



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

VANESSA MELO DE FREITAS

**PÓ DE ROCHA, BIOCARVÃO E INOCULAÇÃO MICROBIANA NA PRODUÇÃO
DE MUDAS DE AÇAIZEIRO EM SOLO DE BAIXA FERTILIDADE**

BELÉM - PARÁ

2025

VANESSA MELO DE FREITAS

**PÓ DE ROCHA, BIOCARVÃO E INOCULAÇÃO MICROBIANA NA PRODUÇÃO
DE MUDAS DE AÇAIZEIRO EM SOLO DE BAIXA FERTILIDADE**

**Dissertação apresentada à Universidade Federal
Rural da Amazônia, como parte das exigências do
programa de Pós-graduação em Agronomia, visando
a obtenção de título de mestre.**

Área de concentração: Agronomia.

Orientador: Silvio Junio Ramos.

Coorientador: Wendel Valter da Silveira Pereira.

BELÉM - PARÁ

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- D278p de Freitas, Vanessa Melo
PÓ DE ROCHA, BIOCARVÃO E INOCULAÇÃO MICROBIANA NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE
AÇAIZEIRO EM SOLO DE BAIXA FERTILIDADE / Vanessa Melo de Freitas. - 2025.
39 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Agronomia(PPGA), Campus Universitário
de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2025.
Orientador: Prof. Dr. Silvio Junio Ramos
Coorientador: Prof. Dr. Wendel Valter da Silveira Pereira.
1. Remineralização do solo. 2. fertilidade do solo. 3. disponibilidade de nutrientes. 4. Amazônia
brasileira. I. Ramos, Silvio Junio, *orient.* II. Título
-

VANESSA MELO DE FREITAS

**PÓ DE ROCHA, BIOCARVÃO E INOCULAÇÃO MICROBIANA NA PRODUÇÃO
DE MUDAS DE AÇAIZEIRO EM SOLO DE BAIXA FERTILIDADE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, visando a obtenção do título de mestre.

Aprovada em 31 de março de 2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **SILVIO JUNIO RAMOS**
Data: 02/04/2025 10:06:32-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. Sílvio Júnio Ramos

Orientador

Instituto Tecnológico Vale - Desenvolvimento Sustentável

Documento assinado digitalmente
 **JEFFERSON SANTANA DA SILVA CARNEIRO**
Data: 04/04/2025 19:26:38-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. Jefferson Santana da Silva Carneiro

1º Examinador

NetZero

Documento assinado digitalmente
 **JOSE AUGUSTO PIRES BITENCOURT**
Data: 17/09/2025 11:24:01-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. José Augusto Pires Bitencourt

2º Examinador

Instituto Tecnológico Vale - Desenvolvimento Sustentável

Documento assinado digitalmente
 **GABRIEL CAIXETA MARTINS**
Data: 02/04/2025 12:45:42-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. Gabriel Caixeta Martins

3º Examinador

Instituto Tecnológico Vale - Desenvolvimento Sustentável

RESUMO

A associação entre pó de metabasalto, biocarvão de caroços de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) e inoculantes com microrganismos nativos pode apresentar potencial para melhorar a qualidade de solos de baixa fertilidade na Amazônia. Nesse sentido, os objetivos deste estudo foram: i) determinar os conteúdos de nutrientes em pó de metabasalto produzido na Província Mineral de Carajás, bem como em biocarvão de caroço de açaí; ii) compreender as mudanças nos atributos químicos de solo de baixa fertilidade com a aplicação de pó de metabasalto, biocarvão de caroços de açaí e inoculante microbiano; e iii) avaliar o crescimento, trocas gasosas e absorção de nutrientes em mudas de açaizeiro nos solos submetidos a aplicação desses produtos. O experimento teve oito tratamentos: 1) solo natural; 2) solo + pó de rocha; 3) solo + biocarvão; 4) solo + inoculante; 5) solo + biocarvão + inoculante; 6) solo + pó de rocha + biocarvão; 7) solo + pó de rocha + inoculante; e 8) solo + pó de rocha + biocarvão + inoculante. Após o experimento, os substratos foram avaliados em termos de fertilidade e as plantas foram avaliadas em termos de crescimento (120 dias), conteúdo de nutrientes no tecido vegetal e trocas gasosas. O pó de rocha apresentou vários nutrientes em conteúdos acima dos requeridos pela legislação brasileira, incluindo bases (Ca, Mg e K) e micronutrientes como Fe e Mn. O biocarvão apresentou conteúdos de nutrientes variando de $0,3 \text{ mg kg}^{-1}$ a $9,4 \text{ g kg}^{-1}$, seguindo a sequência $\text{K} > \text{P} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Mn} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{B} > \text{Ni} > \text{S} > \text{Mo}$. Os resultados do experimento indicaram mudanças na fertilidade do solo, sobretudo os tratamentos com pó de rocha, que aumentaram o pH, soma de bases e saturação por bases a valores de até 7,5, 8,3 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e 91,9%, respectivamente. De modo geral, o crescimento das plantas não foi favorecido pela aplicação de pó de rocha, exceto quando combinado a biocarvão e inoculante microbiano, que resultou em altura, diâmetro e massa seca de raízes até 54, 136 e 45% maiores que no tratamento controle, respectivamente. Além disso, com exceção do conteúdo de CO_2 interno, todas as variáveis fisiológicas apresentaram redução, principalmente a transpiração foliar, que diminuiu com a aplicação de todos os tratamentos. Vários tratamentos promoveram maiores teores de nutrientes no tecido vegetal, incluindo Ca e K com a aplicação de pó de rocha e biocarvão, respectivamente. Os resultados desse estudo indicam o potencial dos produtos avaliados para a correção da acidez e aumento da disponibilidade de nutrientes no solo, mas também sugerem alterações adversas para o crescimento e fisiologia vegetal. Novas pesquisas são sugeridas para potencializar o uso de coprodutos de mineração e resíduos agroindustriais na melhoria de solos na Amazônia.

Palavras-chave: remineralização do solo; fertilidade do solo; disponibilidade de nutrientes; Amazônia brasileira.

ABSTRACT

The association between rock dust, biochar from açai (*Euterpe oleracea* Mart.) seeds, and inoculants with native microorganisms may have the potential to improve the quality of low-fertility soils in the Amazon. Thus, the objectives of this study were to: i) determine the nutrient contents in metabasalt rock dust produced in the Carajás Mineral Province, as well as in biochar from açai seeds; ii) understand the changes in the chemical attributes of low-fertility soil with the application of metabasalt dust, açai seed biochar, and microbial inoculant; and iii) evaluate the growth, gas exchange, and nutrient uptake in açai seedlings in soils subjected to the application of these products. The experiment consisted of eight treatments: 1) natural soil; 2) soil + rock dust; 3) soil + biochar; 4) soil + inoculant; 5) soil + biochar + inoculant; 6) soil + rock dust + biochar; 7) soil + rock dust + inoculant; and 8) soil + rock dust + biochar + inoculant. After the experiment, the substrates were evaluated in terms of fertility, and the plants were assessed for growth (120 days), nutrient content in plant tissue, and gas exchange. Rock dust contained several nutrients in levels above those required by Brazilian legislation, including bases (Ca, Mg, and K) and micronutrients such as Fe and Mn. The biochar presented nutrient contents ranging from 0.3 mg kg⁻¹ to 9.4 g kg⁻¹, following the sequence Mo < S < Ni < B < Cu < Zn < Fe < Mn < Mg < Ca < P < K. The experimental results indicated changes in soil fertility, particularly in treatments with rock dust, which increased pH, sum of bases, and base saturation to values of up to 7.5, 8.3 cmol_c kg⁻¹, and 91.9%, respectively. In general, plant growth was not favored by the application of rock dust, except when combined with biochar and microbial inoculant, which resulted in height, diameter, and root dry mass increases of up to 54%, 136%, and 45% compared to the control treatment, respectively. Moreover, except for internal CO₂ content, all physiological variables showed a reduction, particularly leaf transpiration, which decreased with the application of all treatments. Several treatments promoted higher nutrient levels in plant tissue, including Ca and K, with the application of rock dust and biochar, respectively. The results of this study indicate the potential of the evaluated products for soil acidity correction and increased nutrient availability, but they also suggest adverse effects on plant growth and physiology. Further research is recommended to promote the use of mining by-products and agro-industrial residues for soil improvement in the Amazon.

Keywords: soil remineralization; soil fertility; nutrient availability; Brazilian Amazon.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à Deus por me permitir que superasse os obstáculos, podendo assim alcançar os meus objetivos.

Aos meus pais Pedro Freitas e Antonia Barreto, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando ao longo de toda a minha trajetória.

Ao meu orientador, Dr. Silvio Junio Ramos, pelo apoio, ensinamentos e valiosas orientações fizeram toda a diferença neste trabalho.

Ao meu coorientador, Dr. Wendel Valter da Silveira Pereira, por sua dedicação, correções e ensinamentos que foram de extrema importância para o trabalho, além de sua paciência diária e incentivos que foram fundamentais para a minha evolução profissional.

A todos integrantes do Laboratório de Elementos Traço no Ambiente (LETAM), que me auxiliaram e acompanharam nessa jornada.

Ao Instituto Tecnológico Vale - Desenvolvimento Sustentável (ITV-DS), por todo auxílio e suporte nas análises realizadas para o trabalho.

À Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (PGAGRO), pela estrutura e oportunidades oferecidas para este estudo.

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para realização desta dissertação.

MUITO OBRIGADA!

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Conteúdos de elementos potencialmente tóxicos no pó de metabasalto. 25
- Figura 2** - Composição da comunidade bacteriana do solo (a nível de filo), antes e após o experimento. 29
- Figura 3** - Incremento em altura, incremento em diâmetro, massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSR) das mudas de açazeiro após o experimento. 31
- Figura 4** - Taxa fotossintética (A), condutância estomática (gs), conteúdo de CO₂ interno (Ci) e transpiração foliar (E) das plantas de açazeiro após o experimento. 32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conteúdos de nutrientes no biocarvão de caroço de açaí.	23
Tabela 2 - Caracterização das propriedades do pó de rocha.	24
Tabela 3 - Caracterização da fertilidade do solo após o experimento.	26
Tabela 4 - Teores de nutrientes nas folhas e raízes das plantas de açaizeiro após o experimento.	33

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
AGRADECIMENTOS	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	9
SUMÁRIO	10
1. REVISÃO DE LITERATURA	11
1.1. Pó de rocha como remineralizador	11
1.2. Biocarvão como condicionador de solo	12
1.3. Microrganismos solubilizadores de nutrientes	13
1.4. Bioeconomia na Amazônia	14
REFERÊNCIAS	15
2. PÓ DE ROCHA, BIOCARVÃO E INOCULAÇÃO MICROBIANA NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE AÇAIZEIRO EM SOLOS DE BAIXA FERTILIDADE	19
2.1. Introdução	19
2.2. Material e métodos	20
2.2.1. Coleta de solos e pó de metabasalto	20
2.2.2. Produção e caracterização do biocarvão	21
2.2.3. Produção da solução inoculante	22
2.2.4. Condução do experimento	22
2.2.5. Análise estatística	23
2.3. Resultados e discussão	24
2.3.1. Caracterização do biocarvão	24
2.3.2. Caracterização do pó de metabasalto	25
2.3.3. Fertilidade do solo após experimento	27
2.3.4. Composição da comunidade microbiana	29
2.3.5 Crescimento e trocas gasosas do açaizeiro	30
2.3.6 Análise nutricional do açaizeiro	31
2.4. Conclusão	35
REFERÊNCIAS	35

1. REVISÃO DE LITERATURA

1.1. Pó de rocha como remineralizador

O Brasil importa mais de 80% dos fertilizantes usados nacionalmente (Luchese et al., 2023b), o que aumenta consideravelmente os custos de produção e reforça a necessidade de fontes alternativas de nutrientes para os solos agrícolas do país. Nesse contexto, o pó de rocha tem sido apontado como uma opção para melhorar a fertilidade dos solos (Cruz et al., 2024), principalmente devido a ocorrência de nutrientes como cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg) e fósforo (P) (Luchese et al., 2021). Com a aplicação de pó de rocha, esses e outros nutrientes são liberados de forma gradual para o solo, em quantidades normalmente inferiores quando comparado aos fertilizantes convencionais (Burbano et al., 2022).

