

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**INFLUÊNCIA DO BIOCARVÃO DE RESÍDUOS DO
CUPUAÇUZEIRO ASSOCIADO À ADUBAÇÃO ORGÂNICA E
MINERAL NO DESENVOLVIMENTO DO JAMBU NA REGIÃO
AMAZÔNICA**

Bruno Kleidson da Silva Maia

Engenheiro Agrônomo

2025

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**INFLUÊNCIA DO BIOCARVÃO DE RESÍDUOS DO
CUPUAÇUZEIRO ASSOCIADO À ADUBAÇÃO ORGÂNICA E
MINERAL NO DESENVOLVIMENTO DO JAMBU NA REGIÃO
AMAZÔNICA**

Bruno Kleidson da Silva Maia

Orientador: Prof. Dr. Wanderley José de Melo

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

M217i

Maia, Bruno Kleidson da Silva

Influência do biocarvão de resíduos do cupuaçuzeiro associado à adubação orgânica e mineral no desenvolvimento do jambu na região amazônica / Bruno Kleidson da Silva Maia. -- Jaboticabal, 2025

51 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Wanderley José de Melo

1. Biocarvão. 2. Adubação. 3. Resíduos orgânicos. 4. Desenvolvimento vegetal. 5. Acmella oleracea. I. Título.

Impacto potencial dessa pesquisa

A pesquisa estimula a economia circular na Amazônia ao valorizar resíduos do cupuaçuzeiro como insumo agrícola, promovendo práticas sustentáveis que aumentam a produtividade do jambu e fortalecem a agroecologia e a fertilização integrada na região.

Potential impact of this research

The research promotes circular economy in the Amazon by valuing cupuaçu residues as agricultural inputs, encouraging sustainable practices that increase jambu productivity and strengthen agroecology and integrated fertilization in the region.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: INFLUÊNCIA DO BIOCARVÃO DE RESÍDUOS DO CUPUAÇUZEIRO ASSOCIADO À ADUBAÇÃO ORGÂNICA E MINERAL NO DESENVOLVIMENTO DO JAMBU NA REGIÃO AMAZÔNICA

AUTOR: BRUNO KLEIDSON DA SILVA MAIA

ORIENTADOR: WANDERLEY JOSÉ DE MELO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:



Documento assinado digitalmente
WANDERLEY JOSE DE MELO
Data: 23/04/2025 18:03:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. WANDERLEY JOSÉ DE MELO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal



Prof. Dr. SÉRGIO ANTONIO LOPES DE GUSMÃO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Agrárias / UFRA - Belém/PA



Documento assinado digitalmente
THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA
Data: 17/04/2025 19:24:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Ciencia do Solo / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 08 de março de 2025

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

BRUNO KLEIDSON DA SILVA MAIA, natural de Belém, Pará, Brasil, nascido em 11 de julho de 1993, é filho de Sérgio Maia e Katiane Maia. Possui graduação em Engenharia Agrônômica (2019) pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA). Durante a graduação, foi bolsista da Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS-PA), atuando em atividades relacionadas à gestão de bacias hidrográficas e ao monitoramento de focos de calor na Amazônia. É integrante do Grupo de Pesquisa e Extensão em Manejo e Fertilidade do Solo (GPEMFS), coordenado pelo Prof. Dr. Jessivaldo Rodrigues Galvão, desenvolvendo pesquisas sobre culturas amazônicas e participando de projetos de extensão voltados ao reaproveitamento de resíduos orgânicos. Em agosto de 2023, ingressou no mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), Câmpus de Jaboticabal, sob a orientação do Prof. Dr. Wanderley José de Melo. Durante o mestrado, desenvolveu pesquisas sobre o uso de resíduos orgânicos e qualidade do solo em cultivos na Amazônia. Possui publicações científicas em periódicos nacionais e internacionais de alto impacto.

“Antes mesmo de o meu corpo tomar forma humana, o Senhor já havia planejado todos os dias da minha vida; cada um deles estava registrado no seu livro, antes de qualquer um deles existir.”

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Sérgio Maia e Katiane Maia, à minha irmã, Brenda Maia, e às minhas sobrinhas, Ana Cecília, Ana Lia e Ana Liz, dedico esta conquista com todo o meu amor e gratidão. Vocês são minha base, minha inspiração e minha força para seguir em frente. Cada passo que dou é impulsionado pelo amor e pelo apoio incondicional que recebo de vocês.

Com o coração cheio de saudade, dedico também, *in memoriam*, aos meus avôs Geraldo Silva e a Carlos Maia, que sempre acreditaram em mim e se orgulhavam do meu caminho. Mesmo não estando fisicamente presentes, carrego suas lembranças, ensinamentos e amor comigo, guiando-me em cada nova jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me sustentou em cada desafio, fortaleceu minha caminhada e jamais permitiu que eu desistisse. Nada disso seria possível sem Sua mão poderosa me guiando. Toda honra e toda glória sejam dadas a Ele.

À minha família, minha base e maior motivação. Agradeço imensamente à minha mãe, Katiane, e ao meu pai, Sérgio, por todo apoio incondicional, pelas renúncias feitas para que eu chegasse até aqui e pelo acolhimento nos momentos mais difíceis. Um agradecimento especial à minha irmã, Brenda, e às minhas sobrinhas, Ana Cecília, Ana Lia e Ana Lis, que enchem meus dias de alegria e são meu refúgio para recarregar as energias. São os amores da minha vida, e tudo o que faço é, de alguma forma, por elas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Wanderley José de Melo, minha eterna gratidão. Um profissional exemplar e uma grande inspiração. Obrigado por todos os ensinamentos, pela orientação dedicada e pelo apoio constante ao longo desta jornada.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP), especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pelo acolhimento e pela oportunidade de crescimento acadêmico e profissional. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pelo apoio financeiro essencial à realização desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Jessivaldo Galvão, minha profunda gratidão. Sua orientação, paciência e sabedoria foram fundamentais nesta trajetória, sendo uma grande inspiração para mim.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Manejo e Fertilidade do Solo (GPEMFS), por todo apoio e parceria, e aos amigos que estiveram ao meu lado durante essa jornada, minha eterna gratidão. Em especial, agradeço a Maria Luiza, Thalitha Batista e Matheus Vinicius, cujo incentivo e companhia tornaram tudo mais leve.

À minha grande amiga Marie Ohashi, sou profundamente grato. Desde o início do experimento, você esteve ao meu lado, auxiliando, incentivando e tornando cada desafio mais leve. Você é uma amiga incrível! Sua presença fez toda a diferença nessa caminhada.

Aos amigos da vida, Mateus Augusto, Thiago Costa e Mauro Borges, que fazem parte da minha história acadêmica e profissional, meu sincero agradecimento. Obrigado por nunca soltarem minha mão e por todo apoio ao longo dos anos. Vocês são pessoas incríveis.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	04
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	06
2.1 Práticas agrícolas sustentáveis	07
2.2 Economia circular e a utilização de resíduos agroindustriais.....	07
2.3 Biocarvão: produção, propriedades e benefícios para a agricultura	07
2.4 Resíduos de cupuaçuzeiro na produção de biocarvão	08
2.5 O cultivo de jambu na Amazônia	09
2.6 Adubação orgânica e mineral: interação com o biocarvão.....	10
2.7 Perspectivas futuras e desafios	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1 Descrição do local e caracterização do solo	13
3.2 Produção dos biocarvões	14
3.3 Implantação e condução dos experimentos	16
3.3.1 Experimento 1.....	16
3.3.2 Experimento 2.....	18
3.4 Análise estatística	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4.1 Composição química dos biocarvões	20
4.2 Análises biométricas (experimento 1)	22
4.3 Obtenção da dose ótima de biocarvão	24
4.4 Análises biométricas (experimento 2)	27
4.5 Análises nutricionais	32
4.5.1 Acúmulos de macronutrientes.....	32
5. CONCLUSÃO	35
REFERÊNCIAS	36

INFLUÊNCIA DO BIOCARVÃO DE RESÍDUOS DO CUPUAÇUZEIRO ASSOCIADO À ADUBAÇÃO ORGÂNICA E MINERAL NO DESENVOLVIMENTO DO JAMBU NA REGIÃO AMAZÔNICA

RESUMO - A crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis tem impulsionado a busca por soluções que melhorem a fertilidade do solo e promovam o reaproveitamento de resíduos agroindustriais, alinhando-se aos princípios da economia circular. A conversão de resíduos do cupuaçuzeiro em biocarvão possibilita a valorização de subprodutos, reduzindo impactos ambientais e promovendo a sustentabilidade na agricultura amazônica. Objetivou-se, com este estudo, avaliar a influência do biocarvão produzido a partir de resíduos do cupuaçuzeiro, associados à adubação orgânica e mineral, no desenvolvimento do jambu. Dois experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, visando avaliar *i*) doses de biocarvão (0, 15, 60, 105 e 150 g kg⁻¹) e *ii*) o efeito da combinação da dose considerada ideal (75 g kg⁻¹) com adubação mineral e orgânica (cama de aviário - CA e esterco bovino - EB) no desempenho da cultura. Foram analisadas variáveis biométricas, como altura da planta, massa verde e massa seca das folhas, massa fresca e massa seca da raiz, número de folhas e acúmulo de nutrientes nas folhas. A altura da planta foi influenciada pelo tipo e pelas doses de biocarvão, com os maiores valores observados nas doses 1 e 2 do BP, que proporcionaram incrementos de até 10,7% em relação ao tratamento controle. O número de folhas seguiu a mesma tendência, com os melhores resultados encontrados com aplicação de nas doses 2 e 3 do BP, que promoveram aumentos de até 5,5%. A massa fresca da parte aérea teve efeito significativo nas doses intermediárias, destacando-se a dose 2 do BC, com 67,50 g/planta, representando um incremento de 29,8%. As análises de regressão indicaram respostas quadráticas para todas as variáveis, com as maiores doses de biocarvão variando entre 2,5% e 3,3%, dependendo da variável avaliada. No segundo experimento, os tratamentos com CA e EB apresentaram os melhores desempenhos, com destaque para a CA, que promoveu os maiores valores de altura de planta (24 cm) e acúmulo de N (162,28 mg por planta). A ordem de acúmulo de macronutrientes foi N > K > Ca > Mg > S > P, sendo a CA o tratamento que resultou nos maiores acúmulos de N, K e Ca. Os resultados evidenciam que o biocarvão associado à adubação mineral é uma alternativa promissora para o cultivo do jambu, especialmente em doses intermediárias. No entanto, sua associação com fertilizantes orgânicos não demonstrou a mesma eficiência, destacando a necessidade de um manejo equilibrado para maximizar seus benefícios. A valorização de resíduos agroindustriais, como as cupuaçuzeiro, na produção de biocarvão representa uma alternativa sustentável, promovendo o reaproveitamento de materiais na agricultura e reduzindo impactos ambientais.

