam potencial para a formulação de insumos que melhorem a fertilidade do solo, reduzam a dependência de fertilizantes industrializados, minimizem perdas por lixiviação e, conseqüentemente, promovam o aumento da produtividade e a sustentabilidade da agricultura (Jia *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2021). Embora existam diversas pesquisas sobre fertilizantes à base de biocarvão, a copirólise de resíduos de açaí com pó de rocha como fonte alternativa de nutrientes ainda é uma abordagem pouco explorada na região.

A copirólise de resíduos de açaí e pó de rocha pode originar biocarvões com propriedades promissoras para a melhoria da fertilidade do solo. No entanto, essas potencialidades requerem estudos detalhados da caracterização química e de solubilidade de elementos essenciais. Nesse contexto, os objetivos deste estudo foram: i) determinar o potencial hidrogeniônico (pH); e ii) quantificar os teores solúveis de carbono (C), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) em pó de rocha e biocarvões produzidos a partir da copirólise de caroços de açaí e pó de rocha, em duas temperaturas (400 e 700 °C).. Espera-se que os resultados deste estudo contribuam para futuras pesquisas sobre a aplicação de resíduos agroindustriais e minerais na melhoria da qualidade de solos na região amazônica.

2 Metodologia

2.1 Obtenção de pó de rocha e produção dos biocarvões

Os resíduos oriundos da produção da polpa do açaí foram coletados em feiras urbanas da região metropolitana de Belém, estado do Pará. O pó de rocha, por sua vez, foi

proveniente da Pedreira Vale do Curuá II, de extração e britamento de pedras e outros materiais para construção civil, localizada no município de Altamira, também no estado do Pará (Tabela 1).

Tabela 1 – Conteúdos totais de elementos químicos no pó de rocha utilizado no estudo.

Elemento	Conteúdo
Ca (g kg ⁻¹)	12,6
Mg (g kg ⁻¹)	7,3
K (g kg ⁻¹)	7,4
P (g kg ⁻¹)	1,158
Fe (g kg ⁻¹)	66,7
Cu (mg kg ⁻¹)	328,6
Zn (mg kg ⁻¹)	144,5
Mn (mg kg ⁻¹)	832

Fonte: Os autores (2025).

Os tratamentos avaliados foram: i) pó de rocha (100%), ii) caroços de açaí pirolisados com pó de rocha na temperatura de 400 °C, e iii) caroços de açaí pirolisados com pó de rocha na temperatura de 700 °C. Para a produção dos biocarvões, os caroços de açaí (previamente secos e triturados) e o pó de rocha foram uniformizados em peneiras de 4 e 2 mm, respectivamente. Após isso, os materiais foram misturados na proporção 1:4 (pó de rocha:biomassa) e submetidos a pirólise em cadinhos de porcelana (tampados para minimizar o fluxo de oxigênio), em forno tipo mufla (Quimis, modelo Q318M24), sob temperaturas de 400 e 700 °C, com uma taxa de aquecimento de 3,3 °C min⁻¹. A temperatura final de pirólise foi mantida por 1 h (pirólise lenta) e, em seguida, o material foi deixado na mufla até alcançar a temperatura ambiente. Os biocarvões foram triturados e peneirados (<0,150 mm) para posterior análise e caracterização.

2.2 Caracterização do pH e carbono solúvel

O pH foi determinado na razão de 1:10 (sólido: solução). O conteúdo de C solúvel foi determinado pelo método colorimétrico, baseado na leitura da colorimetria da reação do íon

de cromo com C orgânico, na proporção 1:10 (biocarvão:água destilada), agitado por 30 min em temperatura ambiente, seguido de centrifugação e leitura do sobrenadante em espectrofotômetro em 650 nm.

2.3 Potencial de liberação de nutrientes

2.3.1 Fracionamento de P

Para o fracionamento de P, foi utilizada a metodologia proposta por Qian e Jiang (2014), que permite a análise das seguintes frações de P: i) P solúvel (P_{sol}), extraído com água ultrapura, na proporção 1:25 (material:solução) durante 16 h, seguido de centrifugação, filtragem e análise do sobrenadante; ii) P lábil (P_{lab}), extraído com NaHCO₃ 0,5 M, na proporção 1:25 (material:solução) durante 16 h, seguido de centrifugação, filtragem e análise do sobrenadante; iii) P adsorvido (P_{ads}), extraído com NaOH 0,1 M, na proporção 1:25 (material:solução) durante 16 h, seguido de centrifugação, filtragem e análise do sobrenadante; e iv) P associado a minerais (P_{min}), extraído com HCl 1 M, na proporção 1:25 (material:solução) durante 16 h, seguido de centrifugação, filtragem e análise do sobrenadante. As frações de P foram quantificadas pelo método colorimétrico.

