



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODOIVERSIDADE**

**BIOCHAR E SUA INFLUÊNCIA NO SOLO, NAS PLANTAS E
NA DINÂMICA DO CARBONO**

ANDREZA NUNES CONCEIÇÃO DA SILVA

2025



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE**

ANDREZA NUNES CONCEIÇÃO DA SILVA

BIOCHAR E SUA INFLUÊNCIA NO SOLO, NAS PLANTAS E NA DINÂMICA DO CARBONO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadora
Profa. Dra. Maria Isidória Silva Gonzaga

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL
2025

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

S586b Silva, Andreza Nunes Conceição da.
Biochar e sua influência no solo, nas plantas e na dinâmica do carbono / Andreza Nunes Conceição da Silva; orientadora Maria Isidória Silva Gonzaga. – São Cristóvão, SE, 2025.
108 f.: il.

Dissertação (mestrado em Agricultura e Biodiversidade) – Universidade Federal de Sergipe, 2025.

1. Agrobiodiversidade. 2. Solos - Degradação. 3. Pirólise. 4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 5. Solos - Qualidade. 6. Carbono. 7. Economia. I. Gonzaga, Maria Isidória Silva, orient. II. Título.

CDU 630:582.284.11

ANDREZA NUNES CONCEIÇÃO DA SILVA

BIOCHAR E SUA INFLUÊNCIA NO SOLO, NAS PLANTAS E NA DINÂMICA DO CARBONO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Mestrado de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

APROVADA em 30 de julho de 2025.

Dr. Airon José da Silva (DEA-UFS)

Dra. Danielle Vieira Guimarães (NetZero Ambiental)

Profa. Dra. Maria Isidória Silva Gonzaga
(Orientadora)

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL

*A Deus, por nunca me deixar sozinha, e à
minha mãe, por ser meu alicerce e por cada
oração feita em silêncio, que me sustentou e
fortaleceu até aqui.
Dedico*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem ele nada disso teria sido possível. Foi através da Sua presença que eu encontrei forças - nos momentos mais difíceis - para seguir em frente e coragem para concluir mais um ciclo na minha vida. A Ele, todo louvor e toda honra, por me sustentar até aqui.

A minha família, meu alicerce, e especialmente a minha mãe, Edna, que nunca mediu esforços para me ajudar a realizar esse sonho; me dando todo apoio, carinho e dedicação. Minha eterna gratidão. Ao meu padrasto Bruno, por toda ajuda e apoio concedidos durante essa jornada.

Ao meu pai Valdir, pelo apoio e incentivo para seguir meu objetivo. A minha avó Elze, minha tia/madrinha Edilma e minhas primas Fernanda e Franciele, por sempre estarem ao meu lado e torcerem pelo meu sucesso.

A minha orientadora Maria Isidória, por toda dedicação e afeto. Você foi meu “leme”, não me conduzindo, mas, de fato, me orientando no caminho dos meus sonhos. Sou profundamente grata por cada ensinamento.

Às minhas amigas Luana, Juliana e Mariana, por cada mensagem de apoio e por sempre estarem vibrando por cada conquista. Aos meus amigos, encontrados durante toda jornada de estudos: Cláudia, Eduardo, Vanessa, João, Suzana, Vanicleide e Ellen. A toda equipe do LAS (Laboratório de Água e Solos), com carinho especial a Marcos, Kelianne, Danielle e Thais, pela lealdade e ajuda durante as atividades experimentais.

Também não poderia deixar de agradecer às equipes do Laboratório de Remediação de Solos e do Laboratório de Química Multusuários, por possibilitarem a execução de análises indispensáveis para a construção desse projeto.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa, e a todos do PPGAGRI, que foram essenciais para meu crescimento acadêmico e pessoal.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
REVISÃO.....	i
ARTIGO 1.....	i
ARTIGO 2.....	ii
LISTA DE TABELAS.....	iii
ARTIGO 1.....	iii
ARTIGO 2.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Importância do carbono em solos tropicais e intemperizados.....	3
2.2. Biochar como fonte de carbono para os solos tropicais.....	5
2.3. Dinâmica do carbono em solos condicionados com biochar.....	7
2.4. Distribuição do carbono entre as frações físicas granulométricas em solos com biochar	8
2.5. Efeito do biochar no crescimento de plantas.....	10
2.6. Efeito do biochar no microbioma do solo.....	11
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13
4. ARTIGO 1.....	25
O PAPEL MULTIFUNCIONAL DO BIOCHAR NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO, NA MICROBIOTA E NO DESEMPENHO DAS PLANTAS.....	25
RESUMO.....	25
ABSTRACT.....	26
4.1. Introdução.....	27
4.2. Material e Métodos.....	28
4.2.1 Coleta e caracterização do solo.....	28
4.2.2 Produção e caracterização dos biochars.....	28
4.2.3 Delineamento experimental e condução do experimento.....	29
4.2.4 Análises de solo e de plantas.....	30
4.2.5 Análise estatística.....	30
4.3. Resultados e discussão.....	31
4.3.1 Efeito do biochar nas propriedades químicas do solo.....	31
4.3.1.1 pH.....	31
4.3.1.2 Carbono orgânico e nitrogênio total.....	31
4.3.1.3 Concentrações totais e extraíveis de fósforo.....	32
4.3.1.4 Concentrações trocáveis de Ca^{2+} e Mg^{2+}	34
4.3.1.5 Efeito do biochar nas propriedades microbiológicas do solo.....	35
4.3.1.6 Efeito do biochar no crescimento e nutrição de plantas.....	38
4.4. Conclusões.....	41
4.5. Referências Bibliográficas.....	42

5. ARTIGO 2.....	52
ALTERAÇÕES DA LABILIDADE E ESTABILIDADE DO CARBONO ORGÂNICO E DO NITROGÊNIO NAS FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO COM BIOCHAR	52
RESUMO.....	52
ABSTRACT.....	53
5.1. Introdução.....	54
5.2. Material e Métodos.....	55
5.2.1 Produção, preparação e caracterização do biochar.....	55
5.2.2 Coleta, preparo e caracterização do solo.....	56
5.2.3 Delineamento experimental.....	56
5.2.4 Determinação do carbono orgânico e do nitrogênio total no solo e nas frações do solo.....	57
5.2.5 Análise estatística.....	57
5.3. Resultados e discussão.....	57
5.3.1 Carbono orgânico total e nitrogênio no solo.....	57
5.3.2 Proporção relativa da massa de solo e distribuição do carbono orgânico total e do nitrogênio nas frações físicas granulométricas no solo.....	60
5.3.3 Relações do carbono e do nitrogênio nas frações físicas granulométricas no solo.....	62
5.3.4 Influência dos diferentes biochars na distribuição do C e do N nas frações da MOP e da MOAM e variáveis correlatas avaliada através da análise de componentes principais (PCA).....	64
5.4. Conclusões.....	65
5.5. Referências Bibliográficas.....	66
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70

LISTA DE FIGURAS

REVISÃO

Figura	Página
1 Adições e perdas de matéria orgânica dos solos, São Cristóvão-SE, UFS, 2025.....	4
2 Estrutura aromática do biochar com vários grupos funcionais de superfície e sua organização em estrutura porosa e estável.....	5
3 Processos realizados com as matérias-primas para produção de biochar: Casca de laranja (A); Coco Seco (B); Lodo de esgoto (C); Coco verde (D); Sabugo de milho (E); Cana-de-açúcar (F).....	6
4 Visão geral das principais diferenças entre matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica associada a minerais (MOAM).....	9
5 Apresentação dos benefícios do biochar no solo, nas plantas e na atmosfera...	11

ARTIGO 1

Figura	Página
1 Plantas de mostarda crespa aos 30 dias do ciclo de cultivo. São Cristóvão, SE.....	29
2 pH do solo condicionado com biochar de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde (BCV). Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	31
3 Concentração de carbono orgânico total e de nitrogênio no solo condicionado com biochar de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde (BCV). Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	32
4 Concentrações de fósforo (P) total e extraível no solo condicionado com biochar de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde (BCV). Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	33
5 Concentrações de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no solo condicionado com biochar de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde (BCV). Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	34
6 Atividade microbiana (A), biomassa microbiana (B) e quociente metabólico (C) no solo condicionado com biochar de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde	36

(BCV). Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	
7 Massa seca da parte aérea e das raízes (A) e razão raiz/parte aérea (B) de plantas de mostarda crespa cultivadas em solo condicionado com biochar de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde. Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	39
8 Concentração de N (A) e de P (B) na parte aérea e nas raízes de plantas de mostarda crespa cultivadas em solo condicionado com biochar de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde (BCV). Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	41

ARTIGO 2

	Página
Figura	a
1 Concentração de carbono orgânico total-COT (A), concentração de nitrogênio total-NT (B) e relação carbono/nitrogênio-C/N (C) do solo após o condicionamento com biochar de casca de coco seco (BCS), bagaço de laranja (BL) e biossólido (BB). São Cristóvão-SE. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.....	58
2 Proporção relativa da massa de solo nas frações particulada (MOP) e associada aos minerais (MOAM) do solo após o condicionamento com biochar de casca de coco seco (BCS), bagaço de laranja (BL) e biossólido (BB). São Cristóvão-SE, UFS, 2025.....	60
3 Concentração de carbono orgânico (A), proporção de carbono (B), concentração de nitrogênio (C) e proporção de nitrogênio (D) nas frações particulada (MOP) e associada aos minerais (MOAM) do solo após o condicionamento com biochar de casca de coco seco (BCS), bagaço de laranja (BL) e biossólido (BB). São Cristóvão-SE. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.....	61
4 Partição de carbono (A) e de nitrogênio (B), e relação C/N na MOP (C) e na MOAM (D) do solo após o condicionamento com biochar de casca de coco seco (BCS), bagaço de laranja (BL) e biossólido (BB). São Cristóvão-SE. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.....	63
5 Análise de componentes principais (PCA) entre as frações físicas da matéria orgânica do solo (MOP e MOAM) e variáveis correlatas. Os números entre parênteses representam a variação nos dados explicados pelos dois primeiros componentes principais. BB, BCS e BL (tratamentos com biochar de biossólidos, casca de coco seco e bagaço de laranja); COT (carbono orgânico total do solo); NT (nitrogênio total); C-MOP (carbono na fração da	65

matéria orgânica particulada); C-MOAM (carbono na fração da matéria orgânica associada aos minerais); N-MOP (nitrogênio na fração da matéria orgânica particulada); N-MOAM (nitrogênio na fração da matéria orgânica associada aos minerais). São Cristóvão-SE, UFS, 2025.....

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Tabela

- | | | |
|----------|--|--------|
| 1 | Características dos biochars usados nos experimentos. Biochars de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana- de- açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde (BCV). São CristóvãoSE..... | Página |
|----------|--|--------|

29

ARTIGO 2

Tabela

- | | | |
|----------|--|--------|
| 1 | Características dos biochars de casca de coco seco (BCS), bagaço de laranja (OB) e biossólido (BB). São Cristovão-SE | Página |
|----------|--|--------|

56

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

BL	Biochar de bagaço de laranja
BC	Biochar de bagaço de cana-de-açúcar
BM	Biochar de sabugo de milho
BCV	Biochar de resíduos do coco verde
BCS	Biochar de casca de coco seco
BB	Biochar de biossólido
MOP	Frações da matéria orgânica particulada
MOAM	Frações da matéria orgânica associada aos minerais

RESUMO

SILVA, Andreza Nunes Conceição da Silva. **Biochar e sua influência no solo, nas plantas e na dinâmica do carbono.** São Cristóvão: UFS, 2025. 84p. (Dissertação – Mestrado em Agricultura e Biodiversidade) *

A aplicação de biochar em solos degradados ou muito intemperizados tem sido recomendada em vários países de regiões climáticas vulneráveis a problemas ambientais, mas que precisam de elevados índices de produtividade agrícola para atender à demanda populacional. Essa tecnologia estimula a economia circular através do aproveitamento de resíduos diversos e a agricultura tradicional e regenerativa. O presente estudo avaliou o efeito de diferentes tipos de biochar no solo, na microbiota, no crescimento de plantas e na distribuição de carbono e nitrogênio entre as frações físicas granulométricas do solo. O primeiro experimento, conduzido em delineamento inteiramente casualizado em estufa agrícola, avaliou o efeito de quatro tipos de biochar (bagaço de laranja pera-BL, bagaço de cana-de-açúcar-BC, sabugo de milho-BM e resíduos do coco verde-BCV) em algumas propriedades químicas e biológicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo e no crescimento da mostarda crespa (*Brassica juncea* L.). Todos os biochars aumentaram a concentração de carbono (108-175%) e fósforo total (22-38%) no solo, porém houve efeito significativo do tipo de biochar nas concentrações de N total e Ca trocável, bem como no comportamento da microbiota e da biomassa das plantas, confirmando os resultados reportados na literatura sobre a importância da avaliação dos efeitos de diferentes biochars. O segundo estudo, conduzido em delineamento inteiramente casualizado em laboratório, avaliou o efeito de três tipos de biochar (resíduos do coco seco-BCS, bagaço de laranja péra-BL e biossólido-BB) na distribuição do carbono e do nitrogênio nas frações da matéria orgânica particulada (MOP) e associada aos minerais (MOAM) de um Argissolo Vermelho-Amarelo, após incubação de três anos. O biochar de biossólido teve a menor contribuição no aumento do C no solo (40%), mas se destacou como a melhor fonte de N, elevando em 145% esse nutriente no solo. Esse efeito pode ser associado à sua composição química. De forma geral, os biochars não interferiram na massa proporcional das frações MOP e MOAM, mas provocaram alterações significativas na distribuição do C e do N entre elas, com aumento proporcional de carbono na MOP e redução na MOAM. No solo sem biochar, 17% e 85% do C se distribuíram na MOP e MOAM, respectivamente. No entanto, o biochar aumentou de 4,5 (BB) a 8 vezes (BCS e OB) o C na MOP, provocando um “shift” na proporção de C entre as duas frações. Esses resultados dificultam a utilização do fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica como ferramenta para avaliar as mudanças na qualidade do solo em função do manejo adotado, pois a fração MOP deixa de ser um bom indicador da labilidade do carbono em solos condicionados com biochar.

Palavras-chave: Economia circular; aproveitamento de resíduos; saúde do solo; pirólise; carbono negativo.

* Comitê Orientador: Maria Isidória Silva Gonzaga– UFS (Orientadora).

ABSTRACT

SILVA, Andreza Nunes Conceição da Silva. **Biochar and its effects on soil, plant growth, and carbon dynamics.** São Cristóvão: UFS, 2025. 84p. (Thesis - Master of Science in Agriculture and Biodiversity) *

The application of biochar to degraded or highly weathered soils has been recommended in several countries with climate regions vulnerable to environmental problems but requiring high agricultural productivity to meet population demands. This technology stimulates the circular economy through the use of various organic residues and supports both traditional and regenerative agriculture. This study evaluated the effect of different types of biochar on soil properties, microbiota, plant growth, and the distribution of carbon and nitrogen among soil particle-size physical fractions. The first experiment, conducted in a randomized block design in an agricultural greenhouse, assessed the effect of four types of biochar (pear orange bagasse – BL, sugarcane bagasse – BC, corn cob – BM, and green coconut residue – BCV) on some chemical and biological properties of a Red-Yellow Ultisol and on the growth of curly mustard (*Brassica juncea* L.). All biochars increased soil carbon (by 108–175%) and total phosphorus (by 22–38%) concentrations. However, the biochar type affected total nitrogen and exchangeable calcium concentrations, as well as microbiota behavior and plant biomass, confirming findings reported in the literature on the importance of evaluating the effects of different biochars. The second study, conducted in a completely randomized design in the laboratory, evaluated the effect of three types of biochar (dry coconut residue – BCS, pear orange bagasse – BL, and biosolid – BB) on the distribution of carbon and nitrogen in the particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) fractions of a Red-Yellow Ultisol after a three-year incubation. The biosolid biochar had the smallest contribution to increasing soil carbon (40%) but stood out as the best nitrogen source, increasing soil N content by 145%. This effect is clearly associated with its chemical composition. In general, the biochars did not affect the proportional mass of the POM and MAOM fractions but caused significant changes in the distribution of C and N between them, with a proportional increase of C in the POM and a reduction in the MAOM. In soil without biochar, 17% and 85% of carbon were distributed in the POM and MAOM fractions, respectively. However, biochar increased C in the POM by 4.5 (BB) to 8 times (BCS and OB), causing a shift in the carbon proportion between the two fractions. These results complicate the use of particle-size physical fractionation of organic matter as a tool for assessing changes in soil quality due to management practices, as the POM fraction is no longer a reliable indicator of carbon lability in biochar-amended soils.

Key-words: Circular economy, waste utilization, soil health, pyrolysis, carbon negative.

* Guidance Committee: Maria Isidória Silva Gonzaga (Advisor).

1. INTRODUÇÃO GERAL

Solos muito intemperizados são comuns no Brasil, ocupam extensas áreas usadas para agricultura (Donagemma *et al.*, 2016) e estão sob contínua pressão para atender às demandas de produção de alimentos e fibras. Porém, características intrínsecas, como presença predominante de minerais de argila 1:1 e óxidos de Fe e Al (Barreto *et al.*, 2021), limitam a sua capacidade de troca catiônica (CTC), a retenção de água (Fidalski; Helbel Júnior, 2020) e o acúmulo de matéria orgânica (Castro *et al.*, 2015; Guimarães *et al.*, 2014). São solos geralmente ácidos e de baixa fertilidade natural, como os Argissolos e Latossolos.

A produção agrícola nesses solos é favorecida pela fácil mecanização, mas requer um manejo intenso de corretivos e fertilizantes (Baligar; Bennett, 1986), onerando os custos econômicos e provocando problemas ambientais. Esse uso intensivo do solo geralmente resulta na sua degradação física, química e biológica (Alves, 2021).

O aparecimento de camadas compactadas é comum em áreas sob intensa mecanização, causando sérias limitações ao movimento da água e ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas (Hemmat; Adamchuk, 2008; Valadão *et al.*, 2015). A aplicação frequente e sem critérios de adubos minerais provoca contaminação por elementos coadjuvantes nas formulações e eleva os riscos de poluição dos recursos hídricos (Hooda *et al.*, 2000; Ribeiro *et al.*, 2014; Fischer *et al.*, 2018). Sob essas condições de estresse, a microbiota do solo reduz a diversidade e atividade, com impactos negativos nas perdas de carbono do solo (Lal, 2006; e na ciclagem de nutrientes (Basak *et al.*, 2022).

A matéria orgânica (MOS) é um importante componente do solo, mas seu papel é ainda mais relevante em regiões tropicais, sobretudo em solos das classes dos Latossolos e Argissolos que representam a maior proporção no Brasil (Santos *et al.*, 2018). Devido a esse processo, a pedogênese dos solos tropicais os torna com poucas cargas, resultando em baixa CTC. Nesses solos, a MOS representa quase 70% da CTC (Ramos *et al.*, 2018), além de contribuir para a agregação das partículas, a arquitetura dos poros, o fluxo e a retenção de água, as trocas gasosas e o desenvolvimento das raízes das plantas.

Materiais e resíduos vegetais são a fonte primária para a formação da MOS, mas os resíduos de origem animal também contribuem de forma expressiva, sobretudo em áreas cultivadas que fazem uso de compostos orgânicos como fonte de nutrientes. Qualquer uma dessas fontes e formas de adição de carbono em solos tropicais enfrenta grandes desafios para a permanência duradoura, pois as condições climáticas e edáficas estimulam e facilitam a decomposição da matéria-prima e a liberação de carbono para a atmosfera (Basak *et al.*, 2022; Barreto *et al.*, 2021; Mangalassery *et al.*, 2019).

Estudos mostram que os níveis de matéria orgânica em Latossolos, Neossolos e Argissolos da região Nordeste brasileira são inferiores a 2%, mesmo após a adoção de práticas conservacionistas (Assunção *et al.*, 2023; Guimarães *et al.*, 2014; Gonzaga *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2019). Por exemplo, Assunção *et al.* (2023) recentemente mostraram que 17 anos de manutenção de práticas de cultivo mínimo e plantio direto em um Argissolo Vermelho-Amarelo do município de São Cristóvão, estado de Sergipe, não conseguiram elevar significativamente os níveis de matéria orgânica do solo. As condições climáticas dessa região dificultam a manutenção da cobertura do solo. Assim, a agricultura nesses tipos de solos é cada vez mais dependente de fertilizantes minerais (Palansooriya *et al.*, 2019).

Nesse contexto, uma das estratégias que vem sendo usada para auxiliar na mitigação das mudanças climáticas e melhorar a qualidade do solo, sobretudo os que estão em processos de degradação antropogênica ou que são naturalmente muito intemperizados, ácidos e pouco férteis, é a aplicação de biochar (Lehmann; Joseph, 2015; Basak *et al.*, 2022; Alling *et al.*, 2014; Thomas; Gale, 2015; Jien *et al.*, 2020). O material é proveniente da pirólise de qualquer matéria-prima de natureza orgânica, incluindo os resíduos da agroindústria e restos culturais (Krishnan *et al.*, 2021). O biochar geralmente possui elevada estabilidade química em função das altas temperaturas de produção e é rico em carbono (40 – 85%). Além disso, apresenta

uma estrutura composta de poros de variados tamanhos, com elevada superfície específica e grupos funcionais que são fontes de cargas positivas e negativas (Zelaya, 2016; Zimmerman *et al.*, 2011).

Todas essas características do biochar não apenas favorecem a economia circular, uma vez que promovem o reaproveitamento de resíduos da agroindústria e orgânicos, mas também contribuem para a produção agrícola sustentável em áreas de alta vulnerabilidade climática. Mais de 90.200 artigos foram publicados até o momento sobre o manejo do biochar na agricultura e na recuperação ambiental. Mais recentemente, estudos de meta-análise têm mostrado a viabilidade e o potencial desse material no mundo inteiro (Han *et al.*, 2023; Glaser; Lehr, 2019). No Brasil, apenas na última década, a utilização de biochar como condicionador de solo tem tomado impulso, com a implantação de duas fábricas de grande porte, uma no Espírito Santo e outra em Minas Gerais. O próximo passo para o desenvolvimento do manejo do biochar no Brasil é a elaboração de um manual de recomendação de aplicação e de regulamentação para comercialização desse produto.

Uma das principais limitações para a utilização do biochar no solo é a inconsistência dos resultados obtidos em pesquisas com plantas, sendo reportados efeitos positivos (Nehela *et al.*, 2021), nulos (Ye *et al.*, 2019) e até negativos (Torchia *et al.*, 2023) na performance e produtividade das culturas. A razão para isso está relacionada à grande variabilidade entre os tipos de biochar. Portanto, o presente estudo, dividido em duas partes, procura avaliar o efeito de diferentes biochars no solo, na microbiota e na planta.

Neste contexto, essa dissertação tem como objetivo avaliar os efeitos de diferentes biochars em propriedades químicas do solo, na biomassa e atividade microbiana e no crescimento da olerícola mostarda crespa (*Brassica juncea* L.). Além disso, busca-se investigar o efeito de diferentes biochars na distribuição do carbono e do nitrogênio entre as frações físicas granulométricas do solo, com o intuito de analisar a dinâmica do carbono e o comportamento de parâmetros químicos e biológicos do solo no crescimento de plantas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância do carbono em solos tropicais e intemperizados

Os solos brasileiros estão distribuídos em 13 classes, as quais apresentam grande variabilidade, sendo o clima um fator ativo na pedogênese. Dentre as classes, destacam-se os Latossolos e os Argissolos, que se distribuem por 58% do território nacional. Esses solos são altamente intemperizados, de perfil bem desenvolvido e profundo, ácidos, com elevada saturação por alumínio (Al^{3+}) e baixa fertilidade natural. No entanto, esses solos são muito usados para agricultura, o que exige manejos específicos e de médio a alto grau de tecnologia (Basak *et al.*, 2022).

Os minerais predominantes na fração argila desses solos são caulinita e óxidos de ferro e de alumínio, todos eles apresentando baixa CTC e reduzida capacidade de retenção de água. Assim, o manejo da matéria orgânica é de fundamental importância nesses tipos de solo, pois ela responde por mais de 70% da CTC, além de aumentar a eficiência de uso da água pelas plantas (Fernandes *et al.*, 2016; Resende *et al.*, 2014; Lima Neto *et al.*, 2010; Muggler *et al.*, 2007).

A matéria orgânica compõe de 2-10% da massa do solo e seu principal componente é o carbono, em torno de 58% (Magdoff e Van Es, 2021). Solos de textura fina, contendo altas porcentagens de argila e silte, tendem a ter naturalmente maiores quantidades de matéria orgânica do que solos de textura grosseira. As classes texturais Areia e Areia Franca normalmente apresentam menos de 1% de matéria orgânica; já os Argilo-arenosos, de 2% a 3%, e a classe Argila, de 4% a mais de 5% (Magdoff e Van Es, 2021). Porém, o teor de matéria orgânica do solo é muito influenciado pelas práticas agrícolas, principalmente pelo preparo do solo, que envolve o seu revolvimento.

O solo é o principal reservatório de carbono na biosfera terrestre e possui um papel crucial no funcionamento de todos os ecossistemas. A quantidade de C presente no solo é cerca de três vezes aquela encontrada na atmosfera. Por essa razão, o solo tem um potencial significativo para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (Pauustian *et al.*, 2016). Dos 3170 Gtde C nos ecossistemas terrestres, 2500 Gtsão encontrados no solo, ou seja, em torno de 80% (Lal, 2008). Segundo Liu *et al.* (2020), do total de carbono presente no solo, 70% são compostos por carbono orgânico e 30% por carbono inorgânico.

O carbono inorgânico é encontrado em minerais como calcita, dolomita e gipsita. Já o carbono orgânico é resultante das reações que envolvem fotossíntese, respiração e decomposição. Além da biomassa da parte aérea das plantas, as raízes contribuem para a adição de carbono ao solo, diretamente, pela sua senescênciia, e indiretamente, através da exudação de substâncias orgânicas (Cotrufo *et al.*, 2022; Cotrufo; Lavallee, 2021; Cotrufo *et al.*, 2019). Os exudatos são usados pela microbiota, a qual também contribui para o carbono do solo, tanto através de seus próprios exudatos como pela sua necromassa (Kallenbach *et al.*, 2015). A Figura 1 ilustra as principais formas pelas quais o C é adicionado ao solo bem como os mecanismos que resultam em saída de C do solo. O carbono que não é liberado na forma de CO_2 para a atmosfera pode ficar retido no solo na forma de húmus, forma mais recalcitrante do C.

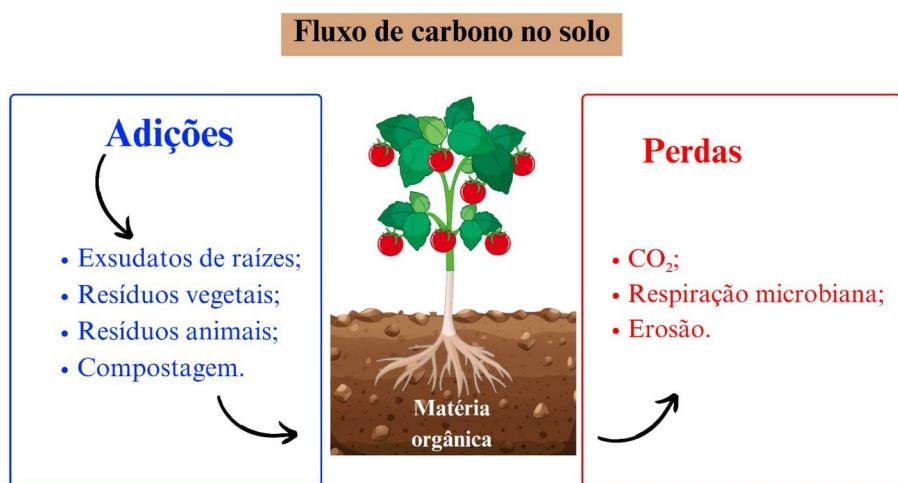


Figura 1. Adições e perdas de matéria orgânica dos solos, São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

Estima-se que até 90% do carbono orgânico adicionado ao solo na forma de resíduos é perdido através da decomposição microbiana (Swift *et al.*, 1979). Essa proporção depende muito das condições climáticas e da textura do solo, ou seja, em regiões tropicais e em solos arenosos e de textura média, observam-se as maiores taxas de perdas de C (Gmach *et al.*, 2020). De acordo com Kumar *et al.* (2020), parte do carbono orgânico no solo é encontrada na forma de matéria orgânica que pode ser facilmente decomposta por meio de práticas de manejo não conservacionistas. Nas regiões tropicais, por exemplo, as mudanças no uso do solo representam a principal ameaça às questões climáticas, principalmente por causa da transformação de áreas de vegetação natural em pastagens e terras direcionadas para práticas agrícolas intensivas e contínuas (Oliveira *et al.*, 2021).

Estudos como os de Loss *et al.* (2013, 2014) indicam que a diferença no teor de carbono orgânico e em seu estoque, em sistemas produtivos em comparação com áreas de mata, está relacionada a fatores como aporte de resíduos orgânicos, oxidação da matéria orgânica e perturbações no ambiente edáfico. Essas mudanças influenciam diretamente a atividade biológica e a qualidade do solo. Vários estudos abordam os efeitos de diferentes usos do solo, sistemas de plantio e manejos de conservação nos teores de carbono de solos tropicais, os quais dependem majoritariamente da matéria orgânica para a sua fertilidade (Costa *et al.*, 2015; Gazolla *et al.*, 2015; Assunção *et al.*, 2023).