Palavras-chave: Economia circular; Uso eficiente de resíduos; *Acmella oleracea*; *Theobroma grandiflorum*;

INFLUENCE OF BIOCHAR FROM CUPUAÇU TREE WASTE COMBINED WITH ORGANIC AND MINERAL FERTILIZATION ON THE DEVELOPMENT OF JAMBU IN THE AMAZON REGION

ABSTRACT – The growing demand for sustainable agricultural practices has driven the search for solutions that enhance soil fertility and promote the reuse of agro-industrial waste, in alignment with the principles of the circular economy. The conversion of cupuaçu tree residues into biochar enables the valorization of by-products, reducing environmental impacts and promoting sustainability in Amazonian agriculture. This study aimed to evaluate the influence of biochar produced from cupuaçu residues, combined with organic and mineral fertilization, on the development of jambu (*Acmella oleracea*). Two greenhouse experiments were conducted to assess: (i) different biochar doses (0, 15, 60, 105, and 150 g kg⁻¹), and (ii) the effect of combining the optimal dose (75 g kg⁻¹) with mineral fertilization and organic amendments (poultry litter – PL, and cattle manure – CM) on crop performance. Biometric variables were analyzed, including plant height, fresh and dry leaf mass, fresh and dry root mass, number of leaves, and nutrient accumulation in leaves. Plant height was influenced by both the type and dose of biochar, with the highest values observed at doses 1 and 2, which resulted in increases of up to 10.7% compared to the control treatment. The number of leaves followed a similar trend, with the best results at doses 2 and 3, showing increases of up to 5.5%. Shoot fresh mass showed significant improvement at intermediate doses, with dose 2 yielding 67.50 g per plant—an increase of 29.8%. Regression analysis revealed quadratic responses for all variables, with optimal biochar doses ranging from 2.5% to 3.3%, depending on the parameter evaluated. In the second experiment, treatments with PL and CM showed the best performance, especially PL, which promoted the highest plant height (24 cm) and nitrogen accumulation (162.28 mg per plant). The order of macronutrient accumulation was N > K > Ca > Mg > S > P, with PL treatment resulting in the highest accumulations of N, K, and Ca. The results demonstrate that biochar combined with mineral fertilization is a promising alternative for jambu cultivation, particularly at intermediate doses. However, its combination with organic fertilizers did not show the same effectiveness, highlighting the need for balanced management to maximize its benefits. The valorization of agro-industrial residues, such as those from the cupuaçu tree, for biochar production represents a sustainable alternative, promoting material reuse in agriculture and reducing environmental impacts.

Keywords: Circular economy, Efficient use of waste, *Acmella oleracea*, Sustainable management.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis tem impulsionado a busca por soluções que promovam a melhoria da fertilidade do solo e a valorização de resíduos agroindustriais dentro dos princípios da economia circular (Barbosa et al., 2019; Gupta et al., 2021). Nesse contexto, o biocarvão (biochar), um material carbonáceo obtido a partir da pirólise de resíduos orgânicos, tem se destacado como uma alternativa inovadora devido à sua capacidade de melhorar as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, além de promover o crescimento das plantas e a ciclagem de nutrientes (Lehmann et al., 2015; Azevedo et al., 2021).

A conversão de resíduos agroindustriais em biocarvão possibilita o reaproveitamento de subprodutos que, de outra forma, seriam descartados inadequadamente, contribuindo para a poluição ambiental (Cheng et al., 2021). Na região Amazônica, um dos principais resíduos gerados é proveniente da cadeia produtiva do cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), cuja casca representa cerca de 40% do peso total do fruto. Além disso, resíduos de podas fitossanitárias frequentemente são eliminados por queima, agravando impactos ambientais (Ribeiro et al., 2019; Mendonça et al., 2021). O uso desses materiais na produção de biocarvão apresenta uma alternativa viável e sustentável, contribuindo para a retenção de umidade no solo, o aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) e a adsorção de nutrientes, fatores essenciais para a melhoria da fertilidade do solo (Oliveira et al., 2020; Araújo et al., 2021).

A adoção do biocarvão, associada à adubação orgânica e mineral, tem demonstrado efeitos positivos no crescimento de culturas tropicais, como o jambu (*Acmella oleracea*), tradicionalmente cultivado na Amazônia e de grande importância econômica e cultural. Estudos indicam que a aplicação do biocarvão pode aumentar o pH do solo, a CTC, o teor de carbono orgânico e a disponibilidade de nutrientes, além de influenciar positivamente a atividade microbológica e a estrutura do solo (Lehmann et al., 2011). Do mesmo modo, pesquisas demonstram que a adubação orgânica melhora o desempenho agrônomo e a produtividade do jambu (Silva et al., 2013).

Dessa forma, a utilização do biocarvão derivado dos resíduos do cupuaçuzeiro, em conjunto com práticas de adubação orgânica e mineral, apresenta-se como uma estratégia promissora para a sustentabilidade agrícola na região Amazônica. Espera-se que essa abordagem não apenas melhore a fertilidade do solo e o desenvolvimento do jambu, mas também contribua para a redução do descarte inadequado de resíduos agroindustriais e a mitigação dos impactos ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa, alinhando-se aos princípios da economia circular e da agricultura sustentável (Ramos et al., 2021; Marinho et al., 2023).

Além disso, a adoção desse modelo integrado contribuirá para a economia circular, ao reutilizar resíduos agroindustriais e reduzir impactos ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa e o descarte inadequado de subprodutos da cadeia produtiva do cupuaçuzeiro. Dessa forma, este estudo busca demonstrar a viabilidade do uso do biocarvão como uma estratégia sustentável para o cultivo agrícola na região Amazônica, promovendo ganhos produtivos e ambientais.

Com base no exposto, parte-se da hipótese de que a aplicação de biocarvão derivado dos resíduos do cupuaçuzeiro, em associação com fertilizantes orgânicos e minerais, promove melhorias significativas na fertilidade do solo, refletindo-se em maior retenção de umidade, aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) e disponibilidade de nutrientes essenciais. Como consequência, espera-se que tais benefícios resultem em um crescimento mais vigoroso do jambu, com incremento na biomassa e maior eficiência na absorção de nutrientes.

Desse modo, objetivou-se avaliar a influência do biocarvão produzido a partir dos resíduos do cupuaçuzeiro, aliado à adubação orgânica e mineral, no desenvolvimento e na eficiência do uso de nutrientes pelo jambu (*Acmella oleracea*), utilizado como planta indicadora, seguindo os princípios da economia circular e das práticas agrícolas sustentáveis.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Práticas agrícolas sustentáveis

A agricultura sustentável busca a produção eficiente de alimentos, minimizando impactos ambientais e garantindo a preservação dos recursos naturais, da biodiversidade e da saúde dos ecossistemas. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2017), essa abordagem visa atender às necessidades alimentares atuais sem comprometer a capacidade das futuras gerações de suprirem suas próprias demandas. Para isso, são adotadas práticas como rotação de culturas, redução do uso de fertilizantes sintéticos e aplicação de tecnologias inovadoras, como o biocarvão (Gliessman, 2007). Além disso, a sustentabilidade agrícola envolve o manejo responsável dos recursos naturais, promovendo um equilíbrio entre a produção de alimentos e a conservação ambiental. Altieri (1999) destaca a importância da integração de práticas agroecológicas como estratégia para uma agricultura mais sustentável.

A agricultura moderna enfrenta desafios significativos, incluindo degradação do solo, perda de biodiversidade e impactos das mudanças climáticas. A intensificação agrícola tem pressionado os recursos naturais, causando erosão, redução da matéria orgânica e degradação da estrutura do solo (Vitousek et al., 2013). O avanço da monocultura e o uso excessivo de insumos químicos contribuem para a perda da biodiversidade e comprometem a regeneração do solo (Matson et al., 1997; Tschamntke et al., 2005). Nesse contexto, torna-se essencial adotar práticas sustentáveis que garantam a produtividade a longo prazo, sem comprometer a qualidade dos ecossistemas (Pretty, 2008).

Pesquisas recentes indicam que a intensificação agrícola afeta não apenas os aspectos físicos e químicos do solo, mas também sua biodiversidade microbiana, essencial para a sustentabilidade da produção agrícola (Lehmann e Joseph, 2015). Assim, práticas que promovam a recuperação e a conservação do solo são fundamentais para garantir a resiliência dos sistemas produtivos.

2.2 Economia circular e a utilização de resíduos agroindustriais

A economia circular é um modelo econômico que visa maximizar a utilização de recursos, minimizar desperdícios e fomentar o reaproveitamento de materiais, promovendo sustentabilidade ambiental e econômica (Ellen MacArthur Foundation, 2015). No setor agrícola, essa abordagem pode ser aplicada por meio da valorização de resíduos agroindustriais, como cascas de frutas e restos de poda, que frequentemente são descartados inadequadamente ou incinerados, gerando impactos ambientais adversos (Geng et al., 2013).

A reutilização de resíduos para a produção de biocarvão é um exemplo concreto da aplicação da economia circular. A conversão desses materiais em biocarvão contribui para a redução do volume de descarte, mitigação da emissão de gases de efeito estufa e aprimoramento da qualidade do solo, favorecendo a produtividade agrícola (Berg et al. 2022). O biocarvão é reconhecido por sua capacidade de sequestrar carbono, reduzindo a liberação de CO₂ na atmosfera e melhorando a fertilidade do solo (Lehmann et al., 2011). Além dos benefícios ambientais, a valorização de resíduos na forma de biocarvão pode gerar novas oportunidades econômicas para produtores locais (Hossain et al., 2020).

Outra aplicação da economia circular na agricultura envolve a produção de energia renovável a partir de resíduos agroindustriais, como biogás e biomassa. Zhang et al. (2016) destacam que essa abordagem reduz a dependência de combustíveis fósseis e contribui para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, a integração dessas práticas no setor agrícola pode fortalecer a segurança alimentar, ao otimizar o uso dos recursos naturais e reduzir desperdícios (FAO, 2017). No entanto, para ampliar a adoção da economia circular, são necessários investimentos em pesquisa, desenvolvimento de políticas públicas adequadas e conscientização dos produtores rurais sobre seus benefícios (Kirchherr et al., 2017).

2.3 Biocarvão: produção, propriedades e benefícios para a agricultura

O biocarvão é um material carbonáceo obtido pela pirólise de biomassa orgânica, um processo termoquímico que ocorre em temperaturas entre 300 e 700°C, na ausência

de oxigênio. Esse processo confere ao biocarvão alta estabilidade química e estrutura porosa, tornando-o um insumo valioso para aplicações agrícolas (Lehmann e Joseph, 2015).

Estudos indicam que a aplicação de biocarvão ao solo promove benefícios como maior retenção de água, aumento da capacidade de troca catiônica, adsorção de nutrientes e redução das emissões de gases de efeito estufa (Jeffery et al., 2011). Além disso, atua como condicionador do solo, melhorando sua estrutura física e criando um ambiente mais propício para o desenvolvimento vegetal (Laird et al., 2010). Outro benefício relevante é a estimulação da biodiversidade microbiana. O biocarvão favorece a formação de habitats estáveis para microrganismos benéficos, impulsionando a atividade biológica e a ciclagem de nutrientes, fatores essenciais para a manutenção da fertilidade do solo a longo prazo (Atkinson et al., 2010; Lehmann et al., 2011).

Além de seus benefícios agronômicos, o biocarvão se destaca como ferramenta para mitigação das mudanças climáticas, devido à sua capacidade de sequestrar carbono por longos períodos, reduzindo a concentração atmosférica de CO₂ (Woolf et al., 2010). Estudos sugerem que o biocarvão pode armazenar carbono no solo por centenas a milhares de anos, dependendo do tipo de biomassa e das condições ambientais.

Embora apresente um potencial significativo para a melhoria da qualidade do solo e o aumento da produtividade agrícola, seus efeitos variam conforme as características edafoclimáticas, o tipo de biomassa utilizada e as condições de produção. Assim, mais pesquisas são necessárias para otimizar sua aplicação em diferentes contextos agrícolas (Kambo e Dutta, 2015).

2.4 Resíduos de cupuaçuzeiro na produção de biocarvão

O cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum*), amplamente cultivado na Amazônia, gera grandes volumes de resíduos, como cascas e restos de poda, que frequentemente são descartados inadequadamente, causando impactos ambientais. Estudos indicam que a valorização desses resíduos pode reduzir a degradação ambiental e promover a sustentabilidade agrícola na região (Santos et al., 2021).