2.3.2 Fracionamento de Ca, Mg e K

A fração solúvel (F1) foi determinada na proporção 1:25 (material:água) durante 16 h, seguido de centrifugação, filtragem e análise do sobrenadante. A fração trocável (F2) foi determinada na proporção 1:25 (material:1 M de NH₄OAc) durante 16 h, seguido de centrifugação, filtragem e análise do sobrenadante. A fração mineral (F3) foi determinada na proporção 1:25 (material:HNO₃) durante 1 h a 80 °C com agitação, seguido de centrifugação, filtragem e análise do sobrenadante. A fração residual (F4), por sua vez, foi estimada a partir da subtração de F1, F2 e F3 do conteúdo total. A determinação dos conteúdos foi realizada via espectrometria de emissão atômica com plasma induzido por micro-ondas (Agilent 4210).

2.4 Análises estatísticas

Os resultados das características químicas e conteúdo de nutrientes foram submetidos à análise estatística descritiva e ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$). Para a

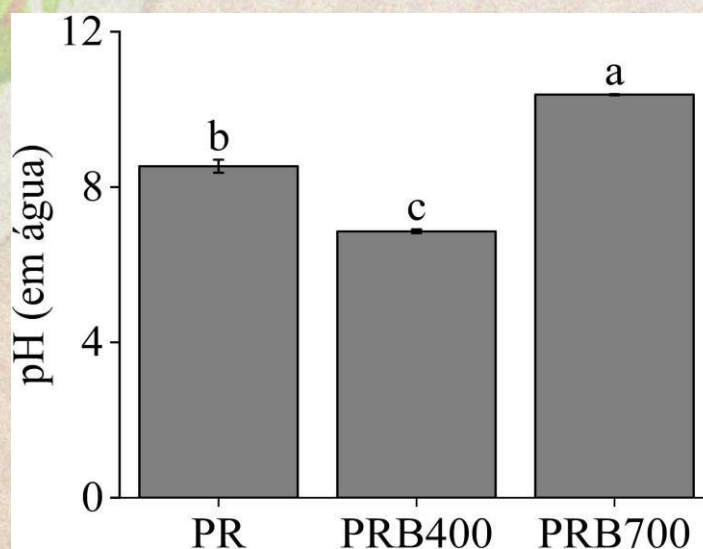
comparação entre as médias dos materiais estudados, o teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) foi utilizado. Todas as análises estatísticas foram realizadas usando o software R (versão 4.2.3).

3 Resultados/Discussões

3.1 Caracterização do biocarvão

Os valores de pH dos materiais analisados variaram entre 6,9 e 10,4 (Figura 1), com pH maior após a copirólise em temperatura mais alta. Esse aumento pode estar associado à formação de cinzas, resultante da maior decomposição de compostos orgânicos sob altas temperaturas (John *et al.*, 2024). Por outro lado, o menor pH foi registrado na copirólise a 400 °C, possivelmente em função da preservação de grupos funcionais ácidos não decompostos em condições térmicas menos intensa (Zhao *et al.*, 2020). Além disso, as propriedades do pó de rocha podem ter contribuído na elevação do pH, devido à presença de elementos que favorecem a formação de compostos alcalinos em temperaturas mais elevadas. Considerando que a faixa ideal de pH para absorção de nutrientes é de 6,5 a 7,0, os materiais obtidos apresentam potencial para melhorar a disponibilidade de nutrientes nos solos da região amazônica.

Figura 1 – Potencial hidrogeniônico (pH) do pó de rocha (PR), pó de rocha pirolisado com caroço de açaí a 400 °C (PRB400), e pó de rocha pirolisado com caroço de açaí a 700 °C (PRB700).