Gazolla *et al.* (2015), ao avaliarem o teor de carbono orgânico total e das frações granulométricas da matéria orgânica do solo, em áreas manejadas em plantio direto, cerrado natural e pastagem em um Latossolo Vermelho, observaram aumentos no conteúdo de carbono em profundidade em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), atribuindo tal resultado à intensa renovação do sistema radicular pela ação do pastejo sobre a parte aérea das plantas. Já Costa *et al.* (2015) observaram incrementos significativos de carbono em um Latossolo Vermelho Distrófico, na camada de 0,00-0,20 m, em áreas de cultivo de espécies forrageiras em sucessão a culturas produtoras de grãos.

É comum encontrar em regiões tropicais solos arenosos suscetíveis à degradação devido às condições climáticas que favorecem altas taxas de decomposição da matéria orgânica, resultando em menor acúmulo de carbono no solo (Assunção *et al.*, 2023). A baixa estabilidade do carbono encontrado no Argissolo Vermelho-Amarelo, por exemplo, é influenciada principalmente por suas características naturais, como elevada proporção de areia na camada superficial. Existem trabalhos que demonstram baixos teores de matéria orgânica nesses solos, mesmos com práticas conservacionistas (Gonzaga *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2019; Assunção *et al.*, 2023).

No âmbito da busca por novas tecnologias que possam auxiliar na redução desses problemas em solos tropicais, o uso do biochar tem ocupado papel de destaque nas publicações (Basak *et al.*, 2022; Amoakwah *et al.*, 2021).

2.2. Biochar como fonte de carbono para os solos tropicais

O termo “biochar” tem origem na definição de “matéria orgânica carbonizada aplicada no solo com intenção de melhorar suas propriedades” (Lehmann; Joseph, 2015). A obtenção do biochar ocorre por pirólise de qualquer biomassa (resíduos de madeira, de colheitas, da agroindústria, estercos de animais e lodo de esgoto) (Joseph *et al.*, 2021; Gao; De Luca, 2018), ou seja, a matéria-prima é submetida à decomposição térmica na ausência de oxigênio, em que as temperaturas tendem a variar entre 300 e 700 °C (Mohan *et al.*, 2006; Nascimento *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2022). As condições de pirólise e o tipo de matéria-prima utilizada influenciam de forma significativa o conteúdo de nutrientes, o pH e a estrutura do biochar produzido (Leng *et al.*, 2021; Tomczyk *et al.*, 2020).

Em termos estruturais, o biochar consiste em uma matriz de carbono amorfó e rígido (Figura 2), resultante do aumento da temperatura durante a pirólise. Nesse processo, ocorre a formação de estruturas aromáticas devido à liberação de matéria volátil, iniciada pela água, seguida por hidrocarbonetos, vapores de alcatrão, H₂, CO e CO₂, e à transformação de anéis aromáticos com a incorporação de heteroátomos, como oxigênio (O), nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S) (Nóbrega, 2011). O resultado é um material poroso, leve e de granulação variada. Dentre suas propriedades, destacam-se a adsorção de nutrientes e íons diversos e a elevada capacidade de retenção de água. Essas propriedades são influenciadas pelo tamanho dos poros e pela área superficial, que podem variar conforme o tipo de matéria-prima utilizada na sua produção (Tomczyk *et al.*, 2020).

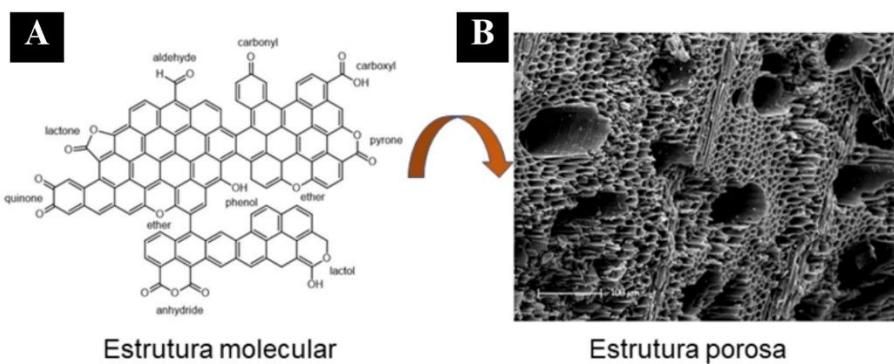


Figura 2. Estrutura aromática do biochar com vários grupos funcionais de superfície e sua organização em estrutura porosa e estável. Fonte: (A) Conte *et al.* (2021); (B) Uk Biochar Research Centre (2021).

Além disso, o biochar é reconhecido como um importante aliado no sequestro de carbono. Sua aromaticidade e composição rica em carbono conferem longa durabilidade ao material, o que influencia na estabilização do carbono orgânico do solo, por meio das interações organo-orgânicas e mineral-orgânicas (Possinger *et al.* 2020)

Cada biochar possui características específicas. Por exemplo, o biochar produzido a partir de resíduos de coco seco apresenta alto teor de carbono fixo, contribuindo para a sua estabilidade no solo e maior retenção de nutrientes. Estudos como os de Lita *et al.* (2022) e Zaitun *et al.* (2022) destacam o uso da casca de coco como matéria-prima ideal para a produção de biochar devido às suas propriedades físico-químicas únicas, que incluem alta capacidade de adsorção e potencial para melhorar a fertilidade do solo. O biochar de bagaço de laranja é rico em carbono orgânico e possui baixo teor de cinzas, o que favorece o incremento de matéria orgânica ao solo. Conforme apontado por Sial *et al.* (2019), esse tipo de biochar melhora as atividades enzimáticas e o conteúdo de carbono orgânico no solo,

sendo uma opção viável para sistemas agrícolas que visam aumentar a produtividade e promover a sustentabilidade.

Silva *et al.* (2023) produziram biochar a partir do bagaço de cana-de-açúcar e observaram elevado pH (9,10) e concentração relevante de nutrientes, como magnésio, potássio e cálcio. Este biochar também apresentou alto teor de carbono e estrutura com muitos poros, favorecendo a retenção de água no solo. Zhao *et al.* (2023) produziram biochar de lodo de esgoto, com alta porosidade e capacidade de retenção de água no solo. Porém, uma das características mais importantes desse biochar é a elevada concentração de nutrientes (Song *et al.*, 2014). Laghari *et al.* (2016) analisaram a área superficial específica (ASE) do biochar de lodo e observaram que houve aumento de 81% com relação à biomassa original.

A Figura 3 ilustra a sequência de processamento de vários resíduos até a produção do biochar. Todos esses resíduos são produzidos em grandes quantidades no Brasil, inclusive no estado de Sergipe, demonstrando o potencial para a produção de biochar. A cada tonelada de resíduos, podem ser obtidos de 300 a 450 kg de biochar (Panwar *et al.*, 2019), ou seja, a eficiência de produção varia de 30 a 45%.

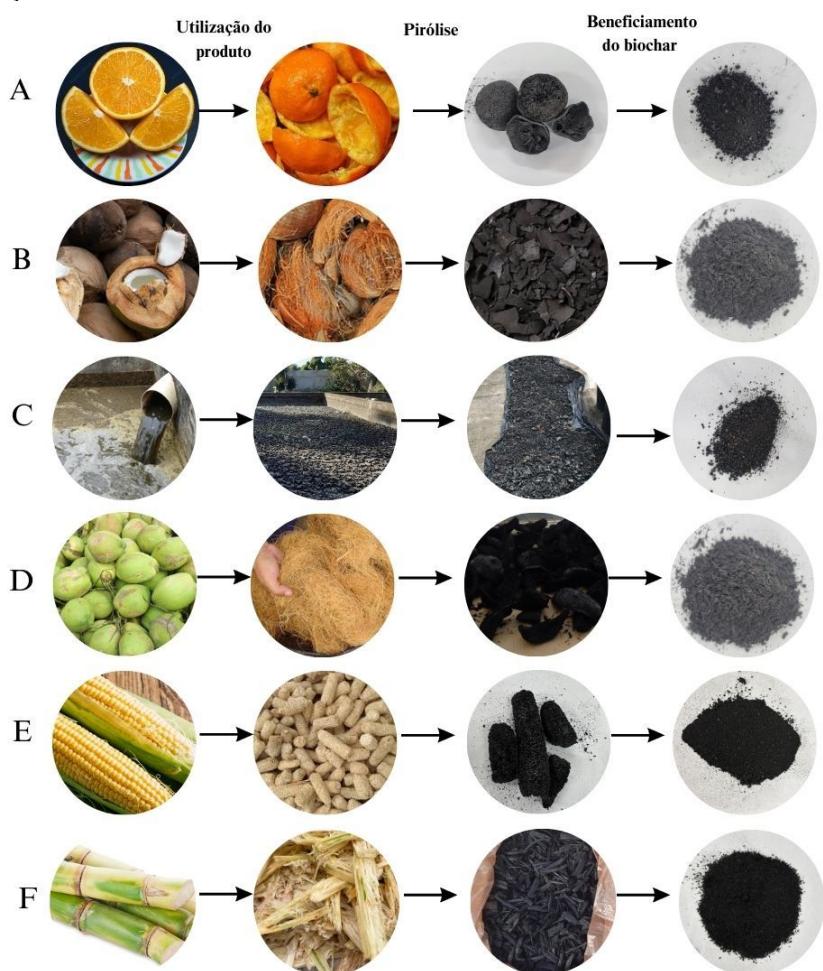


Figura 3. Processos realizados com as matérias-primas para produção de biochar: Casca de laranja (A); Coco seco (B); Lodo de esgoto (C); Coco verde (D); Sabugo de milho (E); Cana-de-açúcar (F). Fonte: Elaboração própria (2025).

Uma característica comum e desejável em todos esses tipos de biochar é a elevada concentração de C fixo presente na estrutura do biochar, o que confere estabilidade ao material no solo após sua aplicação, contrastando com os resultados observados após a aplicação de resíduos não pirolisados (Quadro 1). A concentração de carbono do biochar varia de 40 a 85% (Al-Wabel *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2023; Adhikari *et al.*, 2024). Quanto mais lignificada for a biomassa, maior será sua concentração de C (Demirbaş, 2003). Outra característica interessante é a natureza alcalina do biochar ($\text{pH} > 7,0$). Desse modo, a

aplicação de biochar em solos ácidos e intemperizados brasileiros torna-se uma estratégia eficiente para melhorar a sua qualidade, viabilizando seu uso agrícola e aumentando a produtividade das culturas.

Quadro 1. Teores de carbono e pH de diferentes tipos de biochars.

Biochars	Carbono (%)	pH	Referências
Bagaço de laranja	72,1	9,73	Carvalho Junior <i>et al.</i> , 2019
Serragem de eucalipto	78,6	8,0	Domingues <i>et al.</i> , 2017
Lodo de esgoto	45,5	7,5	Gonzaga <i>et al.</i> , 2018b
Palha de arroz	63,0	10,4	Naeem <i>et al.</i> , 2014
Cana-de-açúcar	69,58	9,10	Silva <i>et al.</i> , 2023
Casca de coco verde	79,8	10,0	Carvalho Junior <i>et al.</i> , 2019
Palha de trigo	62,0	8,8	Naeem <i>et al.</i> , 2014
Bambu	80,9	5,2	Yao <i>et al.</i> , 2012
Esterco de aca	39,37	9,4	Solaiman, Abbott e Murphy, 2019

2.3. Dinâmica do carbono em solos condicionados com biochar

O manejo com biochar no solo é proposto como um mecanismo de sequestro de carbono, inclusive sendo reconhecido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2023) como uma tecnologia promissora de emissão negativa de carbono (NET). Considerando que um dos maiores desafios para a sustentabilidade da agricultura em solos tropicais é a manutenção de níveis adequados de carbono no solo, e ao mesmo tempo assegurar a ciclagem biológica de nutrientes (Tsai; Chang, 2019), o uso do biochar tem sido recomendado como uma alternativa sustentável.

Em sistemas convencionais de manejo de resíduos orgânicos, os processos relacionados à dinâmica de carbono do solo são bem conhecidos. A rápida decomposição dos resíduos adicionados ao solo em regiões de clima tropical e a mineralização intensa da matéria orgânica do solo reduzem os efeitos positivos dessa prática milenar de conservação do solo. Em muitos casos, há necessidade de altas e frequentes doses de materiais orgânicos, aumentando os custos nas propriedades agrícolas e os riscos de emissão de gases (Srivastava *et al.*, 2014).

A adição de resíduos pirolisados ou biochar em solos tropicais tem sido utilizada como alternativa eficaz para o manejo sustentável de resíduos orgânicos, uma vez que a estabilidade do material evita a sua decomposição e permite a sua permanência no solo por milhares de anos (Basak *et al.*, 2022). Porém, ao contrário do que ocorre após a adição de resíduos frescos e maturados ao solo, as interações do biochar com a matéria orgânica já presente no solo não são completamente compreendidas (Schnee *et al.*, 2021). Há estudos que relatam efeitos priming positivo, nulo e negativo (Carvalho Junior *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2021), tornando intrigante o entendimento sobre a degradação da matéria orgânica do solo bem como suas interações com os diferentes componentes.

A dinâmica do carbono, fortemente influenciada pela demanda de energia e nutrientes da microbiota (Kuzyakov *et al.*, 2009), tem recebido atenção crescente, especialmente no contexto do uso do biochar. Quando adicionado ao solo, o biochar, por conter cinzas e carbono orgânico lábil, atua como fonte de energia e nutrientes para os microrganismos, resultando em aumento da biomassa e da atividade microbiana (Lima *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2020).

Hoffland *et al.* (2020) destacam que os estoques lábeis de C são indicadores sensíveis da qualidade do solo e essenciais para avaliar a funcionalidade dos agroecossistemas. No entanto, a influência específica do biochar na labilidade do C e N em solos tropicais é pouco

explorada. Fahad *et al.* (2022) citam mudanças na composição da matéria orgânica do solo, melhoria da mineralização (como resultado de priming positivo) e lixiviação do carbono orgânico do solo após a adição de biochar. Cross e Sohi (2011) destacaram que solos condicionados com biochar demonstraram maior mineralização de C, principalmente devido à presença de C lável no biochar, ainda que em proporção reduzida (Yang *et al.*, 2018).

Apesar de apresentar uma pequena fração de carbono lável, que favorece a microbiota do solo, alguns tipos de biochar contêm substâncias tóxicas presentes na fração lável que, ao invés de estimularem a atividade microbiana, podem causar inibição. Isso resulta em redução dos processos de decomposição da matéria orgânica do solo. Além disso, a maior fração do carbono presente no biochar é recalcitrante e estável. Ao ser adicionado ao solo, parte de suas partículas de granulometria sortida interage com as partículas orgânicas e minerais do solo, enquanto outra parte permanece solta e passa a fazer parte da fração grosseira do solo (Giannetta *et al.*, 2024).

2.4. Distribuição do carbono entre as frações físicas granulométricas em solos com biochar

As fortes ligações químicas que se desenvolvem entre os componentes da matéria orgânica e a fração mineral do solo com diâmetro menor do que 0,053mm (argila e silte), protegem as moléculas orgânicas contra a decomposição. Essas partículas mais finas, além de contribuírem para a formação de agregados, também protegem a matéria orgânica presente no interior desses agregados, limitando as taxas de decomposição (Krull *et al.*, 2003; Lützow *et al.*, 2006; Sollins *et al.*, 2009).

Por essa razão, o fracionamento físico da matéria orgânica é utilizado para identificar a distribuição do carbono orgânico em diversos compartimentos com dinâmicas e funções definidas e assim avaliar a sua qualidade (Teixeira *et al.*, 2017). O fracionamento físico granulométrico, proposto por Cambardella e Elliott (1992), permite quantificar os teores de carbono da MOS associados aos minerais, obtendo dessa técnica as frações pertinentes ao carbono orgânico particulado, associado à fração areia (MOP) e o carbono orgânico associado aos minerais, silte e argila (MOAM).

A composição do carbono no solo não é homogênea. Ao dividir os estoques de carbono em duas frações distintas, a MOP e a MOAM (Figura 4), é possível obter informações mais precisas sobre a vulnerabilidade do solo a diferentes perturbações, como as mudanças climáticas. Essa abordagem permite desenvolver estratégias de manejo em áreas sob cultivo e para o armazenamento de carbono (Cotrufo *et al.*, 2019; Lavallee *et al.*, 2020). Para tanto, é necessário que haja compreensão da composição e das características dessas frações (Figura 4). A fração MOP é predominantemente representada por compostos poliméricos estruturais de origem vegetal e, quando protegida por oclusão física em agregados, possui uma vida relativamente curta, com tempos médios de residência estimados em alguns anos (Von Lützow *et al.*, 2007). Quando não está protegida em agregados (Lal *et al.*, 1997), a persistência da fração MOP é determinada pela sua recalcitrância bioquímica e pela inibição microbiana. Por outro lado, a fração MOAM pode ser formada por compostos orgânicos de baixo peso molecular e lábeis que são, após exudatos ou formados, imediatamente associados às superfícies minerais. Pode também ser formada por compostos mais complexos e humificados. Independentemente do tipo de composto e sua complexidade, a associação com minerais de argila resulta em maior proteção e persistência no solo, com tempos médios de residência na ordem de décadas a séculos (Von Lützow *et al.*, 2007) e uma vulnerabilidade menor a perturbações e alterações ambientais (Rocci *et al.*, 2020).

No entanto, o acúmulo de MOAM depende da disponibilidade de superfície mineral reativa do solo, portanto, pode estar suscetível à saturação dos minerais de argila (Cotrufo *et al.*, 2019). Isso significa que a área de superfície mineral disponível para associação é finita. Portanto, a capacidade de sequestro de carbono de um solo está diretamente relacionada com a textura e tipos de minerais de argila, pois esses fatores determinam a saturação da fração

MOAM. O armazenamento de C na MOAM tem um custo mais baixo pela menor demanda de nitrogênio, uma vantagem importante já que a disponibilidade de nitrogênio é um dos principais fatores limitantes para o sequestro de carbono no solo (Kicklighter *et al.*, 2019).

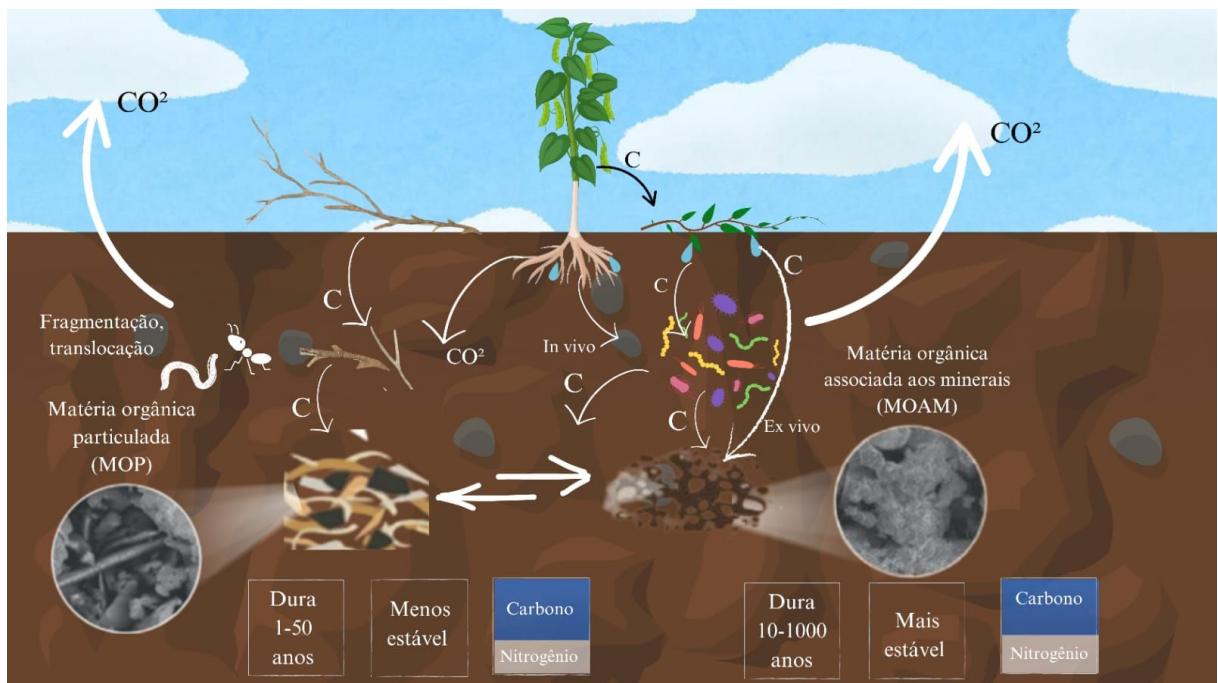


Figura 4. Visão geral das principais diferenças entre matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica associada a minerais (MOAM). Nesta figura, é possível observar os diferentes processos de formação das duas frações bem como as variadas vias de contribuição das fontes de carbono. A fragmentação e translocação provenientes de serrapilheira contribuem principalmente na formação da MOP. Já a MOAM se origina da associação direta (*ex vivo*) ou da transformação realizada pelos microrganismos (*in vivo*) por meio de compostos solúveis e com baixo peso molecular pertencentes a serrapilheira, carbono solúvel lixiviado da parte aérea das plantas, exudatos de raízes e de microrganismos. Quando comparada à MOP, a MOAM tende a manter-se por mais tempo no solo, pois possui maior densidade (ao conter minerais associados) e apresenta relação carbono nitrogênio (C:N) baixa. Fonte: Adaptado de Cotrufo e Lavallee (2022), pela autora (2025).

Alguns estudos têm sido realizados para investigar a influência do biochar nas frações MOP e MOAM do solo (Giannetta *et al.*, 2024; Shi *et al.*, 2021; Cooper *et al.*, 2020; Plaza *et al.*, 2016). Nem todos os resultados são convergentes, principalmente devido à grande variabilidade entre os tipos de biochar, condições climáticas e tipos de solos.

Shi *et al.* (2021) observaram que o biochar de sabugo de milho, produzido a 360 °C, aumentou o teor da fração de carbono orgânico particulado (MOP) e diminuiu o de MOAM. Cooper *et al.* (2020) relataram que a aplicação de 31,5 t ha⁻¹ de biochar de lascas de madeira de faia e pinheiro, produzido a 550 °C, aumentou significativamente a MOP, passando de 3,8% para 30,3%. Segundo os autores, essa mudança sugere que a adição de biochar pode reduzir a taxa média de renovação na fração MOP, potencialmente transformando sua relevância ecológica de uma composição de partículas orgânicas derivadas de plantas para partículas de plantas alteradas termicamente, mais estáveis e capazes de armazenar carbono orgânico por períodos mais longos. Giannetta *et al.* (2024) também observaram aumentos de C tanto na MOP quanto na MOAM após nove anos da aplicação de biochar.

A aplicação de biochar também pode influenciar a distribuição de nitrogênio (N) nas frações MOP e MOAM do solo (Prommer *et al.*, 2014; Hagemann *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2017b). Reações microbiológicas de N no solo, tais como a fixação de N₂, a mineralização do N orgânico nativo do solo, nitrificação e desnitrificação (Clough *et al.*, 2013), podem também sofrer influência da presença de biochar. Além disso, o biochar pode adsorver fisicamente a amônia (NH₃) (Taghizadeh-Toosi *et al.*, 2012) ou liberar NH₄⁺ proveniente de sua própria

mineralização (Schouten *et al.*, 2012). Porém, os mecanismos de interação ainda não estão completamente elucidados (Jeffery *et al.*, 2011).

Sendo assim, essas pesquisas demonstram a necessidade de mais estudos aprofundados para melhor compreensão a respeito do efeito de diferentes biochars na distribuição de C e N nas frações físicas granulométricas da matéria orgânica do solo.

2.5. Efeito do biochar no crescimento de plantas

O biochar vem sendo amplamente estudado como um aliado no desenvolvimento de plantas (Minhas *et al.*, 2020). Por exemplo, na cultura do milho, foram observadas melhorias nas características das raízes, na área foliar e no crescimento das plantas, além de parâmetros morfológicos e relacionados ao rendimento, após a adição de biochar nas doses de 2 e 4 t ha⁻¹ (Minhas *et al.*, 2020). A aplicação do biochar também proporcionou aumento na produtividade do trigo, na biomassa e na absorção de nitrogênio, resultando em maior teor de proteína nos grãos, o que demonstra seu potencial na promoção do crescimento vegetal (Shahzad *et al.*, 2019). Gonzaga *et al.* (2025) observaram melhorias na qualidade do solo e aumento da biomassa do milho após aplicarem biochar de resíduos de coco verde em Argissolo Vermelho-Amarelo. Essas contribuições positivas na produção vegetal são reflexos de melhorias nas propriedades do solo pela aplicação do biochar, especialmente em solos ácidos e de baixa fertilidade (Medeiros *et al.*, 2023). No entanto, o efeito do biochar no crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas é dependente da taxa de aplicação.

Dentre as culturas-teste utilizadas na avaliação do efeito do biochar está a mostarda Indiana, principalmente pela facilidade de cultivo em ambiente protegido. Embora essa planta não seja tão comumente cultivada no Brasil, é encontrada facilmente em regiões áridas e semiáridas. Sua principal variedade é a colza-mostarda, predominante na Índia (Shah *et al.*, 2022). Dentre as culturas oleaginosas do mundo, ocupa o terceiro lugar em importância, atrás apenas da soja e da palma (Islam *et al.*, 2021; Sharma *et al.*, 2019). Trata-se de uma planta adaptada a condições secas, com a capacidade de completar seu ciclo de vida em 3 a 4 meses (Kimber; McGregor, 1995). A faixa de temperatura ideal para o cultivo da mostarda varia entre 15 °C e 22 °C (Simpson, 2010; Shekhawat *et al.*, 2012; Cools; Terry, 2018).

Alguns estudos demonstram a alta responsividade da planta à aplicação de compostos orgânicos e biochar. Charloq *et al.* (2025) observaram aumento de 143% na biomassa da mostarda após aplicação de biochar de esterco de galinha no solo. Gonzaga *et al.* (2018a) reportaram aumento significativo da biomassa da parte aérea e das raízes da mostarda em solo condicionado com biochar. Esses dados demonstram o potencial do biochar em contribuir positivamente para o aumento da produção de biomassa na cultura da mostarda.

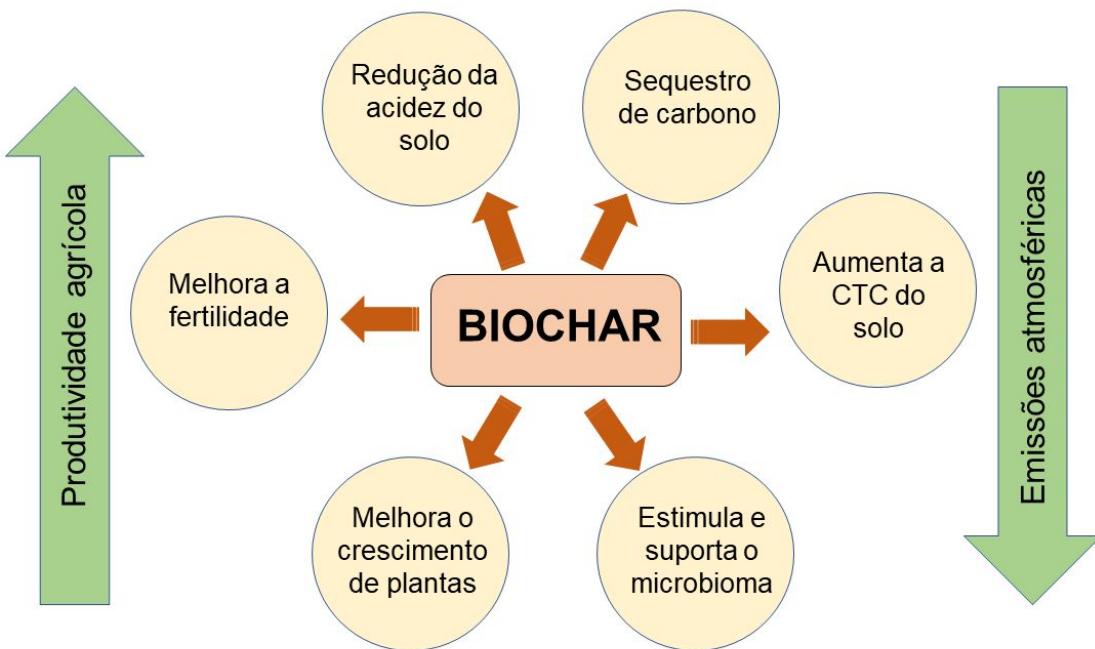


Figura 5. Apresentação dos benefícios do biochar no solo, na fertilidade do solo, nas plantas e na atmosfera. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

2.6. Efeito do biochar no microbioma do solo

Além das propriedades químicas e físicas, o solo abriga a maior diversidade microbiana do planeta (Kirubakaran *et al.*, 2020). As comunidades microbianas do solo apresentam elevada diversidade e densidade populacional, podendo conter até um milhão de espécies e até 10 milhões de microrganismos por grama de solo (Fierer, 2017). Essa diversidade desempenha papel central no ciclo do carbono, na produtividade vegetal e na ciclagem de nutrientes (Dempster *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2018).

A aplicação de biochar pode interferir nesse microbioma, promovendo a atuação de microrganismos benéficos à saúde das plantas e à funcionalidade do solo (Khan *et al.*, 2024), além de favorecer interações simbióticas com fungos micorrízicos, os quais auxiliam na absorção de nutrientes e contribuem para o aumento da biodiversidade do solo (Woolf *et al.*, 2010). Tais efeitos estão relacionados às alterações físicas e químicas no ambiente edáfico induzidas pelo biochar (Lehmann *et al.*, 2011).