A casca do cupuaçu, composta majoritariamente por lignocelulose, apresenta elevado potencial para produção de biocarvão, devido à sua composição química favorável à conversão eficiente em carbono estável. Lehmann et al. (2011) destacam que resíduos lignocelulósicos são altamente promissores para a obtenção de biocarvão de qualidade, contribuindo para a melhoria das propriedades do solo e o sequestro de carbono.

A transformação desses resíduos em biocarvão representa uma oportunidade para integrar práticas de economia circular na Amazônia. Estudos apontam que o biocarvão derivado de resíduos do cupuaçu apresenta alta porosidade e estabilidade térmica, tornando-se eficiente na correção da acidez do solo e no estímulo ao crescimento vegetal (Martins et al., 2018). Além disso, a produção de biocarvão a partir de resíduos agroindustriais pode gerar benefícios econômicos para comunidades locais, impulsionando novas cadeias produtivas e promovendo sustentabilidade (Gomes et al., 2019).

2.5 O cultivo de jambu na Amazônia

O jambu (*Acmella oleracea*) é uma planta de grande importância cultural e econômica na região amazônica, amplamente utilizada na culinária local e em práticas medicinais tradicionais. Sua principal característica sensorial é a sensação de formigamento na boca, atribuída à presença de espilantol, um composto bioativo com propriedades anestésicas e anti-inflamatórias (Barbosa et al., 2016).

O cultivo do jambu ocorre, predominantemente, em solos ricos em matéria orgânica. No entanto, sua produção enfrenta desafios relacionados à acidez do solo e à disponibilidade limitada de nutrientes (Souza et al., 2018). A acidez excessiva pode comprometer a absorção de elementos essenciais, como P, Ca e Mn, reduzindo o crescimento e a produtividade da planta (Melo et al., 2017). Para mitigar esses efeitos, práticas como calagem e aplicação de biocarvão têm sido estudadas como alternativas viáveis, promovendo o aumento do pH do solo e a melhoria da disponibilidade de nutrientes (Lehmann et al., 2011).

Além da adubação mineral, a adubação orgânica tem demonstrado resultados promissores na melhoria da produtividade do jambu, contribuindo para o enriquecimento do

solo e favorecendo a absorção de nutrientes de maneira mais equilibrada (Silva et al., 2019). A utilização de resíduos agroindustriais como insumo orgânico não apenas melhora a fertilidade do solo, mas também fortalece a sustentabilidade do cultivo.

O jambu também desperta interesse da indústria farmacêutica e cosmética, devido às suas propriedades medicinais, incluindo efeitos anti-inflamatórios, analgésicos e antimicrobianos (Pereira et al., 2015). Esse potencial agrega valor comercial à cultura, ampliando suas oportunidades de mercado. No entanto, a expansão da produção enfrenta desafios, como a falta de estudos sobre manejo agrônomo otimizado e a ausência de políticas públicas que incentivem seu cultivo sustentável (Ribeiro et al., 2021).

2.6 Adubação orgânica e mineral: interação com o biocarvão

A adubação orgânica desempenha um papel essencial na melhoria da fertilidade do solo, promovendo incremento na matéria orgânica, aumento da retenção de umidade e favorecimento da microbiota edáfica (Silva et al., 2013). Essa prática reduz a dependência de fertilizantes minerais, diminuindo custos e impactos ambientais, ao mesmo tempo em que contribui para a ciclagem eficiente de nutrientes (Ferreira et al., 2017).

A combinação do biocarvão com adubação orgânica e mineral tem demonstrado efeitos sinérgicos na melhoria da produtividade agrícola. Como material carbonáceo, o biocarvão melhora a eficiência dos fertilizantes, reduzindo perdas de nutrientes por lixiviação e volatilização e favorecendo sua absorção pelas plantas (Lehmann et al., 2011). Essa interação aumenta a biomassa vegetal e melhora os índices de crescimento, especialmente em solos tropicais de baixa fertilidade natural (Ramos et al., 2021).

A aplicação de biocarvão tem sido associada a melhorias na retenção hídrica do solo, aspecto fundamental em regiões onde o déficit hídrico é um fator limitante para a produção agrícola (Carvalho et al., 2021). A retenção de água, combinada à maior disponibilidade de nutrientes, favorece o crescimento do jambu, tornando o cultivo mais produtivo e sustentável.

Do ponto de vista ambiental, a redução da necessidade de fertilizantes minerais contribui para a mitigação dos impactos negativos do uso excessivo de insumos químicos, promovendo a conservação dos recursos naturais e reduzindo os custos para os produtores (Freitas et al., 2019).

2.7 Perspectivas futuras e desafios

Apesar do grande potencial do biocarvão para a agricultura sustentável, sua implementação em larga escala ainda enfrenta desafios logísticos e econômicos. Um dos principais entraves é o custo inicial da tecnologia de pirólise, que exige investimentos para produção e distribuição do biocarvão, especialmente em regiões remotas como a Amazônia (Carvalho et al., 2019). Além disso, há falta de conhecimento técnico sobre a aplicação do biocarvão entre os agricultores, o que dificulta sua adoção em larga escala (Lehmann & Joseph, 2015).

Estudos recentes apontam que o uso do biocarvão pode reduzir emissões de gases de efeito estufa em até 12% em sistemas agrícolas tropicais, além de aumentar a eficiência na utilização de nutrientes (Lehmann et al., 2006). Dessa forma, investimentos em pesquisa e capacitação de agricultores são fundamentais para ampliar sua aplicação e superar barreiras técnicas e econômicas.

A integração do biocarvão com adubação orgânica e mineral tem potencial para transformar a agricultura amazônica, tornando-a mais sustentável e eficiente. A conversão de resíduos agroindustriais, como cascas de cupuaçu, em biocarvão oferece uma solução viável para o manejo de resíduos, promovendo benefícios econômicos, ambientais e sociais (Oliveira et al., 2017).

A adoção de políticas públicas que incentivem o uso de biocarvão, aliada à implementação de programas de extensão rural e treinamentos para agricultores, pode ser decisiva para ampliar o uso dessa tecnologia. Além disso, sua integração em sistemas produtivos pode reduzir custos, minimizar impactos ambientais e criar novos mercados para produtos derivados de resíduos agroindustriais (Cerri et al., 2007).

Dessa forma, o uso do biocarvão na agricultura amazônica representa uma estratégia promissora para a sustentabilidade dos sistemas produtivos, contribuindo para a conservação dos solos, a mitigação das mudanças climáticas e a valorização da economia circular na região.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição do local e caracterização do solo

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, localizada a 48°23' de longitude oeste de Greenwich e 1°31' de latitude sul, com altitude de 16 metros acima do nível do mar (Figura 1).

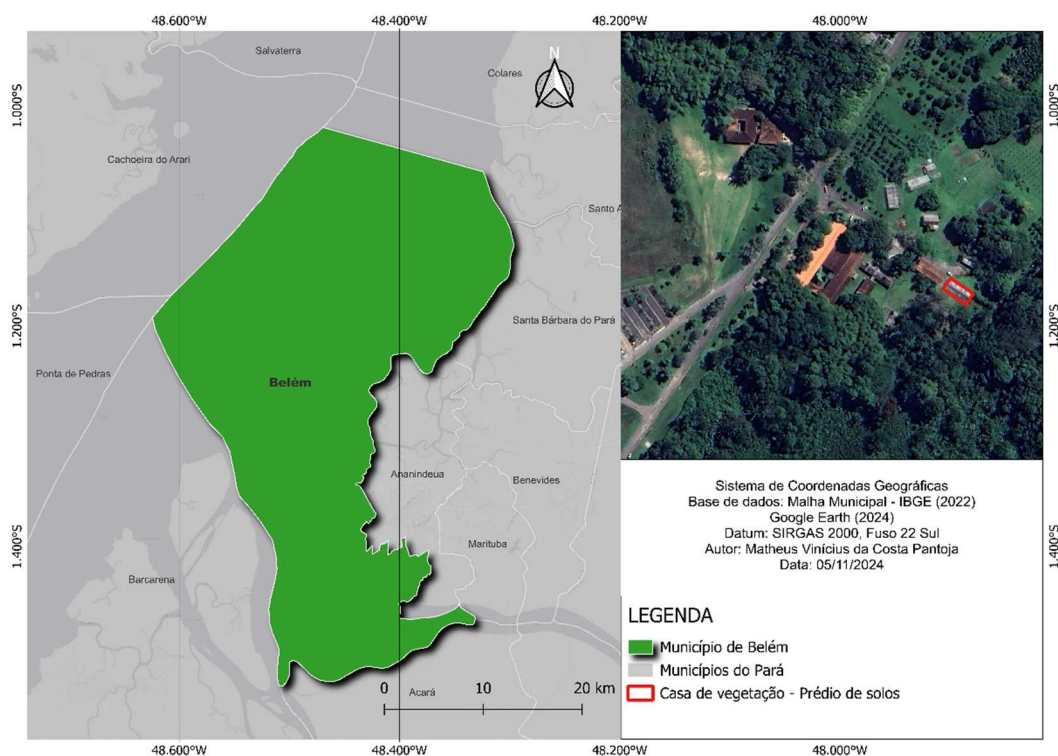


Figura 1. Mapa de localização da área experimental.

O solo utilizado nos experimentos foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico, textura média (Santos et al., 2018). Amostras compostas de solo foram coletadas na profundidade de 0-20 cm, em área de vegetação nativa, para a avaliação da fertilidade inicial (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização química ⁽¹⁾ do solo utilizado no experimento.

Amostras	pH	C _{org}	MO	N	P	K	Ca	Mg	CTC	V
0-0,2 m	H ₂ O	----- g kg ⁻¹ -----			mg kg ⁻¹		-----cmol _c kg ⁻¹ -----			%
	4,2	24	41,4	0,1	1,5	0,4	5,2	2,8	9,6	40

⁽¹⁾Raij et al. (2001). pH – Acidez ativa. C_{org} – Carbono orgânico. MO – Matéria orgânica do solo. CTC – Capacidade de troca de cátion. V – Saturação por bases.

3.2 Produção dos biocarvões

Os biocarvões foram produzidos a partir de resíduos do fruto do cupuaçuzeiro e de podas fitossanitárias infectadas por *Moniliophthora perniciosa*, fungo causador da vassoura-de-bruxa. Os resíduos da casca de cupuaçu foram fornecidos por uma empresa produtora de polpa de frutas da região Amazônica. Após a coleta, os resíduos foram submetidos a um processo de secagem por três dias (a pleno sol), visando reduzir a umidade e otimizar a eficiência na pirólise do material. As podas fitossanitárias foram provenientes de um plantio de cupuaçuzeiro. Com o auxílio de um podão, foram removidos os galhos infectados, os quais foram armazenados em uma estufa para secagem prévia antes de serem submetidos ao processo de carbonização.

O processo de carbonização foi realizado utilizando um cilindro metálico, que serviu como reator. Inicialmente, foi inserido no reator o material de casca de cupuaçu para a carbonização. Em um segundo momento, foi realizada uma nova carbonização, utilizando o material das podas fitossanitárias. Esse cilindro metálico foi acoplado no interior de uma câmara de concreto (forno artesanal), devidamente fechada para o início do processo de carbonização (figura 2). Como fonte de energia, foram utilizados galhos e madeiras que serviram como biomassa para alimentar o forno.



Figura 2. Forno e cilindro metálico empregados no processo de carbonização dos resíduos

As temperaturas dos dois materiais, bem como da câmara, foram monitoradas continuamente durante 240 min (figura 3).