Diversas atividades industriais produzem rochas com potencial para aplicação em solos, incluindo a mineração e a britagem. As principais rochas utilizadas na forma de pó incluem basalto e metabasalto, que são ricas em minerais silicatados (Burbano et al., 2022). Conforme a instrução normativa Nº 5 de 10 de março de 2016, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) do Brasil, vários critérios devem ser atendidos para que um determinado produto seja considerado remineralizador de solos, incluindo teores mínimos de vários nutrientes, bem como valores máximos de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) como As, Cd, Hg e Pb. Além disso, são estabelecidas diretrizes envolvendo a granulometria e teores de sílica livre.

Estudos têm demonstrado o potencial do pó de rocha como fonte de nutrientes no solo, favorecendo também o crescimento de plantas. No estudo de Aguiar et al. (2022), a aplicação de 10% de pó de basalto, quando associada a substrato comercial de casca de pinheiro, promoveu o aumento do crescimento de *Monteverdia ilicifolia* (Mart. ex Reissek) Biral. Em estudo realizado por Conceição et al. (2022), a taxa de 8 t ha⁻¹ de pó de rocha promoveu a melhoria das propriedades químicas de solo de baixa fertilidade, aumentando nos teores de macro e micronutrientes em plantas de milho (*Zea mays* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.).

No estudo de Rodrigues et al. (2024b), a aplicação da maior dose de pó de basalto (96 mg ha⁻¹) aumentou o pH e as concentrações de Ca, Mg, cobre (Cu), boro (B) e silício (Si), e reduziu os teores de alumínio (Al) em Latossolo Vermelho Amarelo. Além disso, aumentou 27% da massa seca da parte aérea e os teores de macronutrientes nas folhas de *Urochloa brizantha* (Hochst. ex A.Rich.) R.D.Webster. Em um estudo de Rodrigues et al. (2024a), com 60 dias de incubação, em Latossolo Vermelho Distrófico, as maiores doses de pó de basalto aumentaram o pH, o carbono (C) orgânico do solo, e alguns macronutrientes, além de

diminuírem os teores disponíveis de Al.

1.2. Biocarvão como condicionador de solo

O biocarvão é um material orgânico, rico em C estável, produzido pela pirólise da biomassa (El-naggar et al., 2019). O biocarvão apresenta uma grande superfície específica, estrutura porosa com grupos funcionais, elevada capacidade de retenção de elementos químicos e, dependendo da biomassa utilizada, pode apresentar teores interessantes de alguns nutrientes (Souza et al., 2019; Singh Yadav et al., 2023). É um produto que tem sido utilizado para melhorar os atributos do solo, com propriedades que variam de acordo com a biomassa utilizada, tempo de residência, taxa de aquecimento e temperatura de produção. De maneira geral, o biocarvão tem sido associado ao aumento do pH, capacidade de troca de cátions, C orgânico, condutividade elétrica e teores de nutrientes, bem como à redução da disponibilidade de EPTs (Singh et al., 2022).

Mudanças na comunidade microbiana do solo também têm sido atribuídas ao biocarvão, influenciando processos de mineralização do C e transformações de nutrientes. Além disso, o biocarvão tem apresentado potencial de melhorar propriedades físicas do solo, como porosidade, agregação e estrutura, potencializando o desenvolvimento das plantas (Razzaghi; Obour; Arthur, 2020). Alguns estudos têm sido realizados para avaliar o potencial do caroço de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) para fins de produção de biocarvão. Por exemplo, Melo et al. (2022) compararam proporções de biocarvão, produzido a partir de resíduos da agroindústria de açaí, em plantas jovens de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* S.T.Blake), evidenciando que a taxa de 7,5% de biocarvão melhorou o estado nutricional das plantas, além do diâmetro e desenvolvimento radicular.

Rita et al. (2025) avaliaram combinações de biocarvão e fertilizante fosfatado em mudas de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp), cultivadas em Latossolo. A combinação de 60 t ha⁻¹ de biocarvão com 120 kg ha⁻¹ de P melhorou as propriedades químicas do solo e o crescimento vegetal. Além disso, as plantas apresentaram maior área foliar com a aplicação isolada de biocarvão.

Mendonça et al. (2024) estudaram o potencial do biocarvão de açaí a partir de testes com quatro doses e quatro tamanhos de partículas de biocarvão, no cultivo de plantas de pimenta do reino (*Piper nigrum* L.), em Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico. A combinação de 32 t de biocarvão ha⁻¹ e 5 mm de tamanho de partícula de biocarvão promoveu melhor crescimento da raiz, teor de umidade do solo e absorção de água pelas

plantas. O estudo de Sato et al. (2020), por sua vez, mostrou que o 60 g kg^{-1} de biocarvão de caroço de açaí, aplicado em Latossolo franco arenoso, reduziu a densidade, aumentou a porosidade, pH, conteúdo de C orgânico e teores de P, K^+ , Mg^{2+} , e mitigou a acidez trocável (Al^{3+}).

1.3. Microrganismos solubilizadores de nutrientes

Microrganismos solubilizadores de nutrientes desempenham um papel essencial na ciclagem de elementos químicos no solo, contribuindo para a disponibilidade de nutrientes para as plantas, principalmente a partir da solubilização de elementos em baixa solubilidade (Ahmed e Holmström, 2015). Esse processo é desencadeado por uma série de compostos produzidos pela microbiota do solo (Lopez e Bacilio, 2020), como ácidos orgânicos que tornam o ambiente mais favorável à desintegração física da matriz mineral (Zang et al., 2025), sideróforos que quelam e solubilizam o ferro (Fe) (Flemming e Wuertz, 2019), enzimas específicas que alteram o pH local e aumentam a mobilidade de nutrientes (Flemming e Wuertz, 2019). Além disso, biofilmes (matriz exopolimérica produzida por microrganismos) favorecem a sinergia entre a interface microbiota-superfície mineral, facilitando a decomposição mineral e acelerando a solubilização de nutrientes das rochas (Flemming e Wuertz, 2019).

Na natureza, esse processo é cíclico e afetado pelas condições ambientais (Beerling et al., 2018). Entretanto, em condições controladas, a solubilização de nutrientes pode ser estimulada com a introdução de microrganismos com potencial para acelerar a dissolução de minerais de pó de rocha (Lefebvre et al., 2019). Esse processo é particularmente importante para a liberação de nutrientes de basalto e metabasalto, que apresentam riqueza de Ca, K, Mg e micronutrientes, liberados mais lentamente na ausência de agentes solubilizadores.

Assim, a aplicação de inoculantes microbianos específicos pode potencializar a liberação de nutrientes de rochas como basalto e metabasalto, acelerando a disponibilização para as plantas (Singh e Reddy, 2011; Mendes et al., 2024). Muitos estudos sugerem que microrganismos como bactérias do gênero *Bacillus* podem melhorar a disponibilidade de macronutrientes em minerais (Ribeiro et al., 2020; Rosalen et al., 2024). Bactérias solubilizadoras potencializam os processos pedogênicos, promovendo a liberação de nutrientes no perfil do solo, aumentando o acesso das plantas aos nutrientes e favorecendo o desenvolvimento vegetal (Raza et al., 2023; Biswas et al., 2024).

Em estudo realizado por Jia et al. (2021), microrganismos solubilizadores foram testados em rochas para o cultivo de acácia negra (*Robinia pseudoacacia* L.) e trevo arbustivo

(*Lespedeza bicolor* Turcz). Os microrganismos proporcionaram melhorias nos atributos químicos e físicos do solo, promovendo impactos positivos nos conteúdos de C e nitrogênio (N) no solo, aumentando também o diâmetro basal, área foliar e crescimento de raízes. Galina et al. (2024), por sua vez, avaliaram a associação de pó de olivina melilitita com inoculação bacteriana em plantas de milho, observando melhorias nos atributos microbiológicos do solo, além de maior solubilização de nutrientes do pó de rocha, com maior absorção de elementos essenciais e, consequentemente, aumento da produtividade da cultura.

1.4. Bioeconomia na Amazônia

A bioeconomia é baseada na redução do uso de produtos petroquímicos e na mitigação das alterações climáticas, além da redução da dependência por importação de recursos naturais e o estímulo às economias locais (Kardung et al., 2021). Nesse contexto, a Amazônia tem especial importância para a discussão global sobre bioeconomia, dada a relevância dessa região para a regulação do clima global, bem como a sua grande biodiversidade e variedade de matérias-primas (Bergamo et al., 2022; Freitas et al., 2024).

Apesar do potencial para fins de bioeconomia, a Amazônia ainda é pouco explorada quanto ao uso de tecnologias sustentáveis envolvendo coprodutos da indústria (Freitas et al., 2024). Na região, algumas espécies possuem um importante potencial bioeconômico, incluindo o açaí (Freitas et al., 2024), que representa uma *commodity* global de especial interesse para as indústrias alimentícias, farmacêuticas, cosméticas e de insumos (Barbosa; Carvalho Junior, 2022).

O estado do Pará responde por 94% da produção nacional de açaí (Rocha et al., 2022). Na capital do estado, cerca de 1200 t de caroços de açaí são produzidas diariamente, o que leva a descartes inadequados no ambiente urbano, principalmente em áreas periféricas (Freitas et al., 2024). Tais impactos ambientais e sociais dificultam o progresso para uma economia sustentável (Barbosa; Carvalho Junior, 2022). Dessa forma, tecnologias sustentáveis como o aproveitamento de caroços de açaí podem contribuir com a bioeconomia da região, inclusive a partir da produção de biocarvão (Bertuol; Frizzo, 2025).

O aproveitamento de coprodutos de mineração também pode potencializar a economia circular na Amazônia. A indústria de mineração é um dos setores econômicos menos circulares no Brasil, reforçando a necessidade de medidas que incorporem coprodutos de exploração mineral em cadeias produtivas. Em 2024, o país exportou cerca de 400 milhões de toneladas de minérios e o Pará foi o segundo estado que mais gerou faturamento para a

indústria mineradora (Jose et al., 2024; IBRAM, 2024), contribuindo com a geração de materiais com potencial para reaproveitamento, inclusive em áreas de produção agrícola.

Assim, pesquisas são necessárias para avaliar o potencial de coprodutos gerados na indústria mineral brasileira. Por exemplo, o uso de pó de rocha como remineralizador de solo é uma forma de reaproveitar rochas oriundas da exploração mineral e estimular a bioeconomia da região (Araújo et al., 2025). Ramos et al. (2022), em revisão de literatura, relatou um estudo com remineralizador rico em K associado a fertilização convencional (NPK) e fertilização orgânica, em plantas de milho e cana de açúcar (*Saccharum officinarum* L.) durante cinco anos, que apresentaram aumento de até 40% na produtividade com a aplicação de pó de rocha em relação a adubação química convencional.

Microrganismos solubilizadores nativos da Amazônia constituem uma alternativa para aumentar a solubilidade de pó de rocha na região, favorecendo o cultivo de culturas agrícolas. Esses microrganismos interagem com o pó de rocha e aceleram a liberação de nutrientes para as plantas. A combinação entre pó de rocha, biocarvão e microrganismos poderá auxiliar na redução do uso de fertilizantes, normalmente utilizados em grandes volumes na agricultura (Santos et al., 2024), reduzindo a deposição de resíduos e favorecendo o cultivo de plantas de interesse regional.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, N. S. et al. Basalt rock dust incorporated to substrate favors *Monteverdia ilicifolia* seedlings initial growth. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 42, p. 1–9, 2022. <https://doi.org/10.4336/2022.pfb.42e202002142>
- AHMED, E.; HOLMSTRÖM, S. J. Microbe–mineral interactions: the impact of surface attachment on mineral weathering and element selectivity by microorganisms. **Chemical Geology**, 403, p. 13-23. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.03.009>
- ARAÚJO, J. V. S. et al. Effect of the incorporation of spent mushroom substrate and remineralizer on the chemical attributes of a Acrisol. **Brazilian journal of biology**, v. 84, p. e290199, 2025. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.290199>
- BARBOSA, J. R.; CARVALHO JUNIOR, R. N. Food sustainability trends - How to value the açaí production chain for the development of food inputs from its main bioactive ingredients? **Trends in Food Science and Technology**, v. 124, n. March, p. 86–95, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.005>
- BEERLING, D. J. et al. Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. **Nature plants**, 4, n. 3, p. 138-147. 2018. <https://doi-org.ez4.periodicos.capes.gov.br/10.1038/s41477-018-0108-y>

BERGAMO, D. et al. The Amazon bioeconomy: Beyond the use of forest products. **Ecological Economics**, v. 199, n. April, p. 107448, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107448>

BERTUOL, D. A.; FRIZZO, C. P. Exploring the Potential of Waste Biomass from the Brazilian Legal Amazon in Bioproducts Production: a Comprehensive Analysis and Promising Perspectives. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 35, n. 5, p. 1–14, 2025. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20240202>

BISWAS, S. S. et al. Phosphate solubilizing bacteria inoculated low-grade rock phosphate can supplement P fertilizer to grow wheat in sub-tropical inceptisol. **Rhizosphere**. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100556>

BURBANO, D. F. M. et al. Crushed Volcanic Rock as Soil Remineralizer: A Strategy to Overcome the Global Fertilizer Crisis. **Natural Resources Research**, v. 31, n. 5, p. 2197–2210, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11053-022-10107-x>

CONCEIÇÃO, L. T. et al. Potential of basalt dust to improve soil fertility and crop nutrition. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 10, n. September, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100443>

CRUZ, G. L. S. et al. Application of rock dust for the management of *Meloidogyne javanica* in soybean. **Canadian Journal of Plant Pathology**, 46(4), 410–420. 2024. <https://doi-org.ez4.periodicos.capes.gov.br/10.1080/07060661.2024.2333546>

EL-NAGGAR, A. et al. Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. **Geoderma**, v. 337, n. September 2018, p. 536–554, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.034>

FLEMMING, H. C.; WUERTZ, S. Bacteria and archaea on Earth and their abundance in biofilms. **Nat Rev Microbiol**, volume 17, 247–260. 2019 <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0158-9>.