Vários aspectos do metabolismo microbiano têm sido objeto de investigação, destacando-se os efeitos do biochar sobre a respiração basal do solo, o carbono da biomassa microbiana e o quociente metabólico. Zhou *et al.* (2017a) relataram que a respiração do solo aumentou após aplicação de biochar em florestas temperadas, enquanto em florestas subtropicais não foram observadas alterações significativas durante o experimento de 24 meses. De forma semelhante, Liu *et al.* (2016) verificaram que a adição de biochar não promoveu alterações expressivas na respiração basal do solo (RS), porém resultou em acréscimos no carbono orgânico do solo (COS) e no carbono da biomassa microbiana (CBM), em 40% e 18%, respectivamente.

De fato, estudos conduzidos em diferentes regiões têm demonstrado alterações na biomassa microbiana, na diversidade e na atividade enzimática do solo após a aplicação de biochar (Pokharel *et al.*, 2020; Jhon; Lucrécia, 2022). No trabalho de Santos *et al.* (2013), ao avaliarem o impacto de doses crescentes de biochar sobre a biomassa microbiana em solo cultivado com soja, durante seis anos, foi constatado que o quociente metabólico (qCO_2) apresentou valores mais elevados no tratamento controle (sem biochar), indicando maior atividade respiratória por unidade de biomassa microbiana em comparação aos tratamentos com biochar.

Carvalho Junior *et al.* (2019), comparando biochars obtidos de casca de coco e bagaço de laranja, observaram respostas distintas na atividade microbiana do solo. O biochar de casca de coco apresentou efeito priming positivo em todas as doses testadas, sobretudo nas menores, favorecendo o crescimento microbiano e a diminuição da emissão de CO₂. Por sua vez, o biochar de bagaço de laranja demonstrou incremento na atividade microbiana apenas na dose de 15 t ha⁻¹, sugerindo uma resposta mais limitada sobre o microbioma do solo.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADHIKARI, S.; MOON, E.; PAZ-FERREIRO, J.; TIMMS, W. Comparative analysis of biochar carbon stability methods and implications for carbon credits. **Science of The Total Environment**, v. 914, p. 169607, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169607> Acesso em: 5 abril. 2025
- ALLING, V. *et al.* The role of biochar in retaining nutrients in amended tropical soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science, Weinheim**, v. 177, p. 671–680, 2014.
- ALVES, R. E. A relação entre agricultura, degradação do solo e tempestades de areia. **Revista Ayika**, v. 1, n. 1, p. 50–66, 2021.
- AL-WABEL, M. I. *et al.* Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. **Bioresource Technology**, v. 131, p. 374–379, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.165>. Acesso em: 03 abr. 2025.
- AMOAKWAH, E. *et al.* Biochar amendment influences tropical soil carbon and nitrogen lability. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 3567–3579, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00628-4> Acesso em: 5 abril. 2025.
- ASSUNÇÃO, S. J. R. *et al.* Soil quality index of an ultisol under long-term plots in the coastal tablelands in northeastern Brazil. **Revista Caatinga**, v. 36, n. 2, p. 432–444, 2023.
- BALIGAR, V.; BENNETT, O. Perspectivas sobre a eficiência do uso de fertilizantes nos trópicos. **Fertilizer Research**, v. 10, p. 83–96, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01073907> Acesso em: 6 dez. 2024.
- BARRETO, M. S. C. *et al.* Efeitos da horticultura nas propriedades da matéria orgânica do solo em solos tropicais altamente intemperizados. **Pesquisa de Solo e Cultivo**, v. 213, p. 105156, 2021.
- BASAK, B. B. *et al.* Revamping highly weathered soils in the tropics with biochar application: What we know and what is needed. **Science of the Total Environment**, v. 822, p. 153461, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153461>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 777–783, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>. Acesso em: 20 maio 2025.
- CARVALHO JUNIOR, J. I. T. *et al.* Type and quantity of biochar influenced soil microbial activity and carbon priming effect. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 4, p. 1405–1415, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n4p1405>. Acesso em: 2 fev. 2025.
- CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C.; ROsolem, C. A. Management impacts on soil organic matter of tropical soils. **Vadose Zone Journal**, v. 14, n. 1, p. 1–8, 2015.

CLOUGH, T. J. *et al.* A review of biochar and soil nitrogen dynamics. **Agronomy**, v. 3, n. 2, p. 275–293, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy3020275>. Acesso em: 15 nov. 2024.

CONTE, Pellegrino; *et al.* Recent Developments in Understanding Biochar's Physical–Chemistry. **Agronomy**, v. 11, n. 4, p. 615–615, 2021.

COOLS, K.; TERRY, L. A. The effect of processing on the glucosinolate profile in mustard seed. **Food Chemistry**, v. 252, p. 343–348, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.096> Acesso em: 8 jan, 2025

COOPER, J. *et al.* Effect of biochar and compost on soil properties and organic matter in aggregate size fractions under field conditions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 295, p. 106882, 2020.

COSTA, N. R. *et al.* Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 852–863, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140269>

COTRUFO, M. F. *et al.* Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nature Geoscience**, v. 12, p. 989–994, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>

COTRUFO, M. F. *et al.* The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 168, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108648>

COTRUFO, M. F.; LAVALLÉE, J. Soil organic matter formation, persistence and functioning: a synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. **Advances in Agronomy**, v. 172, p. 1–50, 2021.

CROSS, A.; SOHI, S. P. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 10, p. 2127–2134, 2011.

DE MEDEIROS, E. V. *et al.* Biochar and *Trichoderma* as an eco-friendly and low-cost alternative to improve soil chemical and biological properties. **Waste and Biomass Valorization**, v. 15, p. 1439–1450, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02240-2> Acesso em: 14 jun. 2024.

OLIVEIRA, A. M. **Resiliência e sequestro de carbono por floresta manejada na Amazônia Oriental – Vale do Jari**. 2021. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal do Amapá, Macapá-AP, 2021.

DEMİRBAŞ, A. Relationships between lignin contents and fixed carbon contents of biomass samples. **Energy Conversion and Management**, v. 44, p. 1481–1486, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0196-8904\(02\)00168-1](https://doi.org/10.1016/s0196-8904(02)00168-1). Acesso em: 26 ago. 2024.

DEMPSTER, D. N. *et al.* Redução da biomassa microbiana do solo e da mineralização de nitrogênio com a adição de biochar de eucalipto a um solo de textura grossa. **Plant and Soil**,

v. 354, p. 311–324, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1067-5> Acesso em: 26 ago. 2024.

DOMINGUES, R. R. *et al.* Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **PLoS ONE**, v. 12, e0176884, 2017.

DONAGEMMA, G. K. *et al.* Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1003–1020, 2016.

FAHAD, S. *et al.* Sistemas agroflorestais para melhoria e manutenção da saúde do solo. **Sustentabilidade**, v. 14, n. 22, p. 14877, 2022.

FERNANDES, K. L. *et al.* Characterization, classification and analysis of the main properties of the Southwestern Goias soil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, p. 1135–1154, 2016.

FIDALSKI, J.; HELBEL JUNIOR, C. Available water content for the management of irrigated crops in the northwestern region of Paraná State. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 2, p. 3976–3986, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.7127/rbai.v14n101152> Acesso em: 8 maio. 2024.

FIERER, N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. **Nature Reviews Microbiology**, v. 15, n. 10, p. 579–590, 2017.

FISCHER, P. *et al.* Phosphorus saturation and superficial fertilizer application as key parameters to assess the risk of diffuse phosphorus losses from agricultural soils in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 630, p. 1515–1527, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.070> Acesso em: 25 abr. 2024.

GAO, S.; DELUCA, T. H. Wood biochar impacts soil phosphorus dynamics and microbial communities in organically-managed croplands. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 126, p. 144–150, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.09.002> Acesso em: 24 jun. 2024.

GAZOLLA, P. R. *et al.* Fractions of soil organic matter under pasture, tillage system and crop-livestock integration. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 2, p. 693–704, 2015.

GIANNETTA, Beatrice; *et al.* Distribution of soil organic carbon between particulate and mineral-associated fractions as affected by biochar and its co-application with other amendments. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 360, p. 108777–108777, 2023.

GLASER, B.; LEHR, V.-I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. **Scientific Reports**, v. 9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45693-z> Acesso em: 26 out. 2024.

GMACH, M. R. *et al.* Processes that influence dissolved organic matter in the soil: A review. **Scientia Agricola**, v. 77, e20180164, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0164> Acesso em: 14 jun. 2024.

GONZAGA, M. I. S. *et al.* Assessing biochar applications and repeated *Brassica juncea* L. production cycles to remediate Cu contaminated soil. **Chemosphere**, v. 201, p. 278–285, 2018a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.038> Acesso em: 2 dez. 2024.

GONZAGA, M. I. S. *et al.* Assessing the impact of pre-treated green coconut waste biochar on tropical soil fertility, initial plant growth, and nutrient uptake using PCA analysis. **Journal of Soils and Sediments**, v. 25, p. 1213–1226, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11368-025-04005-x> Acesso em: 23 mar. 2024.

GONZAGA, M. I. S. *et al.* Atlantic forest soil as reference in the soil quality evaluation of coconut orchards (*Cocos nucifera* L.) under different management. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 6, p. 3847–3857, 2016.

GONZAGA, M. I. S. *et al.* Nitrogen and phosphorus uptake efficiency in Indian mustard cultivated during three growth cycles in a copper contaminated soil treated with biochar. **Ciência Rural**, v. 49, n. 1, e20170592, 2019.

GONZAGA, M. I. S. *et al.* Sewage sludge derived biochar and its effect on the growth and morphological traits of *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden seedlings. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 687–695, 2018b.

GONZAGA, M. I. S. *et al.* Use of organic waste biochar as an innovative alternative for increasing agricultural productivity in small rural communities. **Research, Society and Development**, v. 10, p. e8910413848, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.13848> Acesso em: 3 mar. 2024.

GONZAGA, M. I. S.; SOUZA, D. C. F. de; SANTOS, J. C. de J. Uso de biochar de resíduos orgânicos como alternativa inovadora para aumento da produtividade agrícola em pequenas comunidades rurais. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 10, n. 4, p. e8910413848, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.13848> Acesso em: 14 jul. 2024.

GUIMARÃES, D. V.; GONZAGA, M. I. S.; MELO NETO, J. de O. Manejo da matéria orgânica do solo e estoques de carbono em cultivos de frutas tropicais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 301–306, 2014.

HAGEMANN, N. *et al.* Nitrate capture and slow release in biochar amended compost and soil. **PLOS ONE**, v. 12, n. 2, p. e0171214, 2017.

HAN, M. *et al.* Effect of biochar addition on crop yield, water and nitrogen use efficiency: A meta-analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 420, p. 138425, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138425> Acesso em: 8 nov. 2024.

HEMMAT, A.; ADAMCHUK, V. I. Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 63, n. 2, p. 89–103, 2008.

HOFFLAND, E. *et al.* Eco-functionality of organic matter in soils. **Plant and Soil**, v. 455, n. 1-2, p. 1–22, 2020.

HOODA, P. S. *et al.* Relating soil phosphorus indices to potential phosphorus release to water. **Journal of Environmental Quality**, v. 29, p. 1166–1171, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900040018x> Acesso em: 18 set. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Summary for Policymakers. In: LEE, H. et al. (Coord.) **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Geneva: IPCC, 2023. p. 1–34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

ISLAM, S. et al. Glycine betaine mediated changes in growth, photosynthetic efficiency, antioxidant system, yield and quality of mustard. **Scientia Horticulturae**, v. 285, p. 110170, 2021.

JEFFERY, S. et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 144, n. 1, p. 175–187, 2011.

JHON, D. C.; LUCRÉCIA, M. Biochar increases soil carbon pools: Evidence from a global meta-analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 305, p. 114403, 2022.

JIEN, S.-H.; KUO, Y.-L.; LIAO, C.-S.; WU, Y.-T.; IGALAVITHANA, A. D.; TSANG, D. C. W.; OK, Y. S. Effects of field scale in situ biochar incorporation on soil environment in a tropical highly weathered soil. **Environmental Pollution**, v. 272, p. 116009, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116009> Acesso em: 6 out. 2024.

JOSEPH, S. et al. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. **BCV Bioenergy**, v. 13, p. 1731–1764, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/BCVb.12885>. Acesso em: 9 mar. 2025.

KALLENBACH, C. M. et al. Microbial physiology and necromass regulate agricultural soil carbon accumulation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 91, p. 279–290, 2015.

KHAN, S. et al. Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: A review. **Plants**, v. 13, p. 166, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants13020166>. Acesso em: 18 set. 2024.

KICKLIGHTER, D. W. et al. Future nitrogen availability and its effect on carbon sequestration in Northern Eurasia. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 3024, 2019.

KIMBER, D. S.; MCGREGOR, D. I. The species and their origin, cultivation and world production. In: KIMBER, D. S.; MCGREGOR, D. I. **Brassica oilseeds: Production and utilization**. Wallingford: CABI, 1995. p. 1–9.

KIRUBAKARAN, R. et al. Emerging priorities for microbial metagenome research. **Bioresource Technology Reports**, v. 11, p. 100485, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100485>. Acesso em: 14 jun. 2024.

KRISHNAN, S. et al. Current technologies for recovery of metals from industrial wastes: An overview. **Environmental Technology & Innovation**, v. 22, p. 101525, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101525>. Acesso em: 3 jan. 2025.

KRULL, E. S.; BALDOCK, J. A.; SKJEMSTAD, J. O. Importância dos mecanismos e processos de estabilização da matéria orgânica do solo para a modelagem da renovação do carbono. **Functional Plant Biology**, v. 30, n. 2, p. 207–222, 2003.

KUMAR, R. *et al.* A plantação de árvores e a conservação da água no solo aumentam a resiliência climática e o sequestro de carbono do agroecossistema em ravinas semiáridas degradadas. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 282, p. 107857, 2020.

KUZYAKOV, Y. *et al.* Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 2, p. 210–219, 2009.

LAGHARI, M. *et al.* Recent developments in biochar as an effective tool for agricultural soil management: a review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 15, p. 4840-4849, 2016.

LAL, R. Carbon sequestration. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1492, p. 815–830, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>. Acesso em: 16 maio 2025.

LAL, R. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. **Land Degradation & Development**, v. 17, n. 2, p. 197–209, 2006.

LAL, R. *et al.* (Ed.). **Processos do solo e o ciclo do carbono**. Boca Raton: CRC Press, 1997.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, p. 261–273, 2020. <https://doi.org/10.1111/GCB.14859> Acesso em: 2 nov. 2024.

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

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. London: Routledge, 2015.

LENG, L. *et al.* An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. **Science of the Total Environment**, v. 763, p. 144204, 2021.

LI, Q. *et al.* Biochar affects organic carbon composition and stability in highly acidic tea plantation soil. **Journal of Environmental Management**, v. 370, p. 122803, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122803> Acesso em: 14 jun. 2024.

LI, S.; TASNADY, D. Biochar for soil carbon sequestration: current knowledge, mechanisms, and future perspectives. **C – Journal of Carbon Research**, v. 9, p. 67, 2023. <https://doi.org/10.3390/c9030067> Acesso em: 3 maio. 2024.

LIMA NETO, J. A. *et al.* Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos de Latossolos e Argissolos dos tabuleiros costeiros do Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 473–486, 2010.

LIMA, J. R. de S. *et al.* Effect of biochar on physicochemical properties of a sandy soil and maize growth in a greenhouse experiment. **Geoderma**, v. 319, p. 14–23, 2018.

LITA, A. L. *et al.* Characteristics biochar from young coconut waste based on particle size as améliorant. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 959, p. 012034, 2022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/959/1/012034> Acesso em: 18 jan. 2024.

LIU, B. *et al.* Toxicological effect assessment of aged biochar on *Escherichia coli*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 436, p. 129242, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129242> Acesso em: 25 mar. 2024.

LIU, S. *et al.* Mineral-ions modified biochars enhance the stability of soil aggregate and soil carbon sequestration in a coastal wetland soil. **Catena**, v. 193, p. 104618, 2020.

LIU, S. *et al.* Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis. **BCV Bioenergy**, v. 8, n. 2, p. 392–406, 2016.

LOSS, A. *et al.* Fertilidade do solo e matéria orgânica em Vertissolo e Argissolo sob cobertura florestal e pastagem no Estado do Acre. **Comunicata Scientiae**, v. 5, n. 1, p. 1–10, 2014.

LOSS, A. *et al.* Particulate organic matter in soil under different management systems in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, v. 50, n. 8, p. 685–693, 2013.

LÜTZOW, M. V. *et al.* Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. **European Journal of Soil Science**, v. 57, n. 4, p. 426–445, 2006.

MAGDOFF, F.; VAN ES, H. M. Building soils for better crops: sustainable soil management. 4. ed. Washington, DC: Sustainable Agriculture Research and Education (SARE), **National Institute of Food and Agriculture**, USDA, 2021.

MANGALASSERY, S.; KALAIYANAN, D.; PHILIP, P. S. Effect of inorganic fertilisers and organic amendments on soil aggregation and biochemical characteristics in a weathered tropical soil. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 144–151, 2019.

MINHAS, W. A. *et al.* Synergetic use of biochar and synthetic nitrogen and phosphorus fertilizers to improves maize productivity and nutrient retention in loamy soil. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, p. 1356–1368, 2020. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1729804> Acesso em: 13 ago. 2024.

MOHAN, D.; PITTMAN JR, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. **Energy & Fuels**, v. 20, n. 3, p. 848–889, 2006.

MUGGLER, C. C.; BUURMAN, P.; VAN DOESBURG, J. D. J. Weathering trends and parent material characteristics of polygenic oxisols from Minas Gerais, Brazil: I. Mineralogy. **Geoderma**, v. 138, p. 39–48, 2007.

NAEEM, M. A.; KHALID, M.; ARSHAD, M.; AHMAD, R. Rendimento e composição de nutrientes do biocarvão produzido a partir de diferentes matérias-primas em diferentes temperaturas pirolíticas. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 51, p. 75–82, 2014.

NASCIMENTO, R. F.; NETO, V. O. S.; MELO, D. Q. **Uso de bioadsorventes lignocelulósicos na remoção de poluentes de efluentes aquosos.** 1. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

NEHELA, Y.; MAZROU, Y. S. A.; ALSHAAL, T.; RADY, A. M. S.; EL-SHERIF, A. M. A.; OMARA, A. E.-D. *et al.* The integrated amendment of sodic-saline soils using biochar and plant growth-promoting rhizobacteria enhances maize (*Zea mays* L.) resilience to water salinity. **Plants**, v. 10, n. 9, p. 1960, 2021.

NÓBREGA, I. P. C. **Efeitos do biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: sequestro de carbono no solo.** 2011. 46 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Ciências Sociais da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2011.

NONE CHARLOQ, R. P. S.; ABU, Y. Biochar application as a soil improver to increase growth of mustard greens (*Brassica juncea* L.) as a vision of sustainable agriculture. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1452, p. 012022, 2025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1452/1/012022> Acesso em: 18 jun. 2024.

PALANSOORIYA, K. N.; WONG, J. T. F.; HASHIMOTO, Y. Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review. **Biochar**, v. 1, p. 3–22, 2019.

PANWAR, N. L.; PAWAR, A.; SALVI, B. L. Comprehensive review on production and utilization of biochar. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 2, p. 168, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0172-6> Acesso em: 5 jun. 2024.

PAUSTIAN, K. *et al.* Climate-smart soils. **Nature**, v. 532, n. 7597, p. 49–57, 2016.

PLAZA, C. *et al.* Response of different soil organic matter pools to biochar and organic fertilizers. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 225, p. 150–159, 2016.

POKHAREL, P.; MA, Z.; CHANG, S. X. Biochar increases soil microbial biomass with changes in extra- and intracellular enzyme activities: a global meta-analysis. **Biochar**, v. 2, n. 1, p. 65–79, 2020.

PROMMER, J. *et al.* Biochar decelerates soil organic nitrogen cycling but stimulates soil nitrification in a temperate arable field trial. **PLOS ONE**, v. 9, n. 1, p. e86388, 2014.

POSSINGER, A. R. *et al.* Organo–organic and organo–mineral interfaces in soil at the nanometer scale. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, 30 nov. 2020.

PUTRA, L.; NATADIPUTRI, G. H.; MERYANDINI, A.; SUWANTO, A. Isolation, cloning and co-expression of lipase and foldase genes of *Burkholderia territorii* GP3 from mount papandayan soil. **Bioresource Technology Reports**, 2019.

RAMOS, F.T. *et al.* Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Oxford, v. 98, n. 8, p. 3595–3602, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jsfa.8881>. Acesso em: 5 abril 2025.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F.; KER, J. C. **Pedologia: base para distinção de ambientes.** Lavras: UFLA, 2014. 378 p.

RIBEIRO, K. H.; FAVARETTO, N.; DIECKOW, J.; SOUZA, L. C. D.; MINELLA, J. P. G.; DE ALMEIDA, L.; RAMOS, M. R. Quality of surface water related to land use: a case study in a catchment with small farms and intensive vegetable crop production in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 656–668, 2014.

ROCCI, K.; COTRUFO, M. F.; LAVALLÉE, J. M. A resposta do carbono orgânico do solo ao aquecimento climático depende da sua distribuição entre reservatórios de matéria orgânica associada a partículas e minerais. In: **Resumos da Reunião de Outono da AGU**, 2020. p. B010-02.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, J. L. S.; MADARI, B. E.; TSAI, S. M. Efeito da biocarvão após seis anos de cultivo de soja (*Glycine max* L.) na biomassa microbiana do solo, em cerrado. In: X ENCONTRO BRASILEIRO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS, 10., 2013. **Anais**. Brasília: Embrapa Arroz e Feijão, 2013. p. 1–3.

SCHNEE, L. S.; NGAKOU, A.; FILSER, J. Does biochar enhance soil organic matter formation in tropical soils? **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 648, p. 012195, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/648/1/012195> Acesso em: 14 abr. 2025.

SCHOUTEN, S. *et al.* Bioenergy from cattle manure? Implications of anaerobic digestion and subsequent pyrolysis for carbon and nitrogen dynamics in soil. **BCV Bioenergy**, v. 4, n. 6, p. 751–760, 2012.

SHAH, S. H.; PARREY, Z. A.; ISLAM, S.; TYAGI, A.; AHMAD, A.; MOHAMMAD, F. Exogenously applied sulphur improves growth, photosynthetic efficiency, enzymatic activities, mineral nutrient contents, yield and quality of *Brassica juncea* L. **Sustainability**, v. 14, n. 21, p. 14441, 2022.

SHARMA, R.; BHARDWAJ, R.; THUKRAL, A. K.; AL-HUQAIL, A. A.; SIDDIQUI, M. H.; AHMAD, P. Oxidative stress mitigation and initiation of antioxidant and osmoprotectant responses mediated by ascorbic acid in *Brassica juncea* L. subjected to copper (II) stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 182, p. 109436, 2019.

SHEKHAWAT, K.; RATHORE, S.; PREMI, O.; KANDPAL, B.; CHAUHAN, J. Advances in agronomic management of Indian mustard (*Brassica juncea* (L.) Czernj. Cosson): an overview. **International Journal of Agronomy**, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/408284> Acesso em: 14 jan. 2025.

SHI, S.; ZHANG, Q.; LOU, Y.; DU, Z.; WANG, Q.; HU, N.; SONG, J. Soil organic and inorganic carbon sequestration by consecutive biochar application: results from a decade field experiment. **Soil Use and Management**, v. 37, n. 1, p. 95–103, 2021.

SIAL, T. A.; LAN, Z.; KHAN, M. N.; ZHAO, Y.; KUMBHAR, F.; LIU, J.; ZHANG, A.; HILL, R. L.; LAHORI, M. A. H.; MEMON, M. Evaluation of orange peel waste and its biochar on greenhouse gas emissions and soil biochemical properties within a loess soil. **Waste Management**, v. 87, p. 125–134, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.042> Acesso em: 3 abr. 2025.

SILVA, H. D. M.; ALCANTARA, G. U.; SOUZA, L. Z. M. de; BEZERRA, A. C. da S.; GONÇALVES, E. P.; COSTA, G. H. G.; ALVES, A. B.; MACHADO, A. R. T.; FERREIRA, O. E. Produção e caracterização do biochar obtido de palha de cana-de-açúcar. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 28, n. 4, e20230218, 2023. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0218> Acesso em: 5 jun. 2024.

SILVA, T. L. *et al.* Soil chemical quality in irrigated agricultural areas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 1, p. 1–8, 2019.

SIMPSON, M. G. Diversity and classification of flowering plants. Eudicots. **Plant Systematics**, p. 275–448, 2010. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374380-0.50008-7> Acesso em: 1 maio. 2025.

SOLAIMAN, Z. M.; ABBOTT, L. K.; MURPHY, D. V. Biochar phosphorus concentration dictates mycorrhizal colonisation, plant growth and soil phosphorus cycling. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 2019.

SOLLINS, P.; KRAMER, M. G.; SWANSTON, C.; LAJTHA, K.; FILLEY, T.; AUFDENKAMPE, A. K.; WAGAI, R.; BOWDEN, R. D. Sequential density fractionation across soils of contrasting mineralogy: evidence for both microbial- and mineral-controlled soil organic matter stabilization. **Biogeochemistry**, v. 96, p. 209–231, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9359-z> Acesso em: 8 jun. 2025.

SONG, D.; TANG, J.; XI, X.; ZHANG, S.; LIANG, G.; ZHOU, W.; WANG, X. Respostas de nutrientes do solo e atividades microbianas à adição de biochar de palha de milho e fertilização química em solo calcário. **European Journal of Soil Biology**, v. 84, p. 1–10, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.11.003> Acesso em: 10 jun. 2025.

SONG, X. D.; XUE, X. Y.; CHEN, D. Z.; HE, P. J.; DAI, X. H. Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and heavy metal accumulation. **Chemosphere**, v. 109, p. 213–220, 2014.

SRIVASTAVA, A. K. *et al.* SSNM-based rationale of fertilizer use in perennial crops: a review. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 84, n. 1, 2014.

SWIFT, M. J.; HEAL, O. W.; ANDERSON, J. M. **Decomposition in terrestrial ecosystems**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1979. 384 p.

TAGHIZADEH-TOOSI, A. *et al.* Biochar adsorbed ammonia is bioavailable. **Plant and Soil**, v. 350, p. 57–69, 2012.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: Embrapa, 2017.

THOMAS, S. C.; GALE, N. Biochar and forest restoration: a review and meta-analysis of tree growth responses. **New Forests**, v. 46, p. 931–946, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9491-7> Acesso em: 17. 2025.

TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 19, p. 191–215, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3> Acesso em: 6 abr. 2025.

TORCHIA, D. F. DE O. *et al.* Effects of artisanal biochar applied to rice cultivation in fragile sandy planosol at Rio de Janeiro (Brazil). **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 24, n. 1, p. 172–189, 2023.

TSAI, C.-C.; CHANG, Y.-F. Dinâmica do carbono e fertilidade em solos alterados com biocarvão com aplicação excessiva de composto. **Agronomia**, v. 9, n. 9, p. 511, 2019.

VALADÃO, F. C. A. *et al.* Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 243–255, 2015.

VON LÜTZOW, M. *et al.* SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 9, p. 2183–2207, 2007.

WOOLF, D. *et al.* Sustainable biochar to mitigate global climate change. **Nature Communications**, v. 1, p. 1–9, 2010. <https://doi.org/10.1038/ncomms1053> Acesso em: 27 abr. 2025.

YANG, X. *et al.* Labile organic carbon fractions and carbon pool management index in a 3-year field study with biochar amendment. **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, n. 4, p. 1569–1578, 2018.

YAO, Y. *et al.* Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium and phosphate in a sandy soil. **Chemosphere**, v. 89, p. 1467–1471, 2012.

YE, L. *et al.* Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: a meta-analysis of field studies using separate controls. **Soil Use and Management**, v. 36, p. 2–18, 2019. <https://doi.org/10.1111/sum.12546> Acesso em: 16 jun. 2025.

ZAITUN, Z. *et al.* Surface morphology properties of biochar feedstock for soil amendment. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 951, p. 012034, 2022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/951/1/012034> Acesso em: 12 jun. 2025.

ZELAYA, K. P. S. **Caracterização de biocarvão de lodo de esgoto e bagaço de cana-de-açúcar e efeitos no cultivo de beterraba**. 2016. 71 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

ZHAO, L. *et al.* Sewage sludge derived biochar for environmental improvement: advances, challenges, and solutions. **Water Research X**, v. 18, p. 100167, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2023.100167> Acesso em: 5 maio. 2025.

ZHENG, T. *et al.* Positive and negative priming effects in an Ultisol in relation to aggregate size class and biochar level. **Soil and Tillage Research**, v. 208, p. 104874, 2021.

ZHOU, G. Y. *et al.* Biochar increased soil respiration in temperate forests but had no effects in subtropical forests. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 339–349, 2017a.

ZHOU, Y. *et al.* Enhancement of soil nitrogen retention during winter by biochar application: implications of biochar pyrolysis temperature for plant nitrogen availability. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 236, p. 61–68, 2017b.

ZIMMERMAN, A. R.; GAO, B.; AHN, M.-Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, p. 1169–1179, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.02.005> Acesso em: 6 jun. 2025.