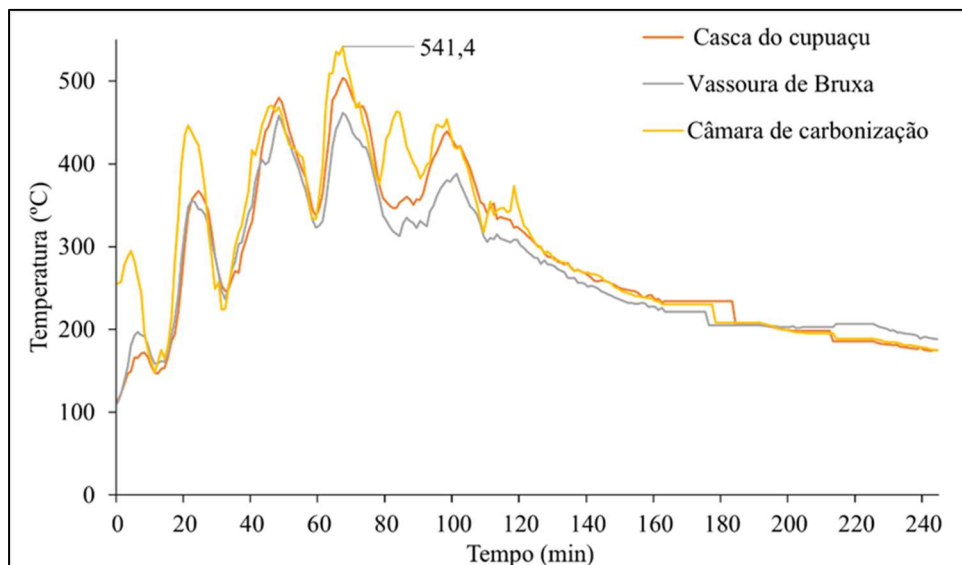


Figura 3. Temperaturas registradas durante a carbonização dos biocarvões de casca de cupuaçu e vassoura-de-bruxa.

A interação térmica entre os materiais no interior do container de ferro e o ambiente externo da câmara foi evidente, com o cilindro, funcionando como moderador térmico. Essa

configuração foi essencial para garantir que as condições de carbonização fossem controladas e monitoradas ao longo do tempo.

Após a finalização do processo de carbonização, o material foi deixado para resfriar por um período de 24 h. Em seguida, foi retirado do cilindro e triturado com auxílio de um triturador elétrico para obter uma granulometria fina, resultando em um pó homogêneo. Amostras de biocarvão provenientes da casca do cupuaçu e da vassoura de bruxa foram submetidas à análise química de acordo com as metodologias descritas no Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes (Embrapa, 2009). A determinação do C, N, H e S elementar foi realizada em Analisador Elementar, modelo 2400 Series II CHNS/O da marca PerkinElmer. A Cistina foi utilizada como padrão analítico para calibração do equipamento. A massa de cada amostra utilizada para a quantificação variou entre 1 e 2 mg. Os resultados foram expressos em porcentagem. Os teores de P foram determinados pelo método de espectrofotometria com amarelo-de-vanadato, onde as amostras foram submetidas a digestão ácida, em forno micro-ondas (ETHOS™ EASY, Milestone). Para o K, as amostras foram primeiramente submetidas a digestão ácida e a quantificação foi realizada em espectrofotômetro de absorção atômica de chama (Thermo, ICE3000) seguindo a metodologia de extração de elementos químicos de tecido vegetal (digestão úmida).

3.3 Implantação e condução dos experimentos

3.3.1 Experimento 1

Foram aplicadas doses de biocarvão associadas a 50% da adubação mineral recomendada, no cultivo do jambu, com o intuito de identificar a que promovesse o melhor desenvolvimento da cultura.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com 11 tratamentos e quatro repetições, resultando em 48 unidades experimentais. O fator A correspondeu a dois tipos de biocarvão (biocarvão proveniente da casca de cupuaçu e biocarvão proveniente das podas fitossanitárias), enquanto o fator B consistiu em cinco doses de biocarvão (0, 15, 60, 105 e 150 g kg⁻¹), aplicadas com base na relação ao volume

do vaso, preenchido com 3 kg de solo. Além disso, foram incluídos dois tratamentos adicionais, contendo 50% e 100% da adubação mineral recomendada (Brasil et al., 2020), ambas sem a adição de biocarvão.

Tabela 2 – Detalhamento dos tratamentos realizados no primeiro experimento

Tratamentos	Descrição
Dose 0	Sem biocarvão e sem adubação mineral convencional (AMC)
Dose 1 BC	15 g kg ⁻¹ de biocarvão (casca) + 50% AMC
Dose 2 BC	60 g kg ⁻¹ de biocarvão (casca) + 50% AMC
Dose 3 BC	105 g kg ⁻¹ de biocarvão (casca) + 50% AMC
Dose 4 BC	150 g kg ⁻¹ de biocarvão (casca) + 50% AMC
Dose 1 BP	15 g kg ⁻¹ de biocarvão (podas fitossanitárias) + 50% AMC
Dose 2 BP	60 g kg ⁻¹ de biocarvão (podas fitossanitárias) + 50% AMC
Dose 3 BP	105 g kg ⁻¹ de biocarvão (podas fitossanitárias) + 50% AMC
Dose 4 BP	150 g kg ⁻¹ de biocarvão (podas fitossanitárias) + 50% AMC
AD1	Sem biocarvão e com 50% AMC
AD2	Sem biocarvão e com 100% AMC

AMC: adubação mineral com N, P e K.

Antes da instalação do experimento, foi realizada a aplicação 7 g de calcário agrícola (PRNT 92%) para cada 3 kg de solo (equivalente a 4,8 t ha⁻¹) visando corrigir a acidez do solo e elevar a saturação por bases (V) para 70%. A adubação inorgânica foi realizada com base nas recomendações para a cultura do jambu, considerando os teores de nutrientes do solo antes da instalação do experimento. A adubação mineral foi realizada com a aplicação de ureia (0,3 g/por vaso), superfosfato simples (2,49 g/vaso) e cloreto de potássio (0,22 g/vaso), de acordo com as necessidades da cultura, correspondendo à dose de 100%. Para a adubação a 50%, foi utilizada metade dessas quantidades.

As sementes foram semeadas em bandejas plásticas preenchidas com substrato orgânico comercial, mantidas em ambiente protegido da radiação solar. A irrigação foi

realizada diariamente, em função da necessidade hídrica, até o momento do transplântio. Após 20 dias da sementeira, as plântulas com quatro folhas bem desenvolvidas foram transplantadas para vasos com 3 kg de solo, contendo uma planta por unidade experimental.

Após o transplântio, as plantas foram monitoradas por um período de 35 dias, até o surgimento das primeiras inflorescências. Ao final desse período, foi realizada a colheita. Avaliou-se a altura da planta, a massa fresca das folhas e o número de folhas. A altura da planta foi mensurada utilizando uma fita métrica, considerando a distância entre a base do caule e o ápice da planta. A massa fresca das folhas foi pesada em uma balança digital. Já o número de folhas foi obtido por meio de contagem manual direta, realizada nas plantas após o processo de colheita.

3.3.2 Experimento 2

Foi conduzido utilizando a dose considerada “ótima” de biocarvão obtida no experimento 1. Essa dose foi combinada com adubação orgânica (*i.e.*, cama aviária e o esterco bovino) indicada para a produção de mudas de jambu (Brasil et al., 2020).

Adotou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado com oito tratamentos e quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais (Tabela 3).

Tabela 3. Detalhamento dos tratamentos realizados no segundo experimento

Tratamentos	Descrição
EB	Esterco bovino
CA	Cama de aviário
BC	Biocarvão da casca do cupuaçu
BP	Biocarvão da poda
EB+BC	Esterco bovino + Biocarvão da casca do cupuaçu
EB+BP	Esterco bovino + Biocarvão das podas fitossanitárias
CA+BC	Cama de aviário + Biocarvão da casca do cupuaçu
CA+BP	Cama de aviário + Biocarvão das podas fitossanitárias

Para cada unidade experimental (vasos preenchidos com 3 kg de solo), foram aplicados 30 g de esterco bovino e 15 g de cama aviária, associadas a 75 g de biocarvão.

Estas doses foram estabelecidas com base na análise química de fertilidade do solo e seguindo as recomendações contidas no manual Recomendações de Calagem e Adubações para o Estado do Pará (Brasil et al., 2020) observada para a cultura do jambu que indica 20 t ha⁻¹ de esterco de curral e 10 t ha⁻¹ de esterco de aves.

As variáveis biométricas avaliadas foram altura da planta, massa verde e massa seca das folhas, massa fresca e massa seca da raiz e número de folhas. A altura da planta foi medida com fita métrica, considerando a distância entre a base do caule e o ápice da planta. A massa fresca e seca da raiz, assim como as massas verde e seca das folhas, foram determinadas por pesagem em balança digital. O número de folhas foi obtido por contagem manual direta. O acúmulo de nutrientes nas folhas foi calculado por meio da equação: acúmulo de nutrientes = teor do nutriente nas folhas (g kg⁻¹) × massa seca das folhas (kg).

3.3.3 Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) a 5% de probabilidade. As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste Tukey. As doses de biocarvão foram avaliadas por meio de análise de regressão. A comparação entre os tratamentos adicionais e as doses de biocarvão+AMC foi realizada por meio do teste de Dunnett.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Composição química dos biocarvões

Análise da composição química do biocarvão revela características relevantes que podem influenciar a fertilidade do solo e a disponibilidade de nutrientes para as plantas. A Tabela 4 apresenta os valores de pH, C, H, N, S, P e K de dois tipos de biocarvão: casca de cupuaçu e podas fitossanitárias.

Tabela 4. Caracterização dos resíduos⁽¹⁾ utilizados para a produção dos biocarvões.

Biocarvão	pH H ₂ O	C	H	N	S	P	K
			----- g kg ⁻¹ -----				
Casca (BC)	11,0	550	53,7	6,3	12,3	2,7	18,1
Poda (BP)	9,3	757,5	33,8	16	6,2	5,2	18,2

⁽¹⁾ Analisador elementar (CHNS).

O pH do BC (11,0) e do BP (9,3) indica um caráter alcalino significativo, o que pode afetar a disponibilidade de determinados nutrientes no solo. De acordo com Lehmann e Joseph (2015), biocarvões com pH elevado podem reduzir a acidez do solo, promovendo um ambiente mais favorável para algumas culturas, mas também podem diminuir a disponibilidade de micronutrientes, como Fe e Mn. Conforme estudo de Jeffery et al. (2017), solos tratados com biocarvão de pH elevado apresentam melhor retenção de umidade e maior capacidade de troca catiônica, fatores essenciais para a produtividade agrícola.

Os teores de C são elevados, especialmente no BP (757,5 g kg⁻¹), sugerindo um elevado potencial para a melhoria das propriedades físicas do solo, como retenção de umidade e aumento da capacidade de troca catiônica (Glaser et al., 2002). Esse alto teor de C pode contribuir para a estabilidade do biocarvão no solo e promover benefícios a longo prazo na melhoria da fertilidade. Segundo Woolf et al. (2010), a estabilidade do carbono no biocarvão pode reduzir a emissão de CO₂, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

A relação carbono/nitrogênio (C/N) nos biocarvões analisados é um fator determinante para sua interação com o solo. A relação C/N no BC é de aproximadamente 87, enquanto no biocarvão de BP é de 47. Segundo Sohi et al. (2010), biocarvões com altas relações C/N tendem a atuar como estabilizadores do solo, aumentando a retenção de carbono a longo prazo, mas podem limitar a disponibilidade imediata de nitrogênio para as

plantas. Esse fenômeno ocorre porque a mineralização do N pode ser lenta, exigindo suplementação com fertilizantes nitrogenados para evitar deficiências nutricionais.

