

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

**TRANSFORMAÇÃO DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM
BIOCHAR E CINZAS E SUA INFLUÊNCIA EM ATRIBUTOS DO SOLO
E NUTRIÇÃO DAS PLANTAS**

Francisco Sales Ferreira dos Santos Júnior

Engenheiro Agrônomo

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

**TRANSFORMAÇÃO DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM
BIOCHAR E CINZAS E SUA INFLUÊNCIA EM ATRIBUTOS
DO SOLO E NUTRIÇÃO DAS PLANTAS**

**Francisco Sales Ferreira dos Santos Júnior
Orientador: Prof. Dr. Jairo Osvaldo Cazetta**

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

S237t

Santos Júnior, Francisco Sales Ferreira dos

Transformação da palha de cana-de-açúcar em biochar e cinzas e sua influência em atributos do solo e nutrição das plantas / Francisco Sales Ferreira dos Santos Júnior. -- Jaboticabal, 2026

65 p. : il., tabs., fotos

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

Orientador: Jairo Osvaldo Cazetta

1. Biochar. 2. Resíduos agrícolas. 3. Fertilidade do solo. 4. Plantas Nutrição. 5. Enzimas microbianas. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: TRANSFORMAÇÃO DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM BIOCHAR E CINZAS E SUA INFLUÊNCIA EM ATRIBUTOS DO SOLO E NUTRIÇÃO DAS PLANTAS

AUTOR: FRANCISCO SALES FERREIRA DOS SANTOS JÚNIOR

ORIENTADOR: JÁIRO OSVALDO CAZETTA

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

Documento assinado digitalmente
 **JAIRO OSVALDO CAZETTA**
Data: 29/07/2025 15:11:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JÁIRO OSVALDO CAZETTA (Participação Virtual)
Departamento de Biotecnologia Agropecuária e Ambiental / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **ERIC VICTOR DE OLIVEIRA FERREIRA**
Data: 29/07/2025 14:57:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ERIC VICTOR DE OLIVEIRA FERREIRA (Participação Virtual)
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) / Capitão Poço/PA

Documento assinado digitalmente
 **MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ**
Data: 29/07/2025 16:11:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ (Participação Virtual)
Departamento de Ciência do Solo / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 28 de julho de 2025

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Francisco Sales Ferreira dos Santos Júnior - Filho de Maria Rosimar Silveira Bento e Francisco Sales Ferreira dos Santos, nasceu em Capitão Poço, Pará, no dia 13 de dezembro de 1997. Ingressou no curso de Engenharia Agrônômica, em agosto de 2017, pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Câmpus de Capitão Poço, Pará. Foi bolsista voluntário de Iniciação Científica PIVIC-UFRA na área de Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas durante o período de setembro de 2021 até setembro de 2022. Foi bolsista de monitoria nas disciplinas de "Fertilidade do Solo", "Nutrição Mineral de Plantas" e "Gênese e Propriedades do Solo" da UFRA, Campus Capitão Poço, durante o período de maio de 2021 a julho de 2022. Ademais, participou dos projetos de pesquisa: "Nutrição e incidência de pragas em cultivares de feijão-caupi sob influência da calagem, adubação mineral e rizobactérias", "Crescimento e nutrição de mudas de dendezeiro em função do suprimento de água e de práticas corretivas do solo" e "Cultivo de mudas de açaizeiro em função do suprimento de água e de práticas corretivas do solo", sendo este o tema para o seu Trabalho de Conclusão de Curso de graduação. Profissionalmente, atuou como Professor Tutor no curso técnico em Fruticultura pelo SENAR, no período de agosto de 2022 a julho de 2023, onde ministrou as disciplinas "Implantação da Área de Produção e Legislação", "Logística e Comercialização de Frutas", "Controle de Qualidade dos Processos de Produção de Frutas", "Planejamento Estratégico", "Agricultura de Precisão" e "Técnicas de Produção de Frutas". Em agosto de 2023, ingressou no curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV-UNESP), Câmpus de Jaboticabal-SP, no Departamento de Tecnologia, sob a orientação do Prof. Dr. Jairo Osvaldo Cazetta.

Epígrafe

“A chama não é tão luminosa para si
como para as outras que ela ilumina:
da mesma forma o sábio.”

(Friedrich Nietzsche)

DEDICO

Dedico aos meus pais, Sales Ferreira e Rosimar Silveira, aos meus sobrinhos, Pedro Lucas e Théo, à minha avó, Maria Silveira, aos meus irmãos, Sandy Silveira, Sâmya Silveira e Júlio Silveira, aos meus gatos, Yin e Yang, e cadela, Khaleesi (*in memoriam*), que sempre me apoiaram e estiveram do meu lado durante esta etapa, me oferecendo todo o suporte necessário, especialmente o emocional, além de servirem de inspiração diária. Esta conquista nunca foi individual!

AGRADECIMENTOS

Buscando traduzir em palavras todo o sentimento de gratidão, inicio agradecendo profundamente às pessoas que estiveram ao meu lado durante esta caminhada. Aos meus pais, Sales Ferreira e Rosimar Silveira, que sempre foram minhas maiores fontes de apoio e inspiração. Agradeço por todo o amor, paciência e compreensão, por estarem sempre presentes em todos os momentos e por me incentivarem a seguir meus sonhos, oferecendo a base sólida necessária para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Reconheço com imensa gratidão a orientação do Prof. Dr. Jairo Osvaldo Cazetta. Sua dedicação, paciência e confiança foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Os ensinamentos transmitidos e as oportunidades oferecidas contribuíram significativamente para minha formação profissional, além da amizade, oportunidades e apoio constantes ao longo do processo.

Em momentos de alegria e refúgio, encontrei conforto em minha família e companheiros de quatro patas. Portanto, agradeço aos meus sobrinhos, Pedro Lucas e Théo, e aos meus gatos e cadela, Yin, Yang e Khaleesi (*in memoriam*). Agradeço pelas doses diárias de carinho e equilíbrio, essenciais para manter a leveza diante da rotina intensa de estudo e trabalho.

Não poderia deixar de expressar minha gratidão à minha avó, Maria Silveira, cuja sabedoria e presença constante foram pilares de sustentação para nossa família. Da mesma forma, aos meus irmãos, Sandy Silveira, Sâmia Silveira e Júlio Silveira, e ao meu cunhado, Leonardo Moraes, agradeço por todo o apoio, incentivo e colaboração ao longo desta jornada.

Obrigado à Prof.^a Dr.^a Mara Cristina Pessoa da Cruz pelas contribuições valiosas, pela parceria sólida e pelos conselhos sempre generosos.

Obrigado ao Prof. Dr. Eric Victor de Oliveira Ferreira, pela amizade, parceria duradoura e pelas oportunidades proporcionadas desde minha graduação.

Agradeço, portanto, aos membros da banca pelas sugestões construtivas que enriqueceram esta dissertação.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Jaboticabal (Unesp/FCAV), pela formação sólida e pela disponibilização da área experimental que permitiu a execução deste trabalho. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo apoio a partir

da concessão da bolsa de estudos, cujo apoio financeiro foi fundamental para a realização do curso de mestrado e para o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os professores, técnicos e membros terceirizados da instituição, especialmente ao Sr. José Carlos, pelos ensinamentos, parceria e pela amizade ao longo de minha trajetória no mestrado.

Aos colegas do projeto de pesquisa, por toda a ajuda e parceria na execução do experimento. Um agradecimento especial ao Adolfo Leão Pereira, Jairo Neves Oliveira, Gabriel Júnior, que contribuíram de maneira significativa para o sucesso desta pesquisa.

Aos meus amigos Neto Medeiros, Caio Florêncio, Ingrid Chara, Juliana Magalhães, Ana Vitória, Thalia Siqueira, Julia Mercês e Jamile Nascimento, por estarem sempre ao meu lado, me incentivando a continuar e proporcionando momentos de diversão e descontração.

Aos meus amigos da pós-graduação, que se tornaram grandes parceiros durante todo o mestrado. Sou muito grato por toda a amizade e apoio, especialmente ao Luis, Igor, Lorena, Magda, Ana, Heytor, Natália e Orlando Ventura, que fizeram desta jornada algo ainda mais enriquecedor.

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

Muito obrigado!

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Aspectos gerais da cana-de-açúcar.....	3
2.2. Uso da palha de cana-de-açúcar: características e efeitos no solo.....	4
2.3. Transformação da palha de cana-de-açúcar em biochar e cinzas: características, propriedades e efeitos no solo.....	5
2.4. Efeitos da aplicação de biochar, palha e cinzas na fertilidade do solo e na nutrição de plantas.....	7
2.5. Resposta microbiana e enzimática do solo à aplicação de palha, biochar e cinzas	8
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	10
3.1. Caracterização do local de estudo	10
3.2. Material original e posterior transformação em biochar	11
3.3. Delineamento experimental e tratamentos.....	12
3.4. Instalação das parcelas experimentais	13
3.5. Avaliações experimentais	14
3.5.1. Fertilidade do solo	14
3.5.2. Acúmulo de nutrientes nas plantas	14
3.5.3. Resposta microbiana e atividade enzimática	15
3.5.4. Biomassa das plantas.....	15
3.6. Análises estatísticas.....	16
4. RESULTADOS	16
4.1. Fertilidade do solo	16
4.1.1. pH, acidez potencial e matéria orgânica do solo.....	16
4.1.2. Bases trocáveis	17
4.1.3. Fósforo e enxofre no solo.....	19
4.2. Acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas	21
4.2.1. Macronutrientes primários	21
4.2.2. Macronutrientes secundários	22
4.2.3. Micronutrientes.....	24
4.3. Resposta microbiana e atividade enzimática	25
4.3.1. Atividade enzimática	25
4.3.2. Respiração basal do solo (RBS)	27

4.4.	Biomassa de plantas	27
5.	DISCUSSÃO	29
5.1.	Fertilidade do solo	29
5.2.	Acúmulo de nutrientes nas plantas.....	34
5.3.	Resposta microbiana e atividade enzimática	39
5.4.	Biomassa de plantas	40
6.	CONCLUSÕES	42
7.	REFERÊNCIAS	42

TRANSFORMAÇÃO DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM BIOCHAR E CINZAS E SUA INFLUÊNCIA EM ATRIBUTOS DO SOLO E NUTRIÇÃO DAS PLANTAS

RESUMO – A transformação da palha de cana-de-açúcar em biochar pode alterar a fertilidade e a atividade biológica do solo, com reflexos na nutrição das plantas. Objetivou-se avaliar os efeitos da palha de cana-de-açúcar e de sua transformação parcial ou total em biochar sobre atributos químicos e biológicos do solo, acúmulo de nutrientes e biomassa da cana-de-açúcar. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado, com sete tratamentos e quatro repetições: controle; 100% de palha; 75% de palha + 25% de biochar; 50% de palha + 50% de biochar; 25% de palha + 75% de biochar; 100% de biochar; e 100% de cinzas. Após 60 dias de incubação em Latossolo Vermelho, foram avaliados atributos químicos e biológicos do solo e, após 120 dias de cultivo, o acúmulo de nutrientes e a biomassa da parte aérea. A aplicação dos resíduos elevou o pH e reduziu, em geral, a acidez potencial, enquanto a transformação em biochar favoreceu a disponibilidade de K, Ca, Mg, P e S. O biochar total destacou-se no acúmulo de K, Mg e S e, juntamente com as cinzas, no acúmulo de P; maiores proporções de palha não pirolisada favoreceram o Ca e atividade microbiana. Não houve efeito significativo sobre a biomassa, fosfatase ácida ou β -glicosidase. A combinação de 75% de palha e 25% de biochar aumentou a arilsulfatase, enquanto a respiração basal foi maior com palha in natura e combinações com maior proporção de palha. A hipótese foi parcialmente confirmada: o biochar favoreceu principalmente a fertilidade e determinados nutrientes, enquanto a palha não pirolisada contribuiu mais para a atividade microbiana.

Palavras-chave: Biochar, resíduos de cana-de-açúcar, fertilidade do solo, nutrição mineral, atividade microbiana.

TRANSFORMATION OF SUGARCANE STRAW INTO BIOCHAR AND ASH AND ITS INFLUENCE ON SOIL ATTRIBUTES AND PLANT NUTRITION

ABSTRACT – The transformation of sugarcane straw into biochar can alter soil fertility and biological activity, with implications for plant nutrition. This study aimed to evaluate the effects of sugarcane straw and its partial or complete transformation into biochar on soil chemical and biological attributes, nutrient accumulation, and sugarcane biomass. The experiment was conducted under greenhouse conditions in a completely randomized design, with seven treatments and four replicates: control; 100% straw; 75% straw + 25% biochar; 50% straw + 50% biochar; 25% straw + 75% biochar; 100% biochar; and 100% ash. After 60 days of incubation in a Rhodic Oxisol, soil chemical and biological attributes were evaluated, and after 120 days of cultivation, nutrient accumulation and shoot biomass were determined. Residue application increased soil pH and, in general, reduced potential acidity, while transformation into biochar increased the availability of K, Ca, Mg, P, and S. The 100% biochar treatment stood out for the accumulation of K, Mg, and S and, together with ash, for P accumulation; higher proportions of non-pyrolyzed straw favored Ca accumulation and microbial activity. No significant effects were observed on biomass, acid phosphatase, or β -glucosidase activity. The combination of 75% straw and 25% biochar increased arylsulfatase activity, whereas basal respiration was higher with unmodified straw and mixtures containing a greater proportion of straw. The hypothesis was partially confirmed: biochar mainly improved soil fertility and the accumulation of specific nutrients, whereas non-pyrolyzed straw contributed more strongly to microbial activity.

Keywords: biochar; sugarcane residues; soil fertility; mineral nutrition; microbial activity.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características químicas do solo utilizado no estudo.	11
Tabela 2. Comparação de teores de nutrientes entre palha (ST) e biochar (B).	12
Tabela 3. Proporção de palha (ST), biochar (B) e cinzas (BA) aplicados nos tratamentos (16t ha ⁻¹).....	13

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Produção (a) e Transplântio (b) das mudas de cana-de-açúcar em casa de vegetação. 14
- Figura 2.** Análise da respiração basal do solo (RBS) para determinação da atividade microbiana. Inicialmente, preparou-se a solução com hidróxido de sódio (a), posteriormente foram acondicionadas sem tampas nos vasos (b), posteriormente, cobriu-se com potes a fim de isolar a solução na área do vaso (c,d) e, após uma semana de incubação, pipetou-se cloreto de bário na solução (e,f,g) para posterior titulação em laboratório com ácido clorídrico (h). 15
- Figura 3.** Efeitos de diferentes tratamentos de resíduos de cana-de-açúcar sobre o pH (a), H + Al (b), e MOS (c), para sete tratamentos: Controle, 100% ST, 75% ST 25% B, 50% ST 50% B, 25% ST 75% B, 100% B, e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas. 17
- Figura 4.** Efeito de diferentes tratamentos com resíduos de cana-de-açúcar nas concentrações de potássio (K, a), cálcio (Ca, b) e magnésio (Mg, c), para sete tratamentos: Controle, 100% ST, 75% ST 25% B, 50% ST 50% B, 25% ST 75% B, 100% B, e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas. 18
- Figura 5.** Efeito de diferentes tratamentos com resíduos de cana-de-açúcar na concentração de fósforo (P, a) e enxofre (S, b), para sete tratamentos: Controle, 100% ST, 75% ST 25% B, 50% ST 50% B, 25% ST 75% B, 100% B, e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas. 20
- Figura 6.** Acúmulo de macronutrientes primários N (a), P (b), e K (c) em plantas de cana-de-açúcar submetidas a diferentes tratamentos de substrato. Os tratamentos consistem em: Controle, 100% ST, 75% ST + 25% B, 50% ST + 50% B, 25% ST + 75% B, 100% B e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas. 22
- Figura 7.** Acúmulo na parte aérea dos macronutrientes secundários Ca (a), Mg (b) e S (c) em plantas de cana-de-açúcar submetidas a diferentes tratamentos de substrato. Os tratamentos consistem em: Controle, 100% ST, 75% ST + 25% B, 50% ST + 50% B, 25% ST + 75% B, 100% B e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas. 23
- Figura 8.** Acúmulo em parte aérea dos micronutrientes Fe (a), Cu (b), Mn (c) e Zn (d) em plantas de cana-de-açúcar submetidas a diferentes tratamentos de substrato. Os tratamentos consistem em: Controle, 100% ST, 75% ST + 25% B, 50% ST + 50% B, 25% ST + 75% B, 100% B e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 25
- Figura 9.** Efeitos de tratamentos de aplicação de resíduos de cana-de-açúcar sobre atividade enzimática do solo. Fosfatase ácida (a), Arilsulfatase (b), e β -glicosidase (c), para sete tratamentos: Controle, 100% ST, 75% ST 25% B, 50% ST 50% B, 25% ST 75% B, 100% B, e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas. 26
- Figura 10.** Efeitos de tratamentos de aplicação de resíduos de cana-de-açúcar sobre a respiração basal do solo (RBS). Controle, 100% ST, 75% ST 25% B, 50% ST 50% B, 25% ST

75% B, 100% B, e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas. 27

Figura 11. Efeito de diferentes tratamentos sobre a massa seca da parte aérea de planta. A figura apresenta a massa seca de folhas (MSF, a), massa seca do colmo (MSC, b) e massa seca da parte aérea (MSPA, c), para sete tratamentos: Controle, 100% ST, 75% ST + 25% B, 50% ST + 50% B, 25% ST + 75% B, 100% B, e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras iguais nas barras não apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas. 28

1. INTRODUÇÃO

A agricultura sustentável é um pilar fundamental para garantir a produtividade a longo prazo e mitigar os impactos negativos sobre o meio ambiente. Nesse contexto, os resíduos agrícolas, como a palha da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), têm se destacado como uma solução eficiente para a recuperação da qualidade do solo e a promoção de uma agricultura mais sustentável. A utilização desses resíduos no manejo agrícola pode não apenas reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos, mas também promover reciclagem de nutrientes mais eficiente, contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas de produção (Liu et al., 2025).

A conversão de palha em biochar, por meio da pirólise, tem demonstrado potencial para melhorar uma série de propriedades do solo, sendo amplamente reconhecida por sua capacidade de aumentar o pH do solo, favorecer a matéria orgânica e otimizar a capacidade de retenção de nutrientes para o crescimento das plantas (Babar et al., 2025; Hailegnaw et al., 2019; Han et al., 2020; Huang et al., 2023; Liu et al., 2025; Shetty; Prakash, 2020; Zhang et al., 2023). O biochar é particularmente eficaz na correção da acidez do solo, uma característica comum em muitas regiões tropicais, incluindo as áreas onde a cana-de-açúcar é cultivada (Dai et al., 2017; Huang et al., 2023; Zhang et al., 2025). Em solos ácidos, como é o caso de muitos solos tropicais, a aplicação de biochar pode reduzir a acidez e aumentar a capacidade de retenção de cátions (Bilias et al., 2023; Hailegnaw et al., 2019; Hien et al., 2021; Kameyama; Kubota; Iwata, 2024; Manirakiza; Gagnon; Ziadi, 2025; Xia et al., 2024), o que resulta em aumento na disponibilidade de nutrientes, como potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Esses efeitos contribuem para um ambiente mais favorável para o crescimento radicular e para o aumento da produtividade das culturas (Liu et al., 2025; Zhang et al., 2025).