4. ARTIGO 1

O PAPEL MULTIFUNCIONAL DO BIOCHAR NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO, NA MICROBIOTA E NO DESEMPENHO DAS PLANTAS

RESUMO

O manejo do biochar na agricultura é uma tecnologia multifuncional devido às suas muitas características benéficas no sistema solo-planta-atmosfera. Além do armazenamento eficaz do carbono, o resíduo pirolisado melhora a saúde do solo e aumenta a produtividade das culturas. Como o efeito do biochar depende do tipo de biomassa original, o presente estudo avaliou algumas propriedades químicas e biológicas do solo e o crescimento da mostarda Indiana após a aplicação de quatro tipos de biochar (bagaço de laranja pêra-BL, bagaço de cana-de-açúcar-BC, sabugo de milho-BM e resíduos do coco verde-BCV), na dose de 50 t ha⁻¹. O experimento foi em delineamento inteiramente casualizado, em estufa agrícola, com quatro repetições. O efeito do biochar no pH (BCV), nitrogênio do solo (BM), P extraível e nitrogênio na parte aérea foi mínimo e pode estar relacionado com o pH inicial do solo (6,0). Todos os biochars aumentaram a concentração de carbono (108%, BCV e, em média, 175% para os demais BL, BC e BM) e fósforo total (22-38%), mas igualmente reduziram (24%) a proporção de fósforo disponível. BL pode ser uma fonte interessante de Ca e P no solo em função tanto da sua composição rica em Ca e P quanto do elevado teor de cinzas, porém reduziu o crescimento da planta. A aplicação de doses menores precisa ser investigada para aumentar o seu potencial de uso no solo. BCV aumentou a massa da parte aérea e, principalmente, das raízes, mas não foi resultado da nutrição das plantas em N, P, Ca e Mg. Esse biochar foi o que mais causou estresse na microbiota do solo, pois uma reduzida biomassa microbiana foi muito ativa na liberação de carbono na forma de CO₂, resultando no mais elevado quociente metabólico (0,27 mg C kg⁻¹ dia⁻¹). Já o BC aumentou significativamente o crescimento da planta e estimulou o crescimento microbiano em 23%, sem aumentar as perdas de carbono ou alterar o quociente metabólico, mostrando-se uma boa alternativa como condicionador de solo. Os resultados obtidos confirmam a variabilidade dos biochars, mas sugerem que a interpretação integrada de seus efeitos no solo, na microbiota e nas plantas é complexa, necessitando de avaliações mais detalhadas tanto das doses aplicadas quanto de outras características, como a capacidade de retenção e disponibilização de água.

Palavras-chave: Microbioma; resíduos agroindustriais; economia circular; mostarda Indiana; *Brassica juncea*.

ABSTRACT**THE MULTIFUNCTIONAL ROLE OF BIOCHAR IN SOIL CHEMICAL PROPERTIES, MICROBIOTA AND PLANT PERFORMANCE**

Biochar management in agriculture is a multifunctional technology due to its many beneficial properties in the soil-plant-atmosphere system. In addition to efficient carbon storage, the pyrolyzed residue improves soil health and increases crop productivity. Because the effect of biochar depends on the type of original biomass, this study evaluated some chemical and biological soil properties and the growth of Indian mustard after the application of four types of biochar (*pera* orange pomace - BL, sugarcane bagasse - BC, corncob - BM, and green coconut residue - BCV) at a rate of 50 t ha⁻¹. The experiment was conducted in a completely randomized design, in an agricultural greenhouse, with four replicates. The effect of biochar on pH (BCV), soil nitrogen (BM), extractable P, and shoot nitrogen was minimal and may be related to the initial soil pH (6.0). All biochars increased carbon concentration (108% for BCV and, on average, 175% for the others: BL, BC, and BM) and total phosphorus (22-38%), but also reduced the proportion of available phosphorus (24%). BL can be an interesting source of Ca and P in the soil due to both its Ca and P-rich composition and its high ash content; however, it reduced plant growth. The application of lower doses needs to be investigated to increase its potential use in soil. BCV increased shoot and especially root mass, but this did not result in plant nutrition with N, P, Ca, or Mg. This biochar caused the most stress on the soil microbiota, as a reduced microbial biomass was very active in releasing carbon in the form of CO₂, resulting in the highest metabolic quotient (0.27 mg C kg⁻¹ day⁻¹). BC significantly increased plant growth and stimulated microbial growth by 23% without increasing carbon losses or altering the metabolic quotient, proving to be a good alternative as a soil conditioner. The results confirm the variability of biochars but suggest that the integrated interpretation of their effects on soil, microbiota, and plants is complex, requiring more detailed evaluations of both the applied doses and other characteristics, such as water retention and availability.

Key-words: Microbiome; agroindustrial wastes; Circular economy; Indian mustard; *Brassica juncea*.

4.1. Introdução

Estima-se que, em 2050, metade da população mundial habitará regiões tropicais. Os solos desses ambientes são suscetíveis à rápida mineralização e perda da matéria orgânica do solo (MOS) devido às condições edafoclimáticas que favorecem altas temperaturas, umidade e aeração do solo, resultando em intensa atividade microbiana e decomposição acelerada dos resíduos orgânicos (Castro *et al.*, 2015; Mangalassery *et al.*, 2019; Basak *et al.*, 2022). Como consequência, a longevidade de boa parte dos componentes orgânicos, imprescindíveis para a CTC (Ramos *et al.*, 2018) e retenção de água em solos muito intemperizados, é efêmera, tornando o sistema de produção pouco sustentável.

Dessa forma, a aplicação de resíduos orgânicos tradicionais não tem resultado em aumento significativo da matéria orgânica do solo, além de aumentar os custos de produção nas propriedades agrícolas. No contexto dos solos tropicais e das mudanças climáticas, o uso do biochar como condicionador do solo tem sido amplamente investigado (Chagas *et al.*, 2022; Dokooohaki *et al.*, 2017; Gonzaga *et al.*, 2025; Lima; Rodrigues, 2024; Pandian *et al.*, 2024; Shyam *et al.*, 2025) devido à sua capacidade de melhorar propriedades químicas (Banik *et al.*, 2023; Piveta *et al.*, 2021; Puga *et al.*, 2020; Shetty; Prakash, 2020), físicas (Santos *et al.*, 2022b) e biológicas (Barbosa *et al.*, 2024; Bolan *et al.*, 2024; Deshoux *et al.*, 2023; Hagemann *et al.*, 2017) do solo de forma duradoura. A estimativa de permanência do biochar no solo é de centenas a milhares de anos (Adhikari *et al.*, 2024; Joseph *et al.*, 2021; Spokas, 2010), e seu potencial para o sequestro de carbono é estimado em 0,2 a 6,6 Gt CO₂ eq ano⁻¹ (IPCC, 2022).

O biochar é um material rico em carbono e é produzido pela conversão termoquímica de qualquer tipo de matéria-prima de natureza orgânica, na ausência ou presença limitada de oxigênio (Wang *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2022), em temperaturas que podem variar de 400 a 800 °C, com variados tempos de produção durante a pirólise (de segundos a dias) e em diferentes equipamentos de pirólise (dos mais artesanais aos mais sofisticados). Com tantos fatores de variação para a obtenção do biochar, é evidente que o produto final apresente uma enorme variabilidade em suas características (Joseph *et al.*, 2021; Lehmann *et al.*, 2011, razão que dificulta a avaliação de seus resultados quando aplicado em diferentes solos, sob diferentes condições climáticas e em diferentes espécies de plantas (Joseph *et al.*, 2021).

Pesquisas indicam que o biochar melhora as propriedades do solo em função de sua alta porosidade, elevada superfície específica, presença de grupos funcionais diversos que podem exibir cargas negativas e positivas (Lima; Rodrigues, 2024), contribuindo para a CTC e CTA. Consequentemente, o biochar apresenta propriedades adsorventes e absorventes que contribuem para a retenção de água e nutrientes. Devido à natureza alcalina da maioria dos biochars (Shetty; Prakash, 2020; Yuan *et al.*, 2011), a sua aplicação em solos intemperizados e geralmente ácidos promove aumento imediato do pH e redução da toxidez por Al³⁺ (Shetty; Prakash, 2020; Masud *et al.*, 2020). Muitos biochars são ricos em nutrientes como N, P, K, Ca e Mg (Masud *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2010).

Os efeitos positivos do biochar sobre as propriedades físicas e químicas do solo são comuns e facilmente observados, embora em variados graus de intensidade (Cabeza *et al.*, 2018; Głab *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2020 Zanutel *et al.*, 2023). Por exemplo, Shetty e Prakash (2020) aplicaram 20 t ha⁻¹ de biochar de madeira em um solo ácido e observaram significativo aumento do pH, o que foi atribuído não apenas à alcalinidade do biochar, mas também à presença de cátions básicos e carbonato de cálcio equivalente em sua composição.

O biochar pode ainda influenciar a comunidade microbiana do solo, promovendo microrganismos benéficos à saúde das plantas e ao funcionamento do solo (Khan *et al.*, 2024; Hagemann *et al.*, 2017; Bolan *et al.*, 2024), que é conhecido por abrigar a maior diversidade microbiana do planeta (Kirubakaran *et al.*, 2020), com até 10 bilhões de microrganismos por grama de solo (Putra *et al.*, 2019; Gastauer *et al.*, 2019). Essa diversidade está profundamente

ligada ao ciclo do carbono, à produtividade vegetal e à ciclagem de nutrientes (Dempster *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2018).

A influência do biochar nas plantas também tem sido objeto de muitos estudos (Guo *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2024; Araujo *et al.*, 2025). Em um experimento conduzido por Situmeang (2022), a aplicação de 9 t ha⁻¹ de biochar de bambu promoveu aumentos significativos na altura e na massa das plantas. Gonzaga *et al.* (2018) aplicaram 30 e 60 t ha⁻¹ de biochar de casca de coco seco, bagaço de laranja e biossólido em solo ácido e observaram aumento expressivo da biomassa das plantas de mostarda crespa. Liu *et al.* (2013) observaram que a maioria das plantas responde bem ao biochar quando aplicado em solos ácidos, provavelmente em função da rápida reação do biochar com o solo e elevação do pH.

Muitos estudos abordam isoladamente o efeito do biochar no solo, na microbiota e nas plantas, o que dificulta a compreensão dos mecanismos de ação do biochar no sistema como um todo. Com isso, o estudo teve como objetivo avaliar a influência de quatro tipos de biochar nas propriedades químicas do solo, no crescimento e nutrição de plantas de mostarda crespa (*Brassica juncea* L.) e na microbiota do solo.

4.2. Material e Métodos

4.2.1 Coleta e caracterização do solo

O experimento foi realizado na Universidade Federal de Sergipe, campus São Cristóvão. De acordo com a classificação de Thornthwaite, a região apresenta clima do tipo C2sA'a', caracterizado como subúmido, possui déficit hídrico no verão. O período chuvoso acontece durante abril e agosto, com temperatura média anual de 24,85 °C e precipitação média anual de 1.576,30 mm. O solo utilizado no experimento foi coletado no perfil de um Argissolo Vermelho-Amarelo. Após a coleta, o solo foi seco ao ar, destorrado e peneirado em malha de 2 mm. As análises realizadas apresentaram os seguintes valores: areia: 68,6%, silte: 17,7%, argila: 13,7% (Day, 1965); pH: 5,99; matéria orgânica: 0,50%; Ca²⁺: 4,50 cmol_c.kg⁻¹; Mg²⁺: 2,90 cmol_c.kg⁻¹ e P: 20,0 mg.kg⁻¹ (Santos *et al.*, 2013).

4.2.2 Produção e caracterização dos biochars

Para a produção de biochar, foram utilizados resíduos do fruto do coco verde, bagaço de cana-de-açúcar, bagaço de laranja pêra e sabugo de milho, todos produzidos em grandes quantidades no estado de Sergipe.

Os resíduos de coco verde foram coletados no bairro Orlando Dantas, na Grande Aracaju, triturados em moinho específico para o produto, lavados por imersão em água por 12 horas e secos em estufa agrícola. Os resíduos de cana-de-açúcar foram coletados em pontos de comercialização de caldo de cana, no bairro Rosa Elze, São Cristóvão, após a cana ser prensada para a extração do caldo e posteriormente secos para a remoção de parte da umidade. O bagaço de laranja foi coletado em lanchonetes localizadas na UFS, campus São Cristóvão, e seco para redução da umidade. O sabugo de milho seco foi obtido em propriedades rurais no município de Paripiranga, na Bahia.

Os resíduos foram pirolisados em um reator artesanal do tipo TLUD (top lit updraft), com temperatura variando de 550-600 °C, e tempo de residência de 1 hora. Após a pirólise, o material foi retirado do forno para estabilizar a temperatura ambiente e, em seguida, moído e passado em peneira de 2 mm. As características dos biochars estão apresentadas na Tabela 1.

O pH foi determinado em suspensão 1:5 (biochar/água) de acordo com Gaskin *et al.* (2008). As concentrações elementares de C e N foram analisadas em equipamento da marca LECO, modelo CHN628, e os resultados tratados no software CHN628, versão 1.30 (Ates; Isikdag, 2008). As concentrações de P, Ca e Mg foram determinadas de acordo com a metodologia de Teixeira (2017). Os teores de carbono fixo, matéria volátil e cinzas foram avaliados seguindo metodologia da ASTM D1762. A técnica de adsorção de nitrogênio a 77 K foi utilizada para determinar a superfície específica em equipamento de marca

Quantachrome, modelo NOVA 1200, utilizando o método BET desenvolvido por Brunauer-Emmett-Teller (1938) (Kuila; Prasad, 2013). Os resultados estão apresentados na Tabela 1. As imagens da estrutura dos biochars foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura em um equipamento TESLA.

Tabela 1. Características dos biochars usados nos experimentos. Biochars de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde (BCV).

Características	BL	BC	BM	BCV
pH	9,60	9,90	10,2	8,30
C (%)	75,4	85,6	81,8	74,3
N (%)	2,72	0,70	1,15	1,10
P (%)	0,38	0,16	0,45	0,38
Ca (%)	2,12	1,20	0,15	0,46
Mg (%)	0,16	0,91	0,25	0,32
Carbono fixo (%)	69,3	81,6	80,7	70,5
Matéria volátil (%)	14,8	10,5	12,6	19,3
Cinzas (%)	15,9	7,90	6,80	7,55
SE** (N_2 , BET, $m^2 g^{-1}$)	99,2	-	22,2	30,2
Poros (N_2 , $cm^3 g^{-1}$)	0,022	-	0,012	0,017

*CTC: capacidade de troca catiônica; **Superfície específica.

4.2.3 Delineamento experimental e condução do experimento

O experimento utilizou o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com cinco tratamentos e quatro repetições, sendo eles: 1. Controle, solo sem biochar; 2. Solo + biochar de bagaço de laranja-BL; 3. Solo + biochar de bagaço de cana-de-açúcar-BC; 4. Solo + biochar de sabugo de milho-BM e 5. Solo + biochar de resíduos de coco verde-BCV. Cada unidade experimental era composta de 1,5 kg de solo e 50 g de cama de frango e, nos tratamentos com biochar, foram adicionados 26,7 g de biochar, equivalente à dose de 50 t ha⁻¹, homogeneizados e deixados em incubação por uma semana, em umidade equivalente a 70% da capacidade de campo.

Três sementes de mostarda crespa (*Brassica juncea* L.) foram depositadas a 0,5 cm de profundidade, no centro de cada vaso e, após uma semana da semeadura, apenas uma planta permaneceu para ser cultivada por 45 dias (Figura 1). A irrigação foi realizada duas vezes ao dia, uma pela manhã e outra no final da tarde, para garantir a umidade ideal do solo e o desenvolvimento adequado das plantas.



Figura 1. Plantas de mostarda crespa aos 30 dias do ciclo de cultivo. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

4.2.4 Análises de solo e de plantas

Após a colheita, a parte aérea foi separada das raízes. As plantas foram pesadas para a determinação do peso fresco, lavadas com água corrente, enxaguadas com água destilada e levadas para estufa de circulação forçada de ar a 60 °C durante 48 h e, em seguida, pesadas para obtenção da massa seca. As amostras de plantas foram moídas em moinho tipo Wiley para determinação das concentrações de N e P. A concentração de N na planta foi determinada após digestão ácida, em bloco digestor (Bremner, 1996). A concentração total de P nas amostras de plantas foi determinada nos mesmos extratos, utilizando o método do azul de molibdênio (Murphy e Riley, 1962).

Amostras de solo foram coletadas em cada vaso, antes da semeadura, para a determinação do pH (Gaskin *et al.*, 2008), carbono orgânico total (Walkley-Black, 1984), nitrogênio total, fósforo total, concentrações trocáveis de Ca e Mg (Teixeira, 2017) e fósforo extraível (Mehlich, 1953). A concentração de P disponível foi determinada espectrofotometricamente a 660 nm.

A determinação do nitrogênio total foi realizada pelo método de Kjeldahl, adaptado para solos tropicais, conforme descrito por Bremner e Mulvaney (1982, citado por EMBRAPA, 2017).

A atividade microbiana do solo (SMA) foi determinada através da respiração basal, utilizando-se a metodologia descrita por Alef e Nannipieri (1995). Os cálculos foram realizados pela equação 1.

$$SMA \left(mgdeC - CO_2 k g^{-1} solo hora^{-1} \right) = i \quad \text{Eq.1}$$

Onde:

SMA: atividade microbiana do solo; Vb (ml): volume de ácido clorídrico gasto na titulação da solução controle (branco); Va (ml): volume gasto na titulação da amostra; M: molaridade exata do HCl; Ps (g): massa de solo seco; T: tempo de incubação da amostra em horas.

A biomassa microbiana do solo foi determinada pelo método descrito por (Vance; Brookes; Jenkinson, 1987), usando-se a irradiação em forno de micro-ondas por quatro minutos para provocar o rompimento das células e liberação do carbono microbiano. A extração do carbono foi realizada com solução de K_2SO_4 0,5mol L⁻¹. Para a quantificação dos valores de carbono microbiano foi usada a equação 2.

$$SMB = \frac{CIrradiado - Cnão-irradiado}{Kc} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

SMB = C da biomassa microbiana C (mg C kg⁻¹ soil); C Irradiado= carbono extraído das amostras de solo irradiadas em micro-ondas (mg kg⁻¹); C non-irradiado = carbono extraído das amostras de solo não irradiadas (mg kg⁻¹); Kc = 0,45 fator de correção proposto por Sparling; West (1988). O quociente metabólico foi calculado como a razão entre a atividade e a biomassa microbiana.

4.2.5 Análise estatística

Após a análise de normalidade e homogeneidade, os dados foram analisados em delineamento inteiramente casualizado. Os resultados foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F, e os valores médios, quando significativos, foram comparados com o teste de Tukey a 5% de probabilidade, por meio do Software Sisvar, versão 5.8 (Ferreira, 2019). A variabilidade dos dados também foi expressa como desvio padrão de quatro repetições.

4.3. Resultados e discussão

4.3.1 Efeito do biochar nas propriedades químicas do solo

4.3.1.1 pH

O biochar de casca de coco verde (BCV) promoveu um aumento de 0,50 unidade no pH do solo (Figura 2), variando de 5,99 a 6,43. Os demais biochars não apresentaram efeito significativo ($p < 0,05$) sobre o pH do solo. O aumento do pH do solo após a adição de biochar é largamente reportado nas publicações científicas, porém esse efeito é mais pronunciado em solos com elevada acidez ($\text{pH} < 5,0$) (Shetty; Prakash, 2020; Gonzaga *et al.*, 2018; Chintala *et al.*, 2014). O solo usado no presente estudo apresentou pH levemente ácido (5,99), limitando a intensidade do efeito corretivo do biochar.

No seu estado natural, sob vegetação nativa, o Argissolo avaliado normalmente apresenta pH abaixo de 5,0 (fortemente ácido) e teor de matéria orgânica abaixo de 1%. Nessas condições, o manejo com biochar eleva o pH, em muitos casos, a mais de uma unidade (Gonzaga *et al.*, 2018). No presente estudo, a aplicação de cama de frango (pH 8,0) como fonte de N e P para as plantas deve ter também contribuído para a elevação do pH do solo, além de aumentar o poder tampão, como é comum acontecer em solos ácidos e de baixa CTC.

Masud *et al.* (2020) avaliaram o efeito da cama de frango e do biochar de cama de frango, ambos nas doses de 5, 10 e 15 t ha^{-1} , em um solo ácido (pH: 5,45) de Chittagong, Bangladesh, e observaram aumento de 0,29 a 1,20 unidade de pH após 60 dias de incubação. Portanto, a cama de frango não pirolisada também tem a capacidade de neutralizar a acidez do solo e reduzir a toxidez provocada pela presença de Al trocável em solos ácidos. Entretanto, aplicada junto com o biochar, pode ofuscar o efeito corretivo do biochar.

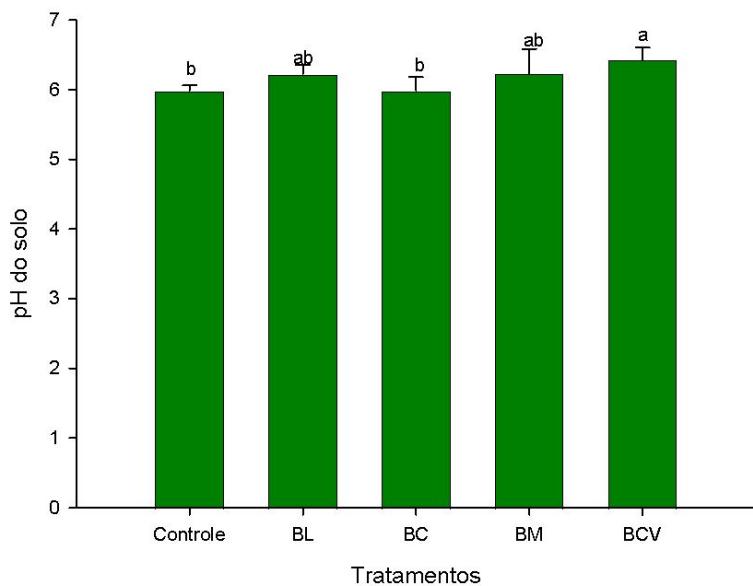


Figura 2. pH do solo condicionado com biochar de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde (BCV). Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

4.3.1.2 Carbono orgânico e nitrogênio total

A adição de biochar aumentou significativamente ($p < 0,05$) a concentração de carbono oxidável no solo, independentemente do tipo de biomassa utilizada (Figura 3A). No entanto, apenas no tratamento BM, que recebeu biochar de sabugo de milho, houve aumento significativo da concentração de nitrogênio quando comparado ao controle (Figura 3B).

Os biochars de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana (BC) e sabugo de milho (BM) aumentaram o carbono do solo em 175%, enquanto o biochar de resíduos do fruto do coco verde contribuiu com 108%. A interpretação desses resultados requer uma análise cuidadosa das características e composição dos diferentes biochars (Tabela 1), já que foram os únicos fatores de variação. Dessa forma, é possível que, além da menor concentração em C na composição do biochar de coco verde, a sua porcentagem de matéria volátil superior (19,3%) aos demais biochars (10,5 a 14,8%) (Tabela 1) tenha contribuído para o resultado observado. A matéria volátil do biochar é passível de decomposição e pode estimular a decomposição da matéria orgânica do solo (Cross *et al.*, 2011).

Embora o biochar apresente nitrogênio em sua composição, conforme Tabela 1, os baixos teores não representam fonte significativa de N, sobretudo em solos que já possuem moderados níveis de N. Além disso, o N presente no biochar pode estar na forma estrutural em função da aromatização da estrutura durante o processo de pirólise (Oliveira *et al.*, 2024).

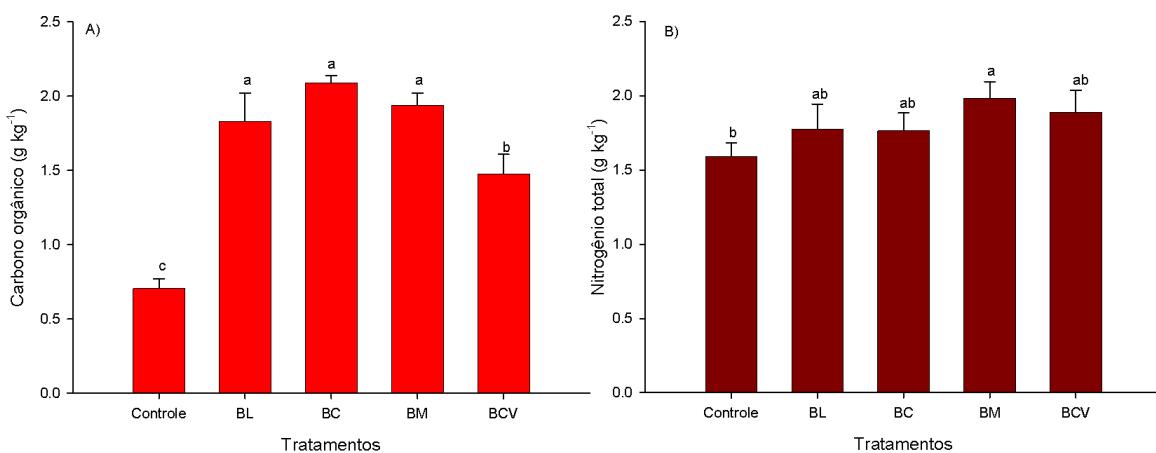


Figura 3. Concentração de carbono orgânico total e de nitrogênio no solo condicionado com biochar de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde (BCV). Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

Os efeitos do biochar tanto para o incremento de carbono no solo, quanto a sua pouca ou negativa influência sobre o nitrogênio do solo são largamente relatados na literatura, nas inúmeras publicações sobre o uso de biochar na agricultura (Nguyen *et al.*, 2017). Por exemplo, o estudo de meta-análise realizado por Nguyen *et al.* (2017) avaliou 56 artigos e 1.080 experimentos e, em todos eles, houve redução de aproximadamente 10% na concentração de N inorgânico no solo após a aplicação de biochar, sobretudo no primeiro ano e com biochar proveniente de resíduos agroindustriais. Gonzaga *et al.* (2019) também observaram redução significativa da concentração de N no solo após o condicionamento do solo com diferentes tipos de biochar. Já no presente estudo, a adição de N foi realizada através de adubação orgânica, na forma de cama de frango, fato que, provavelmente, neutralizou o efeito do biochar na concentração de N no solo.

4.3.1.3 Concentrações totais e extraíveis de fósforo

A concentração de P total variou de 450,6 mg.kg⁻¹ (Controle) a 620,7 mg.kg⁻¹ (solo com biochar), com aumento significativo ($p < 0,05$) de 22 a 38% em função da presença de biochar no solo (Figura 4). He *et al.* (2021) estimam que a concentração média de P total nos solos esteja em torno de 570 mg.kg⁻¹, mas em solos do Nordeste brasileiro, como o Argissolo utilizado nesse estudo, as concentrações totais de P são bem menores, com valores variando, na camada de 0-20 cm, entre 100 e 200 mg.kg⁻¹ (Silveira *et al.*, 2006). É importante salientar

que, de uma forma geral, uma fração expressiva do P total no solo é insolúvel e, portanto, de baixa disponibilidade para as plantas.

Embora a determinação do fósforo (P) total no solo não seja uma prática comum nos laboratórios de análise, pois na maioria das vezes a maior proporção não é disponível para as plantas, em função de sua forte fixação no solo (He *et al.*, 2021), o conhecimento dessa variável pode ser muito útil para avaliar o potencial do solo como reservatório de P e para calcular a proporção do P disponível.

Os diferentes tipos de biochars utilizados nesse estudo apresentam concentrações de P disponível variando de 0,16 a 45%, sendo o biochar de bagaço de cana o que apresenta menor quantidade de P (Tabela 1). Ainda assim, houve aumento significativo da concentração total de P no solo quando comparado ao solo sem biochar, e sem diferenças entre os tratamentos com biochar, sugerindo o potencial do biochar como fonte estável de P no solo (Glaser; Lehr, 2019; Zhang *et al.*, 2025).

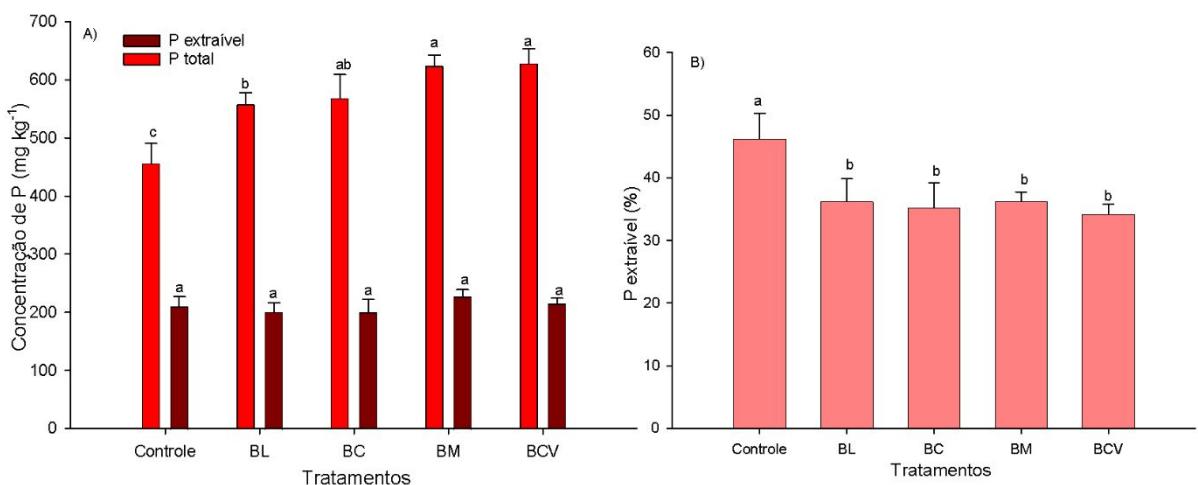


Figura 4. Concentrações de fósforo (P) total e extraível no solo condicionado com biochar de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde (BCV). Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

A concentração de P extraível e, portanto, mais próxima do P disponível para as plantas, variou de 330 mg.kg⁻¹ a 415 mg.kg⁻¹ de solo, sem diferenças significativas entre os tratamentos (Figura 4A). A falta de variação entre os tratamentos significa que o biochar não contribuiu significativamente para a disponibilização do P presente em sua composição. Trabalhos como os de Glaser e Lehr (2019), Ghodszad *et al.* (2022) e Zhao *et al.* (2024) reportaram elevação da disponibilidade de P em solos com pH abaixo de 6,5 após a aplicação de biochar, enquanto em solos com pH mais próximo à neutralidade e alcalinidade, a presença de biochar não contribuiu para aumentar as formas de P extraíveis ou disponíveis no solo. Esses estudos corroboram o nosso resultado, uma vez que o pH do Argissolo está acima de 6,0 em todos os tratamentos com biochar (Figura 1).