Em relação ao N, os valores observados ($6,3 \text{ g kg}^{-1}$ para BC e 16 g kg^{-1} para BP) indicam um fornecimento limitado desse nutriente. Conforme descrito por Kammann et al. (2015), o biocarvão pode atuar como uma matriz adsorvente de N, reduzindo perdas por lixiviação, mas sua capacidade de fornecer esse nutriente diretamente às plantas pode ser baixa, exigindo suplementação com fertilizantes nitrogenados. Nguyen et al. (2022) destacam que a adição de biocarvão enriquecido com N pode aumentar a eficiência da adubação nitrogenada e melhorar a produtividade das culturas agrícolas.

Os teores de S foram de $12,3 \text{ g/kg}$ para o BC e $6,2 \text{ g/kg}$ para o BP. O S é essencial para a biossíntese de aminoácidos e proteínas, mas sua disponibilidade depende da mineralização no solo (Novak et al., 2009). A variação nos teores entre as amostras pode estar associada à matéria-prima utilizada na produção do biocarvão. Estudos recentes, como o de Zhang et al. (2021), demonstram que a aplicação de biocarvão pode melhorar a disponibilidade de enxofre quando combinada com fertilizantes orgânicos.

O P apresentou teores de $2,72 \text{ g/kg}$ BC e $5,27 \text{ g/kg}$ no BP. Embora o P seja um macronutriente essencial, sua disponibilidade no solo pode ser limitada devido à fixação em compostos insolúveis (Laird et al., 2010). O uso de biocarvão pode influenciar a dinâmica do P, melhorando sua retenção e evitando perdas por erosão. Conforme apontado por Biederman e Harpole (2013), solos tratados com biocarvão apresentaram maior eficiência na ciclagem do P, promovendo um melhor aproveitamento desse nutriente pelas plantas.

Os teores de K foram relativamente altos ($18,12 \text{ g/kg}$ no BC e $18,24 \text{ g/kg}$ no BP). O K é um nutriente essencial para a regulação osmótica e ativação de enzimas nas plantas. Estudos como o de Xu et al. (2013) sugerem que o biocarvão pode atuar como fonte secundária desse nutriente, liberando-o gradualmente no solo e beneficiando o crescimento das plantas. De acordo com Joseph et al. (2018), a aplicação de biocarvão melhora a disponibilidade de K, especialmente em solos de baixa fertilidade, contribuindo para o aumento da produtividade agrícola.

4.2 Análises biométricas (experimento 1)

Foram observados efeitos significativos em todas as variáveis estudadas, isoladamente ou em suas interações, com exceção à altura das plantas que não apresentou efeitos para o biocarvão isoladamente (Tabela 5).

Tabela 5. Resumo da análise variância para as variáveis altura de plantas (ALT), número de folhas (NF), ramificações (RMF) e massa fresca (MV) do jambu em reposta aos tratamentos

Tratamentos	GL	ALT	NF	MF
Biocarvão	1	ns	**	**
Doses	4	**	**	**
Bio x Doses	4	**	**	**
Testemunha	1	**	**	**
Test x Bio	1	**	**	**
CV (%)	-	2,73	1,74	5,25

CV = coeficiente de variação; ns = não significativo; ** = significativo a 1% de probabilidade

Para as variáveis biométricas, os resultados evidenciaram diferenças entre os tratamentos para a maioria das variáveis analisadas, com os efeitos variando de acordo com o tipo de biocarvão e a dose aplicada (Tabela 6).

Tabela 6. Interação entre doses e tipos de biocarvão na altura da planta, número de folhas e massa fresca das folhas ou parte aérea da cultura do jambu.

Altura da planta (cm)							
Biocarvão	Dose 0	Dose 1	Dose 2	Dose 3	Dose 4	AD1	AD2
Casca (BC) Poda (BP)	23,5**	32,5b 34,5a*	32,6b 35,2a*	31,8a" 30,2b"	32,7a 30,0b**	31,8	34,2
Número de folhas							
Casca (BC) Poda (BP)	82**	150b" 154a"	145b** 160a**	127b** 157a**	115b** 121a**	151,7	169,2
Massa fresca das folhas (g)							
Casca (BC) Poda (BP)	20,47**	61,8ns** 60,7ns**	67,5a* 63,7b*	55,0a" 39,0b**	42,4b** 49,3a"	52	68

Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. A média do tratamento acompanhada por * difere do tratamento adicional 1 (AD1), e a média acompanhada por " difere do tratamento adicional

2 (AD2) (Dunnett, $p < 0,05$). Dose 0 = sem biocarvão; Dose 1 = 15 g kg⁻¹; Dose 2 = 60 g kg⁻¹; Dose 3 = 105 g kg⁻¹; Dose 4 = 150 g kg⁻¹.

A variável altura da planta apresentou diferenças entre os tipos de biocarvão em todas as doses testadas (Tabela 6). As maiores alturas foram observadas nas doses de 1 e 2 do BP, com valores de 34,5 cm e 35,2 cm, respectivamente.

Ao comparar esses tratamentos com os adicionais, verificaram-se diferenças apenas em relação à AD1 (Tabela 6). A dose 1 do BP promoveu um incremento de 0,8%, enquanto a dose 2 do BP resultou em um aumento de 2,9% em relação à AD2. Além disso, a dose 2 do BP apresentou um incremento de 10,6% em relação a AD1.

Para o número de folhas, os resultados mostraram diferenças entre os tratamentos, com os maiores valores observados nas doses 2 e 3 do BP, correspondendo a 160 e 157 folhas por planta, respectivamente (Tabela 6). Quando comparadas à AD1, essas doses promoveram aumentos de 5,5% e 3,4%, enquanto em relação à AD2, verificaram-se reduções de 5,4% e 7,2%.

A variável massa fresca das folhas apresentou diferenças nas doses 2, 3 e 4, enquanto na dose 1 não houve variação entre os biocarvões. As maiores massas frescas foram observadas nas doses 1 e 2 de ambos os biocarvões, sendo a dose 2 do BC a que obteve o maior valor, com 67,50 g.

Os tratamentos com a dose 1 de BC e BP diferiram dos adicionais. Em relação à AD1, verificaram-se incrementos de 18,9% no BC e 16,8% no BP. No entanto, comparados à AD2, ambos apresentaram redução, de 9,1% e 10,6%, respectivamente.

Já as doses de 2 de BC e BP também se destacaram em relação à AD1, com aumentos de 29,8% e 22,6%, porém, não diferiram da AD2.

Esses resultados corroboram os achados de Silva et al. (2020), que avaliaram a aplicação de biocarvão combinado com adubação nitrogenada na cultura da chicória e constataram incremento no crescimento da parte aérea e no desenvolvimento radicular. Segundo os autores, esse efeito pode estar associado à melhoria na retenção de nutrientes

e na estrutura do solo, promovendo maior absorção de N e P, essenciais para o crescimento vegetativo.

A interação entre biocarvão e adubação mineral pode resultar em efeitos sinérgicos, promovendo maior crescimento e produtividade das plantas. O biocarvão melhora as condições químicas, físicas e biológicas do solo, aumentando a retenção de nutrientes e reduzindo perdas por lixiviação, enquanto os fertilizantes minerais fornecem nutrientes essenciais de forma imediata (Andrade et al., 2023). Essa combinação pode favorecer um desenvolvimento mais vigoroso das culturas, pois o biocarvão pode atuar como liberador gradual de nutrientes e favorecer a microbiota do solo, aumentando a disponibilidade e absorção de elementos essenciais para as plantas (Silva et al., 2020).

Embora o biocarvão isoladamente não supra todas as exigências nutricionais das plantas, sua associação com fertilizantes minerais tem se mostrado eficaz na melhoria da qualidade do solo e no aumento da produtividade agrícola. Assim, a adoção dessa prática pode representar uma alternativa sustentável para a otimização do manejo da fertilidade do solo e o aumento da eficiência dos insumos agrícolas (Andrade et al., 2023).

4.3 Obtenção da dose ótima de biocarvão

A figura 4 ilustra os efeitos de doses de dois tipos de biocarvão sobre as variáveis altura, massa fresca e número de folhas ajustados por modelos de regressão polinomial quadrática. As análises foram realizadas com o objetivo de avaliar a resposta das plantas às doses aplicadas.

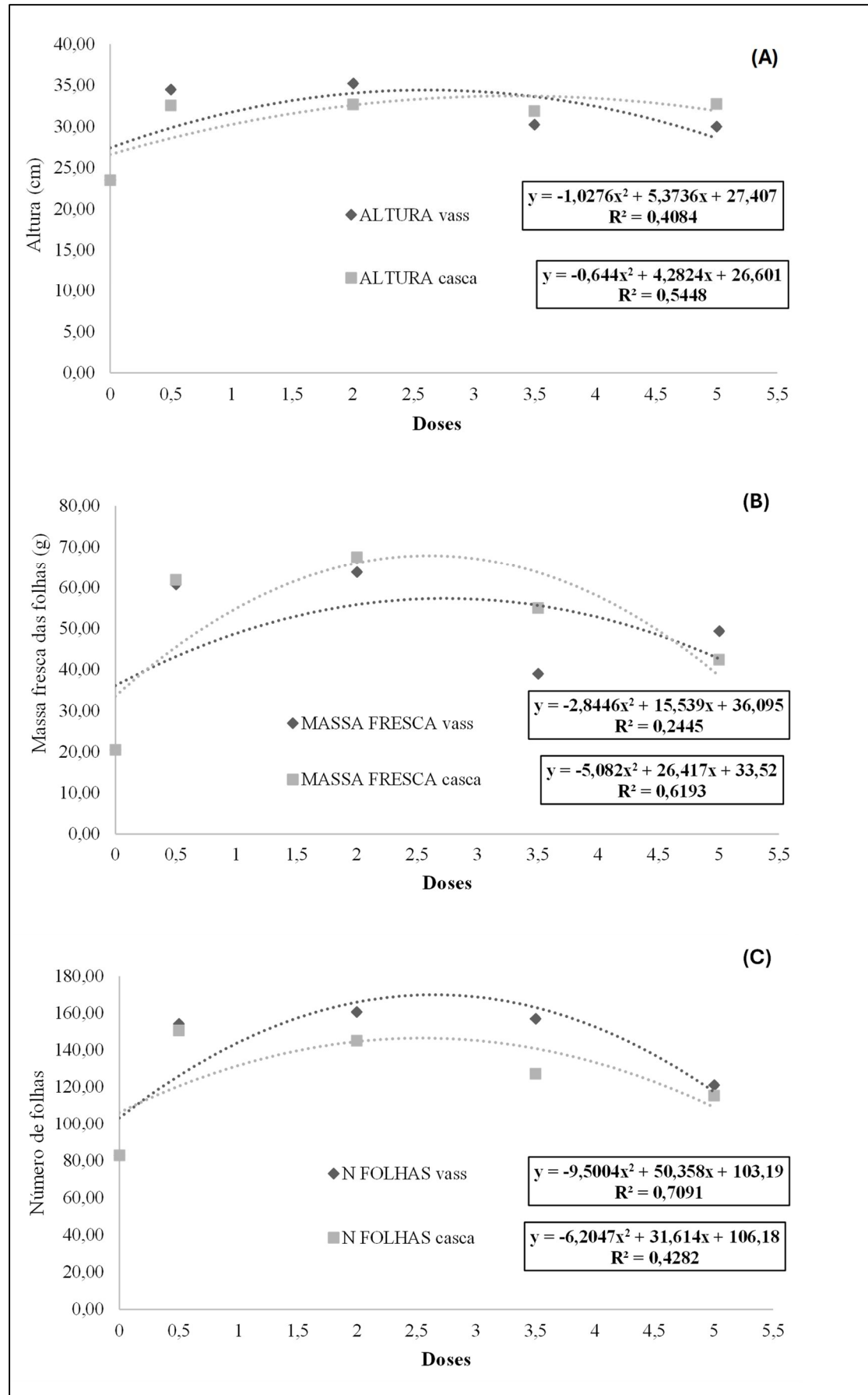


Figura 4. Altura de plantas (A), massa fresca da parte aérea (B), número de folhas (C) em resposta à interação entre tipos e doses de biocarvão.