FREITAS, L. C. et al. Green extraction technologies: A path to the Amazon bioeconomy development. **Trends in Food Science and Technology**, v. 147, n. March, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104462>

GALINA, J. et al. Olivine melilitite powder applied in association with bacterial inoculation impacts soil microbiological attributes. **Scientia Agricola**, v. 81, 2024. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2023-0214>

IBRAM. TCE-SC. Relatório Anual de Atividades. **Grupo De Trabalho De Apoio À Fiscalização Em Educação**, n. 48, p. 1–28, 2024.

JIA, Z. et al. Rock-solubilizing microbial inoculums have enormous potential as ecological remediation agents to promote plant growth. **Forests**, v. 12, n. 3, p. 1–13, 2021. <https://doi.org/10.3390/f12030357>

JOSE, S. A. et al. Promoting a Circular Economy in Mining Practices. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 24, 2024. <https://doi.org/10.3390/su162411016>

- KARDUNG, M. et al. Development of the circular bioeconomy: Drivers and indicators. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 1, p. 1–24, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13010413>
- LEFEBVRE, D. et al. Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: A case study for Sao Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, 233, p. 468-481. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.099>
- LOPEZ, B. R.; BACILIO, M. Intemperismo e formação do solo em ambientes quentes e secos mediados por interações planta-micróbio. **Biol Fertil Soils**, volume 56 , 447–459. 2020. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01456-x>
- LUCHESE, A. V. et al. Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer. **African Journal of Agricultural Research**, v. 17, n. 3, p. 487–497, 2021. [DOI: 10.5897/AJAR2020.15234](https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15234)
- LUCHESE, A. V. et al. Can Basalt Rock Powder be Used as an Alternative Nutrient Source for Soybeans and Corn? **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 3, p. 4044–4054, 2023b. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01322-3>
- MELO, V. L. M. et al. Positive biochemical, physiological and nutritional evidence from the use of biochar in the growth of eucalyptus plants. **Botany Letters**, v. 169, n. 3, p. 337–350, 2022. <https://doi.org/10.1080/23818107.2022.2076258>
- MENDES, D. R. et al. Kinetics of phosphorus release from sedimentary rocks as a potential source of fertilizers in the Amazon region, Brazil, **Journal of South American Earth Sciences**, Volume 148, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105148>
- MENDONÇA, M. S. et al. Açai seed biochar improves soil quality and black pepper seedling development in the Amazon region. **Journal of Environmental Management**, v. 367, n. February, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121752>
- RAMOS, C. G. et al. Possibilities of using silicate rock powder: An overview. **Geoscience Frontiers**, v. 13, n. 1, p. 101185, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185>
- RAZA, T. et al. Impact of silicon on plant nutrition and significance of silicon mobilizing bacteria in agronomic practices. **Silicon**. Volume 15, p. 3797-3817. 2023. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02302-z>
- RAZZAGHI, F.; OBOUR, P. B.; ARTHUR, E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. **Geoderma**, v. 361, n. September 2019, p. 114055, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055>
- RIBEIRO, I. D. A. et al. Use of Mineral Weathering Bacteria to Enhance Nutrient Availability in Crops: A Review. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, n. December 2020, p. 1–20, 2020. [doi: 10.3389/fpls.2020.590774](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.590774)
- RITA, A. et al. Açai Waste Biochar Combined with Phosphorus Fertiliser and Phosphorus Use Efficiency in Cowpea (*Vigna unguiculata* (L .) Walp). **Agronomy**, v. 15, n. 2, p. 1–19, 2025. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020393>

ROCHA, J. H. A. et al. Circular Bioeconomy in the Amazon Rainforest: Evaluation of Açaí Seed Ash as a Regional Solution for Partial Cement Replacement. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 21, p. 1–23, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142114436>

RODRIGUES, M. et al. Paraná basin basalt powder: A multinutrient soil amendment for enhancing soil chemistry and microbiology. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 141, n. May, 2024a. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104957>

RODRIGUES, M. et al. Unlocking higher yields in Urochloa brizantha: the role of basalt powder in enhancing soil nutrient availability. **Discover Soil**, 2024b. <https://doi.org/10.1007/s44378-024-00006-3>

ROSALEN, K. et al. Effect of remineralizer on soil biological quality. **Biologia**, v. 79, n. 11, p. 3327–3336, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11756-024-01783-6>

SANTOS, F. et al. Biofertilizer use in the United States: definition, regulation, and prospects. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 108, n. 1, p. 511, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00253-024-13347-4>

SATO, M. K. et al. Biochar as a sustainable alternative to açaí waste disposal in Amazon, Brazil. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 139, p. 36–46, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.001>

SINGH, H. et al. Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. **Biochar**, v. 4, n. 1, p. 1–17, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1>

SINGH, H.; REDDY, M. S. Effect of inoculation with phosphate solubilizing fungus on growth and nutrient uptake of wheat and maize plants fertilized with rock phosphate in alkaline soils, **European Journal of Soil Biology**, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2010.10.005>

SINGH YADAV, S. P. et al. Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 11, n. January, p. 100498, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100498>

SOUZA, E. S. et al. Organic residues and biochar to immobilize potentially toxic elements in soil from a gold mine in the Amazon. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 169, n. November 2018, p. 425–434, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.032>

ZHANG, S. et al. Basalt rock weathering by *Peribacillus simplex* from Wudalianchi volcanos in NE China and implications for Fe and Si biogeochemical cycling, **International Biodeterioration & Biodegradation**, volume 196, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2024.105948>

2. PÓ DE ROCHA, BIOCARVÃO E INOCULAÇÃO MICROBIANA NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE AÇAIZEIRO EM SOLOS DE BAIXA FERTILIDADE

2.1. Introdução

A maioria dos solos amazônicos apresenta fertilidade naturalmente baixa, incluindo alta acidez e baixas concentrações disponíveis de nutrientes, o que representa um desafio para a produção agrícola (Rocha et al., 2023). Nesse contexto, quantidades significativas de corretivos de acidez e fertilizantes são necessárias para potencializar a produtividade das culturas agrícolas na região, o que aumenta substancialmente os custos de produção. Fontes alternativas de nutrientes devem ser testadas e aplicadas para reduzir os custos com corretivos e fertilizantes em cultivos agrícolas (Luchese et al., 2021).

Dessa forma, o pó de rocha representa uma alternativa para auxiliar na redução de custos com fertilizantes, pois tem sido indicado como valioso aliado na melhoria da qualidade de solos de baixa fertilidade. A aplicação desse produto pode ter várias vantagens em sistemas agrícolas, como o aumento da fertilidade do solo e melhoria do crescimento de plantas (Li et al., 2021). Na Província Mineral de Carajás (PMC), Amazônia brasileira, a extração de diversos minérios resulta na acumulação de quantidades significativas de rochas na superfície, incluindo metabasalto, que pode ter potencial para aplicação em solos na forma de pó de rocha, o que demanda estudos envolvendo a classificação, características químicas e a capacidade de liberação de nutrientes para as plantas.

Apesar dos vários benefícios, o pó de rocha comumente apresenta uma taxa de dissolução lenta, o que pode limitar a sua aplicabilidade e indica a necessidade de potencializar a sua capacidade de liberação de nutrientes. Nesse sentido, tecnologias microbianas têm sido utilizadas para acelerar a liberação de elementos essenciais de pó de rocha, como a aplicação de inoculantes contendo bactérias, que promovem mudanças no pH, quelatção de elementos químicos e reações redox (Samuels et al., 2020). Esses mecanismos favorecem a liberação de vários nutrientes do pó de rocha, como fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), melhorando a fertilidade do solo (Ribeiro et al., 2020).

O açaizeiro é uma cultura agroindustrial em forte expansão na Amazônia, sobretudo no estado do Pará, que é responsável por mais de 90% da produção de frutos de açaí no Brasil. Embora seja uma espécie nativa de planícies de inundação, o cultivo de açaizeiro em condições de terra firme tem crescido em virtude do aumento da demanda pelos frutos, principalmente no cenário internacional, o que é alavancado pelo alto valor nutricional e benefícios comprovados para a saúde. Entre 2010 e 2020, a produção de frutos de açaí

aumentou 89%, alcançando 1,7 milhão de toneladas produzidas em 2020 e contribuindo significativamente com a economia da população amazônica (Jorge; Silva; Brigagão, 2022).

A expansão da cadeia produtiva do açaí tem gerado quantidades elevadas de resíduos na Amazônia, principalmente caroços que geralmente são descartados de maneira inadequada nos grandes centros urbanos, causando contaminação ambiental. Uma forma de mitigar esses impactos é a conversão da biomassa residual em biocarvão (Freitas et al., 2024). O biocarvão é um material carbonáceo, oriundo da pirólise de biomassa, que tem sido indicado para o condicionamento de solos em virtude da sua capacidade de aumentar a retenção de água, mitigar efeitos de contaminantes, melhorar a atividade biológica e, principalmente quando associado a outras fontes, aumentar a disponibilidade de nutrientes para as plantas (Abhishek et al., 2022; Dias et al., 2022; Singh et al., 2022).

Considerando a geração de resíduos em larga escala na cadeia produtiva do açaí, bem como a produção de quantidades elevadas de rochas em áreas de mineração de Fe na Amazônia, o uso desses produtos poderá ser interessante para promover a economia circular na melhoria da fertilidade dos solos da região, especialmente quando associados a inoculantes microbianos. Assim, os objetivos deste estudo foram: i) caracterizar a composição elementar do pó de metabasalto produzido na PMC e do biocarvão de caroço de açaí; ii) compreender as mudanças nos atributos químicos do solo com a aplicação de pó de rocha, biocarvão e inoculante microbiano; e iii) avaliar o cultivo de mudas de açaizeiro em solos submetidos a aplicação desses insumos. Nossos resultados poderão favorecer o aproveitamento de resíduos agroindustriais e coprodutos de mineração na Amazônia, promovendo a economia circular na região.

2.2. Material e métodos

2.2.1. Coleta de solos e pó de metabasalto

O solo utilizado no experimento foi classificado como Latossolo Amarelo, coletado na camada superficial (0-20 cm) em área de vegetação secundária na cidade de Belém, Pará. Após a coleta, o solo foi seco ao ar, peneirado (2 mm) e submetido a análises de fertilidade e granulometria, conforme descrito por Teixeira et al. (2017). O pH foi medido em suspensão solo:água (1:2,5); o conteúdo disponível de enxofre (S) foi obtido por turbidimetria; as concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} e alumínio (Al^{3+}) foram extraídas com KCl 1 M; P e K^+ foram extraídos por solução Mehlich-1 (HCl 0,05 M + H_2SO_4 0,0125 M) e quantificados por ICP-OES. A concentração disponível de boro (B) foi extraída em água quente e as concentrações disponíveis de Fe, manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn) foram extraídas por

solução de DTPA, com determinação por espectrofotometria de absorção atômica. A partir dos resultados, foram calculadas a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por Al (m%) e saturação por bases (V%).