Analizando a proporção de P extraível no solo, ou seja, a relação entre o P extraível e o P total (Figura 4B), observa-se que, do total de P no solo, 46,4% foi extraído na solução de Mehlich 1 no solo sem biochar, enquanto no solo com biochar, a extração do P em M1 foi menor, variando de 34,4-36,5%. Dessa forma, confirma-se a baixa extratabilidade do P no solo com biochar derivado de material vegetal, contrastando com o efeito de biochars de fonte animal, como estercos e lodo de esgoto, os quais contribuem em maior proporção para a disponibilidade de P no solo (Ippolito *et al.*, 2020). Durante o processo de pirólise da biomassa para a produção de biochar, as elevadas temperaturas promovem a conversão de compostos mais lábeis de P em formas mais estáveis, devido à aromatização da estrutura

molecular e à redução dos grupos polares funcionais de superfície, o que torna a extração do P em soluções do tipo Mehlich 1 mais difícil.

Na verdade, há muitas informações inconclusivas a respeito do potencial do biochar para o fornecimento de P às plantas. Estudos como o de Li *et al.* (2020) observaram aumento da absorção de P pelas plantas em solos condicionados com biochar. Já Luo *et al.* (2023) reportaram redução na fração de P disponível no solo após a aplicação de biochar. As razões para esses resultados discrepantes podem estar relacionadas a vários fatores do solo e do biochar, como pH, atividade microbiana, concentração e tipo do biochar, textura do solo e reações de adsorção e dessorção de P.

O fósforo é um dos macronutrientes mais importantes e sua deficiência em solos tropicais caracteriza condições de baixa fertilidade e redução na produtividade das culturas, com sérias consequências para a segurança alimentar de muitas comunidades rurais. Embora nosso estudo tenha demonstrado baixa extratabilidade de P nos diferentes biochars utilizados, é possível que as plantas consigam acessar parte do P do biochar através de mecanismos comumente observados na rizosfera (Bhattacharyya e Jha, 2012).

4.3.1.4 Concentrações trocáveis de Ca^{2+} e Mg^{2+}

As concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} nos tratamentos variaram de 4,57 - 6,68 cmol_c.kg⁻¹ (Ca^{2+}) e de 2,83 – 3,48cmol_c.kg⁻¹ (Mg) (Figura 5). Apenas os biochars de bagaço de laranja (BL) e de sabugo de milho (BM) contribuíram significativamente ($p < 0,05$) (42%), aumentando a concentração de Ca no solo. Não foi observada contribuição do biochar para o Mg do solo. Alguns trabalhos como os de Aluthge *et al.* (2025) reportam resultados semelhantes aos encontrados no presente estudo, no qual houve aumento da concentração de Ca^{2+} no solo após 90 dias da aplicação de biochar, mas não de Mg^{2+} . Isso ocorre provavelmente em função da maior concentração total de Ca^{2+} no biochar quando comparada à de Mg^{2+} , na maioria das biomassas. Além disso, poucos estudos investigam a disponibilidade ou solubilidade desses elementos presentes no biochar.

O uso de biochar para fins agronômicos requer a sua produção a partir de biomassa rica em nutrientes, pois pode aumentar a disponibilidade de elementos necessários para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Portanto, a caracterização do biochar antes de sua aplicação é essencial tanto para o manejo de nutrientes quanto para evitar desequilíbrios que interfiram negativamente na absorção de nutrientes pelas plantas.

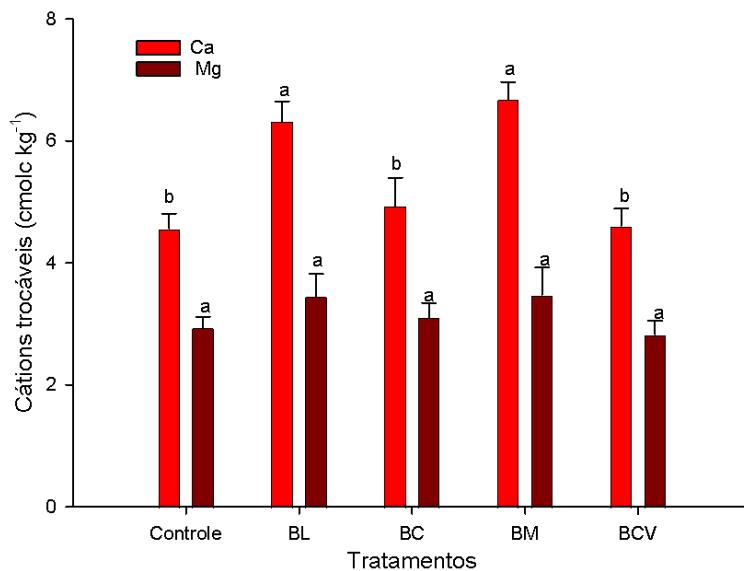


Figura 5. Concentrações de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no solo condicionado com biochar de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde (BCV). Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

O Ca contribui para a melhoria da estruturação do solo através da sua ligação com os compostos da matéria orgânica e com as superfícies com cargas negativas das partículas argilosas (Rowley *et al.*, 2018; Kalinichev; Kirkpatrick, 2007). Já o Mg é conhecido por tornar os solos compactos (Chaganti *et al.*, 2021).

A proporção $\text{Ca}^{2+}:\text{Mg}^{2+}$ do solo foi classificada como reduzida (1,5:1), abaixo da faixa recomendada para a absorção dos dois nutrientes pelas plantas (3:1 a 5:1), conforme Pitta et al. (2017). Os tratamentos BL e BM elevaram essa relação para 1,8:1 e 1,9:1, porém ainda distantes dos valores adequados. Na Tabela 1, observa-se que o BL apresenta concentração de Ca 13 vezes mais elevado à de Mg, possivelmente em função do seu elevado teor de cinzas (2,12). Já no BM, a concentração de Mg é 1,7 maior do que a de Ca. Essa diferença na composição dos biochars pode ter provocado mecanismos distintos que levaram ao aumento da relação $\text{Ca}^{2+}:\text{Mg}^{2+}$ no solo. Por exemplo, o biochar com mais Ca favoreceu a sua adsorção no complexo de troca. Já o biochar com maior proporção de Mg deve ter favorecido a dessorção de Ca do próprio biochar e sua subsequente adsorção pelo solo.

Os íons Ca^{2+} e Mg^{2+} possuem propriedades químicas semelhantes no solo, razão pela qual há frequente competição entre os dois elementos no complexo de troca, o que pode influenciar a disponibilidade e absorção pelas plantas (Li *et al.*, 2004; Leiva Soto *et al.*, 2023; Antonangelo *et al.*, 2024). Ao interagirem com a matriz do solo, através de reações de adsorção e dessorção, Ca e Mg influenciam a agregação do solo, a fertilidade e a nutrição de plantas. Por isso, é importante que o balanço desses elementos no solo seja adequado e leve, considerando a provável preferência de Ca sobre Mg nos sítios de troca catiônicos em função do menor raio iônico do Ca (Antonangelo *et al.*, 2024; Chaganti; Culman, 2017).

Portanto, a aplicação dos biochars de bagaço de cana (1,32:1) e de resíduos do coco verde (1,43:1) em solos com as características do Argissolo (1,5:1), usado no presente estudo, não interfere na relação $\text{Ca}^{2+}:\text{Mg}^{2+}$, provavelmente por apresentarem valores similares aos encontrados no solo. Já biochars que apresentam grande desequilíbrio da relação $\text{Ca}^{2+}:\text{Mg}^{2+}$, como o biochar de bagaço de laranja (13:1) e de sabugo de milho (0,6:1), devem ser manejados com cautela para evitar desequilíbrio químico no solo.

4.3.1.5 Efeito do biochar nas propriedades microbiológicas do solo

Os resultados da aplicação do biochar na atividade microbiana do solo (A), na biomassa microbiana (B) e na atividade metabólica (C) estão apresentados na Figura 6. Os diferentes tipos de biochar influenciaram de forma distinta a microbiota do solo, mostrando que os parâmetros microbiológicos são mais sensíveis ao manejo com biochar do que os parâmetros químicos do solo.

A atividade microbiana, determinada através da respiração basal do solo, variou de 21,8-47,1 $\text{ugC-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo dia}^{-1}$, aumentando significativamente (24%) no tratamento com biochar de coco verde (BCV), não respondeu ao biochar de bagaço de cana (BC) e reduziu em 38% quando os biochars de bagaço de laranja (BL) e de sabugo de milho (BM) foram aplicados ao solo (Figura 6A). Segundo Lopes *et al.* (2013), em ecossistemas florestais, valores de atividade microbiana acima de 100 $\text{ug C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo dia}^{-1}$ são normalmente encontrados em condições de equilíbrio e conservação. Já em condições protegidas de casa de vegetação, espera-se encontrar valores menores.

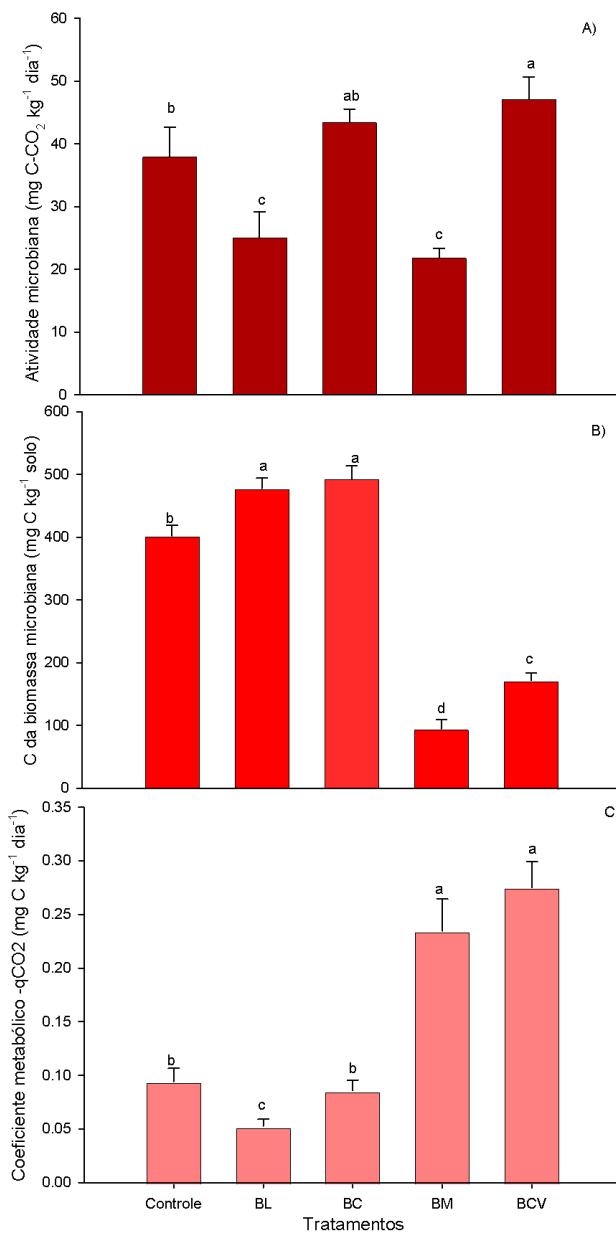


Figura 6. Atividade microbiana (A), biomassa microbiana (B) e quociente metabólico (C) no solo condicionado com biochar de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde (BCV). Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

Porém, na literatura, é comum encontrar valores de referência bem distintos para essa variável microbiológica do solo, uma vez que há importante influência da temperatura, da umidade e do tipo de solo (Pokharel *et al.*, 2020). Por exemplo, em solos cultivados, de fertilidade moderada, é comum encontrar valores de respiração basal variando de 12 a 60 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo dia}^{-1}$ (Hassink, 1994). Em um estudo realizado por Shah *et al.* (2017), verificou-se que a aplicação do biochar no solo aumentou a respiração microbiana. Durante os 10 dias de incubação, a emissão de CO₂ alcançou até 389 $\mu\text{g CO}_2 \text{ g}^{-1}$ de solo com dose de 20 t ha⁻¹, demonstrando aumento de 35% quando comparado ao controle no segundo dia de incubação. Doses menores (10 e 5 t ha⁻¹) resultaram em aumentos graduais de 22% e 13,1%, respectivamente, apesar desse efeito diminuir com o tempo.

A biomassa microbiana do solo apresentou grande variação entre os tratamentos, de 94,7-493 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo. Comparado ao controle, sem biochar, observou-se aumento de 20% na

presença de células microbianas no BL e BC, e redução de 76% e 57% nos tratamentos BM e BCV, respectivamente (Figura 6B). A biomassa microbiana é constituída pela massa total das células vivas de microrganismos presentes no solo, a exemplo de bactérias ($40\text{-}500 \text{ g m}^{-2}$), actinomicetos ($40\text{-}500 \text{ g m}^{-2}$) e fungos ($100\text{-}1500 \text{ g m}^{-2}$), embora em termos de números de células, as bactérias predominem ($10^8 \text{ - } 10^9$ por grama de solo) (Lopez *et al.*, 2010). Portanto, grande parte da biomassa microbiana é representada por fungos, especialmente em condições de pH próximas à neutralidade, como é o caso do solo usado no presente estudo (pH: 6,0).

Essa comunidade microbiana atua ativamente na decomposição dos componentes orgânicos do solo, sendo responsável, em grande parte, pela ciclagem de nutrientes. Normalmente, elevada biomassa microbiana pode estar associada a um ambiente saudável e bem manejado. Um dos produtos que medem o funcionamento dessa biomassa microbiana é o CO_2 liberado através de sua atividade metabólica, medido como respiração basal no presente estudo. Porém, nem sempre uma elevada atividade microbiana é desejada, pois pode representar uma situação de que os microrganismos estejam em situação de estresse. Por exemplo, é de se esperar que, em solos agrícolas, a biomassa microbiana esteja na faixa de 100 a 600 ug C g^{-1} (Anderson; Domsch, 1989), enquanto em solos que receberam adição de compostos orgânicos, essa faixa seja de 500 a 1500 ug C g^{-1} (Lehmann *et al.*, 2011).

A avaliação simultânea e integrada da saúde do solo, através da determinação dos indicadores microbiológicos, é melhor compreendida quando olhamos para o quociente metabólico do solo, ou seja, a razão entre a atividade microbiana e a biomassa microbiana. Esse é um importante indicador que mede a eficiência microbiana ou se há algum nível de estresse no solo (Zhou *et al.*, 2017; Anderson; Domsch, 1993), pois explica a eficiência da microbiota em processar os componentes orgânicos do solo. Por exemplo, valores mais baixos de quociente metabólico podem indicar maior estabilidade e saúde do solo, com maior eficiência da microbiota, ou seja, menor quantidade de CO_2 é liberada por unidade de biomassa microbiana.

No presente estudo, o quociente metabólico (Figura 6C) variou de 0,05 a 0,27 $\text{ug C g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Houve redução do quociente metabólico em 44% no tratamento BL, e aumento de 180% nos tratamentos BM e BCV. O biochar de bagaço de cana (BC) não alterou o quociente metabólico do solo.

Assim, quando a biomassa microbiana é baixa e a respiração basal é alta, consequentemente isso se traduz em elevado quociente metabólico, o que sugere algum tipo de estresse no solo, podendo ser em função das condições de umidade e temperatura, presença de substâncias tóxicas, desequilíbrio ambiental ou mesmo limitações na disponibilidade de nutrientes no solo. Em contrapartida, elevada biomassa microbiana, moderada atividade metabólica e baixo quociente metabólico indicam solos saudáveis, com adequada ciclagem de nutrientes (Spohn, 2015).

Para o tratamento BL, para cada 100 g de carbono da biomassa, apenas 5 ug são respirados e liberados como CO_2 , demonstrando um ambiente de alta eficiência metabólica. Já o tratamento BCV, para cada 100 g de biomassa microbiana, 25 ug de CO_2 são liberadas para a atmosfera, indicando um ambiente de estresse. Dentre os tratamentos testados, aquele que não modificou a atividade microbiana e, ao mesmo tempo, aumentou a biomassa de microrganismos, foi o BC, no qual foi observada redução do quociente metabólico, traduzindo em eficiência no uso do carbono e potencial estabilização da matéria orgânica do solo. Resultados semelhantes foram reportados por Zhou *et al.* (2017) ao observarem aumento de 25% na biomassa microbiana e redução de 13% no quociente metabólico após a adição de biochar ao solo.

Vários trabalhos confirmaram o efeito positivo da adição de biochars provenientes de várias biomassas na microbiota, especialmente em solos degradados (Barbosa *et al.*, 2024; Bolan *et al.*, 2024; Deshoux *et al.*, 2023; Song *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2017). Porém, é necessária cautela na escolha do tipo de biochar e do manejo aplicado, uma vez que a presença de compostos voláteis produzidos durante a pirólise pode prejudicar a microbiota do

solo (Bolan *et al.*, 2024; Deshoux *et al.*, 2023; Xiang *et al.*, 2021). Xiang *et al.* (2021) relataram que biochars acrescentados ao solo recentemente podem liberar contaminantes intrínsecos, como Cd e Pb, que enfraquecem a comunidade bacteriana e reduzem a disposição dos microrganismos de colonizar a superfície do biochar.

A adição de composto orgânico no solo tende a aumentar rapidamente a biomassa microbiana, tanto pela presença de microrganismos no próprio composto quanto pela qualidade do material e pela presença de substâncias com maior grau de labilidade. Isso conduz à rápida elevação da atividade microbiana, com possível aumento do $q\text{CO}_2$ ou redução, a depender da disponibilidade de carbono e outros nutrientes (Song *et al.*, 2023). Quando o biochar é adicionado ao solo, também é esperado que ocorra crescimento da biomassa microbiana, porém de forma gradual e em função da melhoria causada na qualidade do solo, como pH, retenção de água e melhor agregação das partículas. Nessas condições, a atividade microbiana também aumenta lentamente, o que não provoca elevação brusca do $q\text{CO}_2$, podendo até promover a redução dessa variável, uma vez que a microbiota se torna mais eficiente e encontra um habitat mais estável.

Song *et al.* (2023) investigaram a influência do biochar na microbiota e observaram consistente redução do quociente metabólico no solo cultivado com arroz, mas não na rizosfera, o que foi atribuído à qualidade dos compostos de carbono presentes em cada compartimento do solo. A rizosfera apresenta mais carbono lábil quando comparada ao solo longe das raízes.

4.3.1.6 Efeito do biochar no crescimento e nutrição de plantas

A Figura 7A ilustra os resultados da produção de massa seca da parte aérea e das raízes das plantas de *Brassica juncea* (mostarda crespa) após crescerem por 45 dias no solo condicionado com diferentes tipos de biochar. A massa da parte aérea variou de 4,04-6,00g por vaso. Os tratamentos BC e BCV aumentaram significativamente em 20% a massa seca da parte aérea, não houve efeito do BM e o BL reduziu em 18% a massa seca da parte aérea. Houve pouca influência do tipo de biochar na massa seca da raiz, pois apenas o BCV estimulou o sistema radicular das plantas, com aumento de 95%. Observando o efeito do biochar nos parâmetros químicos do solo (C, N, P, Ca, Mg e pH) nesse estudo, não parece haver relação entre a melhoria da fertilidade do solo com biochar e o crescimento de plantas.

Alguns parâmetros de solo, como retenção de água e concentrações de K e micronutrientes, não avaliados no presente estudo, podem influenciar o crescimento de plantas na presença de biochar de bagaço de cana e resíduos de coco verde, pois ambos apresentam elevada capacidade de retenção de água (Santos *et al.*, 2022a) e alta concentração de K.

As condições químicas do solo em todos os tratamentos, inclusive sem biochar, como pH na faixa adequada de 6,0-6,5 e disponibilidade de N, P, Ca e Mg, favoreceram o desenvolvimento das plantas e reduziram o efeito do biochar, confirmando que os benefícios do biochar para o desenvolvimento de plantas são mais evidentes em solos pobres, ácidos e degradados (Dai *et al.*, 2020).

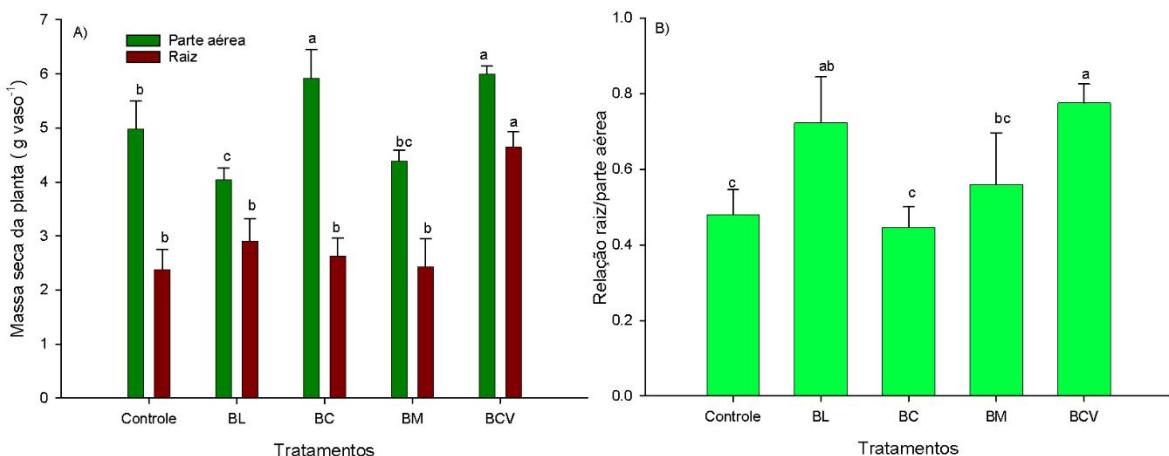


Figura 7. Massa seca da parte aérea e das raízes (A) e razão raiz/parte aérea (B) de plantas de mostarda crespa cultivadas em solo condicionado com biochar de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde. Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

A relação raiz/parte aérea da mostarda crespa variou de 0,43 a 0,80 (Figura 7B). Os tratamentos BL e BCV aumentaram significativamente em 55% a relação raiz/parte aérea das plantas (Figura 7B). Em um raro estudo de meta-análise sobre a relação raiz/parte aérea de algumas espécies cultivadas, Kalantar *et al.* (2025) observaram que a colza (*Brassica napa*), uma espécie muito próxima da mostarda crespa (*Brassica juncea*), apresenta um amplo espectro de variação da relação raiz/parte aérea, de 0,08 a 1,00. Porém, essa relação varia muito de acordo com a espécie de planta e as condições ambientais, sendo comuns valores abaixo de 0,6 (Kalantar *et al.*, 2025). Essa variável é importante, pois explica a alocação de recursos em matéria e energia entre o que a planta absorve do solo (água e nutrientes) e o que é fotossintetizado. É considerado um valioso índice para avaliar a saúde da planta e seu potencial produtivo (Lopez *et al.*, 2023).

A redução da massa seca da parte aérea no tratamento BL e aumento da biomassa de raiz no tratamento BCV resultaram no aumento da relação raiz/parte aérea. Não houve efeito dos demais biochars nessa variável. Algumas condições adversas, como deficiência de água e de nutrientes como N e P, estimulam a produção de mais raízes para aumentar a captura desses recursos, resultando no aumento da relação raiz/parte aérea (Hadir *et al.*, 2021). Como parece ter havido suficiência nutricional desses dois nutrientes no presente estudo (Figuras 8A e 8B), é possível que os tratamentos BL e BCV tenham reduzido a disponibilidade de água para as plantas.

Zhu *et al.* (2018) aplicaram biochar de casca de arroz para o cultivo de soja (*Glycine max* [L.] Merr.) e observaram redução significativa da relação raiz/parte aérea das plantas, mas reportam aumento da produção de raízes mais finas e mais ativas. Em contrapartida, Campos *et al.* (2021) utilizaram biochar de casca de arroz e de caroço de azeitona como condicionador de solo e verificaram aumento significativo da relação raiz/parte aérea do nabo (*Brassica rapa* L. ssp. *Pekinensis*), passando de 0,26 no controle para 0,33-1,30.

O estudo do estado nutricional das plantas fornece importante informação sobre o ambiente de crescimento, sobretudo a disponibilidade de nutrientes. As plantas de mostarda crespa apresentaram concentração de N que variou de 3,7-4,0% na parte aérea e de 0,97-1,23% nas raízes (Figura 8A). Não houve efeito do biochar na concentração de N na parte aérea, porém, os tratamentos BC e BM reduziram significativamente em 21% o N da raiz. Esse resultado reflete o efeito do biochar na concentração de N no solo (Figura 3B), que também não foi significativo.

Em vários artigos publicados pelo presente grupo de pesquisa, são recorrentes os resultados que relacionam a presença de biochar à redução das concentrações de N nas plantas (Gonzaga *et al.*, 2025; Gonzaga *et al.*, 2019), mesmo com o suprimento de adubação nitrogenada mineral. A ausência de efeito negativo do biochar na nutrição nitrogenada da planta provavelmente se deve à presença de cama de aviário, resíduo com elevada concentração de nitrogênio. Dessa forma, é possível que a adição de N na forma de estercos e compostos ricos em N torne o manejo do biochar mais eficiente e econômico.

A concentração de P variou de 2,27 a 4,76 g kg⁻¹ na parte aérea e de 0,78 a 2,32 g kg⁻¹ na raiz (Figura 8B). Gonzaga *et al.* (2019), ao avaliarem o efeito do biochar na concentração de P em mostarda (*Brassica juncea* L.), observaram variações de 3,40 a 5,93 g kg⁻¹ na parte aérea.

De acordo com Veneklaas (2022), em escala global, as concentrações de fósforo em folhas e raízes possuem valores aproximados de 1,25 mg g⁻¹ (1,25 g kg⁻¹) e 1,10 mg g⁻¹ (1,10 g kg⁻¹), respectivamente. Dessa forma, os resultados encontrados neste estudo, especialmente na parte aérea, estão acima da média global, o que pode ser atribuído à aplicação do biochar e de cama de aviário, sugerindo uma alternativa eficaz de aplicação de P ao solo, além da alta eficiência na absorção pela planta.

Não houve efeito dos biochars de coco verde (BCV) nem de bagaço de cana (BC). Porém, os tratamentos BL (90%) e BM (47%) aumentaram significativamente as concentrações de P na parte aérea. Esses dois biochars também elevaram os níveis de P na raiz em 63%. Observando a composição do biochar quanto à concentração de P e o efeito do biochar na extratabilidade de P no solo, não há variação significativa entre os biochars que claramente explique o aumento da concentração de P na planta. Porém, a redução da biomassa da parte aérea (Figura 7A) pode ter influenciado a concentração de P nos tratamentos BL e BM.

Ao contrário do efeito negativo normalmente associado ao biochar quanto à concentração de N na planta (Olszyk *et al.*, 2020), vários estudos mostram aumento da concentração de P nas plantas em solos condicionados com biochar (Gao *et al.*, 2018; Fernandes *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022). Gao *et al.* (2018), em meta-análise avaliando 124 trabalhos, observaram um aumento da concentração de P nas plantas em solos condicionados com biochar. Gonzaga *et al.* (2018) mostraram que o biochar de bagaço de laranja, aplicado na dose de 20 t ha⁻¹, resultou em um aumento de 16% na biomassa vegetal em comparação ao controle. Esses trabalhos corroboram os resultados obtidos.

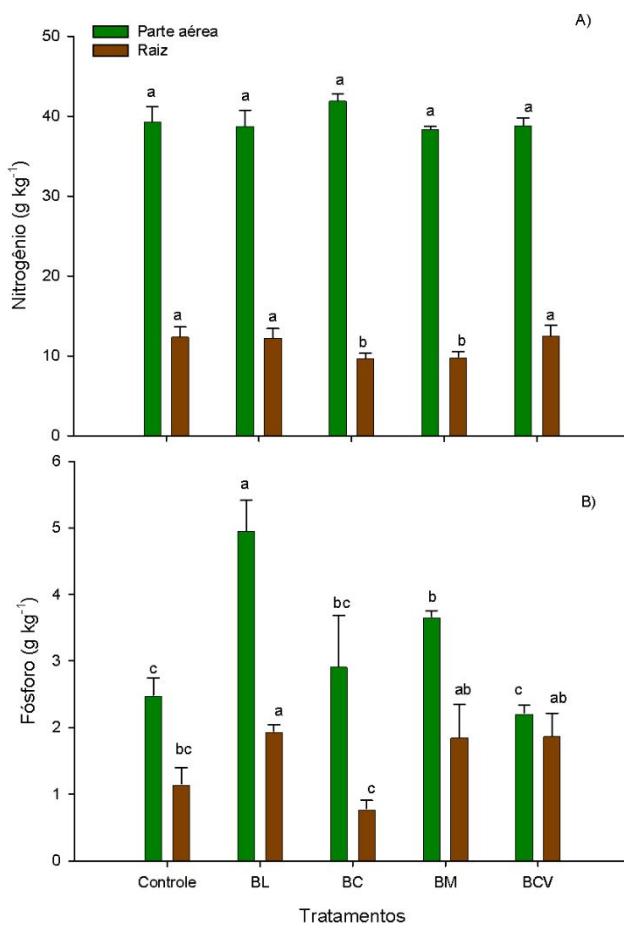


Figura 8. Concentração de N (A) e de P (B) na parte aérea e nas raízes de plantas de mostarda crespa cultivadas em solo condicionado com biochar de bagaço de laranja (BL), bagaço de cana-de-açúcar (BC), sabugo de milho (BM) e resíduos do coco verde (BCV). Médias com a mesma letra não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

4.4. Conclusões

A influência do biochar no solo, nas plantas e na microbiota variou conforme o material de origem. O biochar de cana (BC) apresentou o melhor desempenho, promovendo aumento na biomassa vegetal e estimulando o crescimento microbiano, sem elevar o quociente metabólico ou as perdas de carbono. O biochar de coco verde (BCV) também favoreceu o crescimento das plantas, mas reduziu a biomassa microbiana e aumentou o quociente metabólico, mostrando possível estresse da microbiota. Os parâmetros microbiológicos (carbono da biomassa microbiana, respiração e $q\text{CO}_2$) demonstraram-se mais sensíveis que os parâmetros químicos do solo e, portanto, mais promissores para facilitar recomendações do uso do biochar como condicionador de solo.