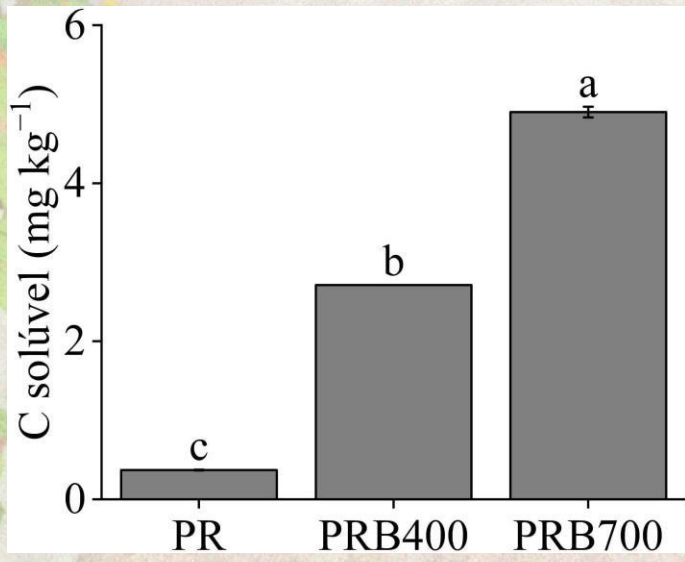
Letras distintas comparam tratamentos pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Resultados apresentados como média \pm desvio padrão.

Fonte: Os autores (2025).

A copirólise a 700 °C resultou em um maior teor de C solúvel (Figura 2), indicando um aumento no grau de carbonização do material. Esse comportamento evidencia alterações significativas na estrutura e composição dos produtos gerados, favorecendo a conversão do C orgânico em formas mais estáveis e a formação de materiais com propriedades diferenciadas. Além disso, o incremento da temperatura promoveu maior produção de cinzas, geralmente ricas em carbonatos, o que reflete uma decomposição mais eficiente da biomassa.

Figura 2 – Conteúdo de carbono (C) solúvel em pó de rocha (PR), pó de rocha pirolisado com caroço de açaí a 400 °C (PRB400) e pó de rocha pirolisado com caroço de açaí a 700 °C (PRB700).



Letras distintas comparam tratamentos pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Resultados apresentados como média ± desvio padrão.

Fonte: Os autores (2025).

Diante da elevada acidez, toxicidade de alumínio (Al^{3+}) e baixa disponibilidade de macro e micronutrientes comumente observadas nos solos da Amazônia, o uso de biocarvão surge como uma estratégia promissora para a melhoria da qualidade do solo, demandando estudos que avaliem seu potencial.

A eficácia do biocarvão no aumento do pH depende de diversos fatores, como o tipo de biomassa empregada, as condições de pirólise (temperatura de pirólise, taxa de aquecimento e tempo de residência), a dose de aplicação e as características iniciais do solo. Da mesma maneira, o pó de rocha também pode contribuir para o aumento do pH por meio da reação dos carbonatos de Ca e Mg com íons H⁺ no solo. Quando utilizados em conjunto, biocarvão e pó de rocha podem apresentar sinergia, aumentando a eficiência na correção da acidez e na liberação de nutrientes, com potencial para incrementar a fertilidade dos solos amazônicos (Conceição *et al.*, 2022; Purakayastha *et al.*, 2019).

3.2 Potencial de liberação de nutrientes

3.2.1 Fracionamento de P

O aumento da temperatura de pirólise influenciou significativamente as frações de fósforo (P) (Tabela 2). Maior conteúdo de P solúvel foi observado na copirólise a 400 °C, indicando que temperaturas mais baixas favorecem a liberação desse nutriente de plantas. O biocarvão é amplamente reconhecido por sua capacidade de promover a liberação gradual de P, prolongando sua disponibilidade no solo (Zhao *et al.*, 2020). Por outro lado, a menor solubilidade de P observada a 700 °C pode estar associada à sua retenção em formas mais estáveis, resultantes das alterações estruturais induzidas por temperaturas elevadas (Figueiredo *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2017).

Tabela 2 – Fracionamento de fósforo (P) em pó de rocha (PR), pó de rocha pirolisado com caroço de açaí a 400 °C (PRB400) e pó de rocha pirolisado com caroço de açaí a 700 °C (PRB700).