O metabasalto foi coletado em áreas de mineração de Fe na Província Mineral de Carajás, Amazônia brasileira. Após a coleta, o material foi triturado e passado em peneira de 0,3 mm, visando a posterior aplicação na forma de pó. Análises químicas foram então realizadas para conhecer o pH de abrasão; os teores de óxidos de cálcio (CaO), magnésio (MgO), potássio (K₂O), fósforo (P₂O₅) e silício (SiO₂); os teores totais dos nutrientes B, Cu, Fe, Mn, molibdênio (Mo), níquel (Ni), S e Zn, bem como dos elementos benéficos cobalto (Co) e selênio (Se); além das concentrações totais de arsênio (As), cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb), considerados elementos potencialmente tóxicos (EPTs). Os resultados foram comparados com os valores fixados na Instrução Normativa Nº 5 de 10 de março de 2016, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) do Brasil, que orienta sobre as características e uso de remineralizadores no país.

2.2.2. Produção e caracterização do biocarvão

Para a produção do biocarvão, caroços de açaí foram coletados em áreas de deposição na cidade de Belém, estado do Pará, Amazônia brasileira. Após a coleta, os caroços foram lavados em água deionizada e secos em estufa a 70 °C por 24 h, seguido de pirólise em mufla a 400 °C com uma taxa de aquecimento de 3,33 °C min⁻¹ e tempo de residência de 1 h. A pirólise a 400 °C foi selecionada em virtude de estudos que evidenciaram maior potencial para a melhoria da fertilidade do solo usando essa temperatura (Dias et al., 2019). Após a pirólise, o biocarvão foi triturado e peneirado (150 mesh) para posterior aplicação.

Análises químicas foram realizadas com o objetivo de determinar os teores totais dos nutrientes fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), boro (B), níquel (Ni), enxofre (S) e molibdênio (Mo). Para a extração, 2 g da amostra foram submetidas à digestão com 5 mL de solução de água régia (HCl:HNO₃, 3:1) em forno de micro-ondas (CEM Corporation, modelo MARS 5®). A quantificação dos elementos foi realizada por espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS, PerkinElmer). Para garantir a qualidade analítica dos resultados, foram utilizados o material de referência certificado ERM® CC-141 e amostras em branco (Hossain et al., 2021).

2.2.3. Produção da solução inoculante

O inóculo utilizado no estudo pertence à coleção de microrganismos do Instituto Tecnológico Vale - Desenvolvimento Sustentável (ITV-DS), também localizado em Belém, Pará. Testes preliminares em citometria de fluxo mostraram a viabilidade e vitalidade celular em diferentes estágios quando associadas ao pó de rocha. O sequenciamento gênico via amplicon 16S rDNA do inóculo apontou para um o perfil taxonômico predominante composto pelos filos Firmicutes, Actinobacteria e Chloroflexi.

Para a aplicação do inóculo nas mudas, uma suspensão com meio de cultura básico (60 mM de $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, 0,04 g L^{-1} de extrato de levedura e $1,03 \times 10^5$ mM de ágar) foi preparada e mantida em agitação controlada por 48 horas a 28 °C. Posteriormente, a concentração de células viáveis do inóculo foi ajustada para 10^8 unidades formadoras de colônia mL^{-1} .

2.2.4. Condução do experimento

O experimento foi realizado em casa de vegetação, usando vasos com 3 kg de capacidade. No total, oito tratamentos foram avaliados: 1) solo natural, identificado como S; 2) solo + 10% de pó de rocha, identificado como S+P; 3) solo + 2% de biocarvão, identificado como S+B; 4) solo + inoculante, identificado como S+I; 5) solo + 2% de biocarvão + inoculante, identificado como S+B+I; 6) solo + 10% de pó de rocha + 2% de biocarvão, identificado como S+P+B; 7) solo + 10% de pó de rocha + inoculante, identificado como S+P+I; e 8) solo + 10% de pó de rocha + 2% de biocarvão + inoculante, identificado como S+P+B+I. Todos os tratamentos tiveram cinco repetições, totalizando 40 unidades experimentais, conduzidas em vasos com 3 kg de capacidade, em delineamento inteiramente ao acaso.

Os tratamentos foram aplicados e submetidos a incubação durante 30 dias, quando amostras de solo foram coletadas para fins de caracterização da comunidade biológica. Em seguida, mudas de açaizeiro variedade BRS pai d'égua (com dois meses de idade, adquiridas em viveiro especializado) foram implantadas e cultivadas durante 120 dias, mantendo frequente monitoramento e irrigação na capacidade de campo. A solução inoculante foi aplicada em taxas de 50 mL por planta, de maneira quinzenal nos primeiros 60 dias e mensal nos últimos 60 dias, conforme metodologia descrita por Mendonça et al. (2025).

Após o experimento, um analisador de gás no infravermelho (*infrared gas analyzer* - IRGA) (LICOR Biosci. Inc., modelo LI-6400 XT) foi utilizado para obter variáveis fisiológicas como taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), condutância estomática (g_s), taxa de

transpiração foliar (E) e conteúdo interno de CO_2 (C_i). As análises foram realizadas sob radiação fotossinteticamente ativa constante de $1100 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e concentração de CO_2 de $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ (Oliveira et al., 2019).

As plantas foram então mensuradas em termos de altura e diâmetro do colo, para avaliar o incremento em relação às medidas iniciais. As folhas e as raízes das plantas foram coletadas, secas em estufa de aeração forçada a 65°C até peso constante, e pesadas para a quantificação da massa seca da parte aérea (MSPA) e da massa seca de raízes (MSR). O material vegetal foi então triturado em moinho analítico (Quimis, modelo Q298A21) para a determinação dos teores de Ca, Mg, K, Fe, Cu, Ni, Mn e Zn, usando digestão ácida em forno de micro-ondas, com a aplicação de 2 mL de HNO_3 + 2 mL de H_2O e 5 mL de água ultrapura em 250 mg de amostra vegetal. Amostras em branco e materiais de referência certificados (ERM-CD281 e ERM-CC141) foram incluídos para garantir a qualidade analítica. Os teores foram quantificados por espectroscopia de emissão atômica com plasma de micro-ondas (Agilent, modelo 4200).

A comunidade biológica do solo foi analisada utilizando o pipeline PIMBA (*Pipeline for Metabarcoding Analysis*) (Oliveira et al., 2021). O tratamento de qualidade das sequências brutas foi realizado com a remoção de sequências com qualidade Phred < 20 e menores que 100 pb. Sequências de alta qualidade foram agrupadas dentro de ASVs (*Amplicon Sequence Variant*). Os filos bacterianos com abundâncias relativas excedendo os dez primeiros foram classificados como abundantes, enquanto aqueles com abundâncias $< 1\%$ foram categorizados como outros.

2.2.5. Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e ao teste de homocedasticidade de Levene ($p < 0,05$). Dados com distribuição normal foram comparados pelo teste de média de Scott-Knott ($p < 0,05$). Dados sem distribuição normal foram analisados pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparação de medianas de Dunn ($p < 0,05$). Todas as análises estatísticas foram realizadas usando o *software* R, versão 4.4.2. Os gráficos foram plotados no *software* OriginPro 2024b. Análises e gráficos de bioinformática foram construídos com base na matriz de ASV e taxonomia gerados pelo PIMBA, por meio dos pacotes Phyloseq (McMurdie & Holmes, 2013), Vegan (Oksanen et al., 2003), MicrobiotaProcess (Xu et al., 2023) e UPSTED (Conway et al., 2017), usando o *software* R studio.

2.3. Resultados e discussão

2.3.1. Caracterização do biocarvão

Os conteúdos de nutrientes no biocarvão variaram de 0,3 mg kg⁻¹ a 9,4 g kg⁻¹ seguindo a ordem K > P > Ca > Mg > Mn > Fe > Zn > Cu > B > Ni > S > Mo (Tabela 1). Os conteúdos observados de vários nutrientes são similares aos observados por Dias et al. (2024), que utilizaram biocarvão de caroço de açaí para fins de remediação de áreas contaminadas pela mineração de ouro na Amazônia, encontrando teores de 1,1, 8,1, 1,3, 2,9 e 0,1 g kg⁻¹ para Ca, K, Mg, P e Fe, respectivamente.

Tabela 1 - Conteúdos de nutrientes no biocarvão de caroço de açaí.

Nutriente	Conteúdo
Ca (g kg ⁻¹)	1,3
Fe (g kg ⁻¹)	0,1
K (g kg ⁻¹)	9,4
Mg (g kg ⁻¹)	1,0
P (g kg ⁻¹)	3,0
B (mg kg ⁻¹)	10
Cu (mg kg ⁻¹)	22,1
Mn (mg kg ⁻¹)	730
Mo (mg kg ⁻¹)	0,3
Ni (mg kg ⁻¹)	1,1
S (mg kg ⁻¹)	1,0
Zn (mg kg ⁻¹)	28

Fonte: A autora (2025).

Os conteúdos de nutrientes em biocarvões dependem diretamente da biomassa utilizada. Por exemplo, em estudo realizado por Borno; Müller-Stöver; Liu (2019), o biocarvão de palha de trigo apresentou teores de K, Mg e P (24,7, 2,3 e 5,4 g kg⁻¹, respectivamente) maiores que os observados no biocarvão de caroço de açaí utilizado neste estudo. Diferentemente, no estudo de Rodríguez -Vila et al. (2022), o biocarvão de espigas de milho apresentou conteúdos mais baixos de diversos nutrientes, como Ca (0,5 g kg⁻¹), K (0,1 g kg⁻¹), Mg (0,001 g kg⁻¹), P (0,7 g kg⁻¹), Cu (15,6 mg kg⁻¹), Mn (26,4 mg kg⁻¹) e S (217

mg kg⁻¹). É importante mencionar que os conteúdos de nutrientes em biocarvões também variam em função das condições de produção (Singh Yadav et al., 2023).

2.3.2. Caracterização do pó de metabasalto

O pH de abrasão foi 7,21 e vários nutrientes apresentaram conteúdos acima dos limites exigidos pela legislação brasileira (MAPA, 2016) para remineralizadores (Tabela 2). Os teores de K₂O foram quase 50% acima do valor definido (1%) pela legislação, assim como a soma de bases, que correspondeu a 14,3% e foi 1,6 vezes maior que o valor requerido. Além dos macronutrientes, diversos micronutrientes também apresentaram níveis acima dos valores requeridos pela legislação brasileira, como Fe, Mn e Ni.

Tabela 2 - Caracterização das propriedades do pó de rocha.

Propriedade	Resultado	Valor requerido ^a
pH de abrasão	7,21	ND
K ₂ O	1,46	1
SB	14,27	9
SiO ₂ (%)	43,9	25*
B (%)	< LD	0,03
Co (%)	0,003	0,005
Cu (%)	0,02	0,05
Fe (%)	8,88	0,1
Mn (%)	0,24	0,1
Mo (%)	0,0001	0,005
Ni (%)	0,01	0,005
P ₂ O ₅ (%)	0,08	1
S (%)	0,11	ND
Se (%)	< LD	0,03
Zn (%)	0,0743	0,1

^aValores requeridos conforme o MAPA (2016).

*Valor máximo permitido conforme o MAPA (2016).

LD - abaixo do limite de detecção.