Além da sua ação corretiva da acidez e retenção de nutrientes no solo, o biochar tem se mostrado eficaz no favorecimento da matéria orgânica do solo (MOS) (Biederman; Stanley Harpole, 2013). Tal favorecimento ocorre devido a adição do biochar melhorar a estrutura do solo, aumentar sua porosidade e facilitar a drenagem, fatores que favorecem a atividade microbiana e o desenvolvimento radicular das plantas (Amin; Mihoub, 2021; Bai et al., 2024; Ighalo et al., 2025; Sharma et al., 2025; Wei et al., 2025; Zheng et al., 2022). A formação de agregados estáveis favorece a melhoria da estrutura e protege a MOS contra a decomposição rápida, promovendo uma barreira física contra o ataque dos microrganismos, onde a MOS pode se

acumular e se manter por períodos mais longos, além de promover maior sequestro de carbono (Nepal et al., 2023). Ademais, a MOS é um dos principais indicadores da fertilidade do solo, uma vez que ela influencia a capacidade do solo de reter e disponibilizar nutrientes, além de promover a troca catiônica (Li et al., 2024). Dessa forma, embora a produção de biochar envolva um processo térmico controlado, a transformação da palha de cana-de-açúcar em biochar representa uma alternativa ambientalmente mais adequada à queima aberta de resíduos, contribuindo para a recuperação e manutenção da fertilidade do solo, além de favorecer o maior sequestro de carbono (Aluthge et al., 2025).

Apesar dos benefícios bem documentados do biochar (Antonangelo; Sun; Eufrade-Junior, 2025; Dai et al., 2017; Ferreira et al., 2024; Han et al., 2020; Hossain et al., 2020; Miheretu, 2020; Sharma et al., 2025; Tusar et al., 2023; Wei et al., 2025; Zhang et al., 2025), pouco se sabe ainda sobre os efeitos da transformação (total ou parcial) da palha em biochar. Ademais, as cinzas da biomassa, resultantes da queima de resíduos vegetais, são ricas em nutrientes como K e Ca, mas sua eficácia na melhoria da fertilidade do solo é limitada, uma vez que esses nutrientes são rapidamente lixiviados, o que reduz sua disponibilidade às plantas (Park et al., 2005). Além disso, a aplicação excessiva de cinzas pode afetar o pH do solo, tornando-o menos ácido e, em alguns casos, prejudicando a absorção de outros nutrientes (Manirakiza; Gagnon; Ziadi, 2025; Quirantes et al., 2016; Stanek-Tarkowska et al., 2022). Embora as cinzas de biomassa possam ser úteis para corrigir a acidez do solo e fornecer nutrientes, especialmente devido à presença de compostos alcalinos como óxidos e carbonatos, seu efeito corretivo tende a ser menos duradouro (Bhandari et al., 2024). Ademais, por não contribuírem com a MOS, as cinzas apresentam limitações quanto à melhoria de propriedades essenciais como estrutura, capacidade de troca de cátions (CTC) e atividade microbiana (Stanek-Tarkowska et al., 2022). Por isso, sua capacidade de melhorar a fertilidade do solo é questionável na ausência de outras fontes de matéria orgânica.

Portanto, este estudo objetivou investigar os efeitos da palha da cana-de-açúcar e sua transformação total ou parcial em biochar sobre as propriedades químicas e biológicas do solo e acúmulo de nutrientes em plantas de cana-de-açúcar. A hipótese é que a transformação, total ou parcial, da palha de cana-de-açúcar em biochar pode favorecer a biologia do solo, além de melhorar sua fertilidade e a nutrição das plantas. Com isso, espera-se contribuir para o desenvolvimento de práticas

agrícolas mais integradas, capazes de otimizar o uso de resíduos e promover a sustentabilidade na cultura da cana-de-açúcar, uma das mais importantes atividades econômicas no Brasil e em outros países tropicais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aspectos gerais da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) destaca-se como um dos principais cultivos globais, apresentando ampla importância econômica, energética e ambiental. Globalmente, ela representou cerca de 20 % da produção agrícola mundial entre 2000 e 2018, superando culturas-chave como o milho (FAO, 2020). O Brasil é o maior produtor mundial: em 2019, foi responsável por aproximadamente 38,6 % da produção mundial, com grande parte concentrada na região Centro-Sul, especialmente em São Paulo (Zheng et al., 2021). A expansão territorial da cana no Brasil vem ocorrendo predominantemente sobre pastagens degradadas e outras áreas agrícolas (Rodrigues; Ross, 2020), evitando desmatamentos diretos de florestas. Entre 2000 e 2020, observou-se remoção líquida de cerca de $9,8 \text{ TgCO}_2 \text{ ano}^{-1}$ dentro das áreas cultivadas, chegando a $17 \text{ TgCO}_2 \text{ ano}^{-1}$ ao considerar o contexto das propriedades rurais (CARs) (Guarengi et al., 2023). Esse “saldo positivo” reflete realocações em uso da terra, políticas e práticas mais sustentáveis.

A cultura da cana é adaptada a climas tropicais e subtropicais: temperaturas médias entre 28 °C e 38 °C, precipitação anual de 1000 a 1500 mm e eficiência climática acima de 0,65 são ideais. Cerca de 24 % do território brasileiro apresenta essas condições (Aparecido et al., 2021). No Centro-Sul, onde se concentram os maiores produtores, a cultura apresenta alta aptidão climática, com temperaturas, precipitação e luminosidade favoráveis ao desenvolvimento da cana-de-açúcar; já no Nordeste, há períodos de déficit hídrico entre junho e setembro, exigindo manejo de irrigação mais intensivo (Coelho; Bragagnolo, 2024).

A sustentabilidade do complexo cana-de-açúcar está relacionada ao aproveitamento integral da planta. Resíduos como bagaço, vinhaça e palha são comumente usados para cogeração de energia, fertilização do solo e produção de bioetanol de segunda geração (Silva et al., 2021). Exemplo disso é que o etanol de cana é uma das fontes de biocombustível mais eficientes segundo o estudo de Silva et al. (2021), que afirmam que a energia produzida tende a reduzir em até 90 % as emissões de CO_2 comparada à gasolina, especialmente quando há cogeração

integrada. Além disso, a difusão de tecnologias, como zoneamento agrícola com base em clima, sensoriamento remoto e machine learning (ML), tem impulsionado a eficiência produtiva e o monitoramento sustentável (Embrapa, 2024; Parra, 2004). Exemplos incluem o uso do índice de eficiência climática para adequação regional e técnicas de monitoramento por satélite com espectroscopia e ML para detecção de pragas/danos. Estudo recente aplica análise de envoltória de dados (DEA) para mensurar eficiência técnica da produção canavieira em estados como SP, GO, MG e MT (com dados do Censo Agropecuário 2017) (Coelho; Bragagnolo, 2024). Concluiu-se que a mecanização, escala da produção, condições edafoclimáticas, sistema de irrigação e reaproveitamento de subprodutos são fatores-chave para a eficiência da cultura. Ademais, a certificação via políticas como o RenovaBio tem ampliado práticas sustentáveis, com cerca de 89 % das usinas certificadas até 2021 (Embrapa, 2024).

2.2. Uso da palha de cana-de-açúcar: características e efeitos no solo

A palha de cana-de-açúcar, composta principalmente por folhas secas e fragmentos de colmo remanescentes da colheita, tem ganhado relevância como estratégia de manejo conservacionista em sistemas canavieiros. Além de representar uma fonte abundante de matéria orgânica, sua presença na superfície do solo contribui significativamente para a melhoria das características físicas, químicas e biológicas do ambiente edáfico (De Souza et al., 2005).

Em termos de estrutura e umidade do solo, estudos com latossolo vermelho constataram que a cobertura com 15 t ha^{-1} de palha de cana reduziu em 53 % a perda hídrica por evaporação de $0,21 \text{ 45 mm dia}^{-1}$ na camada de 0–0,20 m, em comparação com solo descoberto ($0,45 \text{ mm dia}^{-1}$) (Da Silva et al., 2022; Peres; Souza; Lavorenti, 2010). Tais resultados indicam maior retenção de água e menor estresse hídrico, especialmente em comparação com superfícies expostas. Ainda sobre a dinâmica hídrica, o trabalho desenvolvido no semiárido mostrou que a presença da palha diminuiu a perda de água por percolação e evaporação, efeitos que se intensificam nas camadas superficiais e que atenuam com a profundidade, contribuindo para maior disponibilidade hídrica e melhor aproveitamento pela cultura (Peres; Souza; Lavorenti, 2010).

Do ponto de vista da estrutura do solo e compactação, Silva et al. (2021) relataram que a palha melhora a estrutura do solo e reduz a sua densidade, o que facilita o crescimento radicular e a infiltração da água (Ninkuu et al., 2025). Em

consonância, estudos demonstram que a devolução da palha aumenta a diversidade microbiana na rizosfera e melhora as características bioquímicas do solo, favorecendo cultivares de alto rendimento (Wang et al., 2023).

Sob o aspecto da dinâmica de nutrientes e matéria orgânica, a palha da cana contribui significativamente para a ciclagem de carbono (C) e nitrogênio (N). Uma síntese de meta-análise indicou que a manutenção de resíduos pode resultar em acréscimos anuais em até 1 m de profundidade, favorecendo a formação de estoque de carbono no solo (Morais et al., 2020). Além disso, outro estudo confirma aumento do teor da matéria orgânica e melhoria na disponibilidade de nutrientes (Ninkuu et al., 2025).

2.3. Transformação da palha de cana-de-açúcar em biochar e cinzas: características, propriedades e efeitos no solo

A palha de cana-de-açúcar, quando submetida à pirólise, gera biochar e cinzas com propriedades químicas e físicas que podem beneficiar diversas características do solo. Estudos recentes demonstram que o biochar oriundo da biomassa de cana apresenta teor de carbono fixo entre 64,7 e 85,4 %, resultando em melhora expressiva do teor de carbono orgânico, CTC, pH, condutividade elétrica e retenção de água no solo após 90 dias de aplicação (Aluthge et al., 2025). Além disso, estudo que investigou a produção de biochar a 300 e 600 °C constatou que ambos aumentaram a estabilidade estrutural do solo e a disponibilidade de água em solos calcários de texturas variadas, enfatizando o potencial em regiões áridas (Moradi-Choghamarani; Moosavi; Sepaskhah, 2024).

Os benefícios da palha quanto à elevação dos efeitos positivos na retenção de água e na estrutura do solo já são conhecidos, no entanto um estudo mostrou que biochar derivado da palha de cana aumentou a capacidade de retenção de água, promoveu o crescimento radicular inicial da cana e a atividade microbiana do solo, além de alterar o perfil metabolômico das folhas da planta (Ferreira et al., 2024). Tal efeito demonstra que a transformação da palha em biochar também é capaz de favorecer o acúmulo de água, devido aos poros presentes na estrutura do material. Apesar disso, as propriedades do biochar dependem fortemente da temperatura de pirólise e da taxa de aplicação (Mielke et al., 2022). Mielke et al. (2022) observaram que biochar de palha de cana, quando produzido a temperaturas mais altas (350–750 °C) e aplicado em maiores proporções (até 10 %), aumentou a fertilidade do solo,

melhorando também a sorção do herbicida metribuzin. Em paralelo, o estudo de Viana et al. (2024) evidenciou que diferentes temperaturas de pirólise influenciam a capacidade do biochar em imobilizar elementos como bário em solos encharcados, indicando sua utilidade na remediação ambiental (Viana et al., 2024).

Em termos gerais, o biochar melhora a densidade do solo, aumenta a estabilidade de agregados, eleva o pH em solos ácidos, incrementa a CTC e a capacidade de retenção hídrica, conforme evidenciado em revisões sobre biochar (Iwuozor et al., 2022; Zhu et al., 2025). Importante também destacar os efeitos ambientais: aplicações do biochar de palha reduziram a emissão de N_2O em até 73 % em comparação ao solo apenas com palha (Gabetto et al., 2024), além de estabilizar metais pesados como Pb e As em solos contaminados, ampliando seu potencial para remediação ambiental (Ketrot; Wisawapipat, 2021). Em resumo, a transformação de palha de cana em biochar e cinzas resulta em materiais ricos em carbono estável, com porosidade que favorece retenção de água e nutrientes, CTC elevada, ajuste de pH, e efeitos positivos tanto na fertilidade do solo quanto na mitigação de gases de efeito estufa e contaminação por metais. Essas características fazem do biochar uma tecnologia promissora para a reciclagem de resíduos agrícolas e melhoria sustentável do solo.

A partir da combustão total da palha de cana-de-açúcar, obtêm-se também as cinzas, ricas em compostos inorgânicos como Ca, Mg, K, fósforo (P) e óxidos alcalinos/alcalino-terrosos. Um estudo conduzido em casa de vegetação em Goiás avaliou os efeitos da aplicação de doses de cinzas de bagaço e palha (10 a 50 t ha⁻¹) na cultura de feijão-guandu (Rubio et al., 2023). No estudo, foi observado incremento linear no crescimento inicial, teor de clorofila e atributos de fertilidade do solo. A aplicação de doses mais elevadas (36–39 t ha⁻¹) elevou o pH e os teores de P, K, Ca e Mg, saturação por bases e reduziu o teor do alumínio (Rubio et al., 2023). Isso evidencia o potencial uso das cinzas como corretivo e fertilizante, especialmente em solos ácidos. As cinzas apresentam alcalinidade elevada, contribuindo para a neutralização da acidez em solos ácidos e oferecendo nutrientes solúveis que podem ser imediatamente disponíveis às plantas (Bhandari et al., 2024; Quirantes et al., 2016). Contudo, seu uso requer atenção à solubilidade alta, que pode provocar lixiviação de nutrientes e, em doses muito altas, desequilíbrio osmótico no sistema radicular (Bhandari et al., 2024; Stanek-Tarkowska et al., 2022).

2.4. Efeitos da aplicação de biochar, palha e cinzas na fertilidade do solo e na nutrição de plantas

A aplicação de biochar, palha de cana-de-açúcar e cinzas no solo tem se mostrado uma estratégia eficaz para melhorar a fertilidade e, conseqüentemente, a nutrição das plantas. A interação entre esses resíduos agrícolas e o solo não somente afeta as propriedades químicas, mas também influencia os processos biológicos e a disponibilidade de nutrientes.

A palha da cana-de-açúcar tem se mostrado eficaz na melhoria das propriedades físicas do solo, como a estrutura, a porosidade e a retenção de água, sendo estes fundamentais também para uma boa qualidade e fertilidade do solo (Chen et al., 2022). A aplicação de palha pode reduzir a compactação do solo, facilitando o crescimento das raízes e melhorando a aeração. Segundo Liu et al. (2025), a presença de palha na superfície do solo reduz a perda de água por evaporação, o que é especialmente importante em regiões com clima semiárido ou com déficit hídrico, como muitas regiões onde a cana-de-açúcar é cultivada. Além disso, a palha contribui para o aumento do teor da MOS, que é um dos principais indicadores de qualidade (Morais et al., 2020). A ciclagem de C proporcionada pela decomposição da palha resulta na liberação gradual de nutrientes, como N e P, favorecendo o crescimento das plantas (Wei et al., 2025). Ninkuu et al. (2025) indicam que a aplicação de palha pode aumentar a diversidade microbiana na rizosfera, o que melhora a eficiência na decomposição de compostos orgânicos e a disponibilização de nutrientes.

O biochar tem sido amplamente estudado devido ao seu potencial para melhorar a fertilidade do solo, particularmente em solos com baixa CTC (Amin; Mihoub, 2021; Borges et al., 2020; Gamal; Khalafallah; Kafrawy, 2020; Xia et al., 2024). De acordo com Ighalo et al. (2025), a aplicação de biochar aumenta a retenção de nutrientes, como K, Ca e Mg, ao melhorar a estrutura do solo e reduzir a lixiviação dos mesmos. Essa capacidade de retenção é especialmente benéfica em solos tropicais, onde as altas taxas de pluviosidade podem causar a maior perda de nutrientes por lixiviação. Além disso, os autores afirmam que o biochar tem a capacidade de aumentar a CTC e ajustar o pH de solos ácidos, o que melhora a disponibilidade de nutrientes como K e Ca. Zhu et al. (2025) observaram que a aplicação de biochar pode estabilizar a MOS, além de fornecer uma fonte adicional de carbono que promove o crescimento da microbiota do solo e favorece a mineralização de nutrientes, favorecendo, portanto, a disponibilidade dos mesmos. Essa

estabilização do carbono também ajuda no seu sequestro a longo prazo, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Lefebvre et al., 2020; Zhao et al., 2022).

As cinzas de resíduos vegetais, resultantes da queima total de biomassa, têm um efeito significativo na correção da acidez do solo, especialmente em solos ácidos (Bhandari et al., 2024; Pastuszczak; Stanek-Tarkowska; Kačániová, 2022). De acordo com Bhandari et al. (2024), a aplicação de cinzas aumenta a alcalinidade do solo, o que pode ser benéfico à disponibilidade de nutrientes que são solúveis em pH mais alto, como P e K. No entanto, é importante notar que a aplicação excessiva de cinzas pode causar aumento muito grande no pH, o que pode resultar em desequilíbrio nutricional e toxidez às plantas (Bhandari et al., 2024). As cinzas fornecem uma fonte imediata de nutrientes como K, P, Ca e Mg, que são liberados rapidamente e tornam-se disponíveis às plantas (Bhandari et al., 2024; Pastuszczak; Stanek-Tarkowska; Kačániová, 2022; Quirantes et al., 2016). No entanto, Park et al. (2005) alertam que a solubilidade rápida desses nutrientes pode levar à lixiviação em solos com alta taxa de pluviosidade, o que pode reduzir a eficácia das cinzas a longo prazo. Ademais, a aplicação de cinzas pode afetar negativamente a microbiota do solo devido ao seu efeito alcalinizante, como discutido por Quirantes et al. (2016), os quais observaram que a lixiviação rápida de Ca e K pode não ser compensada pela liberação de nutrientes ao longo do tempo.