4.5. Referências Bibliográficas

- ADHIKARI, S. *et al.* Comparative analysis of biochar carbon stability methods and implications for carbon credits. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 914, 169607, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169607>. Acesso em: 27 abr. 2025.

ALUTHGE, M.D. *et al.* Sugarcane biomass-derived biochar for soil quality enhancement in sugarcane-growing soil. **Carbon Research**, Basel, v. 4, n. 9, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44246-024-00175-4>. Acesso em: 11 set. 2024.

ANDERSON, T.; DOMSCH, K.H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, London, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7). Acesso em: 14 set. 2024.

ANDERSON, T.-H.; K.H. DOMSCH. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 21, n. 4, p. 471–479, 1989.

ANTONANGELO, J.A.; CULMAN, S.; ZHANG, H. Comparative analysis and prediction of cation exchange capacity via summation: influence of biochar type and nutrient ratios. **Frontiers in Soil Science**, Lausanne, v. 4, 1371777, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1371777>. Acesso em: 9 fev. 2025.

ARAÚJO, I. da S. *et al.* Biochar and Plant Growth-Promoting Bacteria Boost Chemical and Biological Properties of Semiarid Soil in Cowpea. **Soil Systems**, Basel, v. 9, n. 1, 19, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/soilsystems9010019>. Acesso em: 8 maio 2024.

ATES, F.; ISIKDAG, M.A. Evaluation of the role of the pyrolysis temperature in straw biomass samples and characterization of the oils by GC/MS. **Energy & Fuels**, Washington, v. 22, n. 3, p. 1936–1943, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef8000567>. Acesso em: 10 jun. 2025.

BASAK, B. B. *et al.* Revamping highly weathered soils in the tropics with biochar application: What we know and what is needed. **Science of the Total Environment**, v. 822, p. 153461, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153461>. Acesso em: 12 dez. 2024.

BANIK, C. *et al.* Impact of slow-release nitrogen fertilizers based on biochar on maize growth and nitrogen recovery efficiency. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 52, n. 3, p. 630–640, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jeq2.20468>. Acesso em: 8 maio 2025.

BARBOSA, F.L.A. *et al.* Potential of biochar to restoration of microbial biomass and enzymatic activity in a highly degraded semiarid soil. **Scientific Reports**, London, v. 14, 26065, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77368-9>. Acesso em: 23 abr. 2025.

BHATTACHARYYA, P.N.; JHA, D.K. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, Dordrecht, v. 28, n. 4, p. 1327–1350, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>. Acesso em: 29 maio 2025.

BOLAN, S. *et al.* Biochar modulating soil biological health: A review. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 914, 169585, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169585>. Acesso em: 3 mar. 2025.

BREMNER, J.M. Nitrogen-total. In: SPARKS, D.L. et al. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**: Part 3 Chemical Methods. Madison: Soil Science Society of America, v. 5, p. 1085–1121, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37>. Acesso em: 5 maio 2025.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P.H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, Washington, v. 60, n. 2, p. 309–319, 1938. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>. Acesso em: 8 maio 2025.

CABEZA, I.; WATERHOUSE, T.; SOHI, S.; ROOKE, J.A. Effect of biochar produced from different biomass sources and at different process temperatures on methane production and ammonia concentrations in vitro. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdam, v. 237, p. 1–7, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.12.002>. Acesso em: 15 maio 2025.

CAMPOS, P.; KNICKER, H.; LÓPEZ, R.; ROSA. Application of biochar produced from crop residues on trace elements contaminated soils: effects on soil properties, enzymatic activities and Brassica rapa growth. **Agronomy**, Basel, v. 11, n. 7, 1394, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11071394>. Acesso em: 16 maio 2025.

CASTRO, G.S.A. et al. Management impacts on soil organic matter of tropical soils. **Vadose Zone Journal**, Madison, p. 1–8, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/vzj2015.01.0010>. Acesso em: 6 mar. 2025.

CHAGANTI, V.N. et al. Base cation saturation ratios, soil health, and yield in organic field crops. **Agronomy Journal**, Madison, v. 113, n. 5, p. 4190–4200, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agj2.20785>. Acesso em: 21 maio 2025.

CHAGANTI, V.N.; CULMAN, S.W. Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: a review. **Crop Forage & Turfgrass Management**, Madison, v. 3, n. 1, p. 1–7, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>. Acesso em: 7 maio 2025.

CHAGAS, J.K.M.; FIGUEIREDO, C.C.; RAMOS, M.L.G. Biochar increases soil carbon pools: Evidence from a global meta-analysis. **Journal of Environmental Management**, Oxford, v. 305, 114403, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114403>. Acesso em: 16 jun. 2025.

CHINTALA, R. et al. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. **Archives of Agronomy and Soil Science**, London, v. 60, n. 3, p. 393–404, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.791006>. Acesso em: 19 maio 2025.

CROSS, A.; SOHI, S.P. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status. **Soil Biology and Biochemistry**, London, v. 43, n. 10, p. 2127–2134, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.07.006>. Acesso em: 8 maio 2025.

DAI, Y.; ZHENG, H.; JIANG, Z.; XING, B. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: A meta-analysis. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 713, 136635, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136635>. Acesso em: 14 jun. 2025.

DE OLIVEIRA PAIVA, I. *et al.* Biochar N content, pools and aromaticity as affected by feedstock and pyrolysis temperature. **Waste Biomass Valorization**, New York, v. 15, p. 3599–3619, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02415-x>. Acesso em: 17 jun. 2025.

DEMPSTER, D.N. *et al.* Reduction of soil microbial biomass and nitrogen mineralization following addition of eucalyptus biochar to a coarse textured soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 354, n. 1, p. 311–324, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1067-5>. Acesso em: 17 jun. 2025.

DESHOUX, M.; SADET-BOURGETEAU, S.; GENTIL, S.; PRÉVOST-BOURÉ, N.C. Effects of biochar on soil microbial communities: A meta-analysis. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 902, 166079, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166079>. Acesso em: 5 maio 2025.

DOKOOGHAKI, H. *et al.* Assessing the biochar effects on selected physical properties of a sandy soil: An analytical approach. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Boca Raton, v. 48, n. 12, p. 1387–1398, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1358742>. Acesso em: 26 maio 2025.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: Embrapa, 2017.

FERNANDES, J.D. *et al.* Phosphorus availability in soil incubated with biochar: adsorption study. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 35, n. 1, p. 206–215, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n121rc>. Acesso em: 5 maio 2025.

FERREIRA, DANIEL FURTADO. sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **brazilian journal of biometrics**, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 529–535, 2019. disponível em: <https://biometria.ufla.br/index.php/bbj/article/view/450>.

GAO, S.; DELUCA, T. H. Wood biochar impacts soil phosphorus dynamics and microbial communities in organically-managed croplands. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 126, p. 144–150, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.09.002>
GAZOLLA, P. R. *et al.* Fractions of soil organic matter under pasture, tillage system and crop-livestock integration. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 2, p. 693–704, 2015.

GASKIN, J.; STEINER, C.; HARRIS, K.; DAS, K.; BIBENS, B. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 51, n. 6, p. 2061–2069, 2008.

GASTAUER, M. *et al.* A metagenomic survey of soil microbial communities along a rehabilitation chronosequence after iron ore mining. **Scientific Data**, London, v. 6, n. 1, p. 1–10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0096-5>. Acesso em: 27 abr. 2025.

GHODSZAD, L.; REYHANITABAR, A.; OUSTAN, S.; ALIDOKHT, L. Phosphorus sorption and desorption characteristics of soils as affected by biochar. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 216, 105251, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105251>. Acesso em: 14 maio 2025.

GLAB, T. *et al.* Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 281, p. 11–20, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.028>. Acesso em: 14 maio 2025.

GLASER, B.; LEHR, V.-I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. **Scientific Reports**, London, v. 9, 9338, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45693-z>. Acesso em: 6 abr. 2025.

GONZAGA, M. I. S. *et al.* Nitrogen and phosphorus uptake efficiency in Indian mustard cultivated during three growth cycles in a copper contaminated soil treated with biochar. **Ciência Rural**, v. 49, n. 1, p. e20170592, 2019.

GONZAGA, M.I.S. *et al.* Assessing the impact of pre-treated green coconut waste biochar on tropical soil fertility, initial plant growth, and nutrient uptake using PCA analysis. **Journal of Soils and Sediments**, Berlin, v. 25, p. 1213–1226, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11368-025-04005-x>. Acesso em: 8 jun. 2025.

GONZAGA, M.I.S. *et al.* Nitrogen and phosphorus uptake efficiency in Indian mustard cultivated during three growth cycles in a copper contaminated soil treated with biochar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 49, n. 1, e20170592, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170592>. Acesso em: 8 jun. 2025.

GONZAGA, M.I.S.; MACKOWIAK, C.; ALMEIDA, A.Q.; CARVALHO, J.I.T. Sewage sludge derived biochar and its effect on the growth and morphological traits of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden seedlings. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 687–695, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509832152>. Acesso em: 8 jun. 2025.

GONZAGA, M.I.S.; MACKOWIAK, C.; DE ALMEIDA, A.Q.; DE CARVALHO JUNIOR, J.I.T.; ANDRADE, K.R. Positive and negative effects of biochar from coconut husks, orange bagasse and pine wood chips on maize (*Zea mays L.*) growth and nutrition. **Catena**, Amsterdam, v. 162, p. 414-420, 2018.

GUO, H.; ZHANG, Q.; CHEN, Y.; LU, H. Effects of biochar on plant growth and hydro-chemical properties of recycled concrete aggregate. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 882, 163557, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163557>. Acesso em: 6 jun. 2025.

HADIR, S. *et al.* Sugar beet shoot and root phenotypic plasticity to nitrogen, phosphorus, potassium and lime omission. **Agriculture**, Basel, v. 11, n. 1, p. 21, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture11010021>. Acesso em: 6 mar. 2025.

HAGEMANN, N. *et al.* Nitrate capture and slow release in biochar amended compost and soil. **PLoS One**, San Francisco, v. 12, n. 1, e0171214, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171214>. Acesso em: 6 mar. 2025.

HASSINK, J. Effect of soil texture on the size of the microbial biomass and on the amount of C and N mineralized per unit of microbial biomass in Dutch grassland soils. **Soil Biology and Biochemistry**, London, v. 26, n. 11, p. 1573–1581, 1994. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90100-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90100-7). Acesso em: 30 maio 2025.

HE, X. *et al.* Global patterns and drivers of soil total phosphorus concentration. **Earth System Science Data**, Göttingen, v. 13, n. 12, p. 5831–5846, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-13-5831-2021>. Acesso em: 1 maio 2025.

IPCC. **Summary for Policymakers**. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>. Acesso em: 8 mar. 2025.

IPPOLITO, J.A. *et al.* Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: A comprehensive meta-data analysis review. **Biochar**, Basel, v. 2, n. 4, p. 421–438, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>. Acesso em: 3 mar. 2025.

JOSEPH, S. *et al.* How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. **Bioenergy**, Oxford, v. 13, n. 12, p. 1731–1764, 2021.

KALANTAR AHMADI, S.A.; SARHANGI, M. Optimizing sowing date for enhanced heat stress tolerance in canola (*Brassica napus L.*): Investigating impacts on seed yield, oil content, and fatty acids composition. **Heliyon**, Amsterdam, v. 11, n. 8, e42138, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42138>. Acesso em: 17 mar. 2025.

KALINICHEV, A.G.; KIRKPATRICK, R.J. Molecular dynamics simulation of cationic complexation with natural organic matter. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 58, n. 4, p. 909–917, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00929.x>. Acesso em: 17 mar. 2025.

KHAN, S. *et al.* Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: A review. **Plants**, Basel, v. 13, n. 2, 166, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants13020166>. Acesso em: 28 maio 2025.

KUILA, U.; PRASAD, M. Specific surface area and pore-size distribution in clays and shales. **Geophysical Prospecting**, Oxford, v. 61, n. 2, p. 341–362, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12028>. Acesso em: 4 mar. 2025.

KIRUBAKARAN, R. *et al.* Emerging priorities for microbial metagenome research. **Bioresource Technology Reports**, v. 11, p. 100485, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100485>. Acesso em: 4 mar. 2025.

LEHMANN, J. *et al.* Biochar effects on soil biota. **Soil Biology and Biochemistry**, London, v. 43, n. 9, p. 1812–1836, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.017>. Acesso em: 4 mar. 2025.

LEIVA SOTO, A. *et al.* Managing soil acidity vs. soil Ca:Mg ratio: What is more important for crop productivity? **Crop Forage & Turfgrass Management**, Madison, v. 9, n. 1, e20210, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/cft2.20210>. Acesso em: 29 mar. 2025.

LI, H.; LI, Y.; XU, Y.; LU, X. Biochar phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus availability. **Chemosphere**, Oxford, v. 244, 125471, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125471>. Acesso em: 15 abr. 2025.

LI, Z.H.; XU, A.G.; LONG, H.Y. Evaluation of soil nutrient conditions in major tobacco-producing region of China. **Science Agricultural Sinica**, Beijing, v. 37, n. 1, p. 36–42, 2004.

LIMA, J.Z.; RODRIGUES, V.G.S. Effects of biochar on arsenic-contaminated soil: Chemical fractionation, vegetation growth, and oral bioaccessibility. **Environmental Management**, New York, v. 75, p. 392–401, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00267-024-02067-0>. Acesso em: 22 mar. 2025.

LIU, X. *et al.* Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions – A meta-analysis of literature data. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 373, n. 1, p. 583–594, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1806-x>. Acesso em: 31 mar. 2025.

LOPES, A.A.C. *et al.* Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, n. 2, p. 461–472, 2013.

LOPEZ, G. *et al.* Nutrient deficiency effects on root architecture and root-to-shoot ratio in arable crops. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 13, 67498, 2023.

LOPEZ, R.; LABOSKI, C.; LAL, R.; SINGH, G. **Biochar and soil health**. Columbus: Ohio State University Extension, 2010. Disponível em: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/SAG-16>. Acesso em: 3 jun. 2025.

LUO, D. *et al.* Phosphorus adsorption by functionalized biochar: A review. **Environmental Chemistry Letters**, Berlin, v. 21, p. 497–524, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01519-5>. Acesso em: 13 maio 2025.

MANGALASSERY, S.; KALAIVANAN, D.; PHILIP, P.S. Effect of inorganic fertilisers and organic amendments on soil aggregation and biochemical characteristics in a weathered tropical soil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 187, p. 144–151, 2019.

MASUD, M.M. *et al.* Liming effects of poultry litter derived biochar on soil acidity amelioration and maize growth. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Amsterdam, v. 202, 110865, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110865>. Acesso em: 25 maio 2025.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄ by North Carolina soil testing laboratories**. Raleigh: University of North Carolina, 1953.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 31–36, 1962. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5). Acesso em: 26 jun. 2025.

NGUYEN, T.T.N. *et al.* Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 288, p. 79–96, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.004>. Acesso em: 26 jun. 2025.

OLSZYK, D. *et al.* Biochar affects growth and shoot nitrogen in four crops for two soils. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, Madison, v. 3, n. 1, e20067, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agg2.20067>. Acesso em: 8 jun. 2025.

PANDIAN, K. *et al.* Biochar – a sustainable soil conditioner for improving soil health, crop production and environment under changing climate: a review. **Frontiers in Soil Science**, Lausanne, v. 4, 1376159, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1376159>. Acesso em: 4 maio 2025.

PITTA, M.C.A. *et al.* **Fertilidade de solos**: calagem e gessagem. Roma: FAO, 2017. Disponível em:
<https://agris.fao.org/search/en/providers/122419/records/6474a7b71a9cd02c1d8fa903>. Acesso em: 28 maio 2025.

PIVETA, L.B. *et al.* Diversidade de arroz-daninho (*Oryza* spp.) no sul do Brasil. **Weed Science**, Lawrence, v. 69, n. 5, p. 547–557, 2021. Disponível em:
<https://doi.org/10.1017/wsc.2021.23>. Acesso em: 4 maio 2025.

POKHAREL, P.; MA, Z.; CHANG, S.X. Biochar increases soil microbial biomass with changes in extra- and intracellular enzyme activities: A global meta-analysis. **Biochar**, Basel, v. 2, n. 1, p. 65–79, 2020.

PUGA, A.P. *et al.* Fertilizantes nitrogenados à base de biochar: Emissões de gases de efeito estufa, eficiência de uso e produtividade de milho em solos tropicais. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 704, 135375, 2020. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135375>. Acesso em: 10 maio 2025.

PUTRA, L.; NATADIPUTRI, G.H.; MERYANDINI, A.; SUWANTO, A. Isolation, cloning and co-expression of lipase and foldase genes of *Burkholderia territorii* GP3 from mount Papandayan soil. **Journal of Applied Microbiology**, Oxford, v. 127, n. 4, p. 1162–1174, 2019.

RAMOS, F.T. *et al.* Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Oxford, v. 98, n. 8, p. 3595–3602, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jsfa.8881>. Acesso em: 10 maio 2025.

ROWLEY, M.C.; GRAND, S.; VERRECCHIA, É.P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 137, n. 1, p. 27–49, 2018. Disponível em:
<https://doi.org/10.1007/s10533-017-0410-1>. Acesso em: 7 abr. 2025.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013. 353 p.

SANTOS, J.A. *et al.* Caracterização, retenção e disponibilidade de água de diferentes tipos de biochar de origem animal e vegetal. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 5, e48411528360, 2022a. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28360>. Acesso em: 7 abr. 2025.

SANTOS, J.A.; ISIDORIA, M.; MELO, W.; SILVA, A. J. Water retention and availability in tropical soils of different textures amended with biochar. **Catena**, Amsterdam, v. 219, 106616, 2022b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106616>. Acesso em: 26 abr. 2025.

SHAH, T.; KHAN, S.; SHAH, Z. Soil respiration, pH and EC as influenced by biochar. **Soil & Environment**, Faisalabad, v. 36, n. 1, p. 77–83, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.2525/se/17/51184>. Acesso em: 18 maio 2025.

SHETTY, R.; PRAKASH, N.B. Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity. **Scientific Reports**, London, v. 10, 12345, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69262-9>. Acesso em: 7 jun. 2025.

SHYAM, S. *et al.* Biochar as a soil amendment: Implications for soil health, carbon sequestration, and climate resilience. **Discover Soil**, Berlin, v. 2, n. 1, 18, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00041-8>. Acesso em: 1 abr. 2025.

SILVEIRA, M.M.L.; ARAÚJO, M.S.B.; SAMPAIO, E.V.S.B. Distribuição de fósforo em diferentes ordens de solo do semi-árido da Paraíba e de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 281–291, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832006000200009>. Acesso em: 5 mar. 2025.

SINGH, B.; SINGH, B.P.; COWIE, A.L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. **Soil Research**, Clayton, v. 48, n. 7, p. 516–525, 2010.

SITUMEANG, Y.P. The Use of Bamboo Biochar as a Soil Improver on the Growth and Yield of Mustard Plants. **Agriwar Journal**, Indramayu, v. 2, n. 1, p. 14–18, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.22225/aj.2.1.2022.14-18>. Acesso em: 5 mar. 2025.

SONG, D. *et al.* Soil nutrient responses and microbial activities to maize straw biochar addition and chemical fertilization in calcareous soil. **European Journal of Soil Biology**, Montrouge, v. 84, p. 1–10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.11.003>. Acesso em: 6 mar. 2025.

SONG, Y. *et al.* Change in microbial metabolic quotient under biochar amendment was associated with soil organic carbon quality, microbial community composition, and enzyme activity in bulk and rhizosphere soils in an acid rice paddy. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Santiago, v. 23, n. 3, p. 3149–3162, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01363-8>. Acesso em: 25 abr. 2025.

SPOHN, M. Microbial respiration per unit microbial biomass depends on litter layer carbon-to-nitrogen ratio. **Biogeosciences**, v. 12, n. 3, p. 817–823, 10 fev. 2015.

SPOKAS, K. Review of the stability of biochar in soils: Predictability of O:C molar ratios. **Carbon Management**, Abingdon, v. 1, n. 2, p. 289–303, 2010.

UK BIOCHAR RESEARCH CENTRE. **Microscopic structure of biochar**. [Photograph]. [S. l.]: UK Biochar Research Centre, [n.d.]. Available at: <http://www.nakanoassociates.com/biochar/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. Microbial biomass measurements in forest soils: Determination of kC values and tests of hypotheses to explain the failure of the chloroform fumigation-incubation method in acid soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 689–696, 1987.

VENEKLAAS, E.J. Phosphorus resorption and tissue longevity of roots and leaves – importance for phosphorus use efficiency and ecosystem phosphorus cycles. **Plant and Soil**,

Dordrecht, v. 476, n. 1, p. 627–637, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05522-1>. Acesso em: 25 abr. 2025.

WALKLEY, A.; BLACK, L. Examination of Dejtjareff method for determining soil organic matter and a proposal modification of the chromic acid titration method. **Soil Science Society**, v. 57, p. 29-38, 1984.

WANG, C. *et al.* Effects of phosphorus-modified biochar as a soil amendment on the growth and quality of *Pseudostellaria heterophylla*. **Scientific Reports**, London, v. 12, 7062, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11170-3>. Acesso em: 8 jun. 2025.

WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. **Journal of Clean Production**, Oxford, v. 227, p. 1002–1022, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>. Acesso em: 8 jun. 2025.

XIANG, L.; LIU, S.; YE, S.; YANG, H.; SONG, B.; QIN, F.; SHEN, M.; TAN, C.; ZENG, G.; TAN, X. Potential hazards of biochar: the negative environmental impacts of biochar applications. **Journal of Hazardous Materials**, v. 420, p. 126611, 2021.

XU, L. *et al.* Biochar and its impact on soil profile and plant development. **Journal of Plant Interactions**, Abingdon, v. 19, n. 1, 2401356, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17429145.2024.2401356>. Acesso em: 15 jun. 2025.

XU, Z. *et al.* Electroactive Fe biochar for redox remediation of arsenic and chromium: distinct redox nature with variable iron/carbon speciation. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 430, 128479, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128479>. Acesso em: 4 maio 2025.

YUAN, J.H.; XU, R.K.; ZHANG, H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. **Bioresource Technology**, Oxford, v. 102, n. 3, p. 3488–3497, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.018>. Acesso em: 28 jun. 2025.

ZANUTEL, M.; GARRÉ, S.; SANGLIER, P.; BIELDERS, C. Biochar modifies soil physical properties mostly through changes in soil structure rather than through its internal porosity. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 23, n. 1, e20301, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/vzj2.20301>. Acesso em: 29 jun. 2025.

ZHANG, L. *et al.* Biochar application to soils can regulate soil phosphorus availability: a review. **Biochar**, Basel, v. 7, 73, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00415-1>. Acesso em: 10 maio 2025.

ZHAO, Z.F. *et al.* Varieties of P fractions in biochar-amended reconstructed soils as impacted by freeze-thaw interference. **Journal of Environmental Management**, Oxford, v. 366, 121839, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121839>. Acesso em: 14 abr. 2025.

ZHOU, H. *et al.* Changes in microbial biomass and the metabolic quotient with biochar addition to agricultural soils: A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 239, p. 80–89, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.006>. Acesso em: 29 jun. 2025.

ZHU, Q. et al. Effects of biochar on seedling root growth of soybeans. **Chilean journal of agricultural research**, v. 78, n. 4, p. 549–558, 30 nov. 2018.

5. ARTIGO 2**ALTERAÇÕES DA LABILIDADE E ESTABILIDADE DO CARBONO ORGÂNICO E DO NITROGÊNIO NAS FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO COM BIOCHAR**

Artigo formatado de acordo com as normas do periódico: Soil and Tillage Research

RESUMO

O biochar interage com as partículas minerais e orgânicas do solo e promove alterações nos pools de carbono, que possuem diferentes graus de estabilidade e desempenham funções distintas nos ecossistemas. Dessa forma, as metodologias utilizadas para a determinação do carbono lábil e estável nas frações físicas do solo sob manejo tradicional podem não ser adequadas para solos sob manejo com biochar, pois tornam a interpretação dos resultados desafiadora. O objetivo do presente estudo foi investigar o efeito de três diferentes tipos de biochar na distribuição do carbono orgânico (COT) e do nitrogênio total (NT) entre as frações da matéria orgânica particulada (MOP) e associada aos minerais (MOAM) em um Argissolo Vermelho-Amarelo, após três anos da incorporação/incubação. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (1. Controle, 2. Biochar de casca de coco seco-BCS, 3. Biochar de bagaço de laranja-BL, 4. Biochar de biossólidos-BB) e quatro repetições. Após incubação por três anos, o solo de cada tratamento foi analisado para determinação do COT e do NT no solo e nas frações MOP e MOAM. O biochar aumentou a concentração de COT do solo em 140-234%, os tratamentos BL e BB aumentaram o NT. Os tratamentos BCS e BL aumentaram a concentração de C na MOP e MOAM, mas o BB apenas aumentou o C na MOP. Em termos proporcionais, todos os biochars aumentaram o C na MOP e reduziram na MOAM, resultando em proporção inversa à do solo sem biochar. O tratamento BCS aumentou a recalcitrância do C tanto na MOP quanto na MOAM, em função do aumento significativo na relação C/N para 70 e 25, respectivamente. Já o BB reduziu a C/N na MOP, com potencial para aumentar a labilidade do C. Portanto, a intensidade do efeito do biochar nos pools de carbono do solo depende do tipo de biomassa.

Palavras-chave: Fracionamento de carbono; recalcitrância; pirólise; manejo do solo.

ABSTRACT**CHANGES IN LABILITY AND STABILITY OF ORGANIC CARBON AND NITROGEN IN SOIL ORGANIC MATTER FRACTIONS WITH BIOCHAR**

Biochar interacts with mineral and organic particles in the soil and promotes changes in carbon pools that have different degrees of stability and perform different functions in ecosystems. Thus, the methodologies used to determine labile and stable carbon in the physical fractions of soil under traditional management may not be suitable for soils under biochar management, as they make the interpretation of results challenging. The objective of this study was to investigate the effect of three different types of biochar on the distribution of organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) among the fractions of particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) in a Red-Yellow Argisol after three years of incorporation/incubation. The experiment was conducted in a completely randomized design with four treatments (1. Control, 2. Dry coconut shell biochar-BCS, 3. Orange pomace biochar-BL, 4. Biosolids biochar-BB) and four replicates. After incubation for three years, the soil from each treatment was analyzed to determine TOC and NT in the soil and in the MOP and MOAM fractions. Biochar increased the TOC concentration in the soil by 140-234%, while the BL and BB treatments increased NT. The BCS and BL treatments increased the C concentration in MOP and MOAM, but BB only increased C in MOP. In proportional terms, all biochars increased C in MOP and reduced it in MOAM, resulting in a reverse proportion to that of soil lacking biochar. The BCS treatment increased C recalcitrance in both MOP and MOAM due to a significant increase in the C/N ratio to 70 and 25, respectively. BB reduced C/N in MOP, with the potential to increase C lability. Therefore, the intensity of the biochar effect on soil carbon pools depends on the type of biomass.

Keywords: Carbon fractionation; recalcitrance; pyrolysis; soil management.

5.1. Introdução

A estratégia de manejo mais comum em solos tropicais e intemperizados é a aplicação de resíduos orgânicos para melhorar a disponibilidade de nutrientes e aumentar a retenção de água (Barreto et al., 2021; Sonsri et al., 2022). Devido às condições climáticas e à textura do solo, os resíduos orgânicos são rapidamente decompostos e precisam ser adicionados anualmente, onerando também os custos da produção agrícola e, ao mesmo tempo, reduzindo as chances de sequestro de carbono (Matus, 2021; Sonsri et al., 2022).

A produção de biochar a partir de resíduos orgânicos, seja proveniente de biomassa de origem animal ou vegetal, é, comprovadamente, uma das formas mais eficientes de aproveitamento dos resíduos na agricultura (Lehmann; Joseph, 2015). Os benefícios do biochar em sistemas agrícolas são amplamente conhecidos ao redor do mundo, com melhorias significativas na qualidade química, física e biológica do solo, sobretudo nos Argissolos com baixos teores de argila e minerais secundários de baixa atividade química. Porém, uma das aplicações de maior sucesso para o manejo do biochar está relacionada ao acúmulo de carbono de alta estabilidade no solo (Sandhu et al., 2017; Bossio et al., 2020; Chagas et al., 2022; Gross et al., 2021). A extensão e a intensidade dos efeitos do biochar, tanto para a qualidade do solo quanto para o sequestro de carbono, dependem, principalmente, de fatores como o tipo de biomassa utilizada na sua produção (Chen et al., 2024; Saffari et al., 2020; Sandhu et al., 2017) e o tipo de solo.

Muitos estudos têm investigado os efeitos do biochar nas propriedades do solo (Jiang et al., 2021), na produtividade das culturas (Schmidt et al., 2021; Dayoub et al., 2023) e no acréscimo de carbono no solo (Sandhu et al., 2017; Elkhlifi et al., 2023). Muitos deles apontam diferenças marcantes entre os tipos de biochar e as associam às grandes variações observadas em parâmetros do solo. Essas informações são importantes na tomada de decisão sobre a escolha do biochar a ser utilizado de acordo com objetivos específicos de cada propriedade agrícola. Contudo, quando a finalidade da aplicação do biochar é o aumento do carbono no solo, nem sempre há clareza sobre os mecanismos que norteiam a natureza das interações do biochar com o solo e como isso influencia os diferentes pools de carbono.