A altura das plantas apresentou um ajuste significativo ao modelo polinomial quadrático, indicando um ponto de máxima em doses intermediárias de biocarvão. A dose ideal do BC foi de 3,32%, resultando em uma altura máxima de 33,72 cm, enquanto para o BP, a dose ideal foi de 2,68%, com o valor máximo de altura de 34,61.

O comportamento da massa fresca das folhas também seguiu uma tendência quadrática, com aumento até doses intermediárias e posterior redução. A dose ótima para o BC foi de 2,59%, resultando em uma produção máxima de 67,84 g, enquanto para o BP, a dose ideal foi de 2,73%, com 57 g.

O número de folhas apresentou comportamento semelhante, com resposta máxima em doses intermediárias. A dose ideal para o BC foi de 2,54%, resultando em uma produção máxima de 146 folhas/planta, enquanto para o BP, a dose ideal foi de 2,65%, com 170 folhas/planta.

Os resultados indicam que doses intermediárias de biocarvão favorecem o crescimento da cultura, promovendo incrementos na altura, número de folhas e biomassa fresca das folhas. Esse comportamento é consistente com estudos anteriores, como o de Lehmann et al. (2006), que demonstraram que o biocarvão melhora a retenção de umidade e a disponibilidade de nutrientes, favorecendo o crescimento vegetal até um certo limite.

A partir das doses ideais, observou-se uma queda no crescimento das plantas, sugerindo que concentrações elevadas de biocarvão podem comprometer o desenvolvimento vegetal. Esse efeito pode estar associado à saturação da capacidade de adsorção do solo, um fenômeno no qual os sítios ativos do biocarvão, responsáveis por reter e liberar nutrientes, tornam-se saturados com íons, reduzindo sua capacidade de disponibilizar nutrientes essenciais para as plantas (Pereira et al., 2022).

Além disso, em altas doses, o biocarvão pode modificar as propriedades físico-químicas do solo, alterando a distribuição de poros e a aeração, o que pode afetar negativamente o desenvolvimento radicular e a absorção de água e nutrientes (Lima et al., 2016). Quando a adsorção atinge seu limite máximo, elementos essenciais como N, P e K

podem ficar retidos nos microporos do biocarvão e indisponíveis para as raízes, reduzindo a eficiência da nutrição vegetal. Esse efeito explica a queda na produtividade observada em doses superiores às ideais, reforçando a importância de um manejo adequado da aplicação do biocarvão para evitar desequilíbrios nutricionais no solo.

Pereira et al. (2022) analisaram a aplicação de biocarvão na cultura do milho BRS Caatingueiro e verificaram que doses de 0,5; 1; 5 e 10 Mg ha⁻¹ resultaram em incremento na biomassa aérea, com um rendimento máximo observado na dose de 6 Mg ha⁻¹. Entretanto, o aumento da dose para valores superiores a esse limite ocasionou redução significativa na produtividade.

Esse comportamento também foi descrito por Lima et al. (2016) ao avaliarem a aplicação de biocarvão na cultura do feijão-caupi. Os autores constataram que doses entre 2% e 3% promoveram incremento na produção de biomassa, enquanto valores superiores reduziram o acúmulo de matéria seca e impactaram negativamente o desenvolvimento radicular. Esse efeito pode estar associado à modificação da relação carbono/nitrogênio do solo, interferindo na disponibilidade de nutrientes essenciais às plantas.

Os achados deste estudo reforçam que a dose adequada de biocarvão é um fator crítico para otimizar a produtividade vegetal, sendo necessário avaliar as características do solo e da cultura para determinar a melhor aplicação.

4.4 Análises biométricas (experimento 2)

Houve efeitos significativos, de forma isolada, para os tratamentos nas variáveis altura da planta, massa fresca e seca da parte aérea, massa fresca e seca da raiz e número de folhas. A altura da planta apresentou valores médios mais expressivos nos tratamentos submetidos à cama de aviário (24 cm), seguidos pelo esterco bovino (22 cm).

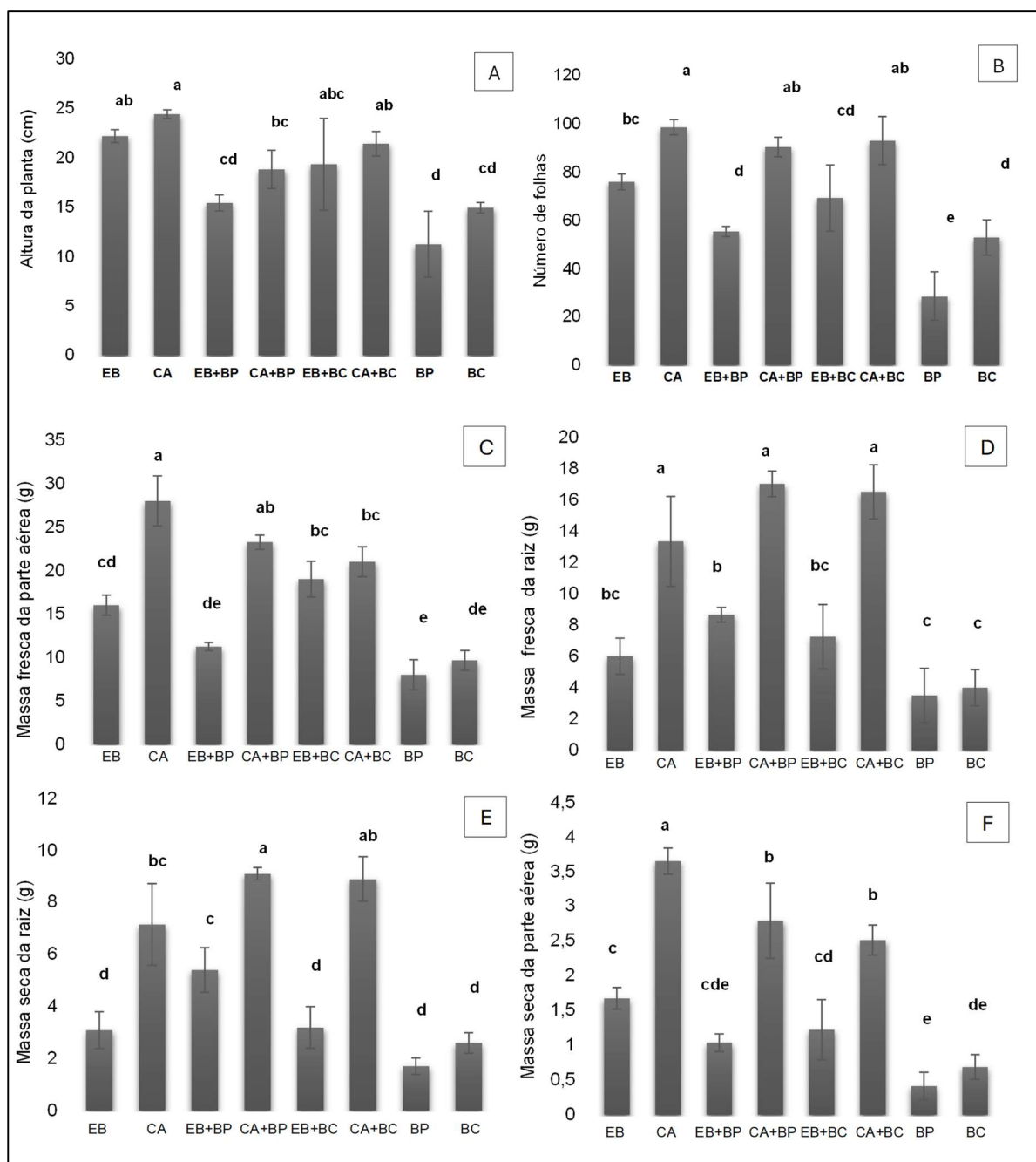


Figura 5. Valores médios dos tratamentos para altura da planta (A), número de folhas (B), massa fresca da parte aérea (C), massa fresca da raiz (D), massa seca da parte aérea (E) e massa fresca da raiz (F). Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As barras representam o desvio padrão da média. EB = esterco bovino; CA = cama aviária; BC = biocarvão da casca; BP = biocarvão das podas fitossanitárias.

A relação C:N dos insumos agrícolas é um dos principais fatores que regulam a disponibilidade de N no solo. Insumos com uma alta relação C:N, como determinados tipos de biocarvão, podem promover a imobilização temporária desse nutriente, reduzindo sua disponibilidade imediata para as plantas (Lehmann & Joseph, 2015). Esse fenômeno ocorre porque os microrganismos do solo utilizam o N disponível para decompor materiais ricos em C, limitando o suprimento imediato desse nutriente essencial para o crescimento vegetal (Steiner et al., 2008). A análise dos resíduos utilizados neste estudo corrobora essa dinâmica. O biocarvão derivado da casca apresentou uma relação C:N de 10,2, enquanto o biocarvão da poda apresentou uma relação significativamente mais elevada, de 22,4. Esse alto índice no biocarvão de poda indica uma maior imobilização do N no solo, reduzindo sua disponibilidade imediata para as plantas. Além disso, o pH elevado do biocarvão de casca (11,09) pode ter influenciado a disponibilidade de nutrientes, possivelmente comprometendo a absorção pelos vegetais.

A associação do biocarvão com fertilizantes orgânicos tem sido amplamente investigada, demonstrando efeitos benéficos no desenvolvimento vegetal e na produtividade das culturas. Estudos como os de Gaskin et al. (2010), Glaser et al. (2002), Marimon Júnior et al. (2012), Petter et al. (2012) e Steiner et al. (2007) indicam que essa interação promove um crescimento mais vigoroso das plantas quando comparada à aplicação isolada do biocarvão. Os resultados deste estudo reforçam que a aplicação exclusiva do biocarvão não apresenta eficiência significativa no crescimento das plantas, evidenciando a necessidade de sua associação com fertilizantes orgânicos para potencializar os efeitos positivos no desenvolvimento vegetal. Essa constatação é corroborada por Ribeiro (2016), que avaliou a mistura de esterco de galinha com resíduos de carvão de eucalipto e observou que as mudas de café conilon apresentaram maior altura no tratamento com esterco de galinha isolado (10,83 cm), em comparação à mistura de esterco com carvão (3,18 cm). Segundo o autor, o principal fator limitante para o crescimento das mudas foi a disponibilidade de N. O esterco de galinha constitui uma fonte de N mais prontamente disponível em comparação ao carvão, uma vez que, no biocarvão, esse nutriente encontra-se predominantemente associado a estruturas aromáticas dos materiais carbonizados, dificultando sua liberação no solo. Assim, os tratamentos que utilizaram esterco no substrato promoveram maior crescimento das mudas, reforçando a necessidade de equilibrar a relação C:N para otimizar o desenvolvimento vegetal.

No caso específico do cultivo de jambu, os biocarvões analisados, especialmente a poda, podem ter limitado o crescimento das plantas devido à elevada relação C:N, que favorece a imobilização do N. A adição de fertilizantes orgânicos ricos nesse nutriente, como o esterco de galinha ou a cama de aviário, poderia equilibrar essa relação, aumentando a disponibilidade de N e, conseqüentemente, favorecendo o desenvolvimento das plantas.