2.5. Resposta microbiana e enzimática do solo à aplicação de palha, biochar e cinzas

A interação entre resíduos agrícolas e a microbiota do solo desempenha um papel crucial nos processos de decomposição e mineralização de nutrientes, fundamentais para a fertilidade do solo. A palha de cana-de-açúcar, o biochar e as cinzas têm sido amplamente estudados devido ao seu impacto na atividade microbiana e enzimática do solo, que influenciam diretamente a qualidade do solo e o desenvolvimento das culturas (Alves et al., 2023; Azadi; Raiesi, 2021; Barbosa et al., 2024; Garbuz et al., 2022; Lopes et al., 2021a, 2021b; Wei et al., 2021; Yang; Lu, 2022).

A palha de cana-de-açúcar tem sido amplamente reconhecida por sua capacidade de enriquecer o solo com matéria orgânica de decomposição rápida, que serve como uma fonte imediata de carbono para os microrganismos do solo (Li et al., 2024; Sharma et al., 2025; Stanek-Tarkowska et al., 2022). Quando aplicada no solo,

a palha aumenta significativamente a biomassa microbiana e a atividade enzimática (Alves et al., 2023; Azadi; Raiesi, 2021; Barbosa et al., 2024a; Garbuz et al., 2022; Lopes et al., 2021; Yang; Lu, 2022). Estudos como o de Lopes et al. (2021) indicam que a presença de resíduos vegetais, como a palha de cana, contribui para um aumento da diversidade microbiana na rizosfera, promovendo a decomposição mais eficiente de compostos orgânicos. A presença de carbono facilmente decomponível para os microrganismos eleva a respiração basal do solo (RBS), um indicativo de maior atividade metabólica das comunidades microbianas (Barbosa et al., 2024). Além disso, a decomposição da palha também favorece a atividade de enzimas hidrolíticas e oxidativas, como a β -glicosidase e a fosfatase ácida, que são essenciais à mineralização de carbono e P no solo (Yang; Lu, 2022). Morais et al. (2020) demonstraram que a aplicação de palha pode resultar em aumento da atividade enzimática, particularmente das enzimas hidrolíticas, que quebram compostos complexos como polissacarídeos e fosfatos. Portanto, o fornecimento contínuo de substrato orgânico facilita a ciclagem de nutrientes, o que é particularmente benéfico para solos em regiões tropicais, onde as taxas de decomposição e lixiviação de nutrientes podem ser aceleradas pelas condições climáticas.

O biochar, obtido a partir da pirólise de resíduos agrícolas, tem atraído atenção por sua estabilidade química e estrutura porosa, que pode servir de suporte para a colonização microbiana (Ghassemi-Golezani; Latifi; Farhangi-Abriz, 2025; Han et al., 2020; Kracmarova-Farren et al., 2024). No entanto, seu efeito sobre a atividade microbiana não é tão imediato quanto o da palha. Estudos recentes mostram que o biochar pode atuar como um reservatório de carbono de decomposição lenta, o que resulta em uma liberação gradual de nutrientes, favorecendo a estabilidade microbiana a longo prazo (Hailegnaw et al., 2019; Li et al., 2024). A sua capacidade de adsorver nutrientes e água também é um fator importante na modulação da atividade enzimática, especialmente em solos com baixa CTC (Hossain et al., 2020). No entanto, a eficácia do biochar depende de várias variáveis, como a temperatura de pirólise e a proporção de aplicação (Khater et al., 2024). Wei et al. (2021) observaram que a aplicação de biochar aumentou a atividade enzimática em solos tropicais, promovendo a mineralização de nutrientes e a decomposição de compostos orgânicos complexos. Contudo, o efeito do biochar sobre a microbiota depende também de suas características específicas e da interação com o solo (Sharma et al., 2025), o que

sugere que diferentes fontes de biochar podem ter efeitos diversos sobre a dinâmica microbiana.

A aplicação de cinzas de biomassa, provenientes da queima total de resíduos vegetais, é uma prática comum para melhorar a fertilidade do solo, devido ao seu alto teor de nutrientes como K, Ca e Mg (Quirantes et al., 2016). Bhandari et al. (2024) destacam que, embora as cinzas aumentem a disponibilidade de nutrientes imediatamente, elas podem reduzir a atividade microbiana em solos ácidos devido ao aumento da pH do solo e sua natureza inorgânica. Esse aumento no pH pode inibir certos grupos microbianos que são sensíveis a alterações na acidez do solo, conforme estudo em que a aplicação de cinzas apresentou menor diversidade microbiana, principalmente em solos com pH naturalmente baixo (Quirantes et al., 2016). A atividade enzimática também pode ser influenciada pela aplicação de cinzas. Stanek-Tarkowska et al. (2022) indicaram que a fosfatase ácida e outras enzimas hidrolíticas podem ter sua atividade inibida em solos com pH muito elevado, como os resultantes da aplicação de cinzas. Isso ocorre porque muitas dessas enzimas, responsáveis pela mineralização de P e outros nutrientes, são mais ativas em ambientes ligeiramente ácidos. Park et al. (2005) também observaram que a lixiviação rápida de nutrientes das cinzas pode resultar em fornecimento de nutrientes muito pontual, sem os efeitos sustentados proporcionados por fontes orgânicas, como a palha e o biochar.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do local de estudo

O experimento foi conduzido em vasos cultivados com cana-de-açúcar em casa de vegetação localizada na Unesp/FCAV, em Jaboticabal-SP, entre julho de 2023 e março de 2024. O solo adicionado aos vasos foi latossolo vermelho (Santos, 2018) com textura média, coletado até a camada de 0-20 cm na área experimental da FCAV - Unesp em Jaboticabal-SP, nas coordenadas -21.234748, -48.285343, com altitude de 618 m, cujo clima, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Aw, tropical, seco no inverno (megatérmico) (Rolim, 2010). Posteriormente à coleta, o solo foi colocado ao ar livre por um período de sete dias, objetivando sua secagem, e, finalmente, passado em peneira com malha de 2 mm e posterior avaliação química (Tabela 1).

Tabela 1. Características químicas do solo utilizado no estudo.

pH CaCl ₂	MOS	P	S	Ca	Mg	K	Al	H+Al
	g dm ⁻³	-----mg dm ⁻³ -----				-----mmolc dm ⁻³ -----		
4,5	25	50	1	18,0	9,1	4,6	0	42

pH: em CaCl₂ por potenciometria; MOS (Matéria orgânica do solo): extração com dicromato de sódio e determinação por espectrofotometria; P: extração com resina trocadora de íons e determinação por espectrofotometria; S: extração com fosfato de cálcio (0,01 mol L⁻¹) e determinação por turbidimetria; Ca, Mg e Al: extração com KCl (1,0 mol L⁻¹) e determinação por espectrometria de absorção atômica (Ca e Mg) e titulometria (Al); H+Al: determinação em tampão SMP por potenciometria.

3.2. Material original e posterior transformação em biochar

O material original utilizado para preparo dos tratamentos foi a palha de cana-de-açúcar (Tabela 2) que é produzida no processo de colheita mecanizada, coletada do campo experimental da Fazenda da FCAV - Unesp após secagem natural, o biochar foi obtido pela pirólise lenta desse resíduo, conforme as indicações de Pires et al. (2018) (250 °C por 3 horas), usando forno que foi adaptado do projeto desenvolvido por Cemin (2010), com alterações realizadas para adequá-lo à pirólise da palha de cana-de-açúcar. A palha foi coletada e colocada para secagem em estufa (60-70 °C) até peso constante. Após isso, foi pesada a quantidade proporcional adequada para cada tratamento com palha. A proporção de palha aplicada obedeceu a uma quantidade total de palha estimada a partir da quantidade média depositada anualmente em campo (16 t ha⁻¹) para o tratamento com aplicação total de palha, sendo esta quantidade proporcional transformada gradualmente em biochar, conforme os tratamentos. Para o tratamento com cinzas, foi feita a queima total da quantidade proporcional de palha.

Tabela 2. Comparação de teores de nutrientes entre palha (ST) e biochar (B).

Nutriente (g/kg)	Palha – ST	Biochar – B
Carbono	430,20	462,91
Nitrogênio	5,79	15,03
Fósforo	0,48	0,93
Potássio	3,27	7,59
Cálcio	6,65	15,48
Magnésio	1,49	4,58
Enxofre	2,27	4,08
Relação C/N	74	31

3.3. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado no trabalho foi do tipo inteiramente casualizado (DIC), com 7 tratamentos e 4 repetições, totalizando 28 parcelas experimentais. Os tratamentos foram: i) Controle (sem aplicação de biochar nem material original); ii) 100% ST (aplicação de 100% da dose do material original); iii) 75% ST 25% B (25% da dose do material original transformado em biochar + restante 75% da dose do material original não pirolizado); iv) 50% ST 50% B (50% da dose do material original transformado em biochar + restante 50% da dose do material original não pirolizado.); v) 25% ST 75% B (75% da dose do material original transformado em biochar + restante 25% da dose do material original não pirolizado); vi) 100% B (100% da dose do material original transformado em biochar); e vii) 100% BA (100% da dose do material original transformado em cinzas) (Tabela 3).

Tabela 3. Proporção de palha (ST), biochar (B) e cinzas (BA) aplicados nos tratamentos (16t ha⁻¹).

Tratamentos	Palha (ST %)	Biochar (B%)	Cinzas (BA %)
i. Controle	0	0	0
ii. 100% ST	100	0	0
iii. 75% ST 25% B	75	25	0
iv. 50% ST 50% B	50	50	0
v. 25% ST 75% B	25	75	0
vi. 100% B	0	100	0
vii. 100% BA	0	0	100

3.4. Instalação das parcelas experimentais

Na condução do experimento, foram utilizados vasos plásticos de 10 litros preenchidos com 8,5 litros de solo mais a adição do resíduo referente aos tratamentos. Após o enchimento dos vasos, foi realizada a incorporação dos resíduos nos tratamentos correspondentes. Assim, a imposição dos tratamentos iniciou por meio da aplicação da mesma quantidade de água em todos os tratamentos até atingir 70% da capacidade de campo (CC). Após isso, foi iniciado o período de incubação dos resíduos no solo, o qual permaneceu por 60 dias, com ciclo de rega diário até 70% da CC do solo em cada vaso por meio do método das pesagens dos vasos.

Ao término do período de incubação dos tratamentos, iniciou-se o transplântio das mudas de cana-de-açúcar de, aproximadamente, 20 dias de formadas (Figura 1b). A produção das mudas de cana-de-açúcar (Figura 1a) consistiu na coleta de plantas adultas no campo e a posterior retirada dos minirrebolos para formação das mudas em copos plásticos preenchidos de areia branca esterilizada. A irrigação foi feita diariamente durante o período de formação das mudas com auxílio de regador simples. Ao final do transplântio, cada parcela experimental foi representada por um vaso com uma muda transplantada.

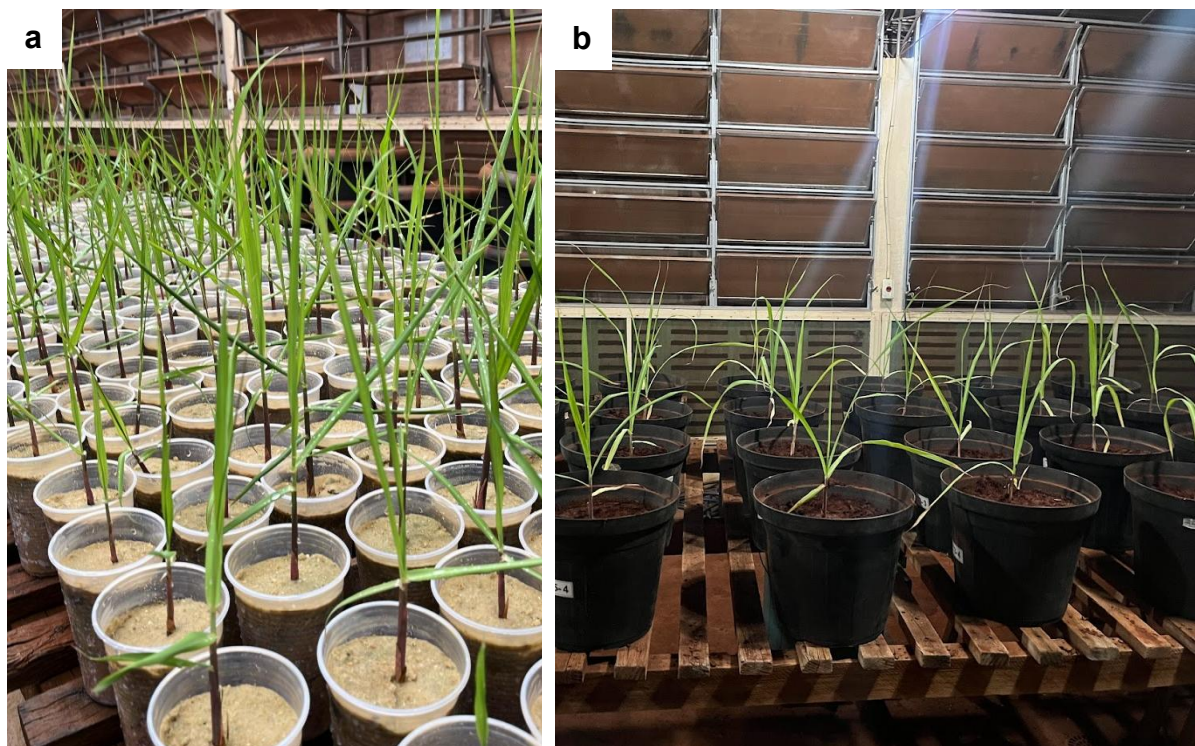


Figura 1. Produção (a) e Transplântio (b) das mudas de cana-de-açúcar em casa de vegetação.

Durante a condução do experimento com as plantas, a irrigação foi realizada de forma similar ao período de incubação dos resíduos nos vasos. Ademais, durante este período não foi realizada a aplicação de fertilizantes minerais no solo, com o objetivo de verificar o comportamento de cada resíduo na fertilidade e sua contribuição para o desenvolvimento das plantas e acúmulo de nutrientes. A coleta das plantas para avaliação ocorreu aos 120 dias após o transplântio.

3.5. Avaliações experimentais

3.5.1. Fertilidade do solo

Para avaliação da fertilidade do solo, foi realizada a coleta de solo após o período de incubação dos resíduos nos tratamentos e após homogeneização do solo. Posteriormente, as amostras de solo coletadas foram previamente secas em temperatura ambiente e passadas em peneira de 2 mm, seguindo as instruções e metodologias descritas em Raij et al. (2001). Assim, foram determinados atributos químicos do solo como o pH, H+Al, MOS, bem como os teores de P, K, Ca, Mg e S.

3.5.2. Acúmulo de nutrientes nas plantas

Para a avaliação do acúmulo de nutrientes, utilizou-se o material da parte aérea colhido no final do cultivo, o qual foi moído (folhas e colmos) para realização das análises químicas dos teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) acumulados na planta, seguindo a metodologia descrita por Bataglia et al. (1983).

3.5.3. Resposta microbiana e atividade enzimática

A atividade enzimática foi medida por meio da análise das enzimas fosfatase ácida, arilsulfatase e β -glicosidase seguindo a metodologia de Tabatabai (1994). Além disso, também foi determinada a RBS (Figura 2), seguindo a metodologia descrita por Alef e Nannipieri (1995).

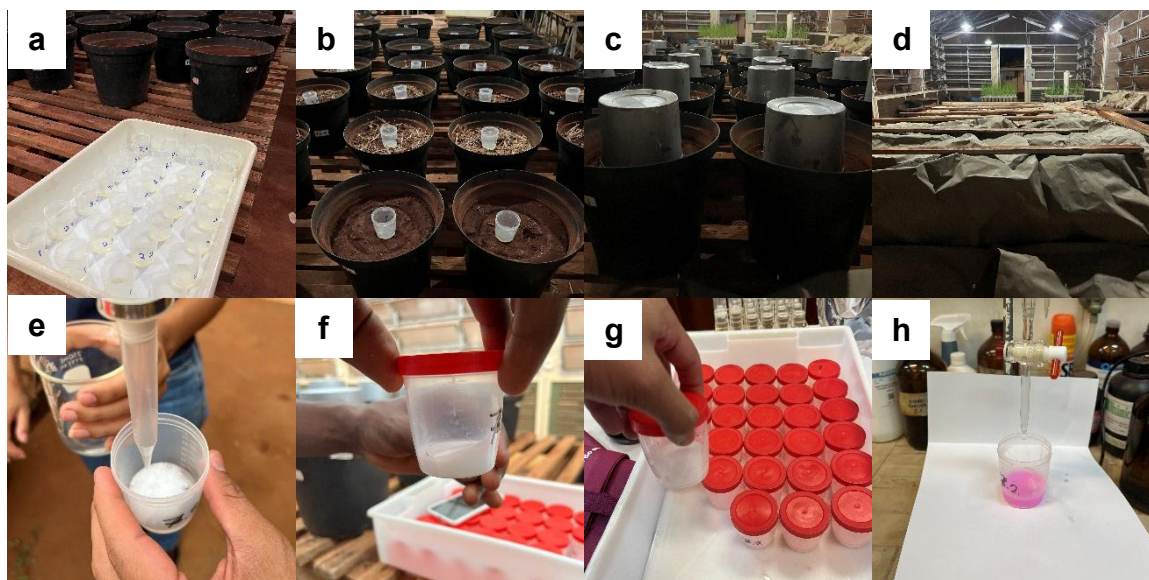


Figura 2. Análise da respiração basal do solo (RBS) para determinação da atividade microbiana. Inicialmente, preparou-se a solução com hidróxido de sódio (a), posteriormente foram acondicionadas sem tampas nos vasos (b), posteriormente, cobriu-se com potes a fim de isolar a solução na área do vaso (c,d) e, após uma semana de incubação, pipetou-se cloreto de bário na solução (e,f,g) para posterior titulação em laboratório com ácido clorídrico (h).

3.5.4. Biomassa das plantas

A avaliação da biomassa foi realizada ao final do experimento e consistiu na determinação da massa seca de folhas (MSF), colmo (MSC) e a soma destes para estimativa da massa total da parte aérea (MSPA). Para isso, as plantas foram desbastadas e separadas em folhas e colmo para posterior secagem em estufa até peso constante (60-70 °C) e, por fim, pesadas em balança de precisão.

3.6. Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos à análise de normalidade e homogeneidade e homoscedasticidade, pelos métodos de Shapiro-wilk e Levene, para verificar a adequação dos dados às premissas exigidas pelos testes estatísticos aplicados, como a ANOVA, garantindo a validade e a confiabilidade das comparações entre os tratamentos. A seguir os dados foram submetidos à análise estatística descritiva para obter valores tais como médias, desvio padrão e erro padrão da média. Assim, os dados foram analisados por meio da ANOVA (Teste F) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Para a realização dos testes estatísticos e preparação dos gráficos foi utilizada a linguagem de programação Python.