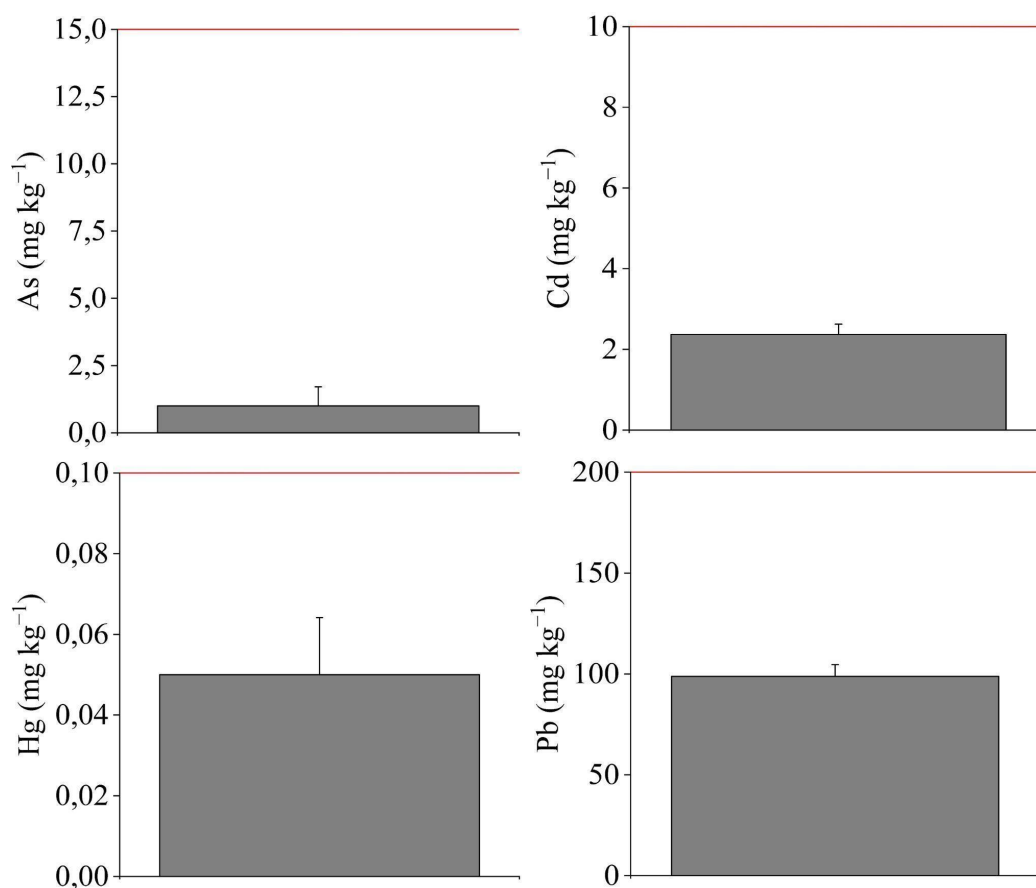
ND - não estabelecido pelo MAPA (2016).

Fonte: A autora (2025).

A legislação brasileira também estabelece limites para As, Cd, Hg e Pb, que são considerados EPTs (MAPA, 2016). O pó de rocha utilizado neste estudo apresentou níveis muito abaixo dos limites permitidos para esses elementos, cujas concentrações seguiram a

tendência $Pb > Cd > As > Hg$ (Figura 1). Tais resultados são especialmente importantes para a proteção do solo e sugerem baixo risco com a aplicação do pó de metabasalto.

Figura 1 - Conteúdos de elementos potencialmente tóxicos no pó de metabasalto.



Valor máximo permitido conforme o MAPA (2016).

Fonte: A autora (2025).

Apesar das diversas características favoráveis do pó de rocha em relação à legislação brasileira, algumas limitações foram observadas e merecem atenção. Por exemplo, os teores de sílica livre estão acima do limite permitido e alguns nutrientes estão abaixo dos valores mínimos, como Bo, Cu, Mo, P e Zn. Elementos como Co e Se, que não são essenciais mas podem trazer benefícios para o crescimento vegetal, também estão abaixo dos limites indicados pela legislação.

Considerando a lenta liberação de nutrientes comumente observada no pó de basalto, é necessário adotar formas de melhorar a disponibilidade desses nutrientes para as plantas (Medeiros et al., 2024). Uma dessas formas é o uso de microrganismos solubilizadores de minerais, que podem auxiliar acelerar a dissolução do pó de basalto (LI et al., 2021). Além

disso, a combinação com biocarvão poderá suprir vários nutrientes que estão em níveis mais baixos no pó de metabasalto (Honvault et al., 2024).

2.3.3. Fertilidade do solo após experimento

A aplicação de tratamentos com pó de rocha aumentou significativamente o pH do solo (Tabela 3), sobretudo a combinação entre pó de rocha e inoculante, que elevou o pH de 4,4 (acidez muito elevada) para 7,5 (alta alcalinidade) (Venegas et al., 1999). Tais resultados podem ser explicados pelo aumento dos conteúdos trocáveis de cátions básicos no solo, que competem com cátions ácidos como H^+ e Al^{3+} (Rodrigues et al., 2024a). Com a aplicação desses tratamentos, tanto a concentração quanto a saturação de Al^{3+} apresentaram redução, passando de $0,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e 49,4% para valores não detectáveis. Além disso, a acidez potencial ($H+Al$) também foi mitigada, passando de alta para muito baixa (Venegas et al., 1999).

Tabela 3 - Caracterização da fertilidade do solo após o experimento.

Variável	S	S+P	S+B	S+I	S+B+I	S+P+B	S+P+I	S+P+B+I
pH (em água)	$4,4 \pm 0,2 \text{ b}$	$7,3 \pm 0,0 \text{ a}$	$4,5 \pm 0,1 \text{ b}$	$4,5 \pm 0,3 \text{ b}$	$4,5 \pm 0,1 \text{ b}$	$7,3 \pm 0,3 \text{ a}$	$7,5 \pm 0,1 \text{ a}$	$7,2 \pm 0,3 \text{ a}$
P (mg kg^{-1})	$4,3 \pm 0,6 \text{ e}$	$10,4 \pm 0,4 \text{ c}$	$17,9 \pm 1,2 \text{ a}$	$7,5 \pm 0,7 \text{ d}$	$19,2 \pm 0,3 \text{ a}$	$15,9 \pm 1,8 \text{ b}$	$11,3 \pm 0,8 \text{ c}$	$18,4 \pm 0,2 \text{ a}$
S (mg kg^{-1})	$6,3 \pm 0,8 \text{ c}$	$29,2 \pm 3,8 \text{ a}$	$11,3 \pm 1,3 \text{ b}$	$11,6 \pm 0,8 \text{ b}$	$13,2 \pm 2,0 \text{ b}$	$33,1 \pm 6,4 \text{ a}$	$30,7 \pm 1,0 \text{ a}$	$34,8 \pm 1,3 \text{ a}$
Ca^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	$0,4 \pm 0,1 \text{ d}$	$6,5 \pm 0,1 \text{ c}$	$0,3 \pm 0,1 \text{ d}$	$0,2 \pm 0,0 \text{ e}$	$0,3 \pm 0,0 \text{ e}$	$6,2 \pm 0,1 \text{ c}$	$7,6 \pm 0,6 \text{ a}$	$7,1 \pm 0,2 \text{ b}$
Mg^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	$0,2 \pm 0,0 \text{ c}$	$0,2 \pm 0,0 \text{ b}$	$0,1 \pm 0,0 \text{ c}$	$0,1 \pm 0,0 \text{ d}$	$0,2 \pm 0,0 \text{ c}$	$0,3 \pm 0,0 \text{ a}$	$0,3 \pm 0,0 \text{ b}$	$0,3 \pm 0,0 \text{ a}$
K^+ ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	$0,1 \pm 0,0 \text{ f}$	$0,1 \pm 0,0 \text{ e}$	$0,5 \pm 0,0 \text{ c}$	$0,1 \pm 0,0 \text{ e}$	$0,6 \pm 0,0 \text{ b}$	$0,6 \pm 0,1 \text{ a}$	$0,3 \pm 0,1 \text{ d}$	$0,6 \pm 0,0 \text{ a}$
Al^{3+} ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	$0,7 \pm 0,1 \text{ a}$	$0,0 \pm 0,0 \text{ c}$	$0,4 \pm 0,2 \text{ ab}$	$0,6 \pm 0,2 \text{ a}$	$0,5 \pm 0,0 \text{ b}$	$0,0 \pm 0,0 \text{ c}$	$0,0 \pm 0,0 \text{ c}$	$0,0 \pm 0,0 \text{ c}$
$H+Al$ ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	$6,2 \pm 0,6 \text{ a}$	$0,8 \pm 0,1 \text{ bc}$	$6,0 \pm 1,0 \text{ a}$	$5,9 \pm 0,2 \text{ a}$	$5,4 \pm 0,1 \text{ ab}$	$0,8 \pm 0,1 \text{ bc}$	$0,7 \pm 0,1 \text{ c}$	$1,0 \pm 0,3 \text{ bc}$
SB ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	$0,7 \pm 0,1 \text{ d}$	$7,0 \pm 0,1 \text{ b}$	$1,0 \pm 0,1 \text{ c}$	$0,5 \pm 0,1 \text{ d}$	$1,1 \pm 0,1 \text{ c}$	$7,2 \pm 0,3 \text{ b}$	$8,3 \pm 0,5 \text{ a}$	$8,2 \pm 0,2 \text{ a}$
T ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	$6,9 \pm 0,5 \text{ c}$	$7,8 \pm 0,2 \text{ b}$	$7,0 \pm 0,8 \text{ c}$	$6,4 \pm 0,2 \text{ c}$	$6,5 \pm 0,0 \text{ c}$	$7,9 \pm 0,2 \text{ b}$	$9,0 \pm 0,6 \text{ a}$	$9,2 \pm 0,5 \text{ a}$
V (%)	$10,6 \pm 1,5 \text{ c}$	$90,3 \pm 0,4 \text{ a}$	$14,9 \pm 3,5 \text{ b}$	$8,2 \pm 1,0 \text{ c}$	$17,4 \pm 1,0 \text{ b}$	$90,3 \pm 1,0 \text{ a}$	$91,9 \pm 0,2 \text{ a}$	$89,7 \pm 2,2 \text{ a}$
m (%)	$49,4 \pm 1,7 \text{ a}$	$0,0 \pm 0,0 \text{ d}$	$29,3 \pm 13,4 \text{ b}$	$53,4 \pm 6,7 \text{ a}$	$31,3 \pm 2,5 \text{ c}$	$0,0 \pm 0,0 \text{ d}$	$0,0 \pm 0,0 \text{ d}$	$0,0 \pm 0,0 \text{ d}$
B (mg kg^{-1})	$0,2 \pm 0,0 \text{ ab}$	$0,1 \pm 0,0 \text{ b}$	$0,2 \pm 0,0 \text{ ab}$	$0,2 \pm 0,0 \text{ ab}$	$0,2 \pm 0,0 \text{ a}$	$0,2 \pm 0,0 \text{ ab}$	$0,2 \pm 0,1 \text{ a}$	$0,2 \pm 0,0 \text{ a}$
Cu (mg kg^{-1})	$0,2 \pm 0,0 \text{ d}$	$1,2 \pm 0,0 \text{ a}$	$0,2 \pm 0,1 \text{ d}$	$0,2 \pm 0,0 \text{ d}$	$0,2 \pm 0,0 \text{ d}$	$1,2 \pm 0,1 \text{ ab}$	$1,0 \pm 0,1 \text{ bc}$	$1,0 \pm 0,0 \text{ c}$
Fe (mg kg^{-1})	$459,0 \pm 31,0 \text{ a}$	$52,0 \pm 1,0 \text{ d}$	$435,3 \pm 103,8 \text{ ab}$	$368,7 \pm 5,0 \text{ ab}$	$341,5 \pm 18,5 \text{ bc}$	$50,7 \pm 4,2 \text{ d}$	$51,0 \pm 1,7 \text{ d}$	$53,4 \pm 0,4 \text{ cd}$
Mn (mg kg^{-1})	$0,5 \pm 0,1 \text{ e}$	$5,5 \pm 0,3 \text{ d}$	$8,4 \pm 1,5 \text{ ab}$	$0,3 \pm 0,2 \text{ e}$	$9,9 \pm 0,2 \text{ a}$	$6,8 \pm 1,0 \text{ c}$	$6,1 \pm 0,1 \text{ cd}$	$6,8 \pm 0,0 \text{ bc}$
Zn (mg kg^{-1})	$0,7 \pm 0,0 \text{ c}$	$2,1 \pm 0,1 \text{ b}$	$0,8 \pm 0,1 \text{ c}$	$0,7 \pm 0,1 \text{ c}$	$0,8 \pm 0,0 \text{ c}$	$2,4 \pm 0,2 \text{ a}$	$2,1 \pm 0,2 \text{ b}$	$2,2 \pm 0,1 \text{ b}$

Fonte: A autora (2025).

Os tratamentos com pó de rocha aumentaram consideravelmente a SB do solo, especialmente com a incorporação de Ca^{2+} , cujas concentrações passaram de baixa ($0,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) a muito altas (valores entre 6,2 a $7,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Além da SB, a V% também

aumentou, atingindo um percentual muito alto (até 92% em S+P+I) com a aplicação de pó de rocha, consideravelmente acima do valor observado no tratamento controle (10,6%), que foi considerado muito baixo. A aplicação de biocarvão, isoladamente e combinado com inoculante, também aumentou a SB e V%, mas em menor proporção que o pó de rocha. Esses resultados reforçam o incremento em bases trocáveis no solo com a aplicação do pó de rocha, que contribuiu com a mitigação da acidez ativa e trocável.