Fração de P	PR	PRB400	PRB700
Psol	38,0 ± 0,3 c	224,1 ± 2,6 a	151,4 ± 3,3 b
Plab	50,0 ± 1,0 c	156,3 ± 2,5 b	212,3 ± 6,9 a
Pads	34,4 ± 1,2 a	59,1 ± 1,3 a	53,3 ± 2,5 a
Pmin	428,3 ± 17,1 a	288,5 ± 10,9 b	319,0 ± 13,9 b
Pres	1249,3 ± 17,0 a	1072,0 ± 14,6 b	1050,2 ± 27,4 b

Letras distintas comparam tratamentos pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Resultados apresentados como média ± desvio padrão.

Fonte: Os autores (2025).

O aumento da temperatura de pirólise elevou o teor de P na fração lábil, sugerindo a mobilização de P de frações mais estáveis para mais disponíveis, conforme evidenciado pela redução nos teores de P nas frações mineral e residual em relação ao controle (Tabela 2). A migração dos nutrientes para compartimentos de menor estabilidade representa vantagens a produtos organominerais, por favorecer a absorção pelas plantas. Além disso, o incremento do P disponível com a copirólise pode estar associado a maior formação das cinzas, geralmente ricas em compostos de P (Yuan *et al.*, 2016).

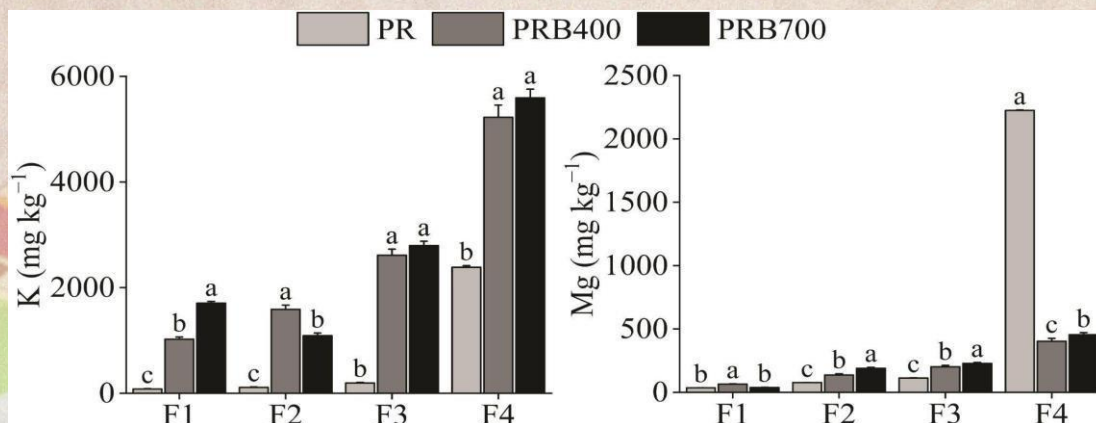
Os solos tropicais brasileiros apresentam baixa disponibilidade natural de P, principalmente devido à sua forte adsorção em coloides do solo, o que compromete a eficiência dos fertilizantes fosfatados, especialmente em solos altamente intemperizados (Fink *et al.*, 2016). Nesse contexto, o uso de biocarvão surge como uma alternativa promissora para aumentar a disponibilidade de P, tanto por meio de sua liberação gradual para as plantas, quanto pela redução da fixação desse elemento em minerais do solo. A copirólise de biomassa (caroço de açaí) com pó de rocha pode, portanto, contribuir para a fertilidade dos solos tropicais e favorecer práticas agrícolas mais sustentáveis (Lehmann; Joseph, 2024).

3.2.2 Fracionamento de Ca, Mg e K

A copirólise do material aumentou o teor solúvel de K (PRB700) e magnésio (Mg) (PRB400) (Figura 3). A maior solubilidade K a 700 °C pode estar relacionada com a formação de cinzas com níveis mais elevados de compostos solúveis desse nutriente. Por sua vez, a maior solubilidade de Mg a 400 °C pode decorrer de carbonatos, cloretos e sulfatos, que representam compostos com maior facilidade de dissolução. Esse aumento na solubilidade de nutrientes proporcionado pela copirólise apresenta grande potencial para melhorar a disponibilidade nutricional para plantas cultivadas em solos ácidos tropicais (Choudhary *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2020). Além disso, os biocarvões podem reduzir a lixiviação de nutrientes, como demonstrado por Figueiredo *et al.* (2021), o que é especialmente relevante em regiões de alta pluviosidade, onde a perda de nutrientes é mais intensa.