A matéria orgânica do solo pode ser operacionalmente separada em duas frações, de acordo com a granulometria, com diferentes graus de estabilidade: a fração particulada, com diâmetro maior do que 0,053 mm, conhecida como MOP, e a fração composta por partículas de diâmetro menor do que 0,053 mm, conhecida como MOAM, ou matéria orgânica associada aos minerais (Six et al., 2002). A MOP apresenta elevada labilidade, menor proteção física, rápida taxa de retorno de carbono e menor concentração de nitrogênio (Lavallee et al., 2020). Já a MOAM é estável, pois está intimamente associada, física e quimicamente, com as partículas do solo, apresenta baixa taxa de retorno de carbono e maior concentração de nitrogênio (Lavallee et al., 2020).

O conhecimento da distribuição do carbono da matéria orgânica do solo em MOP e MOAM possibilita a adoção de práticas de manejo mais sustentáveis, visando a conservação do solo e a redução das perdas de carbono para a atmosfera (Six et al., 2002; von Haden et al., 2019). Cada uma dessas frações é construída a partir de diferentes contribuições e processos que ocorrem durante a adição e decomposição da biomassa no solo (Cotrufo et al., 2022; Cotrufo; Lavallee, 2022; Just et al., 2023). Por essa razão, a MOP e a MOAM possuem diferentes taxas de retorno do carbono à atmosfera e diferentes funções no solo (Matus, 2021).

A MOP é formada, na sua maioria, por resíduos da parte aérea das plantas em diferentes fases de decomposição (Cotrufo et al., 2022), sendo composta, em grande parte, de partículas de maior tamanho e com maior facilidade de degradação, principalmente por não contarem com forte proteção física. Por essa razão, a MOP é conhecida como a fração mais lábil da matéria orgânica e, por estar em menor proporção, responde rapidamente ao manejo do solo. No entanto, a taxa de retorno de carbono da MOP também depende da agregação do

solo e da qualidade do resíduo que lhe deu origem. Biomassa mais significada e com maior relação C/N limita a labilidade da MOP (von Haden et al., 2019).

A fração MOAM é formada por fontes diversas de carbono orgânico, com fortes indícios de que a maior contribuição venha das raízes das plantas, tanto através da decomposição de seus resíduos quanto de seus exudatos, assim como as células microbianas e seus exudatos (Cotrufo; Lavallee, 2022; Cotrufo et al., 2022). Embora esses compostos radiculares e microbianos possuam elevada labilidade, ao se associarem aos minerais de argila, se tornam física e quimicamente protegidos, formando compostos organo-minerais de elevada estabilidade e baixo retorno de carbono (Matus, 2021). Por essa razão, a MOAM normalmente se encontra em alta proporção quando comparada com a MOP, e dificilmente é alterada pelo manejo do solo, sendo considerada a fração mais relacionada ao sequestro de carbono (Six et al., 2002).

A adição de biochar ao solo pode alterar as proporções e as características de MOP e MOAM, pois trata-se de uma fonte de carbono com elevado grau de estabilidade, grande porosidade e área superficial (Du et al., 2023; Lei et al., 2024). O biochar também pode modificar os conceitos de labilidade e estabilidade das frações MOP e MOAM, como são normalmente compreendidos (Matus, 2021; Lei et al., 2024), tornando essencial investigar qual a natureza da interação do biochar com as partículas do solo (Du et al., 2023) e como isso afeta a distribuição dos pools de carbono. Recentemente, algumas publicações (Plaza et al., 2016; Sandhu et al., 2017; Silveira et al., 2020; Cooper et al., 2020; Giannetta et al., 2023, 2024) abordaram os efeitos do biochar na distribuição do carbono no solo. Em geral, o biochar aumentou sistematicamente a concentração de carbono na MOP, mas os resultados do efeito do biochar na MOAM foram variáveis.

Nenhum estudo divulgado até hoje avaliou o efeito dos biochars de bagaço de laranja, casca de coco seco e biossólido na distribuição do carbono e do nitrogênio em Argissolos de regiões tropicais. Esses resíduos são amplamente produzidos em várias partes do mundo, são de difícil descarte, mas apresentam grande potencial na forma de biochar. Portanto, o presente estudo teve o objetivo de investigar as alterações na distribuição de carbono e do nitrogênio nas frações MOP e MOAM em função da aplicação desses biochars em um Argissolo Vermelho-Amarelo, após três anos de incubação.

5.2. Material e Métodos

5.2.1 Produção, preparação e caracterização do biochar

A biomassa de resíduos de coco seco e bagaço de laranja foi coletada de agroindústrias locais. O biossólido foi obtido de uma estação de tratamento de águas residuais municipal que utiliza um processo de tratamento por lodo ativado. Os resíduos foram secos ao ar para reduzir o teor de umidade e pirolizados em um forno artesanal do tipo Top lit updraft gasifier (TLUD) acoplado a uma unidade requeimadora para eliminar os vapores e gases não condensáveis (Nsamba et al., 2015). O biochar do biossólido foi pirolizado a uma temperatura de 600 °C por 3 horas. A casca de coco e o bagaço de laranja foram pirolizados a uma temperatura de 600 °C por 1 hora. A diferença no tempo de produção foi relacionada à densidade de cada resíduo.

Após a moagem e peneiramento, o biochar foi analisado para determinar o teor de cinzas, matéria volátil e carbono fixo, de acordo com a norma ASTM D1752-84 da Sociedade Americana de Testes e Materiais. A concentração de C, N, H e S foi determinada utilizando um analisador elementar CNHS (Mukherjee et al., 2014). O pH do biochar foi determinado na proporção de 1:5 (p/p) biochar:água após 1,5 h de agitação em um agitador reciprocante e um período de equilíbrio de uma hora (Gaskin et al., 2008).

A distribuição granulométrica do biochar foi determinada com base na metodologia ASTM D5158-98. Aproximadamente 25 g de biochar seco ao ar foram transferidos para um conjunto de peneiras de malha: 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm e 0,10 mm, e agitados por 20

minutos em um agitador orbital, girando a 4-4,5 rpm. O biochar retido em cada peneira foi coletado e pesado.

A morfologia dos biochars foi obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando um microscópio eletrônico Express, modelo Aspex, operado em alto vácuo, com aceleração do feixe de elétrons de 15 kV. As amostras foram previamente fixadas em fitas de carbono dupla face e metalizadas com ouro para visualização da estrutura. As características dos biochars estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1– Características dos biochars de casca de coco seco (BCS), bagaço de laranja (OB) e biossólido (BB).

Características	BCS	OB	BB
pH	10,5	10,0	7,50
C (%)	60,5	62,3	34,0
N (%)	3,50	2,70	4,00
H (%)	2,96	3,63	2,42
Cinzas (%)	8,97	9,75	48,1
Matéria Volátil (%)	37,0	41,6	26,0
C Fixo (%)	54,0	48,6	25,4
Área de Superfície Específica ($m^2 \text{ g}^{-1}$)	122	100	77,0
¹⁾			
Densidade (g cm^{-3})	0,10	0,20	0,56
>2mm (%)	12,0	13,5	7,28
2mm-1mm (%)	17,9	20,9	22,6
1mm-0.5mm (%)	21,1	14,0	26,0
0.5mm-0.25mm (%)	38,1	15,7	17,9
0.25mm-0.1mm (%)	3,55	24,5	15,3
< 0.1 mm (%)	1,90	10,4	10,5

5.2.2

Coleta,

preparo e caracterização do solo

O solo utilizado no estudo foi coletado da camada de 0,00-0,20 m em um perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (Soil Survey Staff, 2014), localizado na região Nordeste do Brasil ($S\ 10^{\circ}\ 55,77'$; $W\ 37^{\circ}\ 06,22'$). O solo foi seco ao ar, peneirado em peneira de 2 mm e analisado. O pH do solo era 4,55, carbono orgânico: $5,06\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, CTC: $3,60\ \text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$, areia: 72%, silte: 13% e argila: 15% (Day, 1965).

5.2.3 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e quatro repetições. Três tipos de biochar foram testados: casca de coco seco (BCS), bagaço de laranja (BL) e biossólido (BB). Um tratamento controle (sem biochar) foi adicionado como referência. As unidades experimentais foram vasos plásticos de 1000 mL com tampas perfuradas com microfuros. Cada vaso continha 500 g de solo e 11 g de biochar. Após completa homogeneização, os tratamentos foram umedecidos a 70% da capacidade de vaso, pesados, cobertos e mantidos em laboratório por três anos. O teor de umidade do solo em cada tratamento foi mantido por meio de pesagem mensal e adição de água deionizada.

5.2.4 Determinação do carbono orgânico e do nitrogênio total no solo e nas frações do solo

O carbono orgânico total do solo foi determinado pelo método de Walkley-Black (Nelson; Sommers, 1996). O nitrogênio total foi determinado pelo procedimento de Kjeldahl, que envolve a digestão da amostra para converter o nitrogênio em amônio, seguida pela determinação do amônio por titulação (Bremner, 1996).

A separação das frações físicas da matéria orgânica do solo foi realizada de acordo com Cambardella e Elliott (1992). Resumidamente, 10 g de amostras de solo secas ao ar foram misturadas com 70 mL de hexametafosfato de sódio 5 g L⁻¹ e agitadas por 15 h em um agitador horizontal, a 130 oscilações min⁻¹. A amostra foi colocada em uma peneira de 53 µm e lavada com água deionizada. O solo retido na peneira foi seco a 60 °C, pesado, moído em moinho de bolas e utilizado para determinar o teor de carbono orgânico e nitrogênio total. O solo retido na peneira de 0,053 mm foi definido como matéria orgânica particulada (MOP). A fração do solo que passou pela peneira de 0,053 mm, definida como matéria orgânica complexada (MOAM), também foi seca, pesada e moída até a formação de um pó fino. De cada fração de solo, alíquotas foram pesadas e analisadas quanto aos teores de C e N, de acordo com a mesma metodologia descrita anteriormente.

5.2.5 Análise estatística

Após a análise de normalidade e homogeneidade, os dados foram analisados em delineamento inteiramente casualizado. Os resultados foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F, e as médias, quando significativas, foram comparadas com o teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o software Sisvar, versão 5.8 (Ferreira, 2019). A variabilidade dos dados também foi expressa como desvio-padrão de quatro repetições.

A técnica de ordenação irrestrita da Análise de Componentes Principais (ACP) foi usada para avaliar o impacto dos diferentes tratamentos com biochar nas variáveis do solo. Inicialmente, construímos uma matriz de covariância usando valores normalizados dos parâmetros do solo. Posteriormente, calculamos seus autovalores e autovetores. Finalmente, utilizamos gráficos biplot para visualizar as diferenças nos parâmetros do solo em cada tratamento com biochar. Além disso, ajustamos modelos de regressão múltipla para determinar quais parâmetros do solo foram mais influentes na explicação da distribuição de C e N entre as frações do solo.

5.3. Resultados e discussão

5.3.1 Carbono orgânico total e nitrogênio no solo

A Figura 1 apresenta as concentrações de carbono orgânico total (COT) (A), nitrogênio (NT) (B) e a relação C/N (C) em solos tratados com diferentes tipos de biochar, após três anos de incubação em laboratório.

Independentemente da fonte de biomassa, a adição de biochar elevou significativamente a concentração de COT no solo (Figura 1A), seguindo a ordem: BCS = OB > BB > Controle. Os aumentos no COT foram de 211%, 234% e 140% para os tratamentos BCS, OB e BB, respectivamente. Esse aumento é um resultado típico da influência do biochar

(Lehmann; Joseph, 2015), visto que o biochar é rico em carbono (30–90%). No entanto, as concentrações de COT variaram entre os tratamentos, provavelmente devido aos diferentes teores de carbono de cada biochar, visto que a taxa de aplicação foi consistente entre os tratamentos.

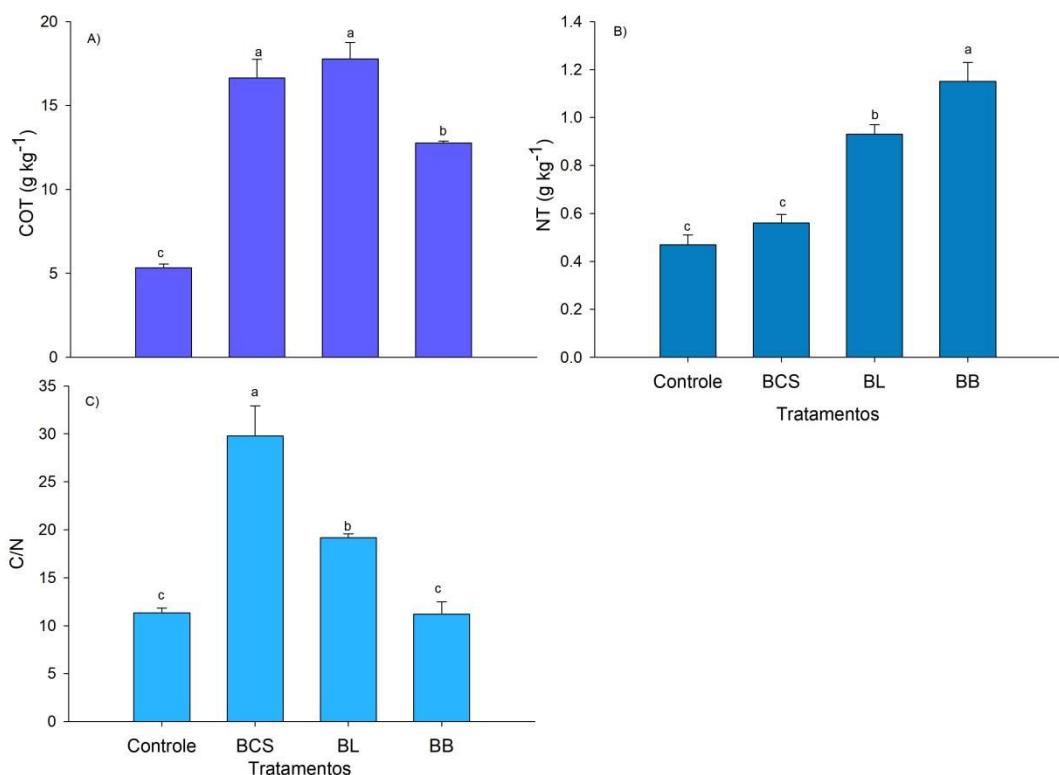


Figura 1. Concentração de carbono orgânico total-COT (A), concentração de nitrogênio total-NT (B) e relação carbono/nitrogênio-C/N (C) do solo após o condicionamento com biochar de casca de coco seco (BCS), bagaço de laranja (BL) e biossólido (BB). São Cristóvão-SE. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

Biochars derivados de resíduos de coco seco e bagaço de laranja normalmente contêm 70 a 80% de carbono, enquanto o biochar biossólido contém 30 a 50% de carbono (Guarnieri et al., 2021; Patel et al., 2020). Essa discrepância no teor de carbono explica o impacto diferencial no COT do solo. Neste estudo, o biochar biossólido, com uma concentração de carbono de 44% (Tabela 1), contribuiu com menos carbono para o solo (Figura 1A).

Como um componente-chave no ciclo global do carbono, o COT influencia a saúde do solo, a produtividade das culturas e a sustentabilidade do ecossistema, com implicações para a regulação climática. Portanto, a aplicação de biochar pode mitigar as mudanças climáticas, particularmente em regiões tropicais, onde a alta atividade microbiana e as condições ambientais promovem a rápida perda de carbono para a atmosfera. O aumento do COT observado neste estudo destaca o potencial do biochar para sequestro de carbono e retenção de matéria orgânica do solo (Chagas et al., 2022; Gross et al., 2021; Bossio et al., 2020).

Esses resultados são consistentes com estudos anteriores sobre o manejo do solo com biochar. Por exemplo, Silveira et al. (2020) observaram um aumento de mais de 300% no carbono do solo após a aplicação de biochar de pinheiro em um solo arenoso na Flórida. Da mesma forma, Bossio et al. (2020) destacaram a eficácia do biochar derivado de resíduos de culturas no sequestro de carbono, estimando a mitigação de aproximadamente 1,1 Gt CO₂e por ano até 2030. Ghosh e Maiti (2023) registraram um aumento de 45% no estoque de carbono do solo após a alteração do biochar com biomassa de *Calotropis procera*. O alto teor de carbono nos biochars de casca de coco seco e bagaço de laranja, combinado com as propriedades físico-químicas desses resíduos, como a composição lignocelulósica, aumenta

sua estabilidade e recalcitrância após a pirólise. A pirólise de resíduos vegetais ricos em lignina, celulose e hemicelulose resulta em biochars com maior resistência à degradação (Iwuozor et al., 2024).

No Nordeste do Brasil, solos como Latossolos, Neossolos Quartzarênicos e Argissolos tipicamente possuem propriedades físicas que favorecem a aeração e a drenagem, acelerando assim a degradação da matéria orgânica. Consequentemente, melhorar o teor de matéria orgânica do solo é desafiador. A aplicação de biochar oferece uma abordagem avançada para a conservação do solo, incorporando carbono estável ao solo, aumentando a resiliência a longo prazo à degradação. Neste estudo, o teor de matéria orgânica no tratamento controle (1%) refletiu as condições típicas encontradas em Argissolos da região Nordeste do Brasil. Em contraste, após três anos de aplicação de biochar, o teor de matéria orgânica aumentou para 2,15% (BB) e 2,93% (BCS e OB).

As alterações com biochar aumentaram significativamente as concentrações de NT no solo (Figura 1B), com aumentos de 98% (OB) e 145% (BB), com exceção do biochar de casca de coco (BCS). Esse aumento está diretamente relacionado ao teor de nitrogênio em cada biochar: o biochar de casca de coco seco (BCS) continha aproximadamente 3,5% de nitrogênio, o biochar de bagaço de laranja (OB) 2,70% e o biochar de biossólido (BB) 4,0% (Tabela 1).

Durante a produção do biochar, as estruturas moleculares sofrem aromatização em altas temperaturas de pirólise, o que leva à volatilização de certos elementos, incluindo o nitrogênio. Neste estudo, os biochars foram produzidos em temperaturas entre 500 °C e 600 °C, condições propícias à volatilização do nitrogênio. No entanto, a aromatização do biochar pode proteger o nitrogênio, aumentando sua estabilidade e recalcitrância, reduzindo assim a perda de elementos. Embora parte do nitrogênio possa ser perdida durante o processo de pirólise, uma porção pode permanecer no biochar se incorporada a estruturas aromáticas. A extensão da liberação de nitrogênio do biochar para o solo depende do seu grau de aromatização, estabilidade e condições ambientais. Biochars derivados de biomassas ricas em lignina e celulose, como cascas de coco secas e bagaço de laranja, normalmente apresentam maior estabilidade e conservação de nitrogênio em comparação com biochars de biomassa menos lignificada, como biossólidos. Em contraste, o biochar biossólido retém uma proporção maior de nitrogênio, não necessariamente devido à maior estabilidade, mas devido ao seu maior teor inicial de nitrogênio (Figueiredo et al., 2021).

Sarfaraz et al. (2020) relataram que o baixo teor de nitrogênio no biochar é atribuído às altas temperaturas de pirólise, que promovem a volatilização do nitrogênio como amônia (NH_3), óxido nitroso (N_2O) ou dióxido de nitrogênio (NO_2), reduzindo assim os níveis de nitrogênio no produto final do biochar. A literatura existente sobre o impacto do biochar na dinâmica do nitrogênio indica que o biochar pode tanto estimular quanto mitigar perdas de nitrogênio (Khan et al., 2022; He et al., 2019), ou ter efeitos mínimos no comportamento do nitrogênio (Phillips et al. 2022).

Neste estudo, o experimento de incubação minimizou a exposição a fatores externos, limitando as perdas de nitrogênio para a atmosfera. Além disso, a atividade microbiana, condicionada pela baixa disponibilidade de substrato, provavelmente teve influência mínima na dinâmica do nitrogênio no solo. Dado o papel vital do nitrogênio para o crescimento das plantas e a atividade microbiana do solo, e as altas taxas de perda de nitrogênio de solos agrícolas como os Argissolos, o biochar biossólido, com seu maior teor de nitrogênio, surge como uma fonte valiosa e sustentável para aumentar a fertilidade do solo em sistemas agrícolas.

A relação C/N do solo variou de 11,0 a 29,8 (Figura 1C). A adição de biochar produzido a partir de biossólidos não alterou significativamente a relação C/N, provavelmente devido ao seu menor efeito sobre o COT em comparação com as concentrações de ND. O tratamento com BCS levou a um aumento substancial de 171% na relação C/N, passando de 11 (controle) para quase 30. Embora o tratamento com BCS tenha aumentado o carbono do

solo de forma semelhante ao OB, seu impacto mínimo sobre o ND explica seu efeito na relação C/N do solo.

A relação C/N é um importante indicador do potencial de armazenamento de carbono do solo e da ciclagem de nutrientes (Kiehl, 2004). Ela reflete o equilíbrio entre as concentrações de carbono e nitrogênio e a composição dos resíduos orgânicos. Em solos cultivados, a relação C/N típica da matéria orgânica é em torno de 10/1, sugerindo equilíbrio dinâmico. Neste estudo, os tratamentos controle e BB se aproximaram desse valor ideal. Segundo Kiehl (2004), a relação C/N ideal situa-se entre 25:1 e 30:1, com relações abaixo de 10:1 promovendo a volatilização do nitrogênio. Relações C/N entre 30:1 e 50:1 favorecem a decomposição eficiente, enquanto relações acima de 50:1 indicam deficiência de nitrogênio e decomposição prolongada. O monitoramento da relação C/N tanto nos resíduos aplicados quanto nos solos otimiza os processos de mineralização e mantém a produtividade e a saúde do solo.

5.3.2 Proporção relativa da massa de solo e distribuição do carbono orgânico total e do nitrogênio nas frações físicas granulométricas no solo

A proporção relativa da massa de solo retida na peneira de 0,053 mm (MOP) e a que passou na peneira (MOAM) variou de 71-76% e de 24-26%, respectivamente (Figura 2). Houve domínio da fração MOP, representando mais de 70% da distribuição das partículas por tamanho. Esse resultado é devido à classe textural do solo usado no experimento. A adição de biochar não interferiu na proporção relativa da massa de solo em nenhuma fração.

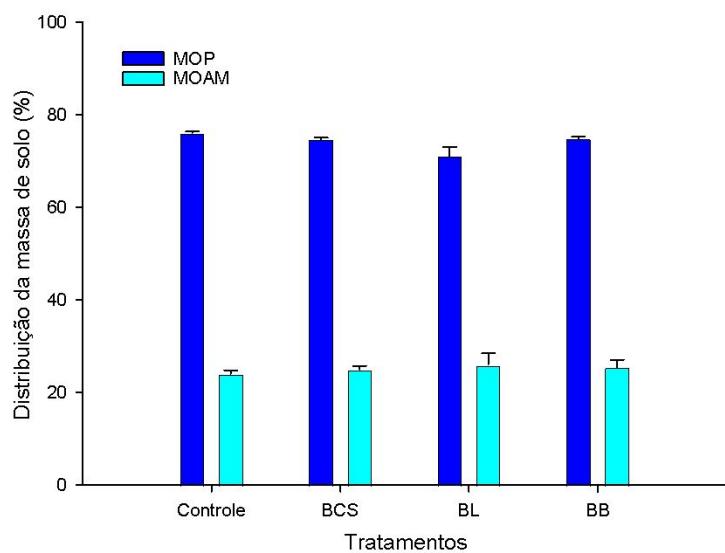


Figura 2. Proporção relativa da massa de solo nas frações particulada (MOP) e associada aos minerais (MOAM) do solo após o condicionamento com biochar de casca de coco seco (BCS), bagaço de laranja (BL) e bioossólido (BB). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

As concentrações e proporções de carbono (C) e nitrogênio (N) nas frações físicas da matéria orgânica do solo, especificamente MOP e MOAM, são ilustradas na Figura 3. Em geral, os solos tendem a exibir maiores concentrações de C na fração MOAM em comparação com a fração MOP (Kauer et al., 2021; Sokol et al., 2022), devido à proteção do C complexado com partículas minerais. Esse padrão foi observado no tratamento controle (sem biochar), com 17% de C em MOP e 85% em MOAM (Figura 3B). No entanto, o biochar alterou significativamente as concentrações de C na fração MOP, resultando em aumentos que variaram de 4,5 vezes (tratamento BB) a 8 vezes (tratamentos BCS e OB).

As concentrações de C na fração MOAM aumentaram em aproximadamente 100% nos tratamentos BCS e OB e não foram influenciadas pelo BB. Uma explicação para esse

resultado está relacionada à distribuição das partículas de biochar por tamanho, isto é, sua granulometria, bem como a concentração de C do biochar (Tabela 1). Uma melhor compreensão pode ser obtida através da associação dos efeitos do tamanho da partícula com a concentração de C do biochar. Por exemplo, o BB tem uma proporção de partículas mais finas ($< 0,25$ mm) de 25,5%, o que poderia contribuir para o aumento da MOAM, porém esse biochar tem apenas 34% de C em sua composição. Já o OB tem uma proporção de partículas $< 0,25$ mm semelhante à do BB (24,9%), mas apresenta quase o dobro da concentração de C.

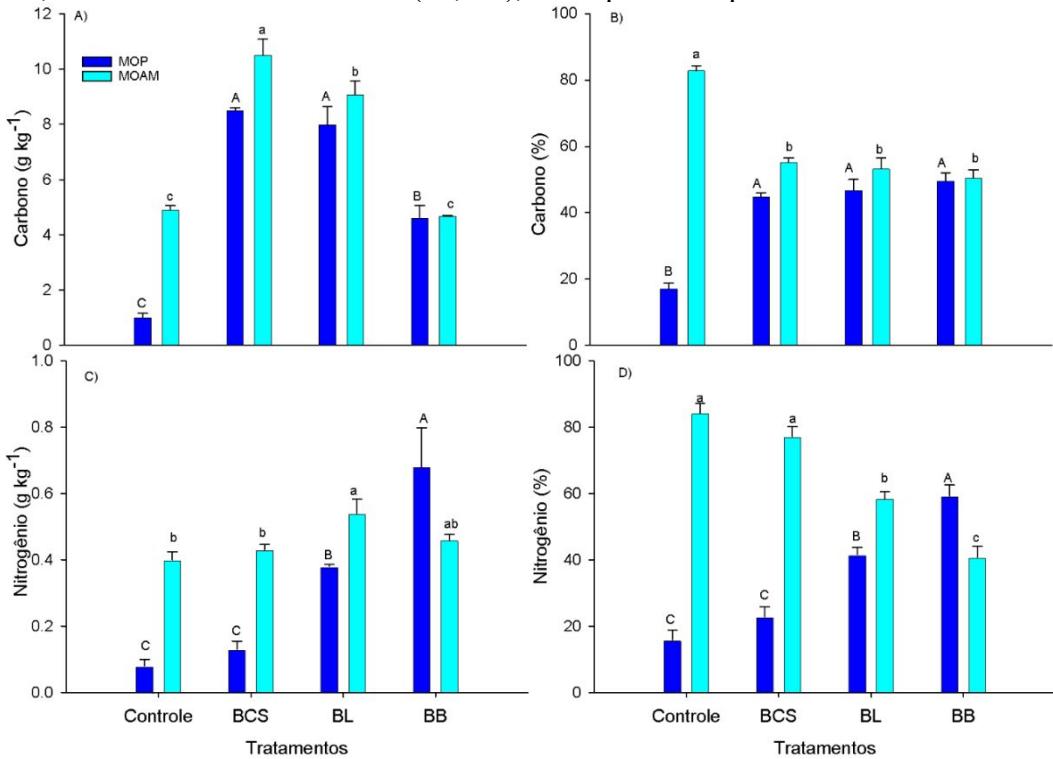


Figura 3. Concentração de carbono orgânico (A), proporção de carbono (B), concentração de nitrogênio (C) e proporção de nitrogênio (D) nas frações particulada (MOP) e associada aos minerais (MOAM) do solo após o condicionamento com biochar de casca de coco seco (BCS), bagaço de laranja (BL) e biossólido (BB). São Cristóvão-SE. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

Ao examinar as proporções relativas de C (Figura 3B), observou-se que todos os tratamentos com biochar aumentaram o teor de carbono na fração MOP e, em contrapartida, reduziram o da MOAM. Em média, a distribuição foi de 45% na MOP e 55% na MOAM, sem diferenças significativas entre os tratamentos. Resultados semelhantes foram relatados por Giannetta et al. (2023), que verificaram aumentos em ambas frações após aplicar 20 t ha⁻¹ de biochar, no entanto, o tipo de biomassa usado para produzir o biochar não foi divulgado em seu estudo, dificultando a comparação direta com nossas descobertas. Lei et al. (2024) aplicaram biochar de palha de milho em solos argilosos e relataram um aumento de 5 vezes no MOP-C e um aumento de 1,2 vez no MOAM-C. Este conjunto de pesquisas destaca um padrão consistente: independentemente do tipo de biochar, sua adição altera a distribuição de C entre as frações MOP e MOAM, embora os resultados específicos possam variar devido a diferenças nas características do biochar, tipos de solo e condições experimentais.