4. RESULTADOS

4.1. Fertilidade do solo

4.1.1. pH, acidez potencial e matéria orgânica do solo

Ao avaliar o pH do solo (Figura 3a), foram observados valores menores no tratamento controle (4,5), em comparação com todos os tratamentos que receberam resíduos (ST, B e BA). No entanto, não houve diferença entre os tratamentos que receberam os resíduos, com os valores de pH variando de 4,64 a 4,71.

Quanto aos resultados de H + Al no solo (Figura 3b), um indicador de acidez potencial do solo, o tratamento controle apresentou o maior valor de H + Al. Todos os tratamentos com resíduos reduziram o H + Al no solo, porém o tratamento com aplicação total de cinzas de biomassa (100% BA) não diferiu do controle e dos outros tratamentos com aplicação de resíduos. Ademais, a redução nos valores de H + Al foi similar entre os tratamentos que receberam palha e sua transformação em biochar, sugerindo diminuição mais efetiva da acidez quando há aplicação destes resíduos.

A MOS foi medida para avaliar os efeitos dos tratamentos sobre o carbono orgânico (Figura 3c). Os tratamentos controle e a queima total da palha (100% BA) apresentaram os menores valores de MOS (25 g dm^{-3}), o que indica para o tratamento com cinzas que a queima total da palha resultou em menor aporte de matéria orgânica ao solo, enquanto os tratamentos com a palha e sua transformação em biochar aumentaram o teor de MOS, alcançando valores entre 26 e 28 g dm^{-3} , com destaque ao tratamento com transformação de 25% da palha em biochar (75% ST 25% B). Todavia, foi possível notar que a maior transformação de palha em biochar (25% ST

75% B e 100% B) apresentou tendência de diminuição do teor da MOS, sugerindo que a adição de biochar, apesar de seu potencial de favorecer a matéria orgânica, pode ter um efeito moderado quando aplicado em maior proporção.

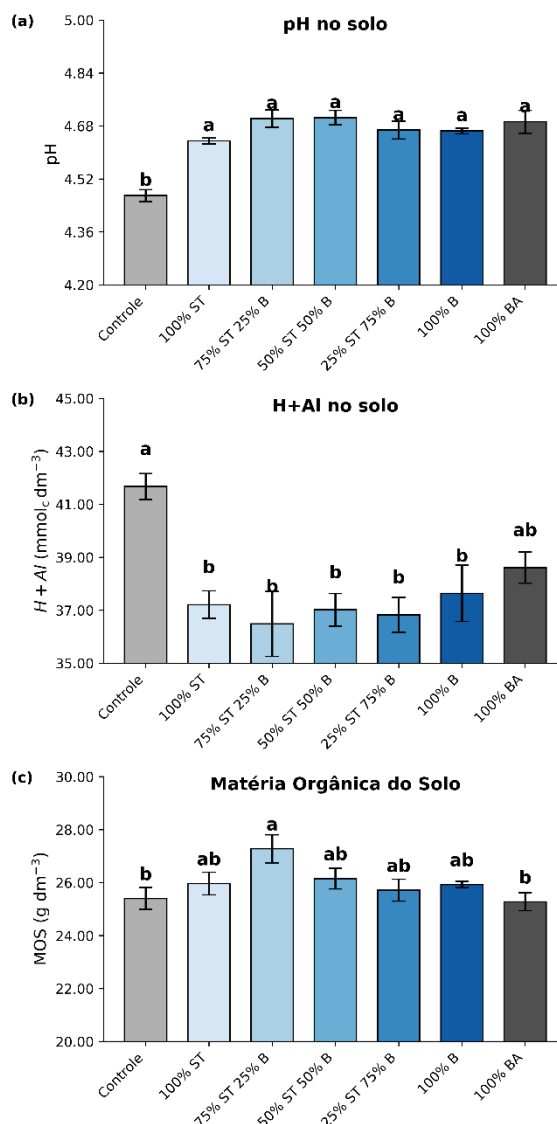


Figura 3. Efeitos de diferentes tratamentos de resíduos de cana-de-açúcar sobre o pH (a), H + Al (b), e MOS (c), para sete tratamentos: Controle, 100% ST, 75% ST 25% B, 50% ST 50% B, 25% ST 75% B, 100% B, e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas.

4.1.2. Bases trocáveis

Em relação ao teor de K no solo, observou-se que o tratamento controle apresentou a menor concentração de K ($4,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Figura 4a). Por outro lado, a transformação total da palha em biochar (100% B) resultou na maior concentração

de K ($6,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), em comparação ao controle, porém não diferindo dos outros tratamentos. A aplicação total da palha (100% ST) também resultou em aumento na concentração de K, mas sem diferença em relação aos tratamentos que retratam sua transformação parcial em biochar (75% ST 25% B, 50% ST 50% B e 25% ST 75% B) ou sua transformação total em cinzas de biomassa (100% BA). Estes últimos apresentaram concentrações intermediárias de K, entre $5,0$ e $5,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, e não diferiram entre si.

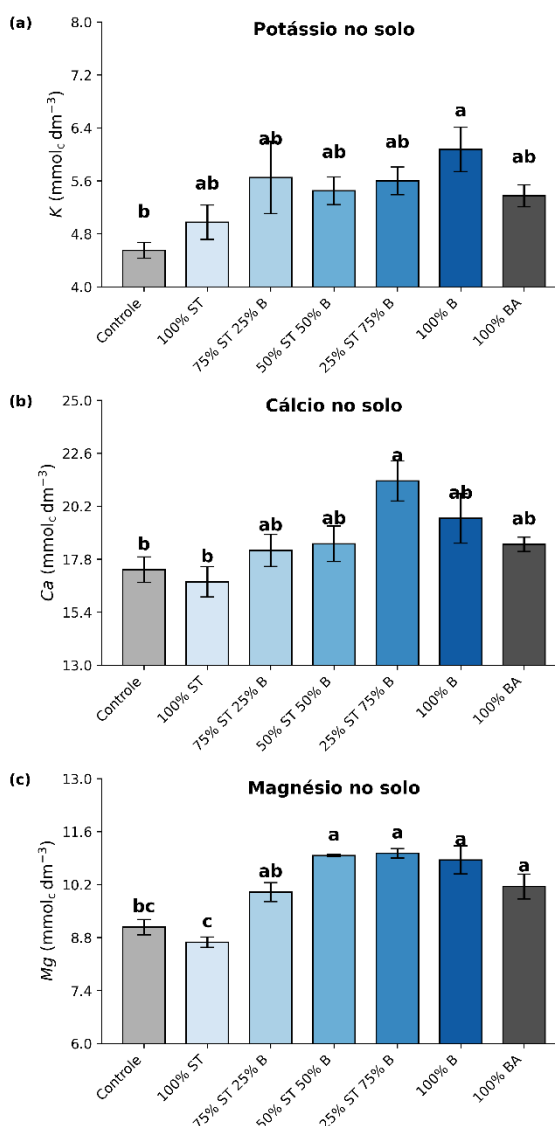


Figura 4. Efeito de diferentes tratamentos com resíduos de cana-de-açúcar nas concentrações de potássio (K, a), cálcio (Ca, b) e magnésio (Mg, c), para sete tratamentos: Controle, 100% ST, 75% ST 25% B, 50% ST 50% B, 25% ST 75% B, 100% B, e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas.

Em relação ao teor de Ca no solo, o tratamento 25% ST 75% B apresentou o maior valor, alcançando cerca de $22,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 4b), em relação ao controle

e ao tratamento com aplicação total do material original (100% ST). Vale ressaltar que o tratamento com a transformação total do material original em biochar apresentou valor mais próximo do melhor tratamento. Ademais, os tratamentos controle, 100% BA e 100% ST, bem como os tratamentos com menor percentual de transformação da palha em biochar apresentaram valores de Ca variando de 17,0 a 19,0 mmol_c dm⁻³, sem diferenças entre si.

Para o Mg no solo, foi observado que a transformação gradual da palha em biochar (75% ST 25% B, 50% ST 50% B, 25% ST 75% B e 100% B) e em cinzas (100% BA) proporcionou maiores concentrações, com valores variando entre 10,0 e 11,1 mmol_c dm⁻³ (Figura 4c). O tratamento controle apresentou concentração de Mg de 9,1 mmol_c dm⁻³, enquanto o 100% ST apresentou o menor valor (8,7 mmol_c dm⁻³). O tratamento 100% BA teve valor intermediário de Mg, similar aos com maior proporção de biochar, porém com tendência moderadamente inferior, indicando que a queima da palha pode não contribuir de forma significativa para o aumento desse nutriente no solo.

4.1.3. Fósforo e enxofre no solo

Observa-se que o tratamento com transformação total da palha em biochar (100% B) promoveu o maior teor de P no solo, atingindo 60 mg dm⁻³ (Figura 5a). Esse resultado sugere que o biochar proveniente da palha de cana-de-açúcar tem alto potencial em disponibilizar P ao solo, possivelmente devido à concentração do nutriente durante o processo de pirólise. Também foi observado maior disponibilidade de P quando houve transformação total da palha em cinzas (100% BA), que alcançou teores semelhantes aos tratamentos com maior ou total transformação da palha em biochar, indicando que a queima completa da palha também pode aumentar a disponibilidade de P no solo. Os tratamentos com transformações parciais da palha em biochar (25%, 50% e 75%) apresentaram teores intermediários de P no solo, variando entre aproximadamente 49 e 53 mg dm⁻³, sem diferenciação entre si ou em relação ao controle. Já os tratamentos com 100% da palha *in natura* (100% ST), bem como o controle sem aplicação de resíduos, apresentaram os menores teores de P no solo (47 e 49 mg dm⁻³), significativamente menor do que o tratamento com transformação total em biochar, tal como o tratamento controle. Esses resultados indicam que a transformação térmica da palha, sobretudo via pirólise, favoreceu a liberação de P no solo, enquanto a aplicação da palha *in natura* apresentou menor

eficácia nesse aspecto. Para este nutriente, a magnitude da resposta parece estar diretamente associada à intensidade da transformação do resíduo, com destaque para o biochar e as cinzas.

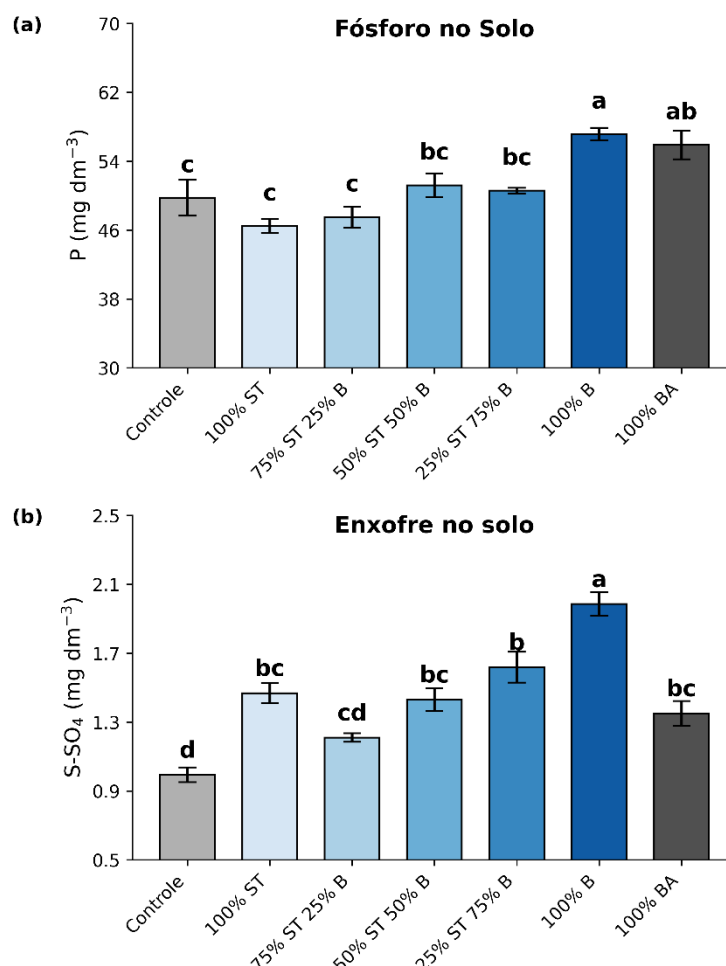


Figura 5. Efeito de diferentes tratamentos com resíduos de cana-de-açúcar na concentração de fósforo (P, a) e enxofre (S, b), para sete tratamentos: Controle, 100% ST, 75% ST 25% B, 50% ST 50% B, 25% ST 75% B, 100% B, e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas.

O tratamento controle, que não recebeu aplicação de resíduos, apresentou a menor concentração de enxofre (S) no solo, com média de $1,0 \text{ mg dm}^{-3}$ (Figura 5b). No entanto, quando ST foi aplicada de forma não modificada (100% ST), a quantidade de S no solo aumentou, apresentando média de $1,5 \text{ mg dm}^{-3}$, com aumento em relação ao controle. Nos tratamentos em que houve a transformação parcial de ST em B (75% ST 25% B, 50% ST 50% B, e 25% ST 75% B) foi observado aumento progressivo nos teores de S no solo, com médias variando entre $1,2$ e $1,6 \text{ mg dm}^{-3}$. O tratamento com transformação total da ST em B (100% B) foi o que apresentou o maior teor médio de S no solo, com $2,0 \text{ mg dm}^{-3}$. Por fim, o tratamento com cinzas

(100% BA) apresentou uma quantidade de S no solo de $1,4 \text{ mg dm}^{-3}$, o que não diferiu dos tratamentos com transformação parcial de ST em B. Em suma, esses resultados sugerem que o biochar pode ter um papel importante no aumento do teor de S disponível no solo.

4.2. Acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas

4.2.1. Macronutrientes primários

Em relação ao acúmulo de N nas plantas, os tratamentos com palha in natura (100% ST) e transformação parcial e total de palha em biochar (75% ST 25% B, 50% ST 50% B e 25% ST 75% B, 100% B) resultaram nos maiores valores de N acumulado, com valores entre 2100 e 2500 mg planta^{-1} , sendo maior do que o tratamento 100% BA (1800 mg planta^{-1}) (Figura 6a). O tratamento controle apresentou o segundo menor valor (1900 mg planta^{-1}). A comparação entre os tratamentos indicou que a transformação da palha em biochar favoreceu a acumulação de N nas plantas em contraste à transformação total em cinzas, que resultou em valores mais baixos.

Quanto ao acúmulo de P, os tratamentos 100% B e 100% BA apresentaram os maiores valores médios (103 e 106 mg planta^{-1}) (Figura 6b). Ambos foram superiores aos tratamentos 50% ST 50% B e 25% ST 75% B, que tiveram os menores acúmulos de P (73 e 66 mg planta^{-1} , respectivamente). Os tratamentos controle, 100% ST e 75% ST 25% B apresentaram valores intermediários, sem diferenças significativas em relação ao 100% B. Esses resultados indicam que tanto a aplicação total do material original quanto sua transformação em menor proporção ou total em B ou BA foram eficazes em promover o acúmulo de P nas plantas de cana-de-açúcar.

Já em relação ao acúmulo de K, o tratamento 100% B novamente apresentou o maior valor de acúmulo, com média de 1216 mg planta^{-1} (Figura 6c). Este valor foi superior ao controle e apresentou tendência de maior valor que os tratamentos com transformação parcial do material original em B ou total em BA, que apresentaram médias entre 1100 e 1170 mg planta^{-1} . O controle, que não recebeu resíduos, teve o menor acúmulo de K (980 mg planta^{-1}). Os dados indicam que as transformações parciais e total da ST em B contribuíram positivamente para o acúmulo de K nas plantas de cana-de-açúcar, diferente do controle.

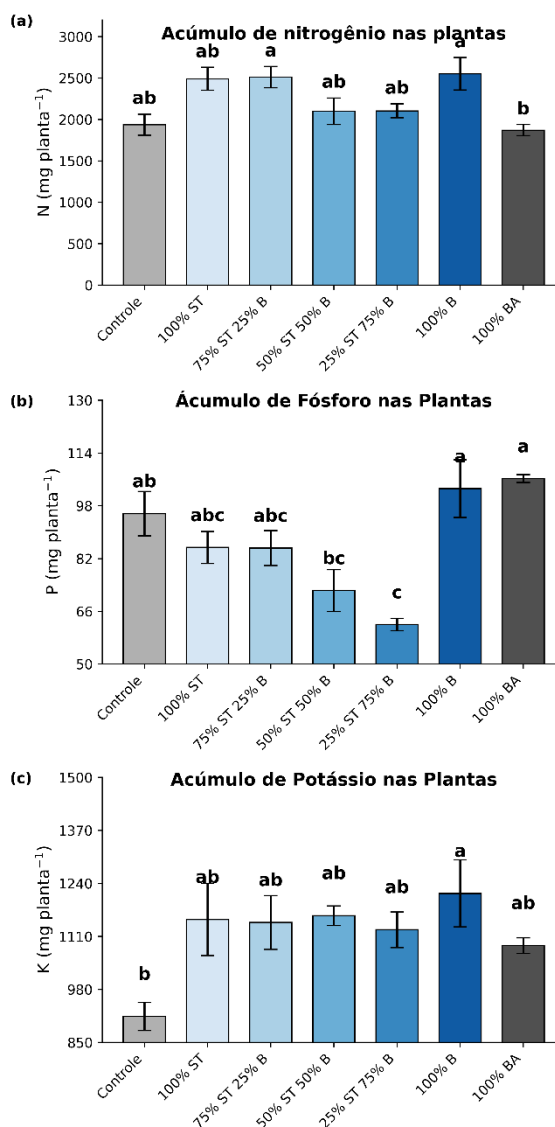


Figura 6. Acúmulo de macronutrientes primários N (a), P (b), e K (c) em plantas de cana-de-açúcar submetidas a diferentes tratamentos de substrato. Os tratamentos consistem em: Controle, 100% ST, 75% ST + 25% B, 50% ST + 50% B, 25% ST + 75% B, 100% B e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas.

4.2.2. Macronutrientes secundários

O acúmulo Ca nas plantas foi influenciado pelos tratamentos aplicados; os tratamentos controle, 100% ST, bem como a menor transformação parcial de ST em B (75% ST 25% B) apresentaram os maiores valores médios de acúmulo de Ca, superiores a 860 mg planta⁻¹, não diferindo entre si (Figura 7a). O tratamento 100% ST atingiu o maior valor absoluto de acúmulo (1018 mg planta⁻¹). Por outro lado, os tratamentos com maior transformação da ST em B, a partir de 50% (50% ST 50% B, 25% ST 75% B e 100% B) e o tratamento 100% BA, apresentaram valores de acúmulo

inferiores, variando entre 310 e 470 mg planta⁻¹. Esses resultados indicam que a maior proporção de ST não pirolizada favorece o acúmulo de Ca nas plantas, enquanto o aumento da proporção de B e a aplicação de BA reduzem a absorção desse nutriente pelas plantas.