Figura 3 – Fracionamento de potássio (K) e magnésio (Mg) em pó de rocha (PR), pó de

rocha pirolisado com caroço de açaí a 400 °C (PRB400) e pó de rocha pirolisado com caroço de açaí a 700 °C (PRB700).



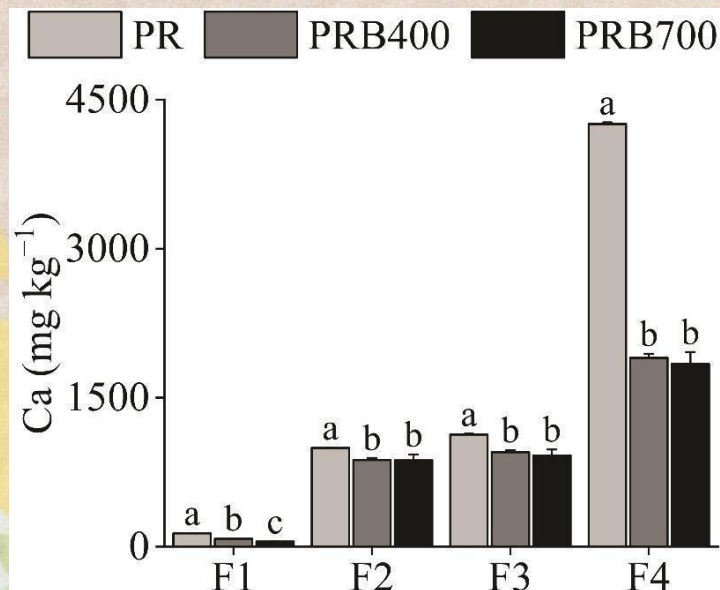
Letras distintas comparam tratamentos pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Resultados apresentados como média \pm desvio padrão.

Fonte: Os autores (2025).

Ambas as temperaturas de pirólise aumentaram os teores de K e Mg na fração trocável. Em contraste, o Ca apresentou redução tanto na fração solúvel quanto na trocável (Figura 4), indicando maior retenção em formas mais estáveis. A fração trocável atua como um reservatório de nutrientes de liberação rápida no solo (Adhikari *et al.*, 2024). Assim, os resultados sugerem que K e Mg podem ser disponibilizados às plantas a partir dessa fração,, ao passo que o Ca parece estar associado predominantemente a formas não trocáveis.

Figura 4 – Fracionamento de cálcio (Ca) em pó de rocha (PR), pó de rocha pirolisado com caroço de açaí a 400 °C (PRB400) e pó de rocha pirolisado com caroço de açaí a 700 °C (PRB700).



Letras distintas comparam tratamentos pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Resultados apresentados como média \pm desvio padrão.

Fonte: Os autores (2025).

Os nutrientes Ca, Mg e K foram majoritariamente acumulados em formas de baixa solubilidade, como as frações mineral e residual, o que evidencia o potencial desses materiais como fontes de liberação lenta quando aplicados ao solo. O aumento nos teores desses elementos pode contribuir para a redução da acidez de substratos com pH baixo, devido à ocupação dos sítios de troca por cátions básicos. Esses efeitos são particularmente relevantes em solos ácidos, como os predominantemente encontrados na região amazônica.

2. Conclusão

O pH e o conteúdo de C solúvel aumentaram com a copirólise a 700 °C. O P apresentou maior solubilidade após a copirólise a 400 °C, enquanto as frações mais estáveis concentraram maiores teores de P no pó de rocha não pirolisado. Os nutrientes Ca, Mg e K tiveram comportamento bastante variado, com maior disponibilidade após a aplicação de PR, PRB400 e PRB700, respectivamente. O acúmulo dos nutrientes em frações mais estáveis indica o potencial de uso do produto organomineral como fertilizante de liberação controlada, o qual pode minimizar perdas no ambiente. Estudos são sugeridos para avaliar o potencial desses produtos em solos de baixa fertilidade, além de testes avaliando diferentes proporções de pó de rocha e biocarvão, visando compreender de maneira mais completa os

impactos na qualidade do solo. O uso desses insumos na copirólise poderá auxiliar no reaproveitamento de resíduos agroindustriais e de exploração mineral na Amazônia, fortalecendo a economia circular.