Todos os tratamentos aumentaram o conteúdo disponível de P, principalmente a aplicação de biocarvão, com valores de 3,6 a 4,5 vezes maiores em relação ao tratamento controle. Esses resultados sugerem que o biocarvão representou uma importante fonte de P para os solos, o que pode estar relacionado com a riqueza em P nos caroços de açaí utilizados na produção do biocarvão (Dias et al., 2019), bem como no próprio biocarvão utilizado neste estudo (Tabela 1). O pó de rocha também contribuiu com o aumento do conteúdo de P no solo, mas em níveis mais baixos que os tratamentos com biocarvão. Biocarvão de caroço de açaí também aumentou a disponibilidade de P em solos de mineração de Fe na PMC (RAMOS et al., 2021).

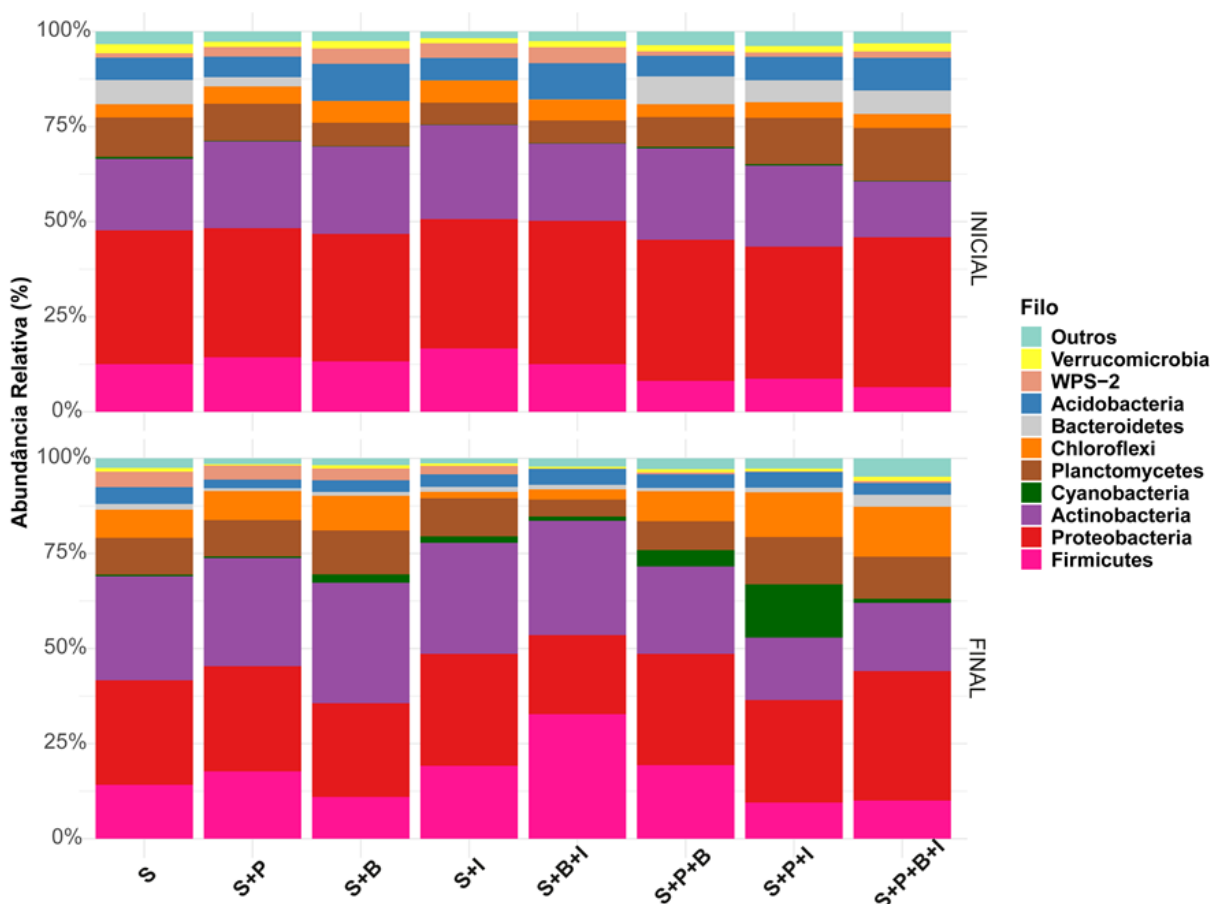
A concentração disponível de Fe apresentou redução com a aplicação de todos os tratamentos com pó de rocha, o que pode ter ocorrido em virtude da alcalinização dos solos, que promoveu a precipitação do Fe e a formação de oxi-hidróxidos com baixa solubilidade (Rodrigues et al., 2024b; Vélez-Bermúdez; Schmidt, 2023). Diferentemente, as concentrações disponíveis de Cu e Zn aumentaram nos tratamentos com pó de rocha. Esses resultados indicam que, apesar do aumento expressivo do pH do solo, o conteúdo total de Cu e Zn no pó de metabasalto contribuiu com a disponibilidade desses nutrientes no solo, inclusive para níveis acima dos considerados como altos (0,8 e 1,2 mg kg⁻¹ para Cu e Zn, respectivamente).

Com exceção da aplicação isolada de inoculante microbiano, que promoveu baixa disponibilidade de Mn, todos os tratamentos aumentaram a concentração disponível desse nutriente para níveis considerados altos (> 5 mg kg⁻¹), especialmente a adição de biocarvão (isoladamente e combinado com inoculante), com resultados 17 a 20 vezes maiores que o solo controle. Esses resultados podem ser explicados pelos teores elevados de Mn no biocarvão utilizado neste estudo (Tabela 1). O Mn é um dos nutrientes absorvidos em maiores conteúdos pelo açaizeiro (Santos et al., 2014), o que resulta em um biocarvão com níveis elevados de Mn e reforça o potencial dos caroços de açaí como fonte de Mn, o que foi evidenciado em estudos anteriores (Dias et al., 2022).

2.3.4. Composição da comunidade microbiana

A análise taxonômica a nível de filo revelou a predominância de Proteobacteria, Actinobacteria e Firmicutes, tanto antes quanto após o experimento (Figura 2). De modo geral, quando comparado ao tempo inicial, os filos Actinobacteria, Firmicutes, Chloroflexi e Planctomycetes apresentaram aumento em todos os tratamentos. Em contrapartida, Acidobacteria, Proteobacteria e Verrucomicrobia reduziram sua abundância relativa. Cyanobacteria teve um aumento expressivo principalmente com a aplicação de pó de rocha associado ao inoculante microbiano.

Figura 2 - Composição da comunidade bacteriana do solo (a nível de filo).



Fonte: A autora (2025).

A abundância relativa dos perfis taxonômicos pode ser modulada pelas características físico-químicas dos solos, interferindo na composição e funções das comunidades microbianas (Sun et al., 2020b). Estudos indicam que a abundância relativa de Acidobacteria é significativamente reduzida em solos alcalinos, enquanto Proteobacteria apresenta correlação positiva com ambientes ácidos (Kim et al., 2021). Essas linhagens possuem genes

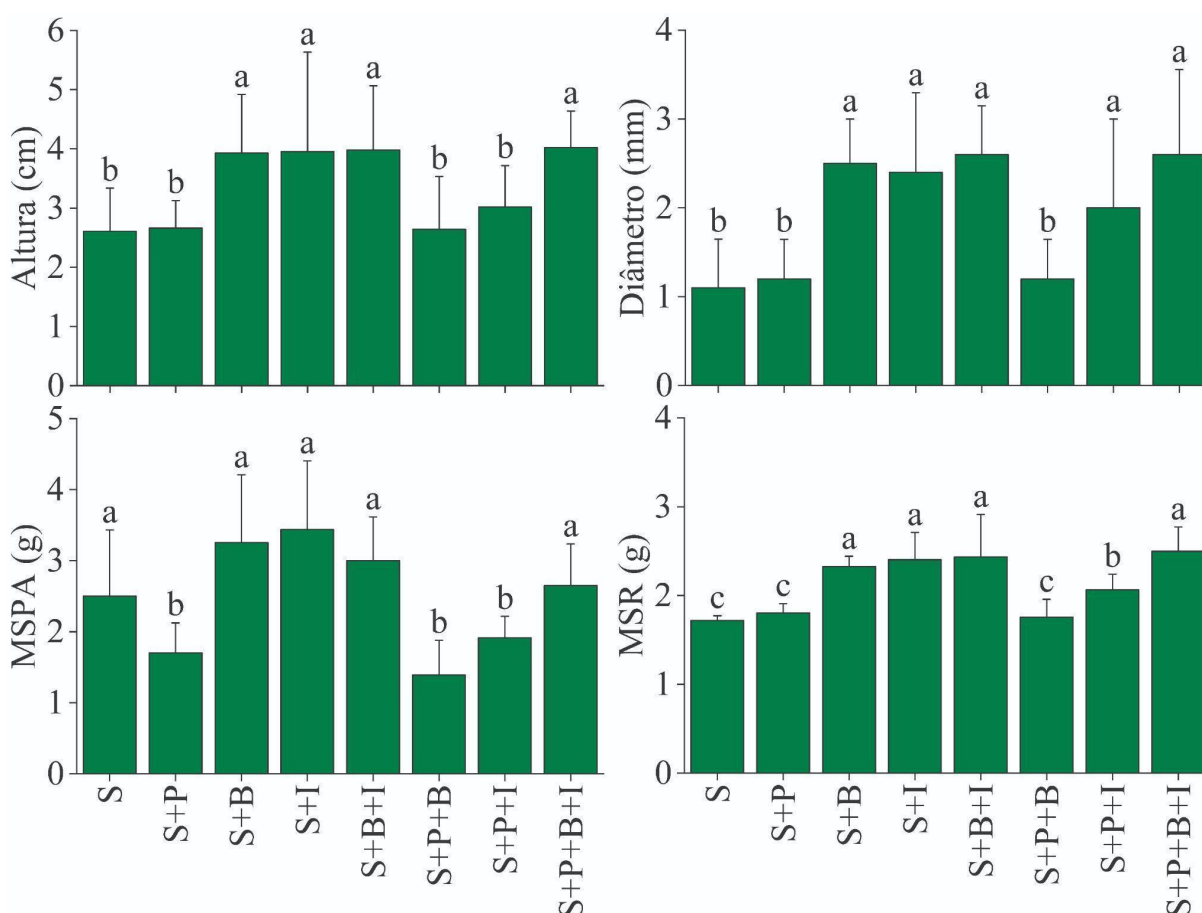
envolvidos na assimilação de formas indisponíveis de N (Bai et al., 2025), além de diversos gêneros que atuam como promotores de crescimento vegetal (Andrade et al., 2023). Mudanças nas propriedades do solo e, conseqüentemente, na composição da comunidade biológica, podem contribuir diretamente com diferenças no crescimento das plantas.

Entre os filos predominantes, Actinobacteria e Chloroflexi possuem genes de ciclagem associados ao P, o que pode otimizar a solubilização e a liberação de P no pó de rocha (Bai et al., 2025). Planctomycetes e Firmicutes têm sido comumente ligados à decomposição da MO (Lage et al., 2019) e a produção de fitohormônios, como ácido indol-acético, crucial para o crescimento vegetal (Hashimi et al., 2020). Cyanobacteria, por sua vez, é comumente relacionado com a disponibilidade de C e N em formas assimiláveis para as plantas, aumento da retenção de água e nutrientes no solo (Li et al., 2025), além de secreção de substâncias bioativas (Toribio et al., 2020).

2.3.5 Crescimento e trocas gasosas do açaizeiro

Diferenças foram observadas para o incremento em altura, diâmetro, MSPA e MSR (Figura 3). A altura apresentou aumento com a aplicação de biocarvão (51%) e inoculante (52%), tanto isoladamente quanto combinados entre si (53%) e com o pó de rocha (54%). O diâmetro aumentou com a aplicação desses mesmos tratamentos (118-136%), além da combinação entre pó de rocha e inoculante (82%). A MSPA não apresentou diferenças entre o solo natural e a aplicação de biocarvão e inoculante, tanto isoladamente quanto combinados entre si e com o pó de rocha, mas diminuiu com a aplicação dos demais tratamentos. A MSR, por sua vez, aumentou com a aplicação dos mesmos tratamentos que promoveram o aumento do diâmetro (20-45%).