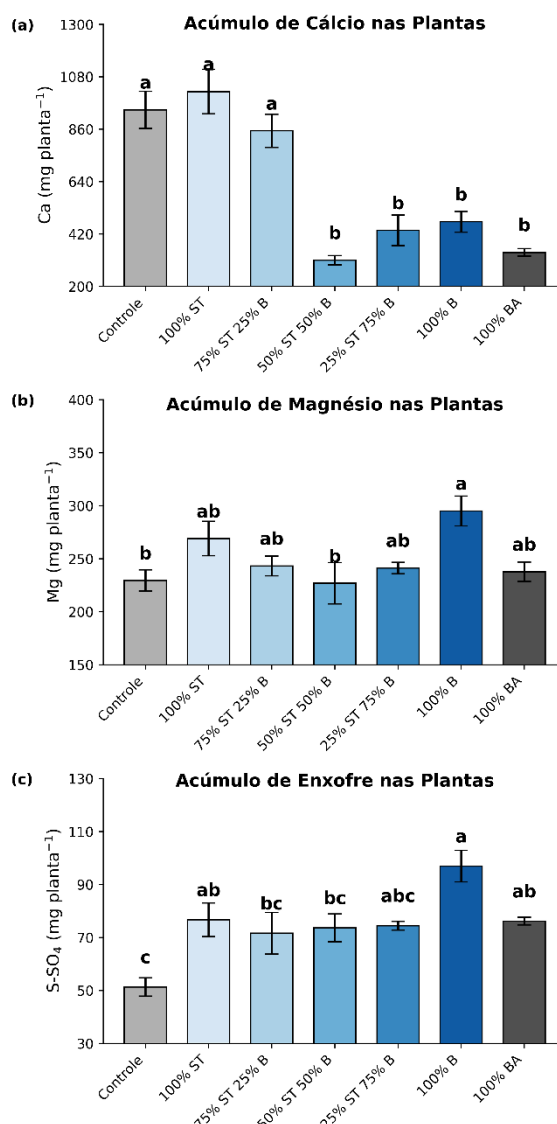


Figura 7. Acúmulo na parte aérea dos macronutrientes secundários Ca (a), Mg (b) e S (c) em plantas de cana-de-açúcar submetidas a diferentes tratamentos de substrato. Os tratamentos consistem em: Controle, 100% ST, 75% ST + 25% B, 50% ST + 50% B, 25% ST + 75% B, 100% B e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas.

Para o acúmulo de Mg nas plantas em resposta aos tratamentos, verificou-se que o tratamento com transformação total de ST em B (100% B) proporcionou o maior acúmulo de Mg (295 mg planta⁻¹) em relação aos tratamentos controle e 50% ST 50% B, que apresentaram os menores valores (~230 mg planta⁻¹) (Figura 7b). Os demais tratamentos (100% ST, 75% ST 25% B, 25% ST 75% B e 100% BA) apresentaram

médias de acúmulo de Ca nas plantas iguais estatisticamente ao tratamento 100% B (238 a 270 mg planta⁻¹). Esse resultado evidencia que a aplicação de B em maior proporção que o ST aumenta o acúmulo de Mg na planta em comparação ao solo sem resíduos ou com menores proporções de ST transformada em B.

Quanto ao comportamento do acúmulo de S nas plantas, o tratamento 100% B destacou-se novamente, com o maior acúmulo (~100 mg planta⁻¹), superior ao controle (~50 mg planta⁻¹), que apresentou o menor valor dentre todos os tratamentos (Figura 7c). Os demais tratamentos (100% ST, 75% ST 25% B, 50% ST 50% B, 25% ST 75% B e 100% BA) apresentaram valores intermediários, entre 70 e 80 mg planta⁻¹, havendo pequenas variações entre si, porém sem diferença em relação aos extremos em todos os casos.

Os resultados demonstram uma clara diferenciação nas respostas nutricionais das plantas aos diferentes resíduos aplicados. O acúmulo de Ca foi mais favorecido pela aplicação da palha *in natura*, enquanto o biochar, especialmente em sua forma pura (100% B), foi mais eficiente em promover o acúmulo de Mg e S nas plantas.

4.2.3. Micronutrientes

Ao avaliar o acúmulo de micronutrientes nas plantas, foi possível observar que não houve diferença entre os tratamentos para o acúmulo de Fe, Mn e Zn (Figuras 8a,c,d). Tais resultados indicam que o fornecimento dos resíduos, independentemente do grau de transformação (palha, biochar ou cinzas), não afetou significativamente os níveis desses micronutrientes acumulados nas plantas.

Em relação ao acúmulo de Cu, as transformações parciais diminuíram o acúmulo conforme foi aumentada a transformação de palha em biochar, sendo apenas a transformação total de palha em biochar (100% B) responsável por manter o acúmulo de Cu igual aos tratamentos controle, sem transformação da palha (100% ST) e transformação total em cinzas (Figura 8b), o que evidencia que a presença majoritária da palha, seja *in natura* ou transformada em biochar ou cinzas, tende a favorecer o acúmulo de Cu, enquanto transformações parciais em biochar reduzem sua absorção pelas plantas. ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas.

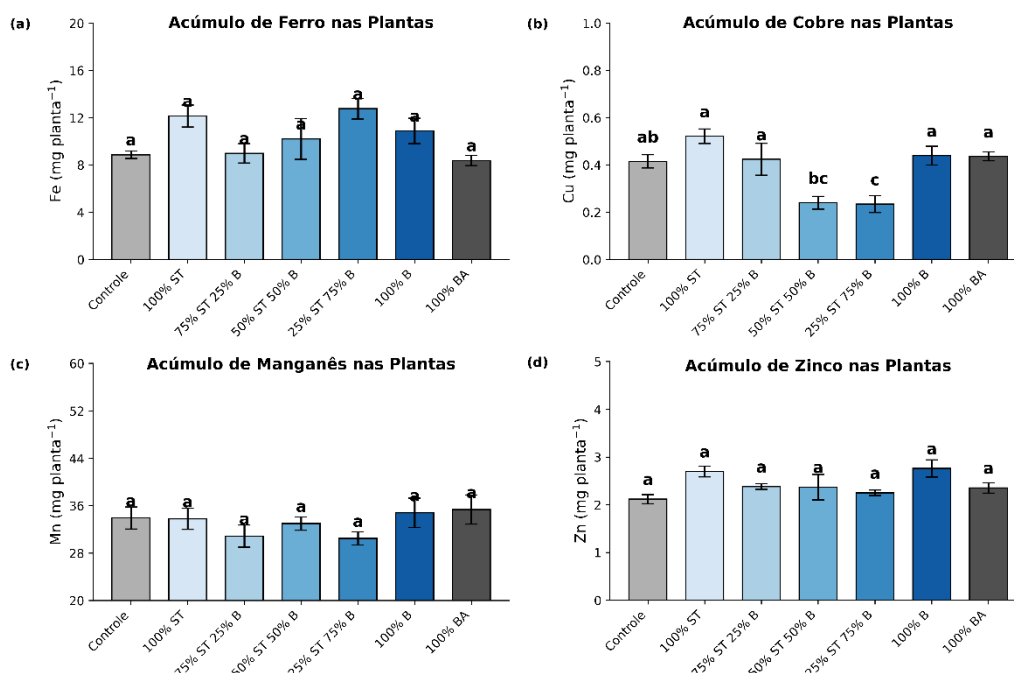


Figura 8. Acúmulo em parte aérea dos micronutrientes Fe (a), Cu (b), Mn (c) e Zn (d) em plantas de cana-de-açúcar submetidas a diferentes tratamentos de substrato. Os tratamentos consistem em: Controle, 100% ST, 75% ST + 25% B, 50% ST + 50% B, 25% ST + 75% B, 100% B e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

4.3. Resposta microbiana e atividade enzimática

4.3.1. Atividade enzimática

Para a atividade da fosfatase ácida, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos (Figura 9a). Os valores médios variaram entre aproximadamente 175 e 230 $\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$, com o tratamento controle apresentando a menor média, porém sem diferença significativa em relação aos demais. Dessa forma, não se pode afirmar que a aplicação de resíduos, em quaisquer proporções ou formas, tenha influenciado a atividade dessa enzima no solo após o período de incubação.

De maneira semelhante, a atividade da β -glicosidase também não apresentou diferença estatística significativa entre os tratamentos (Figura 9c). Os valores médios situaram-se entre 30 e 44 $\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$, sem que nenhum dos tratamentos com resíduos se destacasse em relação ao controle. Assim, não houve evidência de que a aplicação de palha, biochar ou cinzas tenha alterado a atividade da β -glicosidase no solo.

Em contraste, a atividade da arilsulfatase foi significativamente influenciada pelos tratamentos (Figura 9b). O tratamento com menor transformação de palha em biochar (75% ST 25% B) apresentou o maior valor médio ($\sim 40 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$) e foi estatisticamente superior ao tratamento controle ($\sim 30 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$). Os demais tratamentos apresentaram valores intermediários, sem diferença estatística significativa em relação ao controle ou ao tratamento de maior resposta, o que indica uma tendência de estímulo à atividade da enzima arilsulfatase, porém sem um padrão consistente com o aumento da proporção de biochar ou com a substituição por cinzas.

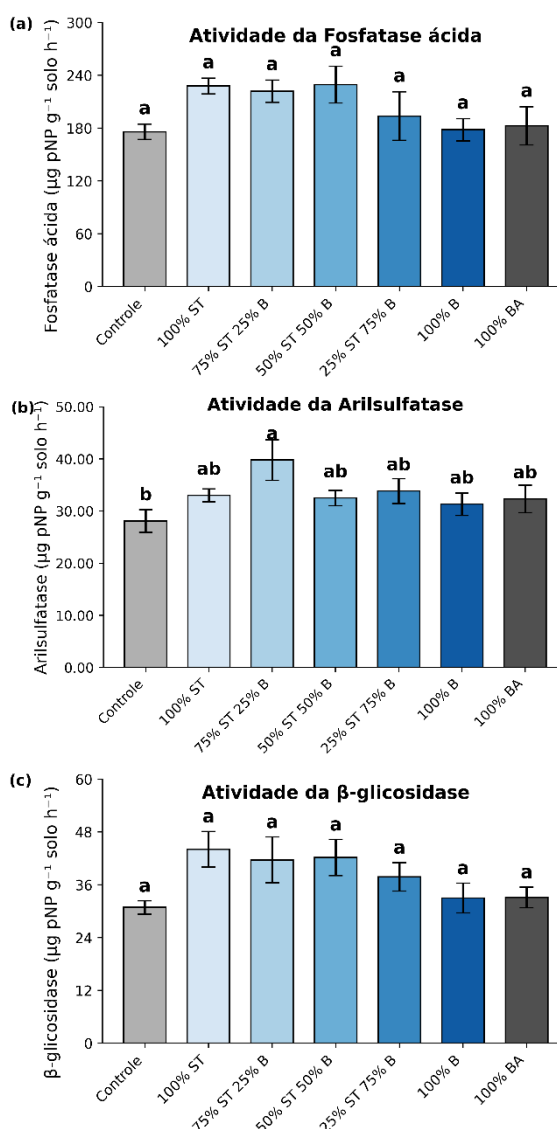


Figura 9. Efeitos de tratamentos de aplicação de resíduos de cana-de-açúcar sobre atividade enzimática do solo. Fosfatase ácida (a), Arilsulfatase (b), e β-glicosidase (c), para sete tratamentos: Controle, 100% ST, 75% ST 25% B, 50% ST 50% B, 25% ST 75% B, 100% B, e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas.

4.3.2. Respiração basal do solo (RBS)

Ao avaliar a RBS nos tratamentos com resíduos de cana-de-açúcar, foi possível observar que o tratamento com a aplicação da palha de cana-de-açúcar *in natura* (100% ST) promoveu maior RBS ($\sim 29 \text{ mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), seguido pelos tratamentos com menores transformações de palha em biochar (75% ST 25% B; 50% ST 50% B) que também apresentaram valores elevados (~ 27 e $25 \text{ mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), porém estatisticamente inferiores à palha *in natura*, mas ambos estatisticamente superiores aos demais (Figura 10). Os tratamentos com maior transformação da palha em biochar (25% ST + 75% B e 100% B), bem como os tratamentos controle e transformação total em cinzas (100% BA), apresentaram os menores valores de RBS ($\sim 21,0$ a $23 \text{ mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), sem diferenças estatísticas entre si. Esses dados sugerem que a presença predominante da palha *in natura* no solo está positivamente associada ao aumento da atividade microbiana no solo, refletida na maior liberação de CO_2 . Por outro lado, a substituição progressiva da palha por biochar, ou sua queima total para obtenção de cinzas, resultou na diminuição da RBS, indicando menor atividade microbiana.

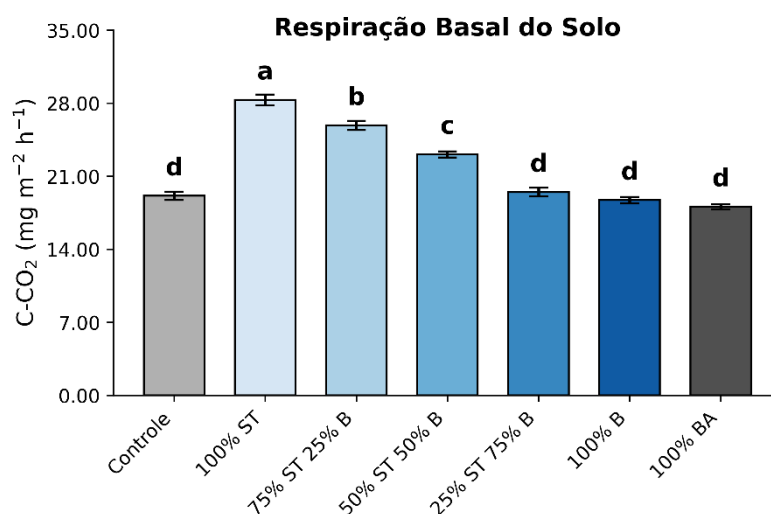


Figura 10. Efeitos de tratamentos de aplicação de resíduos de cana-de-açúcar sobre a respiração basal do solo (RBS). Controle, 100% ST, 75% ST 25% B, 50% ST 50% B, 25% ST 75% B, 100% B, e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras diferentes nas barras apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas.

4.4. Biomassa de plantas

No que diz respeito à MSF (Figura 11a), os tratamentos com transformação parcial e total da ST em B ou a transformação total em BA não refletiu diferenças significativas nas plantas. A tendência de maior média de MSF foi observada quando

houve a transformação total do material original em B (100% B), seguido pelos tratamentos com transformação parcial em B e palha *in natura*. De forma semelhante, na MSC (Figura 11b) os valores foram estatisticamente semelhantes entre os tratamentos. Por fim, para MSPA (Figura 11c), a tendência foi similar, com os tratamentos não apresentando diferenças em relação ao controle. Portanto, os dados indicam que, apesar das diferentes combinações de resíduos aplicadas ao solo, não houve efeitos significativos na biomassa das plantas de cana-de-açúcar após quatro meses de cultivo.

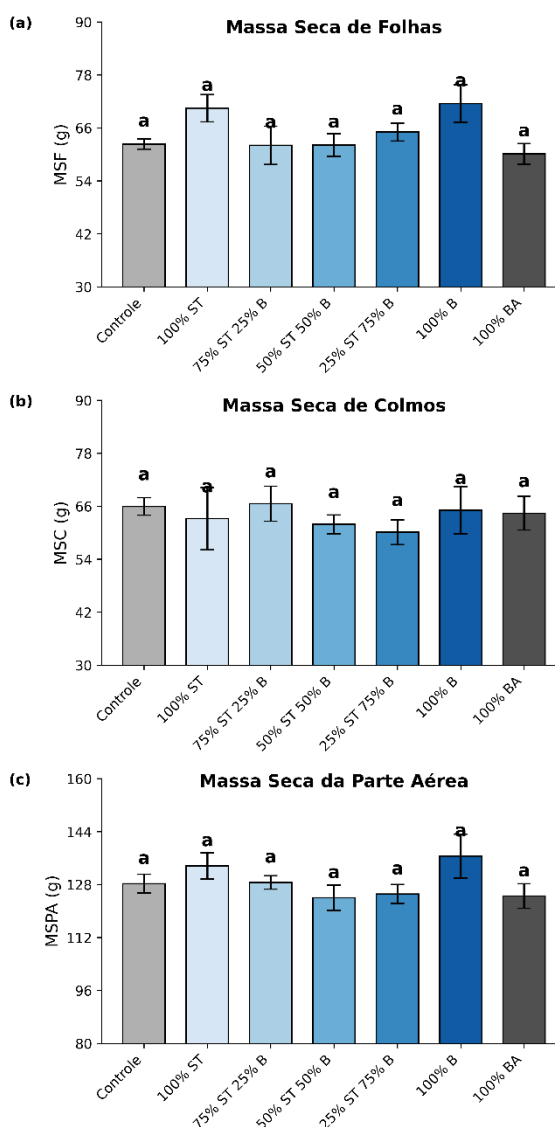


Figura 11. Efeito de diferentes tratamentos sobre a massa seca da parte aérea de planta. A figura apresenta a massa seca de folhas (MSF, a), massa seca do colmo (MSC, b) e massa seca da parte aérea (MSPA, c), para sete tratamentos: Controle, 100% ST, 75% ST + 25% B, 50% ST + 50% B, 25% ST + 75% B, 100% B, e 100% BA. As barras representam a média $\pm$ erro padrão. Médias seguidas de letras iguais nas barras não apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). ST: palha, B: Biochar e BA: Cinzas.

5. DISCUSSÃO

5.1. Fertilidade do solo

Os resultados apresentados na Figura 3 evidenciam os efeitos dos tratamentos com resíduos de cana-de-açúcar sobre as propriedades químicas do solo, especificamente pH, H + Al e MOS, após um período de incubação de 60 dias. A análise dessas variáveis é fundamental para compreender as alterações no ambiente edáfico antes do estabelecimento da cultura. Todos os tratamentos com resíduos aumentaram o pH do solo em relação ao controle, evidenciando o efeito da correção de acidez promovido pela aplicação do biochar. O biochar tem sido amplamente reconhecido por sua capacidade de aumentar o pH de solos ácidos devido à sua natureza alcalina, o que corroborou com os resultados obtidos neste estudo. Zhang et al. (2025) indicam que o biochar pode elevar o pH do solo em até 7,26 %, o que é consistente com o aumento observado neste experimento, especialmente nos tratamentos com transformação total de palha em biochar (100% B). Da mesma forma, Liu et al. (2025) demonstraram que biochar derivado da palha de cana-de-açúcar também elevou o pH de solos ácidos, corroborando as observações feitas neste estudo. Esse aumento do pH no solo pode ser atribuído à capacidade do biochar de liberar compostos alcalinos, neutralizando a acidez e proporcionando um ambiente mais favorável ao crescimento das plantas (Dai et al., 2017; Han et al., 2020; Hossain et al., 2020; Zhang et al., 2025). Em comparação com as matérias orgânicas utilizadas na sua produção, como esterco e palha, o biochar tende a apresentar uma capacidade mais eficaz de neutralizar a acidez do solo (Zhang et al., 2023).