A aplicação da CA, isoladamente ou em associação com o BP, demonstrou um efeito significativo no aumento da massa fresca das raízes, atingindo os maiores valores registrados (13,33 g por planta). Em comparação, os tratamentos com EB, tanto isolado quanto combinado com os biocarvões, apresentaram valores intermediários (6,00; 8,65 e 7,25 g por planta, respectivamente). Por outro lado, a aplicação isolada dos biocarvões resultou nas menores massas frescas radiculares (4,00 g/planta para o BC e 3,50 g/planta para o BP), evidenciando sua baixa eficiência como fonte única de adubação. Esses resultados indicam que a cama de aviário desempenha um papel fundamental na promoção do crescimento radicular, possivelmente devido à sua composição nutricional rica em nitrogênio e à maior disponibilidade de nutrientes no solo.

A associação entre CA e biocarvão também impactou positivamente a massa seca das raízes, sendo o tratamento CA+BP responsável pela maior produção média (9,09 g/planta), seguido pela combinação CA+BC (8,88 g/planta). Esses achados são corroborados por Araujo Neto et al. (2013), que, ao avaliarem a produção de mudas orgânicas de pimentão cultivadas em diferentes substratos, verificaram que a combinação de biocarvão de casca de arroz com composto orgânico promoveu um aumento significativo na massa fresca e seca das raízes. Segundo os autores, esse efeito está associado à melhoria das condições físicas do solo, visto que a casca de arroz carbonizada aumenta a porosidade e a aeração, além de favorecer a retenção hídrica, criando um ambiente mais adequado para o desenvolvimento radicular.

A relação entre biocarvão e a estrutura do solo também foi abordada por Lehmann et al. (2003), que demonstraram como esse material melhora as propriedades físicas do solo ao aumentar sua porosidade e capacidade de retenção de umidade. Esses fatores são essenciais para a otimização do crescimento radicular, pois solos mais aerados e com maior retenção de água favorecem o desenvolvimento das raízes e, conseqüentemente, a

absorção de nutrientes. Dessa forma, a interação entre biocarvão e compostos orgânicos, como a cama de aviário, pode proporcionar condições mais favoráveis para a expansão radicular, justificando os resultados positivos observados no presente estudo.

A superioridade dos tratamentos que associaram biocarvão à cama de aviário pode ser explicada pela complementaridade entre suas características. O biocarvão, devido à sua estrutura altamente porosa, contribui para a melhoria das propriedades físicas do solo, aumentando sua aeração e retenção de umidade. Além disso, ele eleva a capacidade de troca catiônica (CTC), favorecendo a retenção e a liberação gradual de nutrientes essenciais para as plantas (Andrade et al., 2023). No entanto, quando aplicado isoladamente, o biocarvão pode apresentar uma relação C:N elevada, resultando na imobilização temporária do nitrogênio, tornando-o menos disponível para as plantas. A cama de aviário, por sua vez, é uma fonte rica de N prontamente disponível, equilibrando essa relação e garantindo um suprimento contínuo desse nutriente essencial para o crescimento radicular (Cavalcante et al., 2022).

Além disso, a priorização do crescimento radicular em relação ao crescimento da parte aérea pode estar relacionada à necessidade das plantas de estabelecer um sistema radicular bem desenvolvido antes de direcionar recursos para a produção de biomassa aérea. Em condições favoráveis do solo, como boa aeração, umidade e disponibilidade de nutrientes, as plantas tendem a alocar energia para o crescimento das raízes, garantindo maior eficiência na absorção de água e nutrientes para sustentar o desenvolvimento posterior da parte aérea (Pinto, 2017). Esse fator pode explicar por que a melhor resposta ao uso do biocarvão combinado com cama de aviário foi observada no crescimento das raízes, enquanto os efeitos sobre a altura e o número de folhas foram menos expressivos.

Portanto, a combinação entre biocarvão e cama de aviário mostrou-se eficaz na melhoria da estrutura e fertilidade do solo, reduzindo os efeitos negativos da imobilização de nitrogênio e criando um ambiente mais propício ao crescimento das raízes. Esse desenvolvimento inicial radicular proporciona uma base sólida para a absorção eficiente de nutrientes e o crescimento equilibrado da parte aérea ao longo do ciclo da planta, reforçando a importância dessa estratégia para otimizar o manejo nutricional e a produtividade das culturas.

4.5 Análises nutricionais

4.5.1 Acúmulos de macronutrientes

A ordem de acúmulo de macronutrientes nas folhas do jambu seguiu o padrão: N > K > Ca > Mg > S > P. O N destacou-se como o macronutriente mais acumulado, independentemente do tratamento aplicado, atingindo um máximo de 162,28 mg por planta no tratamento com cama de aviário (CA). Esse tratamento também resultou no maior acúmulo de K e Ca, com valores de 142,29 mg por planta e 65,86 mg por planta, respectivamente.

Tabela 7. Efeito dos tratamentos no acúmulo de macronutrientes nas folhas das plantas de jambu.

Tratamentos	Acúmulo de Nutrientes					
	N	P	K	S	Ca	Mg
	----- mg/planta-----					
Esterco Bovino (EB)	82,05cd	4,87b	69,29b	7,46c	30,28b	12,64c
Cama aviário (CA)	162,2a	8,45a	142,29a	16,84a	65,86a	26,54a
Biocarvão da Casca do cupuaçu (BC)	31,00df	2,14cd	32,91cd	3,49de	7,02cd	4,24de
Biocarvão da Vassoura-de-bruxa (BP)	20,45f	1,27d	19,30d	2,57e	4,93d	2,67e
Esterco + Biocarvão da Casca (EB+BC)	59,35de	3,35c	55,53bc	5,51cd	12,55cd	7,17d
Cama + Biocarvão da Casca (CA+BC)	110,54bc	5,30b	120,20a	10,43b	26,58b	15,40bc
Esterco + Biocarvão da Vassoura (EB+BP)	48,78df	2,52cd	44,88bcd	7,58c	14,05c	6,71de
Cama + Biocarvão da Vassoura (CA+BP)	121,92b	5,52b	125,73a	12,62b	31,67b	17,32b

Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os menores acúmulos em CA foram observados para P, Mg e S, com valores de 8,45 mg/planta, 26,54 mg/planta e 16,84 mg/planta, respectivamente. Ainda assim, esses valores foram superiores aos registrados em outros tratamentos, evidenciando a eficiência da cama de aviário na disponibilização de macronutrientes para o jambu.

A análise estatística revelou que CA e suas combinações com biocarvões foram os tratamentos mais eficientes na promoção do acúmulo de N, K e Ca, indicando maior disponibilidade e absorção desses nutrientes. O tratamento com CA apresentou um acúmulo de N duas vezes maior que o EB, o que pode estar associado à maior taxa de mineralização desse fertilizante orgânico, disponibilizando nitrogênio de forma mais eficiente.

Por outro lado, os biocarvões isolados (BC e BP) apresentaram os menores acúmulos para todos os macronutrientes, com valores abaixo de 33 mg/planta para qualquer nutriente. Esse efeito pode ser atribuído ao pH alcalino dos biocarvões (pH 11,09 no BC e 9,33 no BP), que pode afetar a disponibilidade de P e outros nutrientes essenciais.

No entanto, as combinações de biocarvões com EB ou CA apresentaram desempenho intermediário, indicando que o biocarvão pode melhorar a estrutura do solo e a retenção de umidade, mas não fornece diretamente nutrientes ao jambu. A combinação CA+BP, por exemplo, resultou em 121,92 mg/planta de N, um valor expressivo em relação aos tratamentos apenas com biocarvão.

Esses achados revelam uma hierarquia clara na eficiência dos insumos avaliados, sendo os tratamentos orgânicos (CA e EB) os mais eficazes no fornecimento de nutrientes para o jambu. O N foi consistentemente o elemento mais absorvido em todos os tratamentos, seguido pelo K e pelo Ca, enquanto os menores valores de acúmulo foram registrados para P, Mg e S.

O baixo acúmulo de Mg, apesar de sua importância como átomo central da molécula de clorofila, pode ser justificado pelo fato de apenas 15% do Mg total na planta estar associado a essa estrutura. O restante é altamente móvel, sendo redistribuído entre tecidos e folhas, especialmente sob condições de deficiência (Taiz et al., 2017). Isso sugere que os tratamentos utilizados não foram suficientes para atender à demanda metabólica da planta, possivelmente devido a limitações na absorção ou redistribuição do nutriente.

O P foi o macronutriente menos acumulado. Embora esse nutriente seja essencial para processos metabólicos cruciais, como a formação de ácidos nucleicos e lipídios de membrana, o baixo acúmulo de P pode ser explicado pela limitada eficiência dos tratamentos na disponibilização de P no solo, já que este elemento é frequentemente imobilizado em formas indisponíveis para as plantas (Lynch, 2011). A baixa mobilidade do P no solo e a sua rápida fixação em compostos insolúveis podem ter reduzido sua absorção, mesmo em tratamentos que continham fertilizantes fosfatados.

O S também apresentou os menores acúmulos entre os macronutrientes., o que é consistente com sua baixa demanda na maioria das espécies vegetais, exceto nas

pertencentes à família Brassicaceae (Cardoso et al., 2016). O S desempenha funções essenciais no metabolismo vegetal, pois está presente em aminoácidos como cistina, cisteína e metionina, além de ser componente de coenzimas e vitaminas (Taiz et al., 2017). A baixa disponibilidade de S nos tratamentos pode ter limitado sua incorporação metabólica.

5. CONCLUSÃO

O uso do biocarvão associado à adubação mineral demonstrou ser uma estratégia promissora para o crescimento do jambu, especialmente em doses intermediárias, que apresentaram efeitos positivos significativos no desenvolvimento da cultura. No entanto, sua associação com adubos orgânicos não alcançou a mesma eficiência, evidenciando a necessidade de um manejo equilibrado para potencializar seus benefícios.

A utilização de resíduos, como os provenientes do cupuaçuzeiro, na forma de biocarvão, destaca-se como uma alternativa sustentável, promovendo o reaproveitamento desses materiais na agricultura. Além de contribuir para o desenvolvimento de culturas como o jambu, esse manejo reduz o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado, transformando resíduos em insumos agrícolas valiosos. Por outro lado, fica evidente a necessidade de novas pesquisas para aprimorar o manejo do biocarvão e explorar seu potencial em diferentes sistemas agrícolas, visando sua integração eficaz em práticas de cultivo sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ALTIERI, M. A. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 74, n. 1-3, p. 19-31, 1999.
- ANDRADE, C. A.; SOUZA, L. C.; ALMEIDA, R. **Biocarvão: uso agrícola e ambiental**. Embrapa Solos, 2023.
- ARAÚJO, R. M.; OLIVEIRA, A. T.; CUNHA, M. R. Efeito do biocarvão na eficiência no uso de nutrientes em solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, n. 2, p. 385-397, 2021.
- Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D., & Hipps, N. A. (2010). Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. **Plant and Soil**, 337(1-2), 1-18.
- AZEVEDO, H. L. S. et al. Efeito do biocarvão na fertilidade do solo e no crescimento de culturas agrícolas: uma revisão sistemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. e0200123, 2021.
- BARBOSA, L. B.; SILVA, T. F.; MARTINS, D. M. A. A importância da agricultura sustentável na preservação ambiental e na produtividade. **Revista Brasileira de Agricultura**, v. 35, n. 3, p. 101-112, 2019.
- BARBOSA, W. L. R. et al. Espilantol: um composto bioativo do jambu (*Acmella oleracea*). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 18, n. 2, p. 321-330, 2016.
- BERG, B. D.; CAVALCANTE, S. M.; ALMEIDA, V. E. Efeitos do biocarvão na redução de gases de efeito estufa em solos tropicais. **Journal of Soil Science**, v. 36, n. 4, p. 678-692, 2022.
- BIEDERMAN, Lori A.; HARPOLE, W. Stanley. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, v. 5, n. 2, p. 202-214, 2013.
- BRASIL, E. C.; CRAVO, M. da S.; VIEGAS, I. de J. M. (ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. 419 p. ISBN 978-85-7035-932-2.
- Cardoso, A. I. I., Claudio, M. R. T., Magro, F. O., Nakada-Freitas, P. G. (2016). Phosphate fertilization over the accumulation of macronutrients in cauliflower seed production. **Horticultura Brasileira**, 34 (2), 96-2016.
- CARVALHO, M. T. M. et al. Efeitos do biocarvão na retenção de água e fertilidade do solo em cultivos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. 1-10, 2021.
- Carvalho, M. T. M., Madari, B. E., Bastiaans, L., van Oort, P. A. J., Heinemann, A. B., da Silva, M. A. S., & Meinke, H. (2019). Biochar improves fertility of a clay soil in the Brazilian Savannah: short term effects and impact on rice yield. **Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics (JARTS)**, 120(1), 13-22.