Figura 3 - Incremento em altura, incremento em diâmetro, massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSR) das mudas de açazeiro após o experimento.



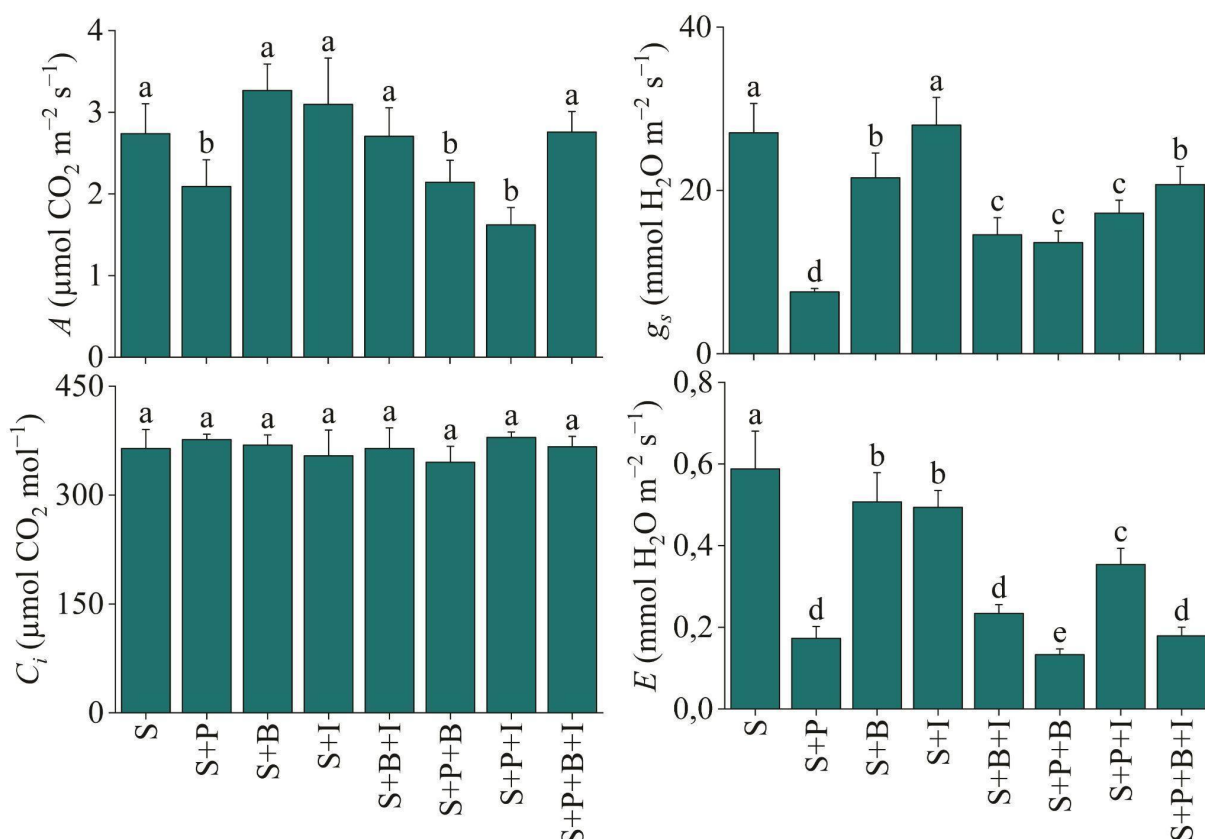
Fonte: A autora (2025).

Os resultados sugerem que biocarvão e inoculante microbiano, aplicados isoladamente e combinados entre si, favoreceram o crescimento das plantas, assim como a combinação entre biocarvão, pó de rocha e inoculante microbiano. Por outro lado, o crescimento diminuiu ou não diferiu do solo controle com a aplicação de pó de rocha, isoladamente ou combinado com os demais materiais, exceto a combinação com inoculante, que aumentou o diâmetro e a MSR. É possível que o aumento excessivo do pH do solo tenha prejudicado o crescimento das plantas em S+P, S+P+B e S+P+I, principalmente com o aumento do conteúdo de HCO_3^- (íon bicarbonato) no solo, prejudicando a respiração e o crescimento vegetal (Msimbira; Smith, 2020). Resultados similares foram observados por Sagervanshi et al. (2021), com menor crescimento de plantas de fava (*Vicia faba* L.) cultivadas em substratos alcalinos.

Com exceção do conteúdo de CO_2 interno, todas as variáveis fisiológicas apresentaram diferenças com a aplicação dos tratamentos (Figura 4). Houve redução da A com a aplicação de pó de rocha, isoladamente e combinado com biocarvão ou inoculante. Todos os

tratamentos reduziram a g_s das plantas em relação ao solo controle, com exceção da aplicação isolada de inoculante microbiano. Os tratamentos também reduziram a E , principalmente a associação entre pó de rocha e biocarvão.

Figura 4 - Taxa fotossintética (A), condutância estomática (g_s), conteúdo de CO_2 interno (C_i) e transpiração foliar (E) das plantas de açaizeiro após o experimento.



Fonte: A autora (2025).

A aplicação de pó de rocha, isoladamente ou em combinação com biocarvão ou inoculante microbiano, impactou a maioria das variáveis fisiológicas das plantas. A redução da A em resposta ao pó de rocha pode estar associada a mudanças nos atributos químicos do solo, que afetam a absorção de nutrientes e, consequentemente, a atividade fotossintética. Estudos indicam que a baixa solubilidade de nutrientes do pó de rocha pode limitar a disponibilidade de elementos essenciais para o metabolismo fotossintético (Ramos et al., 2022).

A redução da g_s , observada em todos os tratamentos, exceto na aplicação de inoculante microbiano, sugere um ajuste fisiológico das plantas em condição de estresse. A manutenção da g_s na aplicação de inoculante microbiano sugere que a microbiota benéfica pode ter

favorecido a absorção de água e nutrientes, melhorando a resistência ao estresse hídrico, o que também foi evidenciado por Bashan et al. (2014). A redução da E , que foi observada em todos os tratamentos, tem relação direta com a diminuição da g_s .

2.3.6 Análise nutricional do açaizeiro

Os conteúdos de nutrientes no tecido vegetal apresentaram diferenças ($p < 0,05$) com a aplicação dos tratamentos (Tabela 4). Entre os macronutrientes avaliados (Ca, Mg e K), nenhum tratamento promoveu aumento do conteúdo de Mg no tecido foliar. Por outro lado, o Ca apresentou teores superiores em todos os tratamentos com aplicação de pó de rocha (81-265%) que no tratamento controle, assim como o K em todos os tratamentos com aplicação de biocarvão (77-106%). No tecido radicular, os tratamentos com pó de rocha aumentaram o conteúdo de Ca (até 1781% em S+P+B+I) e Mg (até 230% em S+P+I) em relação ao solo controle, enquanto o K aumentou com a adição de biocarvão (348%) e inoculante (54%), isoladamente e combinados entre si (265%) e com pó de rocha (107%).

Tabela 4 - Teores de nutrientes nas folhas e raízes das plantas de açaizeiro após o experimento.

Tratamento	Ca	Mg	K	Fe	Mn	Cu	Ni	Zn
	mg kg ⁻¹					μg kg ⁻¹		
Folhas								
S	20,2 ± 1,2 c	5,3 ± 0,5 a	26,4 ± 0,3 cd	0,6 ± 0,1 ab	0,7 ± 0,2 c	44,3 ± 13,0 b	1,4 ± 0,5 c	127,6 ± 23,7 a
S+P	36,9 ± 3,9 ab	4,0 ± 0,1 ab	25,6 ± 2,0 d	1,3 ± 0,3 a	0,8 ± 0,1 c	67,2 ± 0,5 a	4,2 ± 0,2 a	137,2 ± 5,3 a
S+B	20,5 ± 2,6 c	3,9 ± 0,1 b	53,6 ± 1,9 a	0,7 ± 0,1 ab	5,7 ± 0,5 a	11,4 ± 4,8 c	2,5 ± 0,5 b	127,4 ± 23,8 a
S+I	14,9 ± 0,2 d	4,8 ± 0,2 ab	28,7 ± 0,1 bcd	1,0 ± 0,1 ab	0,9 ± 0,1 c	5,3 ± 2,9 c	4,5 ± 0,6 a	97,3 ± 16,5 b
S+B+I	18,6 ± 0,4 cd	3,9 ± 0,4 b	54,4 ± 0,9 a	1,2 ± 0,7 ab	2,9 ± 0,6 b	15,1 ± 8,7 c	3,8 ± 0,7 a	98,9 ± 0,7 b
S+P+B	36,5 ± 0,2 b	4,0 ± 0,1 ab	46,7 ± 2,8 ab	1,7 ± 1,2 ab	1,1 ± 0,1 c	8,5 ± 8,5 c	2,1 ± 0,7 c	53,9 ± 12,2 c
S+P+I	73,8 ± 10,2 ab	4,5 ± 0,4 ab	42,7 ± 0,0 abc	0,7 ± 0,0 ab	0,9 ± 0,1 c	11,3 ± 9,5 c	1,7 ± 0,6 c	35,9 ± 10,8 c
S+P+B+I	69,7 ± 23,0 ab	3,5 ± 1,1 b	53,7 ± 15,8 a	0,5 ± 0,1 b	0,8 ± 0,2 c	22,9 ± 2,6 c	2,9 ± 0,0 b	21,8 ± 14,2 c
Raízes								
S	6,2 ± 0,0 d	4,3 ± 0,1 f	8,2 ± 0,2 g	9,2 ± 0,4 c	0,1 ± 0,0 e	9,2 ± 1,4 cd	1,1 ± 0,0 d	127,0 ± 2,4 b
S+P	57,4 ± 1,5 b	11,9 ± 0,5 c	6,4 ± 0,7 h	21,2 ± 1,1 a	0,8 ± 0,1 c	80,2 ± 3,8 a	15,2 ± 2,4 a	192,5 ± 16,9 a
S+B	10,6 ± 1,2 c	10,8 ± 0,2 d	36,7 ± 0,6 a	22,1 ± 3,6 a	1,8 ± 0,2 a	7,3 ± 2,8 d	6,0 ± 2,4 c	87,9 ± 5,5 c
S+I	6,1 ± 0,4 d	5,1 ± 1,0 f	12,6 ± 0,7 e	17,6 ± 1,3 b	0,2 ± 0,0 e	8,1 ± 1,7 cd	7,1 ± 2,2 c	54,5 ± 2,0 d
S+B+I	6,0 ± 0,3 d	6,3 ± 0,7 e	29,9 ± 3,7 b	16,0 ± 0,8 b	1,2 ± 0,0 b	8,3 ± 3,1 cd	3,9 ± 1,2 d	25,3 ± 1,6 e
S+P+B	52,7 ± 3,8 b	12,9 ± 0,2 b	14,1 ± 0,9 d	17,7 ± 2,9 b	0,6 ± 0,1 c	36,7 ± 6,2 ab	11,1 ± 0,5 b	80,3 ± 17,3 c
S+P+I	109,9 ± 12,6 a	14,2 ± 0,1 a	10,5 ± 0,1 f	25,7 ± 2,2 a	0,6 ± 0,1 c	48,1 ± 4,1 ab	12,3 ± 0,2 b	85,7 ± 9,8 c
S+P+B+I	116,6 ± 12,7 a	12,9 ± 0,7 b	17,0 ± 0,6 c	19,6 ± 5,4 b	0,5 ± 0,1 d	25,7 ± 12,9 bc	10,6 ± 2,1 b	70,1 ± 34,7 c

Fonte: A autora (2025).

A absorção de nutrientes pelas plantas varia em função de diversos fatores, incluindo a disponibilidade no solo e as interações iônicas entre os elementos. Os resultados sugerem que nenhum dos tratamentos aumentou o conteúdo de Mg no tecido foliar, mas todos os tratamentos aumentaram o conteúdo de Mg no tecido radicular, com exceção da aplicação isolada de inoculante. Isso pode ser explicado pela redução da translocação de Mg, decorrente da competição com outros cátions no interior da planta, como Ca e K (Gransee; Fühls, 2013), que foram especialmente favorecidos pela adição de pó de rocha e biocarvão, respectivamente. Os resultados também reforçam que o aumento da disponibilidade de Ca (principalmente com pó de rocha) e K (principalmente com biocarvão) refletiu no aumento da absorção desses nutrientes pelas plantas.