A análise do H + Al, que reflete a acidez potencial do solo, mostrou uma redução significativa nos tratamentos com biochar e cinzas de biomassa, indicando uma neutralização da acidez. O biochar apresenta efeito tamponante, decorrente da presença de grupos funcionais e compostos alcalinos em sua estrutura, os quais reagem com íons H^+ e Al^{3+} , neutralizando sua ação ácida e contribuindo para o aumento do pH (Ferreira et al., 2024; Zhang et al., 2025). A neutralização da acidez do solo ocorre pelo consumo de H^+ e Al^{3+} pela adição de materiais alcalinos, como óxidos, carbonatos e hidróxidos, o que causa a substituição desses íons ácidos por cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) na CTC (Dai et al., 2017; Han et al., 2020). Ainda que essas alterações ocorram majoritariamente na fase sólida, o efeito é refletido na solução do solo, fase em que o pH é medido e com a qual as raízes das plantas interagem diretamente (Mosley; Rengasamy; Fitzpatrick, 2024). Ademais, a

combinação do biochar com a palha de cana-de-açúcar também demonstrou reduzir significativamente a acidez potencial, o que pode ser atribuído à liberação de compostos alcalinos e ao aumento da MOS (Hossain et al., 2020).

Em relação à MOS, os tratamentos com palha, especialmente quando combinados com biochar, apresentaram os maiores valores em comparação com o controle. O biochar, por sua estrutura porosa, tem a capacidade de reter carbono e promover a atividade microbiana, contribuindo para o aumento do teor da MOS (Hossain et al., 2020). Bai et al. (2025), ao realizarem experimento de campo em um sistema de trigo-milho com palha e biochar, confirmaram que a adição de biochar pode aumentar o carbono orgânico em solos agrícolas, especialmente quando a proporção do biochar é equilibrada com resíduos orgânicos, como a palha. No entanto, os tratamentos que utilizaram apenas cinzas de biomassa (100% BA) não apresentaram aumento do teor da MOS, o que pode ser explicado pela natureza inorgânica das cinzas, que, embora ricas em nutrientes (Pastuszczyk; Stanek-Tarkowska; Kačániová, 2022; Quirantes et al., 2016; Stanek-Tarkowska et al., 2022), não contribuem diretamente para o aumento do teor de carbono orgânico do solo. Błońska et al. (2023), ao verificarem como as cinzas de madeira afetam as propriedades básicas dos solos destacaram que, embora as cinzas de biomassa possam aumentar o pH e fornecer nutrientes, seu efeito no aumento do teor da MOS é limitado, sendo necessário grandes quantidades para melhor efeito no carbono orgânico do solo. Esses achados estão de acordo com estudos recentes sobre o uso de resíduos agrícolas para melhorar a qualidade do solo (Błońska et al., 2023; Stanek-Tarkowska et al., 2022; Zhao et al., 2022). Dessa forma, estudos demonstraram que a aplicação de biochar derivado de resíduos agrícolas, além de reduzir a acidez potencial e elevar o valor do pH, também favorece o conteúdo de carbono orgânico (Antonangelo; Sun; Eufrade-Junior, 2025; Liu et al., 2025a; Manirakiza; Gagnon; Ziadi, 2025). Ademais, estudo realizado por Ighalo et al. (2025) também confirma que a combinação de biochar com resíduos orgânicos, como palha, melhora tanto as propriedades químicas do solo quanto a atividade microbiológica, resultando em aumento na MOS. Vale destacar ainda que, no presente estudo, o período de incorporação relativamente curto dos resíduos pode ter sido insuficiente para concluir acerca dos efeitos do biochar na MOS.

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a aplicação de resíduos de cana-de-açúcar ao solo (ST, B e BA) teve efeito na disponibilidade de K, Ca e Mg no

solo, antes da instalação da cultura. Neste trabalho, o tratamento 100% B resultou na maior concentração de K no solo, o que é consistente com a literatura que descreve o efeito positivo do biochar sobre a disponibilidade de K (Bilias et al., 2023; Błońska et al., 2023). O biochar pode liberar K lentamente no solo devido à sua alta capacidade de retenção de nutrientes e sua interação com o sistema de troca catiônica do solo (Bilias et al., 2023; Kabir; Kim; Kwon, 2023). Portanto, o aumento nas concentrações de K nos tratamentos com transformação gradual de palha em biochar pode ser atribuído à liberação gradual de nutrientes da palha, combinado ao efeito de retenção do biochar. Outros estudos sugerem comportamento similar (Bilias et al., 2023; Hien et al., 2021; Kabir; Kim; Kwon, 2023), onde a aplicação de biochar mostrou aumento significativo na retenção de K no solo, devido à sua porosidade e, consequentemente, à capacidade de reter íons de K nos poros, evitando a lixiviação. O tratamento com cinzas de biomassa (100% BA) demonstrou um efeito relevante sobre a disponibilidade de K, o que pode ser explicado pela natureza inorgânica das cinzas, onde compostos inorgânicos como óxidos e carbonatos não são tão facilmente absorvidos pelas plantas quanto o K solúvel (Bhandari et al., 2024). Por isso, embora as cinzas contenham K, este elemento está frequentemente presente em formas menos disponíveis às plantas, o que limita sua eficácia em aumentar os níveis de K no solo (Kameyama; Kubota; Iwata, 2024). As cinzas de biomassa podem melhorar o pH do solo, mas sua contribuição direta para a disponibilidade de K é limitada, como apontado por estudos que observaram que a aplicação de cinzas pode aumentar o pH sem proporcionar aumento significativo na disponibilidade de nutrientes como o K (Błońska et al., 2023; Gahane; Mandavgane, 2024).

No caso do Ca, os maiores valores de disponibilidade foram observados nos tratamentos com maior proporção de biochar, com valores significativamente maiores do que os tratamentos com palha. A maior concentração de Ca no solo após a aplicação de biochar pode ser explicada pela liberação gradual de nutrientes presentes no biochar (Khan et al., 2024), além do efeito de elevação do pH, que pode ter aumentado a solubilidade de certos cátions em relação ao controle, como o Ca. O biochar não somente aumenta a disponibilidade de Ca, mas também melhora as características do solo ao favorecer a estrutura do solo, tornando-o mais favorável à retenção de nutrientes e favorecendo indiretamente a troca catiônica (Khan et al., 2024). O efeito positivo do biochar sobre o Ca foi também relatado por outros estudos que encontraram aumentos significativos dos teores de Ca nos solos tratados com

biochar derivado de resíduos agrícolas (Lentz; Ippolito, 2012; Steiner et al., 2007). Os tratamentos com palha, tanto *in natura* quanto transformada em biochar, apresentaram concentrações de Ca mais elevadas, o que sugere que a palha pode fornecer Ca ao solo, mas de forma menos eficiente do que sua transformação parcial ou total em biochar. Ademais, a decomposição da palha no solo libera nutrientes como o Ca, mas a quantidade liberada é dependente do tipo de material e do tempo de decomposição (Ninkuu et al., 2025), o que pode justificar os valores moderados observados neste estudo.

Para o Mg, os resultados mostraram que os tratamentos com maior proporção de palha convertida em biochar tiveram as maiores disponibilidades do nutriente, como também o tratamento com cinzas e as proporções de palha e biochar com maior quantidade do material original. Esse aumento no ocasionado pelo biochar pode ser atribuído à ação deste resíduo na melhoria da eficiência na retenção de íons, que resulta em maior concentração de cátions como o Mg. Isso está em linha com estudos de Hu et al. (2023), que, ao avaliarem o efeito do biochar de casca de cítricos modificado com Mg sobre pomares cítricos, observaram que a aplicação do biochar pode aumentar a retenção de Mg no solo, melhorando sua disponibilidade para as plantas. Por outro lado, os tratamentos com cinzas de biomassa mostraram tendência de menores valores de Mg, apesar de não haver diferença entre os tratamentos melhores, mas que sugeriu que a queima de palha resultou em um aumento no pH do solo, mas não forneceu Mg de forma eficiente.

Os tratamentos com transformação total da palha em biochar e em cinzas (100 % B; 100 % BA) demonstraram potencial de aumento da disponibilidade de P no solo comparados ao controle e à palha *in natura*. Este comportamento está em consonância com achados científicos que relataram aumento expressivo do teor de P disponível em solos submetidos à aplicação do biochar, atribuída à liberação de P residual do material após pirólise (Ahmed et al., 2024; Amin; Mihoub, 2021; Borges et al., 2020; Carneiro et al., 2021; Dombinov et al., 2022; Gupta et al., 2024; Kameyama; Kubota; Iwata, 2024; Khan et al., 2025; Yang; Lu, 2022; Zenero et al., 2021; Zhang et al., 2025). Adicionalmente, estudo conduzido por Borges et al. (2020) reforça que biochars derivados de biomassa de cana aumentam a fração de P disponível em até 23 %, resultado justificado pela composição mineral formada durante a pirólise. Portanto, uma possível maior concentração de formas solúveis de P no biochar explicaria o desempenho superior observado no presente trabalho. No trabalho, o

tratamento com cinzas (100 % BA) apresentou desempenho comparável ao biochar. Essa semelhança pode ser explicada pelo elevado teor de nutrientes solúveis que permanecem após a combustão da biomassa, como indicado por Dombinov et al. (2022), que demonstraram a cinza de biomassa de cana como fonte de nutrientes prontamente disponíveis, sobretudo de P e K, em solos tropicais. Já os tratamentos com palha *in natura* e controle mantiveram níveis inferiores de P, evidenciando que a matéria orgânica não pirólisada libera P de forma lenta e/ou em formas menos disponíveis. Esse resultado pode ser corroborado por estudos recentes, que observaram que o biochar melhora a ciclagem de nutrientes via adsorção e troca catiônica, mecanismos pouco evidentes na palha bruta (Chen et al., 2022). Os níveis intermediários observados em tratamentos com aplicações parciais de biochar (25–75 %) indicam que há uma relação quase linear entre o aporte de biochar e a disponibilidade de P, sugerindo que o efeito é dependente da dose aplicada. A literatura aponta que aplicações elevadas de biochar promovem maiores aumentos na fração solúvel de P, via incremento de sítios ativos e da capacidade de retenção catiônica (Khan et al., 2025).

Também foram observadas, após incubação dos resíduos de cana-de-açúcar, variações significativas no teor de S entre os tratamentos aplicados. O tratamento com 100% de biochar apresentou o maior teor de S, seguido pelas transformações parciais de palha em biochar, e o tratamento com cinzas de biomassa e 100% palha. Estudos recentes corroboram esses achados, indicando que o biochar pode aumentar a disponibilidade de S no solo (Amin; Mihoub, 2021; Gamal; Khalafallah; Kafrawy, 2020; Khater et al., 2024; Taheri et al., 2024; Zhang et al., 2017). Por exemplo, estudo de Gamal et al. (2020) observou que a aplicação do biochar aumentou a disponibilidade de nutrientes, incluindo S, em solos de diferentes texturas. Além disso, estudo de Khater et al. (2024) observou que o biochar derivado de resíduos de cana-de-açúcar apresentou altos teores de S, especialmente quando produzido a temperaturas mais elevadas. O aumento do S no solo pode ser atribuído à presença de compostos sulfurosos no biochar, que podem ser liberados lentamente durante a incubação, a depender das condições em que o solo se encontra, tais como sulfetos, sulfatos, organossulfurados (tióis e dissulfetos), compostos de enxofre volátil e ácido sulfúrico (Amin; Mihoub, 2021; Taheri et al., 2024; Zhang et al., 2017). Além disso, a alta área superficial e a porosidade do biochar favorecem a adsorção e liberação controlada de nutrientes, incluindo o S (Khan et al., 2024; Khater et al., 2024). Por outro lado, o

tratamento com cinzas também apresentou aumento no teor de S, possivelmente devido à presença de compostos solúveis de S nas cinzas. No entanto, a ausência de biochar pode limitar a liberação controlada desses compostos. Em contraste, o controle, sem aplicação de resíduos, apresentou o menor teor de S, indicando que a menor quantidade de matéria orgânica resultou em menor disponibilidade de S no solo.

Os resultados deste estudo sugerem que o biochar tem potencial para favorecer os níveis de K, Ca, Mg, P e S no solo, devido à sua alta capacidade de retenção de nutrientes em seus poros e sua liberação gradual de nutrientes, contribuindo para a melhoria da fertilidade e potencialmente beneficiando o crescimento das plantas em cultivos subsequentes. Esses achados são consistentes com a literatura mais recente (Amin; Mihoub, 2021; Taheri et al., 2024; Zhang et al., 2017), que destaca o biochar como melhorador do solo, principalmente em solos com baixa fertilidade, enquanto as cinzas de biomassa devem ser usadas com cautela, considerando seus efeitos limitados sobre a disponibilidade de nutrientes às plantas.

5.2. Acúmulo de nutrientes nas plantas

Os resultados obtidos no presente estudo indicam que a aplicação de palha não pirolizada e sua transformação parcial ou total derivado da pirólise da palha de cana-de-açúcar promoveu aumento no acúmulo de nutrientes (N, P, K, Mg e S) nas plantas de cana-de-açúcar, em comparação aos controle. Esses resultados estão alinhados com diversas pesquisas recentes que evidenciam os benefícios agrônômicos do biochar, especialmente em solos tropicais e para culturas como a cana-de-açúcar (Amin; Mihoub, 2021; Kabir; Kim; Kwon, 2023; Zhang et al., 2017; Zubairu et al., 2023).

No que tange ao N nas plantas, Chen et al. (2022), observaram um aumento significativo na acumulação de N em variedades de cana-de-açúcar sob aplicação de biochar e diferentes concentrações de N, especialmente nas fases de perfilhamento e alongamento. Este efeito pode ser atribuído à capacidade do biochar de melhorar a estrutura do solo, aumentar o pH e facilitar a liberação de N disponível, além de reduzir perdas, seja por lixiviação ou volatilização (Hailegnaw et al., 2019; Hossain et al., 2020; Zheng et al., 2022).

Em relação ao P, a aplicação de biochar também resultou em maior acúmulo nas plantas. Estudos indicam que o biochar pode aumentar a disponibilidade de P no

solo (Figura 6a), especialmente quando derivado de fontes ricas nesse nutriente (Tabela 2), como esterco de aves, devido à sua capacidade de adsorver e liberar P de forma mais eficiente (Kameyama; Kubota; Iwata, 2024; Zhang et al., 2025). Além disso, a estrutura porosa do biochar pode melhorar a interação entre as raízes e o P adsorvido, facilitando sua absorção pelas plantas (Ahmed et al., 2024; Zhang et al., 2025). No entanto, embora se esperasse aumento progressivo no acúmulo de P nas plantas com o aumento da transformação de palha em biochar, os dados deste estudo indicaram um comportamento não linear. Nas proporções intermediárias de transformação de palha em biochar, observou-se uma redução no acúmulo de P nas plantas. Assim, tal resultado indica que há a necessidade de avaliar de forma isolada os efeitos do biochar no acúmulo de P nas plantas, a fim de melhor elucidação do efeito ocorrido. As cinzas de biomassa apresentam natureza inorgânica, apesar de apresentarem formas de P que podem ser mais solúveis, ainda assim proporcionaram um acúmulo de P, provavelmente devido à sua composição e efeitos no solo (Dombinov et al., 2022).

Quanto ao K, a literatura apresenta resultados variados. Alguns estudos relatam que o biochar pode aumentar a disponibilidade de K no solo, enquanto outros observam efeitos neutros ou até negativos, dependendo das características do biochar e do solo em questão (Aluthge et al., 2025; Biliias et al., 2023; Gahane; Mandavgane, 2024; Kameyama; Kubota; Iwata, 2024; Xia et al., 2024). No entanto, no presente estudo, observou-se aumento significativo no acúmulo de K nas plantas tratadas com a palha e sua transformação parcial ou total em biochar, o que pode ser atribuído à sua capacidade de melhorar a estrutura do solo e aumentar a retenção de nutrientes, além de fornecer K diretamente às plantas (Babar et al., 2025). É importante destacar que a eficácia do biochar na promoção do acúmulo de nutrientes depende de diversos fatores, como a matéria-prima utilizada, a temperatura de pirólise, a dose aplicada e as características do solo (Biliias et al., 2023; Khater et al., 2024; Pires et al., 2018). Em comparação com os tratamentos que utilizaram apenas a palha não pirolizada ou cinzas da biomassa, o biochar apresentou vantagens significativas. A palha não pirolizada pode decompor-se mais rapidamente em comparação com as demais formas (Ninkuu et al., 2025), liberando nutrientes de forma menos controlada, enquanto as cinzas de biomassa podem ter alta concentração de elementos como K, mas sua solubilidade e disponibilidade para as plantas podem ser limitadas (Alkharabsheh et al., 2021). O biochar, por sua vez,

oferece uma liberação mais gradual e controlada de nutrientes, além de melhorar as propriedades físicas e químicas do solo (Antonangelo; Sun; Eufrade-Junior, 2025; Hossain et al., 2020; Li et al., 2024; Liu et al., 2025; Zhang et al., 2025). Estudos como o de Aluthge et al. (2025) demonstraram que biochar derivado de biomassa de cana-de-açúcar, quando aplicado ao solo, aumentou significativamente os níveis de carbono orgânico, P disponível e K trocável, além de melhorar a capacidade de retenção de água do solo. Essas melhorias nas propriedades do solo podem ter contribuído para o aumento da disponibilidade de nutrientes para as plantas no presente estudo. Além disso, a aplicação de biochar pode ter favorecido a atividade microbiana do solo (Ighalo et al., 2025), promovendo a mineralização de nutrientes e a ciclagem de elementos essenciais ao crescimento das plantas.