Cerri, C. E. P., Sparovek, G., Bernoux, M., Easterling, W. E., Melillo, J. M., & Cerri, C. C. (2007). Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, 64(1), 83–99.

CHENG, H. et al. Biochar application for soil health improvement and greenhouse gas mitigation: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 456-473, 2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition. 2015. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org>. Acesso em: 10 out. 2023.

FAO. The future of food and agriculture: Trends and challenges. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2025.

FERREIRA, J. P. et al. Impacto da adubação orgânica na qualidade do solo e produtividade agrícola. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 12, n. 2, p. 101-110, 2017. Disponível em: <https://www.revistas.ufpr.br/ra/>.

FREITAS, A. C. et al. Uso de biocarvão e adubação orgânica na agricultura tropical: benefícios e desafios. *Revista Agro@mbiente*, v. 13, n. 1, p. 45-52, 2019.

Gaskin, J. W.; Speir, R. A.; Harris, K.; Das, K. C.; Lee, R. D.; Morris, L. A.; Fisher, D. S. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. **Agronomy Journal**, v.102, n.2, p.623-633, 2010.

GENG, Y. et al. Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 42, p. 215-224, 2013.

Glaser, B.; Lehmann, J.; Zech, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. **Biology and Fertility of Soils**, v.35, p.219–230, 2002.

GLASER, Bruno et al. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with biochar. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, p. 219-230, 2002. DOI: 10.1007/s00374-002-0466-4.

GLIESSMAN, S. R. Agroecology: The ecology of sustainable food systems. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

GOMES, L. F. et al. Challenges in optimizing the pyrolysis process for biochar production: A review. **Bioresource Technology**, v. 282, p. 1-9, 2019.

GUPTA, R.; VERMA, R. S.; SINGH, M. O papel do biocarvão na agricultura sustentável e na redução de impactos ambientais. **Sustainable Agriculture Reviews**, v. 56, p. 235-250, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-44339-5_10.

HOSSAIN, M. A.; SINGH, J.; AGARWAL, A. Utilization of agro-industrial wastes for biochar production and its application in agriculture. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 11, p. 12079-12091, 2020.

JEFFERY, Simon et al. A meta-analysis of the impact of biochar on crop yield. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 144, p. 175-187, 2017. DOI: 10.1016/j.agee.2011.08.015.

JOSEPH, Stephen et al. Effects of enriched biochars on plant growth and resilience. **Agronomy**, v. 8, n. 11, p. 181, 2018.

Kambo, H. S., & Dutta, A. (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 45, 359-378.

KAMMANN, Claudia I. et al. Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. **Scientific Reports**, v. 5, p. 11080, 2015.

KIRCHHERR, J.; DOLLEWEERD, W.; VAN SANTEN, R. Barriers to the circular economy: Evidence from the European Union (EU). **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 180-191, 2017.

Laird, D. A., Fleming, P., Davis, D. D., Horton, R., Wang, B., & Karlen, D. L. (2010). Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. **Geoderma**, 158(3-4), 443-449.

LAIRD, D. A.; TURNER, S.; GITTI, S.; AMARO, A.; GARRETT, S.; ALLOWAY, B.; SAINSBURY, M. Biochar impact on soil agrophysical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 2, p. 381-394, 2010.

LAIRD, David A. et al. Review of biochar impacts on soil properties and carbon sequestration. **Journal of Environmental Quality**, v. 39, n. 6, p. 1753-1764, 2010. DOI: 10.2134/jeq2010.0153.

LEHMANN, J. et al. Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011.

LEHMANN, J. et al. Biochar for environmental management: science and technology. 2. ed. London: Routledge, 2015.

Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 403–427.

LEHMANN, Johannes; JOSEPH, Stephen (Eds.). Biochar for environmental management: science and technology. 2. ed. London: Routledge, 2015.

Lima, S.L.; Tamiozzo, S.; Palomino, E.C.; Petter, F.A.; Marimon-Junior, B.H.2015. Interactions of biochar and organic compound for seedlings production of *Magonia pubescens* A. St. Hil. **Revista Árvore**, 39: 655-661

Lynch, J. P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 156, p. 1041-1049, 2011.

Marimon-junior, B. H.; Petter, F. A.; Andrade, F.; Madari, B. E.; Marimon, B. S.; Schossler, T. R.; Gonçalves, L. G. V.; Belém, R. S. Produção de mudas de jiló em substrato condicionado com Biochar. **Comunicata Scientiae**, v.3, n.2, p.108-114, 2012.

- MARINHO, C. S. et al. Uso de resíduos agroindustriais na produção de biocarvão: potencial para a economia circular. **Engenharia Agrícola**, v. 43, p. e0211042, 2023.
- MARTINS, J. et al. Application of biochar for enhancing soil fertility and plant growth in tropical soils. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 161-170, 2018.
- MATSON, P. A.; PARTON, W. J.; POMEROY, L. C.; CLEVELAND, C. C.; HARVEY, D.; SCHIMEL, D. S. **Agricultural intensification and ecosystem properties**. Science, v. 277, n. 5325, p. 504-509, 1997..
- MELO, E. C. et al. Correção da acidez do solo para o cultivo de jambu: efeitos da calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1-10, 2017.
- MENDONÇA, E. M.; RIBEIRO, C. A.; SOARES, J. T. A importância do reaproveitamento de resíduos agroindustriais na Amazônia. **Revista Agroindústria Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 92-104, 2021. DOI: 10.1590/rab.2021.0243.
- NGUYEN, Bao N. et al. Biochar-based nitrogen fertilizers for sustainable agriculture: A review. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 411, 2022.
- NOVAK, Jeffrey M. et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern Coastal Plain soil. **Soil Science**, v. 174, n. 2, p. 105-112, 2009.
- Oliveira, F. R., Patel, A. K., Jaisi, D. P., Adhikari, S., Lu, H., & Khanal, S. K. (2017). Environmental application of biochar: Current status and perspectives. **Bioresource Technology**, 246, 110–122.
- OLIVEIRA, J. C. et al. Efeito do biocarvão na estrutura e fertilidade do solo em áreas de cultivo intensivo. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, p. e0210125, 2020. DOI: 10.1590/1413-705420204401125.
- Pereira, J. R. C.; Signor, D.; Deon, M. D.; Guiotoku, M.; Macedo, A. Caracterização de biocarvões regionais e efeitos sobre a produção de biomassa do milho BRS Caatingueiro. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 30, e026979, 2022.
- PEREIRA, R. C. et al. Atividades biológicas de extratos de jambu (*Acmella oleracea*): uma revisão. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 25, n. 4, p. 289-297, 2015.
- Petter, F. A.; Madari, B. E.; Soler, M. A. S.; Carneiro, M. A. C.; Carvalho, M. T. M.; Marimon-Junior, B. H.; Pacheco, L. P. Soil fertility and upland rice yield after biochar application in the Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.5, p.699- 706, 2012.
- PRETTY, J. N. Agroecological principles and practices for sustainable farming. London: Earthscan, 2008.
- RAMOS, F. T. et al. Combinação de biocarvão e adubação orgânica no crescimento de plantas tropicais. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 44, n. 1, p. 89-98, 2021.
- RAMOS, F. T. et al. Efeitos sinérgicos do biocarvão e adubação orgânica na microbiota do solo. **Revista Brasileira de Microbiologia**, v. 52, n. 3, p. 456-465, 2021.

Ribeiro, P. H., Uso de finos de carvão e esterco de galinha em solo cultivado com milho e na produção de mudas de café, 2016. 71f. (Tese – Doutorado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2016.

RIBEIRO, P. R. A. et al. Potencial econômico e desafios do cultivo de jambu na Amazônia. **Revista de Economia Agrícola**, v. 68, n. 2, p. 78-89, 2021.

RIBEIRO, P. R. A. et al. Resíduos agroindustriais do cupuaçu: potencial para produção de biocarvão e sustentabilidade. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 2, p. 123-135, 2019.

SANTOS, J. A. et al. Impacto da utilização de resíduos agroindustriais na sustentabilidade agrícola da Amazônia. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, n. 3, p. 300-311, 2021.

SILVA, L. C. et al. Adubação orgânica no cultivo de jambu: efeitos no crescimento e produtividade. **Revista Agro@ambiente**, v. 13, n. 1, p. 45-52, 2019.

SILVA, L. C. et al. Efeitos da adubação orgânica nas propriedades físicas e químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 321-330, 2013.

SILVA, L. C. et al. Potencial do biocarvão derivado de resíduos agroindustriais para a agricultura tropical. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 9, n. 2, p. 123-135, 2020.

SILVA, R. F.; ALMEIDA, J. P.; SOUZA, L. C. Adubação química e orgânica associada ao biocarvão promovem maior crescimento à chicória (*Eryngium foetidum* L.). **Brazilian Journal of Development**, 2020.

SOHI, S. P.; LOPEZ-CAPEL, E.; BROWN, R. J.; RICHARDSON, D. P. A review of biochar and its use and function in soil. **Soil Research**, v. 48, n. 7, p. 499-508, 2010.

SOUZA, J. M. A. et al. Desafios do cultivo de jambu em solos ácidos da Amazônia. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 2, p. 123-132, 2018.

Steiner, C.; Teixeira, W. G.; Lehmann, J.; Nehls, T.; Macêdo, J. L. V.; Blum, W. E. H.; Zech, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant Soil**, v.291, p.275–290, 2007.

Taiz, L.; Zeiger, E.; Møller, I. M.; & Murphy, A. (2017). Fisiologia e Desenvolvimento vegetal. Porto Alegre, Artmed.

TSCHARNTKE, T.; THIES, C.; BUNNING, A.; RICHARDS, M.; WIEGAND, K. The stability of agroecosystems and the biodiversity crisis: The role of biodiversity in the sustainability of agriculture. **Ecology and Society**, v. 10, n. 1, p. 36, 2005.

VITOUSEK, P. M.; REINHARDT, S.; HOLLAND, E. A.; HARRISON, M. D. Nutrient cycling and limitation: Hawai'i as a model system. Princeton: Princeton University Press, 2013.

Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. **Nature Communications**, 1(5), 1-9.

WOOLF, D.; AVERILL, S.; CARRIERE, P.; DE LANGE, W.; GILKES, R. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review of the literature. **Global Change Biology**, v. 16, n. 4, p. 1080-1096, 2010.

WOOLF, Dominic et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, v. 1, n. 5, p. 1-9, 2010.

XU, Guangxi et al. Effect of biochar amendment on yield and greenhouse gas emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 173, p. 13-21, 2013.

ZHANG, Guodong et al. Biochar-mediated sulfur nutrition in plants: a systematic review and meta-analysis. **Environmental Research**, v. 192, p. 110224, 2021.

ZHANG, Q. et al. Agricultural waste as a resource for sustainable energy production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 218-234, 2016.