Entre os conteúdos de micronutrientes no tecido foliar (Tabela 3), o Fe não apresentou diferenças entre o solo controle e os demais tratamentos, mas aumentos foram evidenciados para Mn com a aplicação de biocarvão isoladamente (8 vezes acima) e combinado com inoculante (4 vezes acima), Cu com a aplicação isolada de pó de rocha (2 vezes acima), e Ni em todos os tratamentos (de 2 a 3 vezes acima) com exceção da combinação de pó de rocha com biocarvão ou inoculante. O Zn apresentou redução com a aplicação de todos os tratamentos, exceto a adição isolada de pó de rocha ou biocarvão, que não diferiram do solo controle.

No tecido radicular, os conteúdos de micronutrientes também foram afetados (Tabela 3). Todos os tratamentos aumentaram os conteúdos de Fe (74-179%), Mn (100-1700%) e Ni (255-1282%) em relação ao solo controle, exceto o Mn com a aplicação isolada de inoculante, bem como o Ni com a combinação de biocarvão e inoculante. O conteúdo de Cu aumentou com a aplicação isolada de pó de rocha, isoladamente (9 vezes acima) e combinado com biocarvão (4 vezes acima) ou inoculante (5 vezes acima). O Zn, por sua vez, teve aumento apenas com a aplicação isolada de pó de rocha, com conteúdo 2 vezes acima do solo controle.

Os resultados indicam que os tratamentos com pó de rocha, biocarvão e inoculante promoveram mudanças significativas na absorção de micronutrientes pelas plantas. O biocarvão favoreceu principalmente a absorção de Mn, enquanto o pó de rocha aumentou consideravelmente a absorção de Cu e Zn. Esses achados reforçam o potencial dos coprodutos da mineração e resíduos agroindustriais para a melhoria da fertilidade de solos na Amazônia, mas também indicam a necessidade de novas pesquisas para melhor avaliar o crescimento de plantas em solos tratados submetidos à aplicação desses produtos.

2.4. Conclusão

O pó de rocha apresentou vários nutrientes em conteúdos acima dos requeridos pela legislação brasileira, incluindo bases e micronutrientes. O biocarvão apresentou conteúdos mais elevados de Ca, Mg, K, P, Fe e Mn que outros nutrientes. A aplicação de pó de rocha, biocarvão e inoculante microbiano promoveu mudanças nos atributos do solo, como a neutralização do Al trocável e o aumento do conteúdo e da saturação de bases no solo, principalmente com o uso de pó de rocha. No entanto, os tratamentos com pó de rocha (exceto quando combinado aos demais produtos) resultaram em menor crescimento de mudas de açaizeiro. Alterações adversas também foram evidenciadas nas trocas gasosas das plantas, que apresentaram redução da taxa fotossintética, condutância estomática e transpiração foliar. Os teores de vários nutrientes aumentaram com a aplicação dos tratamentos, principalmente Ca com pó de rocha (até 4 vezes na parte aérea e 19 vezes nas raízes) e K com biocarvão (até 2 vezes na parte aérea e 5 vezes nas raízes), mas nutrientes como Cu e Zn tiveram absorção prejudicada em vários casos. Novos estudos são sugeridos para avaliar outras taxas e formas de aplicação dos produtos testados, bem como outros insumos. Pesquisas dessa natureza poderão contribuir para o uso de resíduos agroindustriais e coprodutos de mineração na melhoria da qualidade de solos de baixa fertilidade na Amazônia, favorecendo a economia circular e a bioeconomia na região.

REFERÊNCIAS

- ABHISHEK, K. et al. Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: A state-of-the-art review. **Science of the Total Environment**, v. 853, n. September, p. 158562, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158562>
- ANDRADE, P. H. M. et al. 16S metabarcoding analysis reveals the influence of organic and conventional farming practices on bacterial communities from the rhizospheric of *Coffea arabica* L. **Brazilian Journal of Biology**, volume 83, 2023. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.274070>
- BAI, X. Metagenomics reveals functional profiles of soil nitrogen and phosphorus cycling under different amendments in saline-alkali soil. **Environmental Research**, Volume 267, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120686>
- BASHAN, Y. et al. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: Formulations and practical perspectives (1998-2013). **Plant and Soil**, v. 378, n. 1–2, p. 1–33, 2014. [DOI 10.1007/s11104-013-1956-x](https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x)

BORNØ, M. L.; MÜLLER-STÖVER, D. S.; LIU, F. Biochar properties and soil type drive the uptake of macro- and micronutrients in maize (*Zea mays* L.). **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 182, n. 2, p. 149–158, 2019. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800228>

CONWAY, JR., LEX, A., GEHLENBORG, N. UpSetR: an R package for the visualization of intersecting sets and their properties, **Bioinformatics**, Volume 33, Issue 18, Pages 2938–2940, September 2017. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btx364>

DIAS, Y. N. et al. 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**, v. 14, n. 7, 2024. <https://doi.org/10.3390/min14070732>

DIAS, Y. N. et al. Biochar mitigates bioavailability and environmental risks of arsenic in gold mining tailings from the eastern Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 311, n. November 2021, p. 114840, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114840>

DIAS, Y. N. et al. Biochar produced from Amazonian agro-industrial wastes: properties and adsorbent potential of Cd ²⁺ and Cu ²⁺. **Biochar**, 1, 389-400. 2019. <https://doi.org/10.1007/s42773-019-00031-4>

FREITAS, L. C. et al. Green extraction technologies: A path to the Amazon bioeconomy development. **Trends in Food Science and Technology**, v. 147, n. March, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104462>

GRANSEE, A., FÜHRS, H. Mobilidade de magnésio em solos como um desafio para análise de solo e planta, fertilização de magnésio e absorção de raiz sob condições adversas de crescimento. **Plant Soil** 368 , 5–21, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1567-y>

HASHMI, I.; BINDSCHEDLER, S.; JUNIER, P. Firmicute. **Beneficial Microbes in Agro-Ecology**. 1. ed. c. 18, p. 363-396. 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823414-3.00018-6>

HONVAULT, N. et al. Additive effects of basalt enhanced weathering and biochar co-application on carbon sequestration, soil nutrient status and plant performance in a mesocosm experiment. **Applied Geochemistry**, v. 169, n. May, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106054>

HOSSAIN, M. Z. et al. Assessment of the fertilizer potential of biochars produced from slow pyrolysis of biosolid and animal manures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 155, n. September 2020, p. 105043, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105043>

JORGE, F. T. A.; SILVA, A. S.; BRIGAGÃO, G. V. Açai waste valorization via mannose and polyphenols production: techno-economic and environmental assessment. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 3, p. 3739–3752, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02681-0>

KIM, H. Diversity and composition of soil Acidobacteria and Proteobacteria communities as a bacterial indicator of past land-use change from forest to farmland, **Science of The Total Environment**, Volume 797, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148944>

- LAGE, O. M. et al. Planctomycetes, **Encyclopedia of Microbiology**, Pages 614-626, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.90689-7>
- LI, C. et al. Effects of mineral-solubilizing microorganisms on root growth, soil nutrient content, and enzyme activities in the rhizosphere soil of robinia pseudoacacia. **Forests**, v. 12, n. 1, p. 1–12, 2021. <https://doi.org/10.3390/f12010060>
- LI, S. et al. Enhancement of rice production and soil carbon sequestration utilizing nitrogen-fixing cyanobacteria, **Applied Soil Ecology**, Volume 207, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105940>
- LUCHESI, A. V. et al. Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer. *African Journal of Agricultural Research*, v. 17, n. 3, p. 487–497, 2021. DOI: [10.5897/AJAR2020.15234](https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15234)
- MEDEIROS, F. DE P. et al. Rock Powder Enhances Soil Nutrition and Coffee Quality in Agroforestry Systems. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 1, p. 1–16, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16010354>
- MENDONÇA, D. P. et al. Amazonian Microorganism Strains Improve Physiological Performance to Oil Palm Seedlings Growth Promote. **J Plant Growth Regul.** 2025. <https://doi.org/10.1007/s00344-025-11628-4>
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. E A. (MAPA). INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 5, DE 10 DE MARÇO DE 2016. **GABINETE DA MINISTRA**, 2016.
- MSIMBIRA, L. A.; SMITH, D. L. The Roles of Plant Growth Promoting Microbes in Enhancing Plant Tolerance to Acidity and Alkalinity Stresses. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, n. July, p. 1–14, 2020. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00106>
- MCMURDIE, P.J. AND HOLMES, S. PHYLOSEQ: An R Package for Reproducible Interactive Analysis and Graphics of Microbiome Census Data. *PLOS ONE*, 8, e61217. 2013. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061217>
- OKSANEN, J. et al. Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.6 5, 2023. <https://github.com/vegandevs/vegan>.
- OLIVEIRA, R. R. et al. Pimba: a pipeline for metabarcoding analysis. **Springer**. 106-116. 2021.
- RAMOS, C. G. et al. Possibilities of using silicate rock powder: An overview. **Geoscience Frontiers**, v. 13, n. 1, p. 101185, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185>
- RAMOS, S. J. et al. Açai biochar and compost affect the phosphorus sorption, nutrient availability, and growth of dioclea apurensis in iron mining soil. **Minerals**, v. 11, n. 7, 2021. <https://doi.org/10.3390/min11060000>
- RIBEIRO, I. D. A. et al. Use of Mineral Weathering Bacteria to Enhance Nutrient Availability in Crops: A Review. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, n. December 2020, p. 1–20, 2020. [doi: 10.3389/fpls.2020.590774](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.590774)

ROCHA, F. I. et al. Soil type determines the magnitude of soil fertility changes by forest-to-pasture conversion in Western Amazonia. **Science of the Total Environment**, v. 856, n. July 2022, 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158955>

RODRIGUES, M. et al. Paraná basin basalt powder: A multinutrient soil amendment for enhancing soil chemistry and microbiology. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 141, n. May, 2024a. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104957>

RODRIGUES, M. et al. Unlocking higher yields in *Urochloa brizantha*: the role of basalt powder in enhancing soil nutrient availability. **Discover Soil**, 2024b. <https://doi.org/10.1007/s44378-024-00006-3>

RODRÍGUEZ-VILA, A. et al. Effect of Biochar on Micronutrient Availability and Uptake Into Leafy Greens in Two Urban Tropical Soils With Contrasting Soil pH. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 6, n. May, p. 1–14, 2022. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.821397>

SAGERVANSKI, A. et al. Early growth reduction in *Vicia faba* L. under alkali salt stress is mainly caused by excess bicarbonate and related to citrate and malate over accumulation. **Environmental and Experimental Botany**, v. 192, n. July, p. 104636, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104636>

SAMUELS, T. et al. Microbial weathering of minerals and rocks in natural environments. **Biogeochemical cycles: Ecological drivers and environmental impact**, 59-79, 2020. <https://doi-org.ez4.periodicos.capes.gov.br/10.1002/9781119413332.ch3>

SANTOS, V. S., et al. Açaí (*Euterpe oleracea* Mart.): A Tropical Fruit with High Levels of Essential Minerals Especially Manganese and its Contribution as a Source of Natural Mineral Supplementation. **Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A**, 77(1–3), 80–89. 2014. <https://doi.org/10.1080/15287394.2014.866923>

SINGH, H. et al. Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. **Biochar**, v. 4, n. 1, p. 1–17, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1>

SUN, Y. et al. Land-use changes alter soil bacterial composition and diversity in tropical forest soil in China. **Science of the Total Environment**, v. 712, p. 136526, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136526>

TEIXEIRA, P. C. et al. Manual de métodos de análise de solo. **EMBRAPA**, 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF, 2017.

TORIBIO, A. J. et al. Prospection of cyanobacteria producing bioactive substances and their application as potential phytostimulating agents, **Biotechnology Reports**, Volume 26, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00449>.

VÉLEZ-BERMÚDEZ, I. C.; SCHMIDT, W. Plant strategies to mine iron from alkaline substrates. **Plant and Soil**, v. 483, n. 1–2, p. 1–25, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05746-1>

VENEGAS, V. H. A. et al. Interpretation of soil analysis results. In: **Recommendations for the use of correctives and fertilizers in Minas Gerais**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999b. p. 25–32.

Xu, S. et al. MicrobiotaProcess: A comprehensive R package for deep mining microbiome. **The Innovation**, 2023. [Doi: 10.1016/j.xinn.2023.100388](https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100388)