Em estudo que investigou os efeitos do biochar na cana-de-açúcar sob estresse salino, Vu et al. (2023) observaram que a aplicação deste condicionador aumentou a eficiência do uso de nutrientes e a biomassa das plantas, sugerindo que o biochar pode melhorar a disponibilidade de nutrientes mesmo em condições adversas. Esse efeito pode ser atribuído à capacidade do biochar de adsorver nutrientes e liberá-los lentamente para as plantas, além de melhorar a estrutura do solo e a atividade microbiana. No entanto, é importante lembrar que a eficácia do biochar pode variar dependendo de fatores como a origem da biomassa, as condições de pirólise e as características do solo. Por exemplo, a pesquisa de Kameyama et al. (2012) indicou que a aplicação de biochar derivado de bagaço de cana-de-açúcar em misturas de substrato para plantas de vasos resultou em maior lixiviação de nitrato, sugerindo que a liberação de nutrientes pode ser influenciada pelo biochar e pelas condições de cultivo. Em contraste, o tratamento com cinzas de biomassa apresentou os menores valores de acúmulo de nutrientes. Assim, a aplicação excessiva de cinzas pode alterar o pH do solo, afetando negativamente a disponibilidade de nutrientes e a atividade microbiana, o que pode impactar no acúmulo de nutrientes nas plantas.

Em relação ao acúmulo de Ca nas plantas, o controle e os tratamentos com maior proporção de palha *in natura* (100% ST e 75% ST 25% B) apresentaram os maiores valores de acúmulo de Ca nas plantas, enquanto os tratamentos onde houve maior transformação de palha em biochar e cinzas de biomassa resultaram em menores acúmulos. Por outro lado, o tratamento com transformação total de palha em biochar resultou nos maiores acúmulos de Mg e S nas plantas. Portanto, o maior acúmulo de Ca nos tratamentos com palha *in natura* pode ser atribuída à liberação

gradual de nutrientes durante a decomposição de resíduos orgânicos, proporcionando uma fonte contínua de Ca para as plantas. Além disso, a palha pode melhorar a estrutura do solo e a retenção de umidade, fatores que favorecem a absorção de nutrientes (Wei et al., 2025). Em contraste, o biochar, especialmente quando aplicado em maiores proporções, pode aumentar o pH do solo e alterar a dinâmica de troca catiônica (Dai et al., 2017; Huang et al., 2023; Zhang et al., 2025), afetando a disponibilidade de certos nutrientes, como o Ca. No entanto, o biochar pode ser uma fonte eficaz de Mg e S. Vale lembrar que o maior acúmulo de S se deu no tratamento com maior proporção de biochar, corroborando com a disponibilidade de S no solo, a qual também foi maior no tratamento com a totalidade da aplicação de biochar. Além disso, o biochar pode favorecer as propriedades físicas e químicas do solo, como retenção de íons e umidade, criando um ambiente mais favorável para a absorção de Mg e S pelas raízes das plantas. Esses efeitos foram observados por Aluthge et al. (2025), que relataram melhorias significativas na qualidade do solo com a aplicação de biochar derivado de biomassa de cana-de-açúcar. A aplicação de cinzas de biomassa resultou em acúmulos intermediários de Ca, Mg e S nas plantas. As cinzas podem fornecer nutrientes, mas sua eficácia depende da solubilidade dos nutrientes presentes (Pastuszcak; Stanek-Tarkowska; Kačániová, 2022). Além disso, a aplicação de cinzas pode aumentar o pH do solo, o que pode afetar a disponibilidade de certos nutrientes, como observado na figura 3a (Pastuszcak; Stanek-Tarkowska; Kačániová, 2022; Quirantes et al., 2016; Wang et al., 2024). Esses efeitos foram discutidos por Alkharabsheh et al. (2021), que destacaram os impactos do biochar na fertilidade do solo.

Os resultados deste estudo destacam a importância de considerar as características específicas dos resíduos aplicados ao solo e suas interações com as propriedades do solo ao planejar estratégias de manejo para a nutrição da cana-de-açúcar. Portanto, os resultados deste estudo corroboram a literatura existente, que destaca o potencial do biochar como uma estratégia eficaz para melhorar a nutrição das plantas e a qualidade do solo (Biliás et al., 2023; Huang et al., 2023; Kabir; Kim; Kwon, 2023; Liu et al., 2025; Zhang et al., 2025). No entanto, estudos de longo prazo são necessários para aprofundar o entendimento sobre os impactos do biochar em diferentes contextos agrícolas.

Em relação aos micronutrientes, o acúmulo de Fe, Mn e Zn nas plantas não foi alterado pelos diferentes tratamentos com palha, biochar ou cinzas neste estudo,

indicando estabilidade nutricional desses micronutrientes. Esse comportamento sugere que a aplicação desses resíduos não foi suficiente para elevar o acúmulo desses micronutrientes nas plantas até o período avaliado. Tal resultado não é seguiu a literatura, pois a aplicação de resíduos como biochar nos solos tende a favorecer a disponibilidade desses micronutrientes (Aluthge et al., 2025; Zubairu et al., 2023). Aluthge et al. (2025), em estudo avaliando a eficiência da aplicação de biochar em vasos por 90 dias, demonstraram que biochars derivados de resíduos de cana, especialmente quando produzidos a cerca de 450 °C, aumentam significativamente a disponibilidade de micronutrientes em solos cultivados com cana, elevando pH, matéria orgânica e micronutrientes. Já Mashwani et al. (2024) destacam que o biochar age como fonte de micronutrientes e melhora as propriedades físico-químicas do solo, influenciando diretamente na absorção do Fe.

Em contraste, o acúmulo de Cu apresentou sensível variação: tratamentos com transformações parciais da palha em biochar reduziram significativamente o teor de Cu acumulado pelas plantas, enquanto as transformações totais (100 % biochar e 100% BA) ou 100 % da palha *in natura* mantiveram níveis semelhantes aos do controle (Figura 8b). Esse comportamento das transformações parciais da palha em biochar pode ser explicado pela seletiva capacidade de adsorção desses resíduos (Ghassemi-Golezani; Latifi; Farhangi-Abriz, 2025). Trabalhos com diversas culturas reforçam que o biochar aplicado no solo contaminado com Cu diminuiu o Cu trocável em solo e reduziu a acumulação em plantas, sem comprometer a produtividade (Godinho et al., 2025; Guo et al., 2024; Neve et al., 2025; Yang et al., 2022). Além disso, a remoção de Cu pelo fitomonitoramento com mostarda foi intensificada em solo tratado com biochar (Abideen et al., 2023). Esse comportamento seletivo de imobilização de Cu, sem alteração em Fe, Mn e Zn, tem implicações agronômicas importantes. Em solos com teores de micronutrientes adequados, a aplicação de biochar e palha pode ser usada para controlar a disponibilidade de elementos específicos (como o Cu em excesso) sem comprometer os outros micronutrientes. Nisso, as transformações parciais parecem mais eficazes para reduzir o Cu, potencialmente por equilibrar a disponibilidade de matéria orgânica com a capacidade já comprovada de adsorção do biochar (Han et al., 2020; Manirakiza; Gagnon; Ziadi, 2025).

5.3. Resposta microbiana e atividade enzimática

A ausência de resposta significativa das atividades da fosfatase ácida e β -glicosidase aos tratamentos com resíduos de cana-de-açúcar (Figura 9a e 9c) pode estar relacionada a vários fatores. Estudos recentes reportaram aumentos médios de ~10% da atividade dessas enzimas após adições orgânicas, porém em diversos contextos experimentais (Alves et al., 2023; Lopes et al., 2021). Isso sugere que o efeito de aditivos como biochar depende fortemente das propriedades do biochar, solo, dose e tempo de incubação. Por exemplo, Lopes et al. (2021) encontraram maior atividade de β -glicosidase e fosfatase em solo cultivado com cana e acrescido com biochar de eucalipto, porém esse efeito foi reversível em doses $> 30 \text{ Mg ha}^{-1}$ ou após longo prazo. Considerando que no presente estudo os tratamentos envolveram proporções parciais de palha, biochar e cinzas por um período relativamente curto, pode ter sido insuficiente para observar diferenças estatísticas. Além disso, biochar de fontes diversas e submetidos a diferentes temperaturas de pirólise podem variar em suas propriedades químicas e físicas (área específica, funcionalidade e pH), modulando a resposta microbiana (Aluthge et al., 2025; Alves et al., 2023; Garbuz et al., 2022; Ighalo et al., 2025; Lopes et al., 2021b; Sharma et al., 2025; Xia et al., 2024; Zheng et al., 2022). Nisso, biochars com pirólise mais elevada podem até reduzir algumas atividades enzimáticas ou não promover respostas significativas. No presente estudo, a composição e o grau da pirólise do biochar (derivado de palha de cana) podem não ter sido suficientemente favoráveis à modulação da atividade dessas duas enzimas.

Em contraste, a atividade da arilsulfatase mostrou aumento significativo em todos os tratamentos exceto controle (Figura 9b), reforçando que enzimas específicas da ciclagem do S podem ser mais sensíveis à presença do biochar em conjunto com a palha. Estudos em solos com cana reportaram elevação da atividade da arilsulfatase associada ao aumento do teor de carbono microbiano e de disponibilidade de S, corroborando com os resultados encontrados no presente estudo (Azadi; Raiesi, 2021; Barbosa et al., 2024; Garbuz et al., 2022; Khadem; Besharati; Khalaj, 2019; Kracmarova-Farren et al., 2024; Lopes et al., 2021b; Wei et al., 2021; Zafeer et al., 2024).

A análise da RBS nos diferentes tratamentos com resíduos da cana-de-açúcar revelou variações significativas na atividade microbiana do solo, conforme ilustrado na Figura 10. O tratamento com palha *in natura* (100% ST) apresentou a maior taxa

da RBS, seguido pelos tratamentos com menores proporções de biochar, como 75% ST 25% B e 50% ST 50% B. Por outro lado, os tratamentos com maior proporção de biochar, como 25% ST 75% B e 100% B, bem como o tratamento da transformação total em cinzas (100% BA), apresentaram os menores valores de RBS. Estudos recentes corroboram com esses achados (Barbosa et al., 2024a; Lopes et al., 2021), indicando que a aplicação do biochar pode influenciar a atividade microbiana do solo de maneiras distintas. Por exemplo, Lopes et al. (2021) observaram que doses de biochar (20 a 30 t ha⁻¹) aumentaram a biomassa microbiana e a diversidade microbiana, enquanto doses mais altas resultaram em menor RBS, sugerindo um efeito de saturação ou inibição da atividade microbiana. Além disso, a aplicação de biochar de casca de caju aumentou a RBS, indicando uma maior atividade biológica derivada da decomposição de materiais orgânicos (Barbosa et al., 2024). Uma possível explicação para os resultados observados é o efeito priming, que descreve a aceleração ou retardamento da mineralização da MOS devido à adição do biochar (Lopes et al., 2021). O mesmo estudo destaca que doses intermediárias de biochar podem fornecer carbono lábil que estimula a atividade microbiana, enquanto doses mais altas podem saturar o solo com carbono recalcitrante, reduzindo a atividade microbiana. Além disso, a estrutura porosa do biochar pode fornecer um habitat favorável para os microrganismos, mas também pode adsorver enzimas extracelulares e compostos orgânicos, limitando a disponibilidade de substratos para a microbiota do solo (Barbosa et al., 2024). Portanto, a relação entre a aplicação de biochar e a atividade microbiana do solo é complexa e depende de fatores como a proporção de biochar, a qualidade da matéria orgânica e as características do solo (Alves et al., 2023; Garbuz et al., 2022; Lopes et al., 2021).

5.4. Biomassa de plantas

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a aplicação de resíduos provenientes da cana-de-açúcar (ST, B e BA) não promoveu diferenças significativas na produção de biomassa das plantas de cana-de-açúcar após quatro meses de cultivo. Esse resultado é relevante, especialmente considerando que a avaliação da fertilidade do solo foi realizada após o período de incubação dos resíduos, sem a presença de plantas, o que permitiu uma análise isolada dos efeitos dos resíduos no solo.

A literatura sugere que os efeitos do biochar na no desenvolvimento da planta podem ser influenciados por diversos fatores, incluindo o tipo de resíduo utilizado, a dose aplicada, as características do solo e o tempo de incubação. Por exemplo, Ferreira et al. (2024), em estudo com plantas jovens de cana-de-açúcar cultivadas com aplicação de biochar em vasos, observaram que o biochar derivado de resíduos de cana-de-açúcar aumentou a capacidade de retenção de água do solo e favoreceu o crescimento das raízes, embora os efeitos na biomassa total das plantas não tenham sido observados. Além disso, nesse mesmo estudo, a análise metabolômica das folhas indicou alterações nos perfis de aminoácidos, sugerindo que o biochar pode influenciar o metabolismo das plantas de maneiras complexas (Ferreira et al., 2024).

Zubairu et al. (2023), em revisão sobre aplicação de biochar para melhoria da fertilidade e desempenho de culturas na Nigéria, relataram melhorias na fertilidade do solo e no desempenho das culturas com a aplicação de biochar. No entanto, os efeitos variaram dependendo das características do solo e das práticas agrícolas adotadas, destacando a importância de considerar o contexto local ao avaliar os benefícios do biochar. Uma possível explicação para a ausência de efeitos significativos observados no presente estudo pode estar relacionada à natureza do solo utilizado, um latossolo vermelho, que é caracterizado por sua alta acidez e baixa fertilidade natural (Santos, 2018). Embora o biochar tenha o potencial de favorecer a fertilidade do solo, seus efeitos podem ser limitados em solos com características específicas que não favorecem a interação benéfica entre o biochar e os nutrientes do solo (Sharma et al., 2025; Tusar et al., 2023). Além disso, o tempo de incubação de 60 dias pode não ter sido suficiente para que os efeitos do biochar se manifestassem plenamente a ponto de refletirem na biomassa das plantas, especialmente em solos com baixa atividade microbiana e baixa disponibilidade de nutrientes. Portanto, os resultados deste estudo sugerem que, sob as condições experimentais avaliadas, a aplicação de biochar, palha ou cinzas de biomassa da cana-de-açúcar não resultou em melhorias na produção de biomassa da espécie. Entretanto, é importante considerar que os efeitos do biochar podem ser influenciados por uma série de fatores, incluindo as características do solo, o tipo de resíduo utilizado, a dose aplicada, o tempo de incubação e a presença de plantas.

Estudos adicionais, incluindo experimentos de campo de longa duração, são necessários para uma compreensão mais aprofundada dos potenciais benefícios do biochar na agricultura. Portanto, a incorporação do biochar ao solo pode não ser uma

solução universal para melhorar o desenvolvimento das culturas, sendo necessário um planejamento cuidadoso e uma avaliação criteriosa das condições locais antes de sua aplicação, sobretudo no que se refere à aplicabilidade do resíduo em maior escala.

6. CONCLUSÕES

A transformação da palha de cana-de-açúcar em biochar melhorou a fertilidade do solo, principalmente pela redução da acidez e pelo aumento da disponibilidade de nutrientes. Entretanto, os efeitos dependeram do grau de transformação da palha, com destaque para a transformação total em biochar no favorecimento de alguns nutrientes no solo e nas plantas.

A transformação da palha modificou o acúmulo de nutrientes nas plantas, porém sem promover aumento significativo da biomassa durante o período avaliado. A maior proporção de palha não pirolisada favoreceu o acúmulo de Ca, enquanto o biochar apresentou maior contribuição para o acúmulo de outros macronutrientes (P, K, Mg e S).

Os efeitos sobre a biologia do solo foram dependentes da forma de utilização da palha. A transformação em biochar não alterou significativamente as atividades da fosfatase ácida e da β -glicosidase, enquanto a palha in natura e as combinações com maior proporção de palha favoreceram a atividade microbiana do solo.

Assim, a hipótese foi parcialmente confirmada, uma vez que a transformação da palha em biochar favoreceu principalmente a fertilidade e a nutrição das plantas, mas não proporcionou benefícios generalizados à atividade biológica do solo ou à produção de biomassa.

7. REFERÊNCIAS

ABIDEEN, Zainul *et al.* Impact of biochar amendments on copper mobility, phytotoxicity, photosynthesis and mineral fluxes on (*Zea mays* L.) in contaminated soils. **South African Journal of Botany**, v. 158, p. 469–478, 1 jul. 2023.

AHMED, Nazir *et al.* **Optimizing the dual role of biochar for phosphorus availability and arsenic immobilization in soils.** **Science of the Total Environment** Elsevier B.V., , 20 dez. 2024.

ALEF, Kassem; NANNIPIERI, P. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. 1995.

ALKHARABSHEH, Hiba M. *et al.* **Biochar and its broad impacts in soil quality and fertility, nutrient leaching and crop productivity: A review.** *AgronomyMDPI AG*, , 1 maio 2021.

ALUTHGE, Mayuri D. *et al.* Sugarcane biomass-derived biochar for soil quality enhancement in sugarcane-growing soil. **Carbon Research**, v. 4, n. 1, 1 dez. 2025.

ALVES, Leonardo Cardoso *et al.* Soil enzyme activities and microbial community modulation after addition of poultry litter amendment enriched with *Bacillus* spp. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 47, 2023.

AMIN, Abu El Eyuoon Abu Zied; MIHOUB, Adil. Effect of Sulfur-Enriched Biochar in Combination with Sulfur-Oxidizing Bacterium (*Thiobacillus* Spp.) on Release and Distribution of Phosphorus in High Calcareous P-Fixing Soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 3, p. 2041–2047, 1 set. 2021.

ANTONANGELO, Joao A.; SUN, Xiao; EUFRADE-JUNIOR, Humberto de Jesus. **Biochar impact on soil health and tree-based crops: a review.** *BiocharSpringer*, , 1 dez. 2025.

APARECIDO, Lucas Eduardo de Oliveira *et al.* Climate Efficiency for Sugarcane Production in Brazil and its Application in Agricultural Zoning. **Sugar Tech**, v. 23, n. 4, p. 776–793, 1 ago. 2021.

AZADI, Nahid; RAIESI, Fayez. Sugarcane bagasse biochar modulates metal and salinity stresses on microbial functions and enzyme activities in saline co-contaminated soils. **Applied Soil Ecology**, v. 167, p. 104043, 1 nov. 2021.

BABAR, Saba *et al.* Unraveling the synergistic effect of biochar and potassium solubilizing bacteria on potassium availability and rapeseed growth in acidic soil. **Journal of Environmental Management**, v. 380, 1 abr. 2025.

BAI, Jinze *et al.* Impact of straw-biochar amendments on microbial activity and soil carbon dynamics in wheat-maize system. **Soil and Tillage Research**, v. 244, 1 dez. 2024.

BARBOSA, Francisco L. A. *et al.* Potential of biochar to restoration of microbial biomass and enzymatic activity in a highly degraded semiarid soil. **Scientific reports**, v. 14, n. 1, p. 26065, 1 dez. 2024a.

BARBOSA, Francisco L. A. *et al.* Potential of biochar to restoration of microbial biomass and enzymatic activity in a highly degraded semiarid soil. **Scientific reports**, v. 14, n. 1, p. 26065, 1 dez. 2024b.