As partículas de biochar são altamente diversas em termos de forma, tamanho e grupos funcionais de superfície (Tabela 1), com cargas negativas e positivas. Da mesma forma, as partículas de solo apresentam uma variedade de tamanhos, classificadas como frações de areia, silte e argila. A fração de areia, que faz parte da MO, é inerte e tem interação mínima com o biochar e o C nativo do solo. No entanto, o C nativo do solo na fração da MO pode se associar às partículas de biochar, aumentando a proteção e reduzindo a labilidade do C nativo,

mitigando assim as perdas. Portanto, o aumento da fração de C-MOP em solos tratados com biochar não indica necessariamente maior biodisponibilidade de C ou nutrientes. Em vez disso, pode representar um reservatório de C mais estável, derivado tanto do próprio biochar quanto da matéria orgânica nativa do solo.

Partículas de silte e argila são componentes da fração da MOAM. A interação entre os minerais secundários eletricamente carregados (silicatos e não silicatos) na fração de argila e nas partículas de biochar, que também carregam cargas elétricas nos grupos funcionais da superfície, pode aumentar a estabilidade do C orgânico do solo. O aumento significativo nas concentrações de C na fração MOAM após a adição de OB e BCS, observado neste estudo, sugere que o biochar pode aumentar a capacidade do solo de sequestrar C em formas mais estáveis, contribuindo para o armazenamento de carbono a longo prazo. A alta estabilidade da estrutura aromática do biochar, juntamente com sua alta porosidade e propriedades de carga superficial, pode levar à competição por sítios de troca com o carbono nativo do solo, conforme observado por Shi et al. (2021). Espera-se, portanto, que interações na fração MOAM ocorram entre biochar e minerais de argila, entre biochar e carbono nativo do solo e entre carbono nativo do solo e minerais de argila. Essas interações podem envolver troca de ligantes, ligações de hidrogênio, ligações catiônicas e forças de van der Waals (Lavallee et al., 2020), todas com potencial para aumentar a capacidade de saturação de carbono da fração MOAM.

A capacidade de saturação de carbono na fração MOAM está tipicamente relacionada à composição mineralógica e ao tamanho da fração argilosa em solos minerais (Georgiou et al., 2022). No presente estudo, a fração argilosa representou apenas 15% do solo (Tabela 1), com uma composição dominada por caulinita e óxidos de Fe e Al. Esses minerais possuem área superficial específica reduzida e baixa capacidade de carga, sugerindo que o Argissolo Vermelho distroférreo tem uma capacidade relativamente baixa de armazenar carbono na fração MOAM. Consequentemente, a aplicação de biochar pode aumentar o potencial de armazenamento de carbono do solo, visto que a alta estabilidade e as propriedades superficiais do biochar ajudam a compensar a capacidade mineralógica limitada do solo.

Os efeitos positivos do biochar no armazenamento de carbono em frações físicas do solo foram observados em estudos anteriores (Plaza et al., 2016; Ding et al., 2023; Giannetta et al., 2023; Giannetta et al., 2024). O aumento simultâneo de carbono nas frações MOP e MOAM devido à adição de biochar, particularmente quando se utiliza o biochar de bagaço de laranja, fornece informações valiosas para sistemas agrícolas, especialmente aqueles que exploram oportunidades de comércio de carbono.

Em relação à distribuição de nitrogênio, no solo sem biochar, as concentrações foram de $0,08 \text{ g kg}^{-1}$ em MOP e $0,40 \text{ g kg}^{-1}$ em MOAM, com 16% do N em MOP e 84% em MOAM (Figura 3C e 3D). Esses resultados são consistentes com estudos conduzidos na região Nordeste do Brasil. Uma proporção maior de N é tipicamente encontrada na fração MOAM em comparação com a fração MOP (Silveira et al., 2020; Kauer et al., 2021; Cotrufo; Lavallee, 2022), provavelmente devido ao maior risco de perdas de N da fração MOP, principalmente por lixiviação. No estudo de Silveira et al. (2020), a proporção de N na fração MOAM variou de 64% a 94%, com 22% a 28% na fração MOP. Embora uma proporção maior de N na MOAM seja uma observação comum.

5.3.3 Relações do carbono e do nitrogênio nas frações físicas granulométricas no solo

A Figura 4 ilustra as razões de MOP-C/MOAM-C, MOP-N/MOAM-N, MOP-C/N e MOAM-C/N. Essas razões são essenciais para avaliar os efeitos de várias práticas de manejo da terra na estabilidade do carbono, pois cada fração desempenha funções distintas dentro do sistema do solo. A razão MOP-C/MOAM-C variou de 0,21 a 0,99 (Figura 4A), com tratamentos com biochar mostrando um aumento de mais de 300%, destacando sua influência predominante na MOP. Um aumento na razão MOP-C/MOAM-C, observado em solos sob manejo convencional de resíduos orgânicos e rotação de culturas (Just et al., 2023), pode

indicar acúmulo de carbono na MOP sem um aumento correspondente na MOAM. Isso sugere um processo lento de conversão de MOP em MOAM durante a degradação dos resíduos e/ou uma contribuição reduzida de exsudatos radiculares e compostos microbianos para a formação da MOAM.

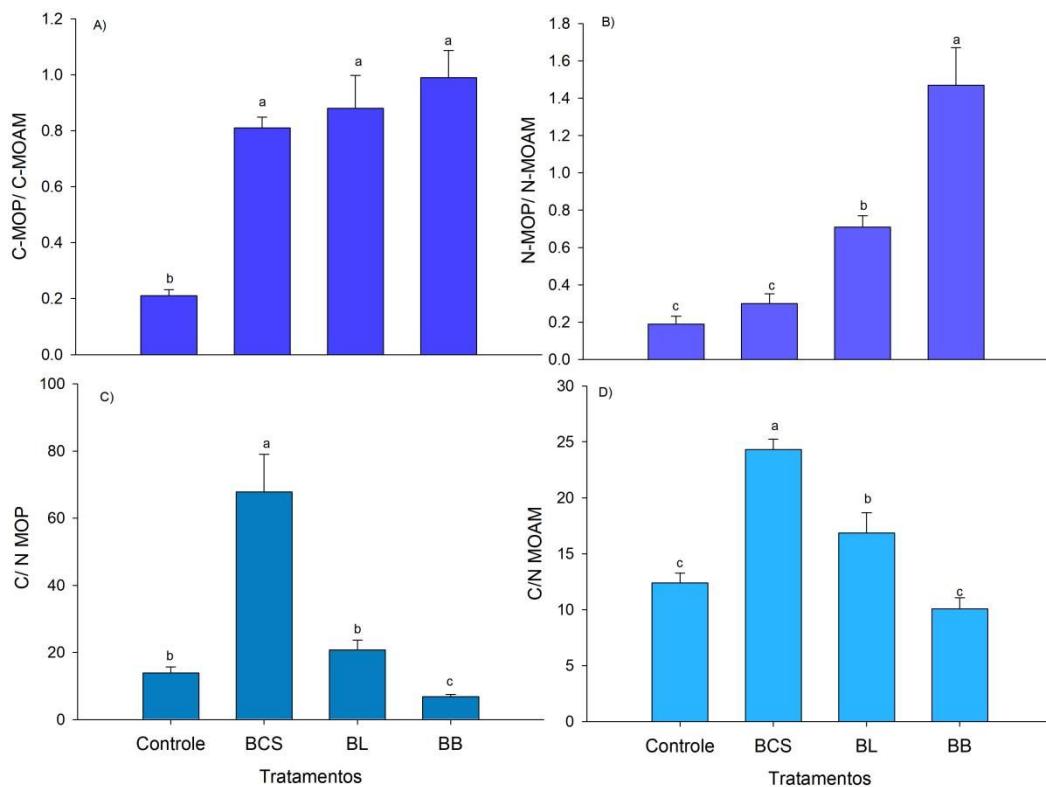


Figura 4. Partição de carbono (A) e de nitrogênio (B), e relação C/N na MOP (C) e na MOAM (D) do solo após o condicionamento com biochar de casca de coco seco (BCS), bagaço de laranja (BL) e biossólido (BB). São Cristóvão-SE. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

Em solos enriquecidos com biochar, o aumento na MOP provavelmente está relacionado à natureza recalcitrante do biochar, à sua composição variada de nutrientes (Silveira et al., 2020) e à sua distribuição de tamanho de partícula (Tabela 1), que favorece partículas de maior diâmetro (Giannetta et al., 2024). Neste estudo, mais de 90% das partículas de biochar eram maiores que 0,1 mm (Tabela 1), o que limita sua passagem pela peneira de 0,053 mm que separa a MOP da MOAM. A ausência de diferenças significativas entre os tratamentos com biochar (Figura 4A) para esta variável enfatiza ainda mais a influência da distribuição de tamanho de partícula. Em contraste, Giannetta et al. (2023) relataram uma razão MOP-C/MOAM-C de 0,65 no solo controle e 1,90 no solo tratado com biochar. No entanto, seu estudo não especificou a matéria-prima usada para a produção de biochar, um fator típico que influencia as propriedades do biochar. Da mesma forma, Lei et al. (2025) observaram razões MOP-C/MOAM-C de 0,20 para solos controle e 1,18 para solos adubados com biochar de palha de milho.

Outro fator que contribui para o aumento de carbono na fração MOP e o consequente aumento na razão MOP-C/MOAM-C é a maior sensibilidade da MOP. Essa fração responde mais rapidamente não apenas às perdas de carbono da decomposição da matéria orgânica, mas também às adições externas de carbono (Heckman et al., 2022). Por outro lado, as mudanças no teor de carbono na fração MOAM são mais graduais devido à sua maior estabilidade, que é impulsionada por interações organominerais. Como a fração MOAM representa uma proporção menor do reservatório total de carbono, quaisquer mudanças são mais facilmente observadas na MOP.

Como o maior reservatório de carbono, a fração MOAM sofre mudanças mais lentas em resposta a aportes externos. A razão MOP-N/MOAM-N apresentou variação significativa entre os tratamentos, variando de 0,19 a 1,47, seguindo a sequência BB > OB > BCS = Controle. Essa variação está ligada ao aumento substancial de nitrogênio (N) na fração MOP para os tratamentos OB e BB (Figura 2C), o que provavelmente estimula a mineralização e a biomassa microbiana em MOP (Bu et al., 2015). No tratamento BB especificamente, o aumento significativo no nitrogênio total (NT) em MOP, sem mudanças correspondentes em NT em MOAM, levou a uma inversão da razão MOP e MOAM, resultando na maior razão MOP-N/MOAM-N. A razão C/N variou de 6,82 a 67,8 em MOP e de 10,1 a 24,3 em MOAM (Figuras 4C e 4D). Tipicamente, a relação C/N na MOAM é menor do que na MOP, visto que a MOAM possui uma concentração maior de nitrogênio derivado da biomassa microbiana (Cotrufo et al., 2019).

Na fração MOP, a relação C/N foi BCS > OB = controle > BB, enquanto na fração MOAM, a relação seguiu a ordem BCS > OB > controle = BB. A BCS exibiu consistentemente uma alta relação C/N tanto na MOP quanto na MOAM, provavelmente devido à sua composição lignocelulósica, conforme discutido anteriormente neste estudo. Portanto, o biochar de casca de coco seca garante maior estabilidade do carbono, independentemente de sua distribuição entre as frações. Em contraste, o biochar biossólido (BB) reduziu significativamente a relação C/N na MOP, mas não afetou a MOAM. A redução substancial na relação C/N da MOP no tratamento BB levanta preocupações, pois pode estimular a degradação de resíduos orgânicos e levar ao aumento das emissões de CO₂ para a atmosfera.

5.3.4 Influência dos diferentes biochars na distribuição do C e do N nas frações da MOP e da MOAM e variáveis correlatas avaliada através da análise de componentes principais (PCA)

A influência dos tratamentos com biochar nas frações MOP e MOAM, juntamente com as variáveis de solo associadas, foi avaliada por meio de análise de componentes principais (ACP) (Figura 5). Os dois primeiros componentes principais foram responsáveis por 84,7% da variância total, sendo 52,1% atribuídos ao primeiro componente (PC1) e 32,6% ao segundo (PC2).

A ACP distinguiu claramente os tratamentos, evidenciando que os biochars exercem efeitos específicos sobre a dinâmica do C e do N no solo. As variações nos tratamentos OB e BB estiveram associadas principalmente ao PC1, enquanto o PC2 separou nitidamente os tratamentos controle e BCS. As variáveis MOP-N e MOP-N/MOAM-N foram as principais contribuintes para os efeitos observados no tratamento com biochar de biossólido, destacando o papel significativo do nitrogênio na influência desse biochar.

A relação C/N, tanto no solo como nas frações MOP e MOAM, foi a variável de maior influência no comportamento do biochar de coco, sendo responsável por aproximadamente 58% da variação no PC2. Esse resultado sugere que esse material, de maior estabilidade e com relação C/N mais elevada, impacta especialmente a qualidade da matéria orgânica, ajustando o equilíbrio entre a mineralização e a estabilidade do C.

Sendo assim, seu efeito tende a se manifestar mais no longo prazo. Os fatores mais influentes no efeito do biochar de bagaço de laranja foram MOP-C e a relação MOP-C/MOAM-C. A ACP identificou de forma efetiva as variáveis mais responsáveis pelos efeitos observados nos tratamentos com biochar, fornecendo insights sobre as diferenças específicas induzidas por cada material. Ressalta-se que as distintas biomassas utilizadas na produção resultaram em características próprias, que impactaram de maneira diferenciada suas propriedades quando aplicadas ao solo.

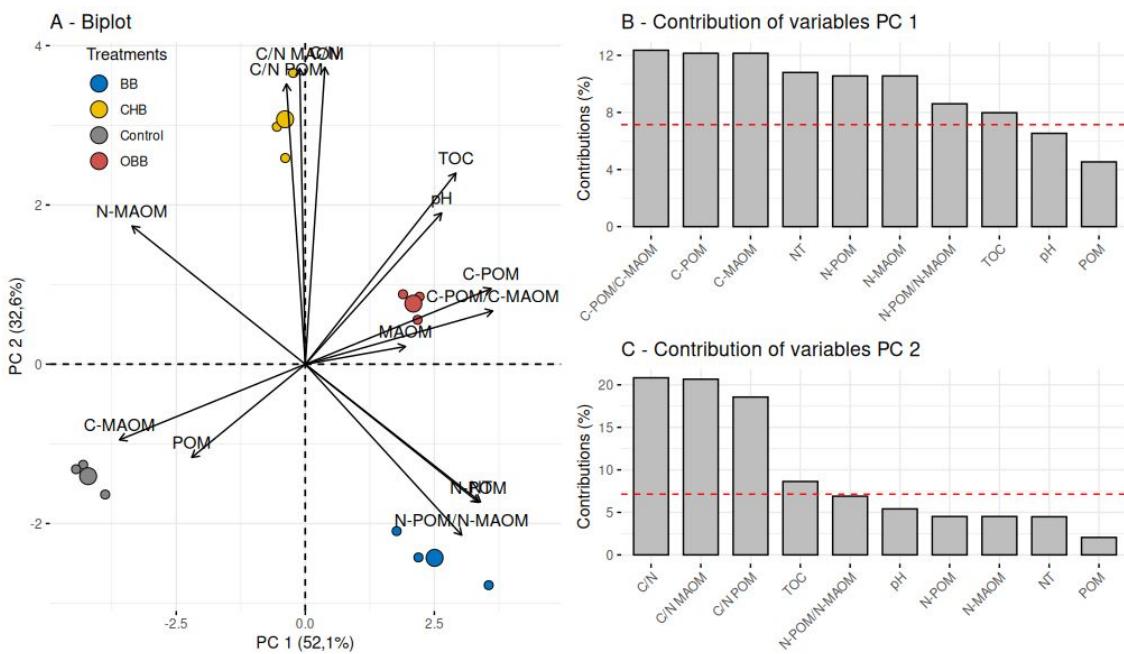


Figura 5. Análise de componentes principais (PCA) entre as frações físicas da matéria orgânica do solo (MOP e MOAM) e variáveis correlatas. Os números entre parênteses representam a variação nos dados explicados pelos dois primeiros componentes principais. BB, BCS e BL (tratamentos com biochar de biofertilizantes, casca de coco seco e bagaço de laranja); COT (carbono orgânico total do solo); NT (nitrogênio total); C-MOP (carbono na fração da matéria orgânica particulada); C-MOAM (carbono na fração da matéria orgânica associada aos minerais); N-MOP (nitrogênio na fração da matéria orgânica particulada); N-MOAM (nitrogênio na fração da matéria orgânica associada aos minerais). São Cristóvão-SE, UFS, 2025.

5.4. Conclusões

A aplicação dos biochars de casca de coco, bagaço de laranja e biofertilizante alterou a distribuição de carbono e nitrogênio nas frações MOP e MOAM, no Argissolo Vermelho-Amarelo, após três anos de incubação. Os biochars de casca de coco seco e bagaço de laranja aumentaram significativamente o carbono tanto na fração MOP quanto na MOAM, já o biochar de biofertilizante elevou principalmente o carbono na fração MOP.

Todos os biochars tiveram aumento proporcional no teor de C na MOP e redução na MOAM. O efeito sobre o nitrogênio foi menos destacado, tendo variações dependentes do tipo de biochar. Sendo assim, esses resultados indicam que a aplicação do biochar, independentemente da matéria-prima, influencia a alocação de C e N nas frações da matéria orgânica do solo em longo prazo.

5.5. Referências Bibliográficas

- Barreto MSC, Schellekens J, Ramlogan M, Rouff AA, Elzinga EJ, Vidal-Torrado P, Reynaldo L (2021) Effects of horticulture on soil organic matter properties in highly weathered tropical soils. *Soil and Tillage Research* 213, 105156–105156. doi:<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105156>.
- Bossio DA, Cook-Patton SC, Ellis PW, Fargione J, Sanderman J, Smith P, Wood S, Zomer RJ, von Unger M, Emmer IM, Griscom BW (2020) The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability*, 3, 391-398. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>.
- Bremner JM (1996) Nitrogen-total. Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods, 5, 1085-1121. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37>.
- Bu R, Lu J, Ren T, Liu B, Li X & Cong R (2015) Particulate organic matter affects soil nitrogen mineralization under two crop rotation systems. *PLOS ONE*, 10, e0143835. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143835>.
- Cambardella CA, Elliott ET (1992) Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 777-783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>.
- Chagas JKM, Figueiredo CC, Ramos MLG (2022) Biochar increases soil carbon pools: Evidence from a global meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 305, 114403. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114403>.
- Chen M, Liu D, Shao X, Li S, Jin X, Qi J, Liu H, Li C, Li C, Li C (2024) Effect of Biochar Types and Rates on SOC and Its Active Fractions in Tropical Farmlands of China. *Agronomy* 14, 676–676. doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy14040676>.
- Cooper J, Greenberg I, Ludwig B, Hippich L, Fischer D, Glaser B, Kaiser M (2020) Effect of biochar and compost on soil properties and organic matter in aggregate size fractions under field conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295, 106882. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106882>.
- Cotrufo MF, Haddix ML, Kroeger ME, Stewart CE (2022) The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 168, 108648. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108648>.
- Cotrufo MF, Lavallee JM (2022) Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. *Advances in Agronomy*, 172, 1-66. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002>.
- Cotrufo MF, Ranalli MG, Haddix ML, Six J, Lugato E (2019) Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, 12, 989-994. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>.
- Day PR (1965) Particle fractionation and particle-size analysis. Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling, 9, 545-567. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c43>.
- Dayoub EB, Tóth Z, Anda A (2023) Biochar and its effects on soil properties and evapotranspiration: A sustainable solution for plant growth. *Cogent Food & Agriculture*, 9, 2256136. <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2256136>.
- Ding X, Li G, Zhao X, Lin Q, Wang X (2023) Biochar application significantly increases soil organic carbon under conservation tillage: an 11-year field experiment. *Biochar*, 5, 28. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00226-w>.
- Du Y, Feng Y, Xiao Y (2023) Interaction between biochar of different particle sizes and clay minerals in changing biochar physicochemical properties and cadmium sorption

- capacity. *Journal of Cleaner Production*, 428, 139348. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139348>.
- Elkhelifi Z, Iftikhar J, Sarraf M, Ali B, Saleem MH, Ibranshahib I, Chen Z (2023) Potential role of biochar on capturing soil nutrients, carbon sequestration and managing environmental challenges: a review. *Sustainability*, 15, 2527. <https://doi.org/10.3390/su15032527>.
- Ferreira DF (2019) SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Brazilian Journal of Biometrics*, 37, 529–535. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.
- Figueiredo CCD, Wickert ÉG, Vieira Neves HC, Coser TR & Paz-Ferreiro J. (2021) Sewage sludge biochar increases nitrogen fertilizer recovery: Evidence from a ¹⁵N tracer field study. *Soil Use and Management*, 37, 689-697.
- Gaskin JW, Steiner C, Harris K, Das KC, Bibens B (2008) Effect of Low-Temperature Pyrolysis Conditions on Biochar for Agricultural Use. *Transactions of the ASABE* 51, 2061–2069. <https://doi.org/10.13031/2013.25409>.
- Georgiou K, Jackson RB, Vindušková O, Abramoff RZ, Ahlström A, Feng W, Harden JW, Adam Wayne PH, Soong JL, Riley WJ, Torn MS (2022) Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. *Nature Communications*, 13, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31540-9>.
- Ghosh D, Maiti SK (2023) Invasive weed-based biochar facilitated the restoration of coal mine degraded land by modulating the enzyme activity and carbon sequestration. *Restoration Ecology*, 31, e13744. <https://doi.org/10.1111/rec.13744>.
- Giannetta B, Plaza C, Cassetta M, Mariotto G, Benavente-Ferraces I, García-Gil JC, Zaccone C (2023) The effects of biochar on soil organic matter pools are not influenced by climate change. *Journal of Environmental Management*, 341, 118092. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118092>.
- Giannetta B, Plaza C, Galluzzi G, Benavente-Ferraces I, García-Gil JC, Panettieri M, Gascó G, Zaccone C (2024) Distribution of soil organic carbon between particulate and mineral-associated fractions as affected by biochar and its co-application with other amendments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 360, 108777. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108777>.
- Gross A, Bromm T, Glaser B (2021) Soil Organic Carbon Sequestration after Biochar Application: A Global Meta-Analysis. *Agronomy*, 11, 2474. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122474>.
- Guarnieri SF, Nascimento EC, Costa Junior RF, Faria JLB, Lobo F (2021) Coconut fiber biochar alters physical and chemical properties in sandy soils. *Acta Scientiarum. Agronomy* 43, e51801. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v43i1.51801>.
- He L, Shan J, Zhao, X, Wang S, Yan X (2019) Variable responses of nitrification and denitrification in a paddy soil to long-term biochar amendment and short-term biochar addition. *Chemosphere*, 234, 558-567. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.038>.
- Heckman K, Hicks CE, Lawrence CR, Rasmussen C, Crow SE, Hoyt AM, Sophie Shi Z, Stoner S, McGrath C (2022) Beyond bulk: Density fractions explain heterogeneity in global soil carbon abundance and persistence. *Global Change Biology*, 28, 1178–1196.
- Iwuozor KO, Emenike EC, Bakare BF, Eleregbé FO, Aransiola FT, Omonayin E, Adeniyi AG (2024) A review on the conversion of plant husk-based biomass into biochar. *Biofuels*, 15, 1331–1345. <https://doi.org/10.1080/17597269.2024.2376367>.
- Jiang RW, Galo M, Oelbermann M (2021) Soybean and soil responses to biochar amendment in controlled environments with elevated temperature and carbon dioxide. *Canadian Journal of Soil Science*, 102, 65-76. <https://doi.org/10.1139/cjss-2020-0133>.
- Just C, Armbruster M, Barkusky D, Baumecker M, Diepolder M, Döring TF, Wiesmeier M (2023) Soil organic carbon sequestration in agricultural long-term field experiments as

- derived from particulate and mineral-associated organic matter. *Geoderma*, 434, 116472. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116472>.
- Kauer, K, Pärnpuu S, Talgre L, Eremeev V, Luik A (2021) Soil Particulate and Mineral-Associated Organic Matter Increases in Organic Farming under Cover Cropping and Manure Addition. *Agriculture*, 11, 903. <https://doi.org/10.3390/agriculture11090903>.
- Khan Z, Zhang K, Khan MN, Bi J, Zhu K, Luo L, Hu L (2022) How Biochar Affects Nitrogen Assimilation and Dynamics by Interacting Soil and Plant Enzymatic Activities: Quantitative Assessment of 2 Years Potted Study in a Rapeseed-Soil System. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.853449>.
- Kiehl E (2004) Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto., forth ed. Piracicaba.
- Lavallee JM, Soong JL, Cotrufo F (2020) Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, 26, 261–273.
- Lehmann J, Joseph S (2015) Biochar for environmental management: an introduction. *Taylor & Francis* 1–13. doi:<https://doi.org/10.4324/9780203762264-1>.
- Lei K, Dai W, Wang J, Li Z, Cheng Y, Jiang Y, Yin W, Wang X, Song X, Tang Q (2024) Biochar and straw amendments over a decade divergently alter soil organic carbon accumulation pathways. *Agronomy*, 14, 2176. <https://doi.org/10.3390/agronomy14092176>.
- Matus FJ (2021) Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulations in soils: a meta-analysis. *Scientific Reports*, 11, 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84821-6>.
- Mukherjee A, Zimmerman AR, Hamdan R, Cooper WT (2014) Physicochemical changes in pyrogenic organic matter (biochar) after 15 months of field aging. *Solid Earth* 5, 693–704. doi:<https://doi.org/10.5194/se-5-693-2014>.
- Nelson DW, Sommers LE (1996) Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. *Soil Science Society of America Book Series* 961–1010. doi:<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>.
- Nsamba H, Hale S, Cornelissen G, Bachmann RT (2015) Designing and Performance Evaluation of Biochar Production in a Top-Lit Updraft Upscaled Gasifier. Unit.no. <https://doi.org/2165-400X>.
- Patel S, Kundu S, Halder P, Ratnayake N, Hedayati MM, Aktar S, Selezneva E, Paz-Ferreiro J (2020) A critical literature review on biosolids to biochar: an alternative biosolids management option. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19, 807–841. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09553-x>.
- Phillips CL, Meyer KM, Garcia-Jaramillo M, Weidman CS, Stewart CE, Wanzek T, Grusak MA, Watts DW, Novak J, Trippe KM (2022) Towards predicting biochar impacts on plant-available soil nitrogen content. *Biochar* 4,. doi:<https://doi.org/10.1007/s42773-022-00137-2>.
- Plaza C, Giannetta B, Fernández JM, López-de-Sá EG, Polo A, Gascó G, Méndez A, Zaccione C (2016) Response of different soil organic matter pools to biochar and organic fertilizers. *Agriculture Ecosystems & Environment* 225, 150–159. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.04.014>.
- Saffari N, Hajabbasi MA, Shirani H, Mosaddeghi MR, Mamedov AI (2020) Biochar type and pyrolysis temperature effects on soil quality indicators and structural stability. *Journal of Environmental Management*, 261, 110190. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110190>.

- Sandhu SS, Ussiri DAN, Kumar S, Chintala R, Papiernik SK, Malo DD, Schumacer, TE (2017) Analyzing the impacts of three types of biochar on soil carbon fractions and physiochemical properties in a corn-soybean rotation. *Chemosphere*, 184, 473–481. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.165>.
- Sarfaraz Q, Silva LSD, Drescher GL, Zafar M, Severo FF, Kokkonen A, Solaiman ZM (2020) Characterization and carbon mineralization of biochars produced from different animal manures and plant residues. *Scientific Reports*, 10, 955. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57987-8>.
- Schmidt H, Kammann C, Hagemann N, Leifeld J, Bucheli TD, Angel M, Cayuela ML (2021) Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy* 13, 1708–1730. doi:<https://doi.org/10.1111/gcbb.12889>.
- Silveira ML, Brandani CB, Kohmann MM, Erickson JE, Mello S (2020) Short-term effects of bioenergy cropping on soil carbon and nitrogen dynamics in a Florida Ultisol. *Soil Science Society of America Journal*, 84, 1233–1246. <https://doi.org/10.1002/saj2.20081>.
- Six J, Conant RT, Paul EA, Paustian K (2002) Plant and Soil, 241, 155–176. <https://doi.org/10.1023/a:1016125726789>.
- Soil Survey Staff (2014) Keys to soil taxonomy (12th ed.). USDA Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 360.
- Sokol NW, Whalen ED, Jilling A, Kallenbach C, Pett-Ridge J, Georgiou K (2022) Global distribution, formation and fate of mineral-associated soil organic matter under a changing climate: A trait-based perspective. *Functional Ecology*, 36, 1411–1429. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14040>.
- Sonsri K, Naruse H, Watanabe A (2022) Mechanisms controlling the stabilization of soil organic matter in agricultural soils as amended with contrasting organic amendments: Insights based on physical fractionation coupled with ¹³C NMR spectroscopy. *Science of The Total Environment*, 825, 153853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153853>.
- Von Haden AC, Kucharik CJ, Jackson RD, Marín-Spiotta E (2019) Litter quantity, litter chemistry, and soil texture control changes in soil organic carbon fractions under bioenergy cropping systems of the North Central US. *Biogeochemistry*, 143, 313–326. <https://doi.org/10.1007/s10533-019-00564-7>

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A incorporação de variados tipos de biochar em solos tropicais altamente intemperizados resultou em melhorias nos atributos químicos e biológicos do solo, favoreceu a atividade microbiana, contribuiu para a dinâmica do carbono e provocou o desenvolvimento da mostarda crespa (*Brassica juncea* L.), ainda que os impactos observados dependam da origem da matéria-prima utilizada.

Além disso, o biochar interferiu nos processos de estabilização do carbono no solo, comprovado pela alteração na distribuição do carbono entre as frações matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica associada aos minerais (MOAM).

Assim, o biochar incide numa estratégia promissora para o manejo sustentável do solo, sendo eficaz avaliar sua composição, a dosagem incorporada e as condições ambientais locais para garantir sua efetividade.