3. Referências Bibliográficas

- Adhikari, S., Moon, E., Timms, W., 2024. Identifying biochar production variables to maximise exchangeable cations and increase nutrient availability in soils. *J. Clean. Prod.* 446, 141454. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141454>
- Bano, A., Aziz, M.K., Prasad, B., Ravi, R., Shah, M.P., Lins, P.V.D.S., Meili, L., Prasad, K.S., 2025. The multifaceted power of biochar: A review on its role in pollution control, sustainable agriculture, and circular economy. *Environ. Chem. Ecotoxicol.* 7, 286–304. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.01.004>
- Beerling, D.J., Leake, J.R., Long, S.P., Scholes, J.D., Ton, J., Nelson, P.N., Bird, M., Kantzas, E., Taylor, L.L., Sarkar, B., Kelland, M., DeLucia, E., Kantola, I., Müller, C., Rau, G., Hansen, J., 2018. Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. *Nat. Plants* 4, 138–147. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0108-y>
- Canteral, K.F.F., Dias, Y.N., Fernandes, A.R., 2023. Biochars from agro-industrial residues of the Amazon: an ecological alternative to enhance the use of phosphorus in agriculture. *Clean Technol. Environ. Policy* 25, 1119–1132. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02427-6>
- Carneiro, J.S. da S., Ribeiro, I.C.A., Nardis, B.O., Barbosa, C.F., Lustosa Filho, J.F., Melo, L.C.A., 2021. Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability. *Sci. Total Environ.* 760, 143955. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143955>
- Choudhary, T.K., Khan, K.S., Hussain, Q., Ashfaq, M., 2021. Nutrient Availability to Maize Crop (*Zea mays* L.) in Biochar Amended Alkaline Subtropical Soil. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 21, 1293–1306. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00440-0>
- Conceição, L.T., Silva, G.N., Holsback, H.M.S., Oliveira, C. de F., Marcante, N.C., Martins, É. de S., Santos, F.L. de S., Santos, E.F., 2022. Potential of basalt dust to improve soil fertility and crop nutrition. *J. Agric. Food Res.* 10, 100443. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100443>
- Cong, P., Song, S., Song, W., Dong, J., Zheng, X., 2024. Biochars prepared from biogas residues: temperature is a crucial factor that determines their physicochemical properties. *Biomass Convers. Biorefinery* 14, 12843–12856. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03229->

Y

Dias, Y.N., Pereira, W.V. da S., Caldeira, C.F., Ramos, S.J., de Souza, E.S., Ribeiro, P.G., Fernandes, A.R., 2024. Açai Seed Biochar-Based Phosphate Fertilizers for Improving Soil Fertility and Mitigating Arsenic-Related Impacts from Gold Mining Tailings: Synthesis, Characterization, and Lettuce Growth Assessment. *Minerals* 14, 732. <https://doi.org/10.3390/min14070732>

Divyangkumar, N., Panwar, N.L., 2024. Standardization, certification, and development of biochar based fertilizer for sustainable agriculture: An overview. *Environ. Pollut. Manag.* 1, 186–202. <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.10.001>

Figueiredo, C.C. de, Reis, A. de S.P.J., Araujo, A.S. de, Blum, L.E.B., Shah, K., Paz-Ferreiro, J., 2021. Assessing the potential of sewage sludge-derived biochar as a novel phosphorus fertilizer: Influence of extractant solutions and pyrolysis temperatures. *Waste Manag.* 124, 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.044>

Fink, J.R., Inda, A.V., Tiecher, T., Barrón, V., 2016. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. *Ciência e Agrotecnologia* 40, 369–379. <https://doi.org/10.1590/1413-70542016404023016>

GOMES, J.C.C., ASSIS, W.S. de (Eds.), 2013. *Agroecologia: princípios e reflexões conceituais*. Embrapa, Brasília, DF. Huang, R., Fang, C., Lu, X., Jiang, R., Tang, Y., 2017. Transformation of Phosphorus during (Hydro)thermal Treatments of Solid Biowastes: Reaction Mechanisms and Implications for P Reclamation and Recycling. *Environ. Sci. Technol.* 51, 10284–10298. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02011>