BATAGLIA, O. C. *et al.* **Métodos de análise química de plantas.** Campinas: [S.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/286904632>>.

BHANDARI, Dija *et al.* Influence of biomass ash fertilization on soil pH, CaCO₃, K₂O and P₂O₅ under *Miscanthus x giganteus*. **Journal of Central European Agriculture**, v. 25, n. 3, p. 833–841, 2024.

BIEDERMAN, Lori A.; STANLEY HARPOLE, W. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 202–214, 2013.

BILIAS, Fotis *et al.* **Biochar application as a soil potassium management strategy: A review.** *Science of the Total EnvironmentElsevier B.V.*, , 1 fev. 2023a.

BILIAS, Fotis *et al.* **Biochar application as a soil potassium management strategy: A review.** *Science of the Total Environment* Elsevier B.V., , 1 fev. 2023b.

BŁOŃSKA, Ewa *et al.* Effects of wood ash on the soil properties and fungal community structure in a beech forest in Poland. *Geoderma Regional*, v. 34, 1 set. 2023.

BORGES, Bernardo M. M. N. *et al.* Re-use of sugarcane residue as a novel biochar fertiliser - Increased phosphorus use efficiency and plant yield. *Journal of Cleaner Production*, v. 262, p. 121406, 20 jul. 2020.

CARNEIRO, Jefferson Santana da Silva *et al.* Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability. *Science of The Total Environment*, v. 760, p. 143955, 15 mar. 2021.

CHEN, Limei *et al.* **Effects of straw return and straw biochar on soil properties and crop growth: A review.** *Frontiers in Plant Science* Frontiers Media S.A., , 27 set. 2022.

COELHO, Luísa Fancelli; BRAGAGNOLO, Cassiano. Fatores determinantes da eficiência técnica da cana-de-açúcar nos polos de produção do sudeste e centro-oeste brasileiros. *Estudos Economicos*, v. 54, n. 1, p. 167–204, 2024.

DA SILVA, João Alfredo Neto *et al.* **EFEITOS DE PALHIÇO SOBRE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.** *[S.l.: S.n.]*.

DAI, Zhongmin *et al.* **Potential role of biochars in decreasing soil acidification - A critical review.** *Science of the Total Environment* Elsevier B.V., , 1 mar. 2017.

DE SOUZA, Zigomar Menezes *et al.* Harvest systems and residue management of sugarcane. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, v. 40, n. 3, p. 271–278, 2005.

DOMBINOV, Vitalij *et al.* Sugarcane bagasse ash as fertilizer for soybeans: Effects of added residues on ash composition, mineralogy, phosphorus extractability and plant availability. *Frontiers in Plant Science*, v. 13, 8 dez. 2022.

EMBRAPA. **Inovação e desenvolvimento em cana-de-açúcar.** *[S.l.: S.n.]*.

FAO. **FAOSTAT: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): FAO Statistical Databases., 2020.**

FERREIRA, Osania Emerenciano *et al.* Biochar enhances soil interactions and the initial development of sugarcane. *Scientific reports*, v. 14, n. 1, p. 27610, 1 dez. 2024a.

FERREIRA, Osania Emerenciano *et al.* Biochar enhances soil interactions and the initial development of sugarcane. *Scientific reports*, v. 14, n. 1, p. 27610, 1 dez. 2024b.

GABETTO, Fernanda Palmeira *et al.* Exploring the potential of sugarcane straw biochar: Insights into N₂O emissions and microbial functional genes. *Biomass and Bioenergy*, v. 182, p. 107070, 1 mar. 2024.

GAHANE, Dipali; MANDAVGANE, Sachin A. Biogenic potassium: sources, method of recovery, and sustainability assessment. *Reviews in Chemical Engineering*, v. 40, n. 6, p. 707–722, 1 ago. 2024.

GAMAL, B. A. El-; KHALAFALLAH, Naglaa E.; KAFRAWY, M. M. El-. IMPACT OF SULPHUR AND BIOCHAR APPLICATIONS ON SOIL PROPERTIES AND PRODUCTIONS OF WHEAT

AND SOYBEAN YIELDS IN SOILS HAVING TEXTURE. **Menoufia Journal of Soil Science**, v. 5, n. 12, p. 235–256, 1 dez. 2020.

GARBUZ, Stanislav *et al.* Biochar increases soil enzyme activities in two contrasting pastoral soils under different grazing management. **Crop and Pasture Science**, 12 ago. 2022.

GHASSEMI-GOLEZANI, Kazem; LATIFI, Sedigheh; FARHANGI-ABRIZ, Salar. Biochar-mediated remediation of nickel and copper improved nutrient availability and physiological performance of dill plants. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, 1 dez. 2025.

GODINHO, Mariana *et al.* Microbial inoculants alleviate the adverse effects of Cu-contaminated soils amended with biochar on sunflower growth. **Soil Advances**, v. 3, p. 100029, jun. 2025.

GUARENGHI, Marjorie M. *et al.* Land Use Change Net Removals Associated with Sugarcane in Brazil. **Land**, v. 12, n. 3, 1 mar. 2023.

GUO, Ningyu *et al.* A quantitative review of the effects of biochar application on the reduction of Cu concentration in plant: a meta-analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 51, p. 60731–60748, 11 out. 2024.

GUPTA, Rajeev Kumar *et al.* Biochar influences nitrogen and phosphorus dynamics in two texturally different soils. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, 1 dez. 2024.

HAILEGNAW, Niguss Solomon *et al.* Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, n. 5, p. 2405–2416, 1 maio 2019.

HAN, Lanfang *et al.* **Biochar's stability and effect on the content, composition and turnover of soil organic carbon.** **Geoderma** Elsevier B.V., , 1 abr. 2020.

HIEN, Tran Thi Thu *et al.* Enhancing soil water holding capacity and provision of a potassium source via optimization of the pyrolysis of bamboo biochar. **Biochar**, v. 3, n. 1, p. 51–61, 1 mar. 2021.

HOSSAIN, Md Zahangir *et al.* Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. **Biochar**, v. 2, n. 4, p. 379–420, 2020.

HUANG, Kai *et al.* **Soil acidification and salinity: the importance of biochar application to agricultural soils.** **Frontiers in Plant Science** Frontiers Media SA, , 2023.

IGHALO, Joshua O. *et al.* **Biochar for ameliorating soil fertility and microbial diversity: From production to action of the black gold.** **iScience** Elsevier Inc., , 17 jan. 2025.

IWUOZOR, Kingsley O. *et al.* A Review on the thermochemical conversion of sugarcane bagasse into biochar. **Cleaner Materials**, v. 6, p. 100162, 1 dez. 2022.

KABIR, Ehsanul; KIM, Ki Hyun; KWON, Eilhann E. **Biochar as a tool for the improvement of soil and environment.** **Frontiers in Environmental Science** Frontiers Media SA, , 2023.

KAMEYAMA, Koji; KUBOTA, Yuki; IWATA, Yuki Yoshi. Differences in plant availability of phosphorus and potassium in pelletized and granulated biochar for an Andisol. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2024.

KETROT, Daojarus; WISAWAPIPAT, Worachart. Lead immobilisation in mining contaminated soil using biochar and ash from sugarcane. **Plant, Soil and Environment**, v. 67, n. 8, p. 474–481, 2021.

KHADEM, Allahyar; BESHARATI, Hossein; KHALAJ, Mohammad Ali. Biochar application changed arylsulfatase activity, kinetic and thermodynamic aspects. **European Journal of Soil Biology**, v. 95, p. 103134, 1 nov. 2019.

KHAN, Muhammad Numan *et al.* Impact of modified biochar on phosphorus fractionation and biochemical properties for different soils. **Environmental Sciences Europe**, v. 37, n. 1, 1 dez. 2025.

KHAN, Shahbaz *et al.* **Biochar Production and Characteristics, Its Impacts on Soil Health, Crop Production, and Yield Enhancement: A Review.** *Plants* Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 jan. 2024.

KHATER, El Sayed *et al.* Biochar production under different pyrolysis temperatures with different types of agricultural wastes. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, 1 dez. 2024.

KRACMAROVA-FARREN, Martina *et al.* Biochar-induced changes in soil microbial communities: a comparison of two feedstocks and pyrolysis temperatures. **Environmental Microbiome**, v. 19, n. 1, 1 dez. 2024.

LEFEBVRE, David *et al.* Modelling the potential for soil carbon sequestration using biochar from sugarcane residues in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 1 dez. 2020.

LENTZ, R. D.; IPPOLITO, J. A. Biochar and Manure Affect Calcareous Soil and Corn Silage Nutrient Concentrations and Uptake. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, n. 4, p. 1033–1043, 1 jul. 2012.

LI, Qiang *et al.* Biochar affects organic carbon composition and stability in highly acidic tea plantation soil. **Journal of Environmental Management**, v. 370, 1 nov. 2024.

LIU, Shaowen *et al.* **The key role of biochar in amending acidic soil: reducing soil acidity and improving soil acid buffering capacity.** *Biochar* Springer, , 1 dez. 2025a.

LIU, Shaowen *et al.* **The key role of biochar in amending acidic soil: reducing soil acidity and improving soil acid buffering capacity.** *Biochar* Springer, , 1 dez. 2025b.

LOPES, Érika Manuela Gonçalves *et al.* Biochar increases enzyme activity and total microbial quality of soil grown with sugarcane. **Environmental Technology and Innovation**, v. 21, 1 fev. 2021a.

LOPES, Érika Manuela Gonçalves *et al.* Biochar increases enzyme activity and total microbial quality of soil grown with sugarcane. **Environmental Technology & Innovation**, v. 21, p. 101270, 1 fev. 2021b.

MANIRAKIZA, Eric; GAGNON, Bernard; ZIADI, Noura. Soil and plant cations as affected by application of wood ash, biochar, and papermill biosolids. **Agronomy Journal**, v. 117, n. 1, p. e21714, 1 jan. 2025.

MIELKE, Kamila C. *et al.* Pyrolysis Temperature and Application Rate of Sugarcane Straw Biochar Influence Sorption and Desorption of Metribuzin and Soil Chemical Properties. **Processes**, v. 10, n. 10, 1 out. 2022.

MIHERETU, Bedassa. Soil acid Management using Biochar: Review. **International Journal of Agricultural Science and Food Technology**, p. 211–217, 5 nov. 2020.

MORADI-CHOGHAMARANI, Farzad; MOOSAVI, Ali Akbar; SEPASKHAH, Ali Reza. Sugarcane bagasse derived biochar potential to improve soil structure and water availability in texturally different soils. **Scientific reports**, v. 14, n. 1, p. 26541, 1 dez. 2024.

MORAIS, Maristela C. *et al.* Trade-offs between sugarcane straw removal and soil organic matter in Brazil. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 22, p. 1–13, 2 nov. 2020.

MOSLEY, Luke M.; RENGASAMY, Pichu; FITZPATRICK, Rob. Soil pH: Techniques, challenges and insights from a global dataset. **European Journal of Soil Science**, v. 75, n. 6, 1 nov. 2024.

NEPAL, Jaya *et al.* **Advances and prospects of biochar in improving soil fertility, biochemical quality, and environmental applications.** **Frontiers in Environmental Science** Frontiers Media S.A., , 2023.

NEVE, Sameer *et al.* Sustainable management of copper-contaminated soils using vetiver root biochar. **BMC Chemistry**, v. 19, n. 1, 1 dez. 2025.

NINKUU, Vincent *et al.* **Impact of straw returning on soil ecology and crop yield: A review.** **Heliyon** Elsevier Ltd, , 30 jan. 2025a.

NINKUU, Vincent *et al.* **Impact of straw returning on soil ecology and crop yield: A review.** **Heliyon** Elsevier Ltd, , 30 jan. 2025b.

PARK, Byung Bae *et al.* Wood ash effects on plant and soil in a willow bioenergy plantation. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 4, p. 355–365, abr. 2005.

PARRA, José Roberto. **Cana-de-Açúcar.** [S.l.: S.n.].

PASTUSZCZAK, Miłosz; STANEK-TARKOWSKA, Jadwiga; KAČÁNIOVÁ, Miroslava. Impact of Soil Fertilized with Biomass Ash on Depth-Related Variability of Culturable Bacterial Diversity and Selected Physicochemical Parameters in Spring Barley Cultivation. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 21, 1 nov. 2022.

PERES, José G.; SOUZA, Claudinei F.; LAVORENTI, Norberto A. **AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA COBERTURA DE PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR NA UMIDADE E NA PERDA DE ÁGUA DO SOLO EVALUATION OF THE EFFECTS OF SUGARCANE STRAW COVERAGE IN MOISTURE AND WATER LOSS OF SOIL** Aprovado pelo Conselho Editorial. [S.l.: S.n.].

PIRES, Isis C. S. A. *et al.* Biochar de Palha de Cana-de-Açúcar: Caracterização e Estudo do Processo. 2018.

QUIRANTES, M. *et al.* Soil-nutrient availability affected by different biomass-ash applications. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 16, n. 1, p. 159–163, 1 mar. 2016.

RAIJ, BV *et al.* **ANÁLISE QUÍMICA PARA AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DE SOLOS TROPICAIS.** Campinas: [S.n.]. Disponível em: <www.iac.br>.

RODRIGUES, Gelze S. S. C.; ROSS, Jurandyr L. S. **A TRAJETÓRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL.** [S.l.: S.n.].

ROLIM, Glauco de Souza. **Resenha Meteorológica do Período 1971 – 2010.**

RUBIO, Giovana Oliveira *et al.* Sugarcane bagasse ash doses affect soil chemical attributes and pigeon pea initial performance. **Revista de Agricultura Neotropical**, 2023.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** [S.l.]: Embrapa, 2018.

SHARMA, Meesha *et al.* **Biochar-Induced Microbial Shifts: Advancing Soil Sustainability. Sustainability (Switzerland)** Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 fev. 2025.

SHETTY, Rajpal; PRAKASH, Nagabovanalli Basavarajappa. Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 1 dez. 2020.

SILVA, Dayane Lilian Gallani *et al.* Cana-de-açúcar: Aspectos econômicos, sociais, ambientais, subprodutos e sustentabilidade. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e44410714163, 28 jun. 2021.

STANEK-TARKOWSKA, Jadwiga *et al.* The Impact of Using Different Doses of Biomass Ash on Some Physical Properties of Podzolic Soil under the Cultivation of Winter Oilseed Rape. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 11, 1 jun. 2022.

STEINER, Christoph *et al.* Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and Soil**, v. 291, n. 1–2, p. 275–290, fev. 2007.

TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. **Methods of Soil Analysis, Part 2: Microbiological and Biochemical Properties**, p. 775–833, 11 set. 1994.

TAHERI, Musa al Reza *et al.* The role of biochar and sulfur-modified biochar on soil water content, biochemical properties and millet crop under saline-sodic and calcareous soil. **Plant and Soil**, v. 499, n. 1–2, p. 221–236, 1 jun. 2024.

TUSAR, Hachib Mohammad *et al.* **Biochar-Acid Soil Interactions—A Review. Sustainability (Switzerland)** Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 set. 2023.

VIANA, Douglas G. *et al.* Sugarcane straw biochar: effects of pyrolysis temperature on barite dissolution and Ba availability under flooded conditions. **Biochar**, v. 6, n. 1, 1 dez. 2024.

WANG, Mengrong *et al.* Sugarcane straw returning is an approaching technique for the improvement of rhizosphere soil functionality, microbial community, and yield of different sugarcane cultivars. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, 2023.

WANG, Ruibao *et al.* Biomass ash as soil fertilizers: Supercharging biomass accumulation by shifting auxin distribution. **Chemosphere**, v. 357, 1 jun. 2024.

WEI, Zhanbo *et al.* Effects of biochar, dual inhibitor, and straw return on maize yield, soil physicochemical properties, and microbial system under fertilization conditions. **Frontiers in Microbiology**, v. 16, 28 abr. 2025.

WEI, Zhuo *et al.* Application of biochar in estrogen hormone-contaminated and manure-affected soils: Impact on soil respiration, microbial community and enzyme activity. **Chemosphere**, v. 270, p. 128625, 1 maio 2021.

XIA, Hao *et al.* Co-application of biochar and potassium fertilizer improves soil potassium availability and microbial utilization of organic carbon: A four-year study. **Journal of Cleaner Production**, v. 469, 1 set. 2024.

YANG, Caidi; LU, Shenggao. Straw and straw biochar differently affect phosphorus availability, enzyme activity and microbial functional genes in an Ultisol. **Science of The Total Environment**, v. 805, p. 150325, 20 jan. 2022.

YANG, Wenting *et al.* Biochar and Cropping Systems Changed Soil Copper Speciation and Accumulation in Sweet Corn and Soybean. **Plants**, v. 11, n. 18, 1 set. 2022.

ZAFEER, Mohd Khalid *et al.* **Sugarcane bagasse-based biochar and its potential applications: a review.** **Emergent Materials**Institute for Ionics, , 1 fev. 2024.

ZENERO, M. D. O. *et al.* Short-term biochar effects on greenhouse gas emissions and phosphorus availability for maize. **Agrosystems, Geosciences and Environment**, v. 4, n. 1, 2021.

ZHANG, Hongjie *et al.* Sulfur-enriched biochar as a potential soil amendment and fertiliser. **Soil Research**, v. 55, n. 1, p. 93–99, 2017.

ZHANG, Lixin *et al.* **Biochar application to soils can regulate soil phosphorus availability: a review.** **Biochar**Springer, , 1 dez. 2025a.

ZHANG, Nanhai *et al.* **The potential of biochar to mitigate soil acidification: a global meta-analysis.** **Biochar**Springer, , 1 dez. 2025b.

ZHANG, Siwen *et al.* Effects of soil amendments on soil acidity and crop yields in acidic soils: A world-wide meta-analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 345, 1 nov. 2023.

ZHAO, Huili *et al.* Effect of Straw and Wood Ash on Soil Carbon Sequestration and Bacterial Community in a Calcareous Soil. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, 18 jul. 2022.

ZHENG, Xuemei *et al.* **The effects of biochar and its applications in the microbial remediation of contaminated soil: A review.** **Journal of Hazardous Materials**Elsevier B.V., , 15 set. 2022.

ZHENG, Yi *et al.* High-resolution map of sugarcane cultivation in Brazil using a phenology-based method Earth System Science Data Discussions. 2021.

ZHU, Zetao *et al.* **The Biological Effects of Biochar on Soil's Physical and Chemical Characteristics: A Review.** **Sustainability (Switzerland)**Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 mar. 2025.

ZUBAIRU, Abdulrahman Maina *et al.* **Biochar Improves Soil Fertility and Crop Performance: A Case Study of Nigeria.** **Soil Systems**Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 dez. 2023.