Jia, A., Song, X., Li, S., Liu, Z., Liu, X., Han, Z., Gao, H., Gao, Q., Zha, Y., Liu, Y., Wu, X., Wang, G., 2024. Biochar enhances soil hydrological function by improving the pore structure of saline soil. *Agric. Water Manag.* 306, 109170. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109170>

John, V., Braga, A.R. de O., Danielli, C.K.A. de O., Sousa, H.M., Danielli, F.E., de Araujo, R.O., Marques-dos-Santos, C.S. de C., Falcão, N.P. de S., Guerra, J.F.C., 2024. Characterization of Biochar Produced in a Mobile Handmade Kiln from Small-Sized Waste Biomass for Agronomic and Climate Change Benefits. *Agronomy* 14, 1861. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081861>

Lehmann, J., Joseph, S., 2024. *Biochar for Environmental Management*. Routledge, London.

<https://doi.org/10.4324/9781003297673>

MAPA, 2016. Instrução Normativa MAPA N° 5 de 10 de março de 2016. Brazil.

Mendonça, M. de S., 2019. Biochar de caroço de açaí como condicionador de solo na produção de mudas de pimenta-do-reino (*Piper nigrum* L.). UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA- UNESP.

Purakayastha, T.J., Bera, T., Bhaduri, D., Sarkar, B., Mandal, S., Wade, P., Kumari, S., Biswas, S., Menon, M., Pathak, H., Tsang, D.C.W., 2019. A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security. *Chemosphere* 227, 345–365. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.170>

Qian, T.-T., Jiang, H., 2014. Migration of Phosphorus in Sewage Sludge during Different Thermal Treatment Processes. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2, 1411–1419. <https://doi.org/10.1021/sc400476j>

Quesada, C.A., Paz, C., Oblitas Mendoza, E., Phillips, O.L., Saiz, G., Lloyd, J., 2020. Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. *SOIL* 6, 53–88. <https://doi.org/10.5194/soil-6-53-2020>

Rodrigues, M., Carla Argenta, J., Cezar, E., Lebozo Alemparte Abrantes dos Santos, G., Özal, Ö., Silveira Reis, A., Rafael Nanni, M., 2024. The use of Vis-NIR-SWIR spectroscopy in the prediction of soil available ions after application of rock powder. *Inf. Process. Agric.* 11, 26–44. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.07.001>

Schaefer, C.E.G.R., Lima, H.N., Teixeira, W.G., do Vale, J.F., Corrêa, G.R., de Mendonça, B.A.F., Melo, V.F., Amaral, E.F., Campos, M.C.C., Ruivo, M. de L.P., 2023. Soils from Brazilian Amazonia. pp. 85–128. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19949-3_4

Theodoro, S.H., de Paula Medeiros, F., Ianniruberto, M., Baiocchi Jacobson, T.K., 2021. Soil remineralization and recovery of degraded areas: An experience in the tropical region. *J. South Am. Earth Sci.* 107, 103014. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103014>

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., Boguta, P., 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology* 19, 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>

Yang, L., Wu, Y., Wang, Y., An, W., Jin, J., Sun, K., Wang, X., 2021. Effects of biochar addition on the abundance, speciation, availability, and leaching loss of soil phosphorus. *Sci.*

Total Environ. 758, 143657. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143657>

Yuan, H., Lu, T., Wang, Y., Chen, Y., Lei, T., 2016. Sewage sludge biochar: Nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients. *Geoderma* 267, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.12.020>

Zhang, M., Riaz, M., Liu, B., Xia, H., El-desouki, Z., Jiang, C., 2020. Two-year study of biochar: Achieving excellent capability of potassium supply via alter clay mineral composition and potassium-dissolving bacteria activity. *Sci. Total Environ.* 717, 137286. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137286>

Zhao, H., Xie, T., Xiao, H., Gao, M., 2022. Biochar-Based Fertilizer Improved Crop Yields and N Utilization Efficiency in a Maize–Chinese Cabbage Rotation System. *Agriculture* 12, 1030. <https://doi.org/10.3390/agriculture12071030>

Zhao, L., Xiao, D., Liu, Y., Xu, H., Nan, H., Li, D., Kan, Y., Cao, X., 2020. Biochar as simultaneous shelter, adsorbent, pH buffer, and substrate of *Pseudomonas citronellolis* to promote biodegradation of high concentrations of phenol in wastewater. *Water Res.* 172, 115494. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115494>.